

JOSÉ AUGUSTO GONÇALVES CHOUSAL

PROCESSAMENTO DE IMAGEM NA INTERPRETAÇÃO DE FRANJAS INTERFEROMÉTRICAS EM ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES



Faculdade de Engenharia

PORTO - 1991

JOSÉ AUGUSTO GONÇALVES CHOUSAL

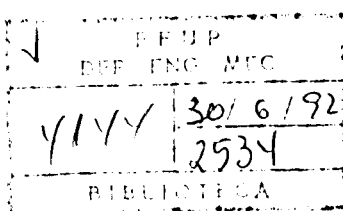
PROCESSAMENTO DE IMAGEM NA INTERPRETAÇÃO DE FRANJAS INTERFEROMÉTRICAS EM ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES



621(043) (CHO) 1220

UNIVERSIDADE DO PORTO	
Faculdade de Engenharia	
BIBLIOTECA	
N.º	31844
CDU	621(043)
Data	22/01/1999

Dissertação apresentada para obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia Estrutural pela Faculdade de Engenharia da
Universidade do Porto



OUTUBRO 1991

AGRADECIMENTOS



Para que ninguém fique
aqueles que contribuíram para

Um agradecimento muito especial ao meu orientador, Prof. Joaquim Silva Gomes, pelas condições criadas, que proporcionaram a realização deste trabalho, bem como pelo apoio e orientação prestados.

Quero agradecer também a camaradagem e incentivo de todos os à Ana ntos do grupo de Análise Experimental de Tensões (F.E.U.P.), que muito importante se aos meus Pais iver o barco a bom porto". Um agradecimento especial ao Mário, que se mostrou sempre disponível a ajudar naquelas pequenas coisas, que tanta importância têm.

Agradeço aos companheiros dos "intervalos" pelos momentos de boa disposição, indispensáveis quando é necessário desanuviar um pouco.

Finalmente um agradecimento muito particular à Ana, pela compreensão e "carinho" demonstrados quando as coisas não corriam da melhor forma.

A todos
OBRIGADO

AGRADECIMENTOS

Para que ninguém fique esquecido, quero deixar aqui o meu profundo agradecimento a todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho.

Um agradecimento muito especial ao meu orientador, Prof. Joaquim Silva Gomes, pelas condições criadas, que proporcionaram a realização deste trabalho, bem como pelo apoio e orientação prestados.

Quero agradecer também a camaradagem e incentivo de todos os elementos do grupo de Análise Experimental de Tensões (F.E.U.P.), que muito importante se revelou para "levar o barco a bom porto". Um agradecimento especial ao Mário, que se mostrou sempre disponível a ajudar naquelas pequenas coisas, que tanta importância têm.

Agradeço aos companheiros dos "intervalos" pelos momentos de boa disposição, indispensáveis quando é necessário desanuviar um pouco.

Finalmente um agradecimento muito particular à Ana, pela compreensão e carinho demonstrados quando as coisas não corriam da melhor forma.

A todos
OBRIGADO

RESUMO

Autor: José Augusto Gonçalves Chousal
Título: ***Processamento de Imagem na Interpretação de Franjas Interferométricas em Análise Experimental de Tensões***
Orientador: Prof. Joaquim Francisco da Silva Gomes
Instituição: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Grau: Mestre em Engenharia Estrutural

Neste trabalho procurou-se desenvolver métodos que permitissem melhorar o desempenho de um instrumento utilizado em análise experimental de tensões por fotoelasticidade: o polariscópio de transmissão. Além do melhoramento, a rapidez de obtenção dos resultados experimentais foi também uma das preocupações presentes.

Numa primeira abordagem ao problema, foram implementados métodos de detecção de franjas em imagens resultantes de processos de interferometria. Devido à objectividade destes métodos, é possível a sua utilização noutros campos da metrologia experimental, para além da fotoelasticidade. Este é o motivo pelo qual o título deste trabalho não especifica a fotoelasticidade como área exclusiva de trabalho, apesar de ser dedicada a esta maior atenção.

Numa segunda fase, procurou-se explorar as particularidades da fotoelasticidade, de modo a desenvolver métodos mais poderosos e eficientes. A utilização destes métodos permite usar toda a informação contida numa imagem, conseguindo-se assim a optimização na utilização da informação disponível, com a consequente melhoria do desempenho, em tempo, dos algoritmos utilizados. Os métodos implementados permitem determinar rapidamente, para qualquer ponto de um modelo representativo de uma peça mecânica, toda a informação disponível no polariscópio. Referimo-nos às direcções principais de tensão, através das franjas isoclínicas, e à diferença das duas tensões principais (estado plano de tensão), através das franjas isocromáticas.

ABSTRACT

Author: José Augusto Gonçalves Chousal
Title: *Image Processing for Interferometric Fringes Interpretation in Experimental Stress Analysis*
Supervisor: Prof. Joaquim Francisco da Silva Gomes
Institution: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Degree: Master of Science in Structural Engineering

The work presented in this thesis aims the development of methods and techniques for improving the performances of an instrument used in experimental stress analysis by photoelasticity - the transmission polariscope - both in terms of quality and speed in obtaining the experimental results.

In first place, methods for detecting interferometric fringes were implemented, which can be applied to other fields of experimental metrology, beyond photoelasticity. This is the reason because the title of the thesis does not specify photoelasticity as the exclusive area of the work.

In second place, the particularities of photoelasticity were explored, in order to develop more powerfull and efficient methods of analysis. The utilization of such methods uses all the information contained in a given image, and gives a considerable improvement in terms of time consuming of the computer algorithms with the methods here implemented. It is possible to determine, very quickly, all the information available in the polariscope, at any position in the photoelastic model, either in terms of principal directions (isoclinic fringes) or in terms of principal stresses difference (isochromatic fringes).

ÍNDICE

SIMBOLOGIA	ix
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Objectivos	2
1.3 Estrutura da Tese	3
CAPÍTULO 2 TEORIA DA FOTOELASTICIDADE	5
2.1 Introdução	5
2.2 A Equação de Onda	6
2.3 Sobreposição de Ondas	8
2.4 Elementos Ópticos	11
2.4.1 Polarizador Plano	11
2.4.2 Placa Birrefringente	12
2.4.3 Arranjo dos Elementos Ópticos	14
2.5 Efeito Fotoelástico - Lei de Maxwell	15
2.6 O Polariscópio	17
2.6.1 Polariscópio Plano	18
2.6.2 Generalização do Polariscópio Plano	21
2.6.3 Polariscópio Circular	22
2.6.4 Generalização do Polariscópio Circular	28

CAPÍTULO 3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
3.1	Introdução	29
3.2	Processamento de Imagem em Fotoelasticidade	30
CAPÍTULO 4	EQUIPAMENTO E "SOFTWARE"	35
4.1	Equipamento	35
4.2	"Software"	37
CAPÍTULO 5	MÉTODOS DISCRETOS DE ANÁLISE DE FRANJAS	46
5.1	Introdução	46
5.2	Métodos de Erosão por Análise de Condições Padrão	46
5.2.1	Versão 1	47
5.2.2	Versão 2	48
5.2.3	Versão 3	48
5.3	Métodos de Erosão por Condições de Ligação (Versão 4)	49
5.4	Métodos de Detecção de Mínimos Locais	52
5.4.1	Detecção de Mínimos com Orientação Preferencial	52
5.4.2	Detecção de Mínimos Testando 8 Direcções	53
CAPÍTULO 6	MÉTODOS CONTÍNUOS DE ANÁLISE DE FRANJAS	57
6.1	Introdução	57
6.2	Separação das Isoclínicas	57
6.2.1	Modelação das Imagens do Polariscópio Plano	59
6.2.2	Técnicas de 3 Imagens	61
6.2.2.1	Fase Inicial $4\gamma=0^\circ$, Incremento $\Delta 4\gamma=90^\circ$	61
6.2.2.2	Fase Inicial $4\gamma=45^\circ$, Incremento $\Delta 4\gamma=90^\circ$	67
6.2.2.3	Fase Inicial $4\gamma=-120^\circ$, Incremento $\Delta 4\gamma=120^\circ$	68
6.2.3	Técnicas de 4 Imagens	70
6.2.3.1	Fase Inicial $4\gamma=0^\circ$, Incremento $\Delta 4\gamma=90^\circ$	70
6.2.3.2	Fase Inicial $4\gamma=0^\circ$, Incremento $\Delta 4\gamma=60^\circ$	71
6.2.3.3	Fase Inicial $4\gamma=0^\circ$, Incremento $\Delta 4\gamma=90^\circ$ (Média de 3 a 3 Imagens)	72
6.3	Obtenção do Desfasamento Angular (Isocromáticas)	74
6.3.1	Modelação das Imagens do Polariscópio Circular	75
6.3.2	Técnicas de 3 Imagens	76
6.3.2.1	Fase Inicial $2\gamma=0^\circ$, Incremento $\Delta 2\gamma=90^\circ$	76
6.3.2.2	Fase Inicial $2\gamma=0^\circ$, Incremento $\Delta 2\gamma=90^\circ$ (Com Eliminação de $\alpha(x,y)$)	82
6.3.3	Técnicas de 4 Imagens	85
6.3.3.1	Fase Inicial $2\gamma=0^\circ$, Incremento $\Delta 2\gamma=90^\circ$ (Com Eliminação de $\alpha(x,y)$)	85
6.3.3.2	Fase Inicial $2\gamma=0^\circ$, Incremento $\Delta 2\gamma=60^\circ$ (Com Eliminação de $\alpha(x,y)$)	86

6.3.4	Multiplicação de Franjas	90
CAPÍTULO 7	EXEMPLOS E RESULTADOS	94
7.1	Introdução	94
7.2	Disco em Compressão Diametral	95
7.2.1	Solução Teórica	95
7.2.2	Análise dos Resultados	97
7.3	Anel em Compressão Diametral	103
7.4	Ensaio numa Lâmina de Guilhotina	106
CAPÍTULO 8	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	110
8.1	Conclusões	110
8.2	Sugestões de Trabalho Futuro	111
BIBLIOGRAFIA		114

SIMBOLOGIA

PRINCIPAIS SÍMBOLOS:

a	amplitude duma onda luminosa
c	velocidade de propagação no vazio; constante fotoelástica
D	diâmetro
E	magnitude do vector eléctrico
f	frequência duma radiação; função de propagação no sentido positivo do eixo z
f_σ	constante de franja dum material fotoelástico
g	função de propagação no sentido negativo do eixo z
h	espessura
I	intensidade luminosa
I₀	intensidade luminosa de fundo
k	constante positiva
K	constante positiva; função positiva (iluminação de fundo com modulação das franjas)

M	função positiva (termo médio)
n	constante inteira positiva; índice de refração
N	desfasamento em termos de ciclo completo
N_i	número de ligações
p_i	ponto de uma imagem
$\bar{p}_i$	negação lógica da intensidade de p_i
P	carga pontual
R	raio
t	variável tempo
v	velocidade de propagação duma onda luminosa
x	coordenada espacial
y	coordenada espacial
z	coordenada espacial associada ao eixo de propagação
α	ângulo entre o eixo do polarizador e o vector luminoso à entrada do polarizador; ângulo entre a vertical e a direcção principal de tensão 1; função que representa, em cada ponto, o ângulo entre a vertical e uma das direcções principais de tensão
β	ângulo entre o plano de vibração da luz polarizada plana incidente e o eixo rápido de uma placa birrefringente
δ	desfasamento linear; fase inicial duma onda luminosa
Δ	desfasamento angular; desfasamento angular relativo; função que representa, em cada ponto, o desfasamento angular
ϕ	desfasamento angular numa dada posição z
ϕ_0	modulação das franjas de interferência
γ	ângulo entre o vector emergente de uma placa birrefringente e o seu eixo rápido; ângulo rodado pelo conjunto dos elementos do polariscópio plano; ângulo do analisador em relação à horizontal, no polariscópio circular
λ	comprimento de onda
σ	tensão
ω	frequência angular
ζ	número de onda

PRINCIPAIS ÍNDICES:

(nota: S representa um símbolo qualquer)

S_0	designador de referência
S_1	designador para distinção entre entidades do mesmo tipo; relativo à direcção principal 1; relativo ao eixo rápido de uma placa birrefringente
S_2	designador para distinção entre entidades do mesmo tipo; relativo à direcção principal 2; relativo ao eixo lento de uma placa birrefringente
S_x	com a direcção do eixo x; plano de vibração paralelo ao eixo x
S_y	com a direcção do eixo y; plano de vibração paralelo ao eixo y
S_t	transmitida
S_a	absorvida
S_r	relativo ao eixo rápido de uma placa birrefringente
S_l	relativo ao eixo lento de uma placa birrefringente
S_{py}	proveniente do polarizador com plano de vibração paralelo ao eixo y
S_{ax}	emergente do analisador com plano de vibração paralelo ao eixo x
S_{ay}	emergente do analisador com plano de vibração paralelo ao eixo y
$S_{a\gamma}$	emergente do analisador com plano de vibração paralelo à direcção γ
S_γ	relativo à orientação γ
S_e	exterior
S_i	interior
S'	após atravessar o elemento óptico; designador para distinção entre entidades do mesmo tipo
S''	componentes à saída do analisador

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 GENERALIDADES

A fotoelasticidade tornou-se, na altura do seu aparecimento, numa área de investigação de grande importância. A facilidade com que se podem analisar as condições de funcionamento de um determinado componente mecânico em muito contribuiu para isso. O desenvolvimento dos materiais utilizados nos componentes ópticos permitiu a análise de áreas relativamente extensas de uma só vez. Contudo, a resolução nem sempre foi a desejável pois as franjas resultantes além de espessas eram bastante espaçadas, havendo portanto que usar algum método para obter a informação não directamente acessível. Várias foram as técnicas utilizadas para tentar resolver este problema. O uso de materiais bastante sensíveis e a multiplicação das franjas por processos ópticos foram alguns dos meios utilizados.

O surgimento de novos métodos de interferometria relegou, durante algum tempo, a fotoelasticidade um pouco para segundo plano. Dentre aqueles podem-se referir o método "moiré" e a interferometria holográfica. Estes métodos permitiam boas resoluções, especialmente a interferometria holográfica que permite medir deslocamentos da ordem de metade do comprimento de onda da luz utilizada. Assim a fotoelasticidade perdeu parte da popularidade que antes detinha.

Com o aparecimento do processamento de imagem, a evolução dos acontecimentos alterou-se de modo significativo. A aplicação de técnicas de processamento de imagem deu novo folgo à fotoelasticidade. É evidente que não foi só esta a beneficiar com o aparecimento do processamento de imagem; as outras técnicas de análise interferométrica também tiraram partido das vantagens

então postas à disposição. No entanto, a fotoelasticidade permite a aquisição de imagens de muito boa qualidade, ponto em que detem vantagem sobre os outros métodos referidos.

Inicialmente o processamento de imagem foi utilizado para extrair com maior precisão os centros das franjas, contudo o problema da escassez de informação mantinha-se. Digamos que estes foram os primeiros passos desta recente ligação. Devido à boa qualidade das imagens obtidas, houve quem se lembrasse de aplicar o processamento de imagem a toda a área de observação. É esta a tendência actual da investigação em fotoelasticidade.

Dentre o equipamento normalmente utilizado incluem-se fontes de iluminação laser e, por vezes, dispositivos posicionadores. Por vezes a configuração do polariscópio utilizado não é a mais usual, e por isso difícil de obter no mercado. O trabalho aqui descrito pretende tirar partido de um polariscópio e de uma placa de processamento de imagem (tipo PC compatível) correntemente existentes no mercado. Trata-se assim de um sistema acessível à maioria dos centros de investigação.

1.2 OBJECTIVOS

Em linhas gerais, pretende-se com o presente trabalho criar uma ferramenta que permita uma utilização mais eficaz dum sistema fotoelástico (polariscópio). Neste contexto são apresentados métodos que permitem obter mais informação do polariscópio tanto na configuração de polariscópio plano como de polariscópio circular.

Implementaram-se métodos de análise de franjas de interferência que encontram aplicação tanto em fotoelasticidade como noutros métodos ópticos, desde que lidem com franjas. Aqueles métodos consistem basicamente em algoritmos que permitem efectuar a erosão das franjas existentes numa imagem binária (dois níveis de intensidade) permitindo assim encontrar o centro daquelas, ou então detectar os pontos que correspondem a mínimos locais (franjas), assinalando-os para posteriormente se utilizarem na obtenção dos centros, após um processo de limpeza.

Implementaram-se também métodos mais específicos, aplicáveis só em fotoelasticidade, que permitem usar melhor a informação contida nas imagens adquiridas. No caso do polariscópio plano, o objectivo fundamental é obter as direcções principais de tensão, para tal desenvolveram-se vários métodos que permitem criar um "mapa" daquelas direcções na totalidade da superfície do modelo fotoelástico. O polariscópio circular permite obter o desfaseamento angular entre duas ondas luminosas que oscilam em planos perpendiculares entre si, paralelos às direcções principais. Este desfaseamento é relacionável com a diferença entre as duas tensões principais paralelas ao plano do modelo fotoelástico (caso bidimensional) através da lei fundamental da fotoelasticidade. Para isso desenvolveram-se métodos que permitem a partir de imagens de polariscópio circular, e com o auxílio das direcções principais, determinar esse desfaseamento angular.

Ficam assim cobertas as técnicas experimentais que permitem depois, utilizando um método numérico, efectuar a separação das tensões. A conjugação de métodos experimentais com métodos numéricos é usualmente designada de métodos híbridos, que é a continuação natural ao trabalho

aqui apresentado. Este trabalho abrange sómente o desenvolvimento de métodos experimentais utilizando o processamento de imagem como ferramenta adicional.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

A apresentação do trabalho foi feita de modo a dar ao leitor uma certa continuidade dos assuntos, permitindo assim integrá-lo melhor no assunto tratado.

No **capítulo dois** são apresentadas as equações fundamentais para uma abordagem adequada à teoria da fotoelasticidade. Após uma breve introdução à teoria da propagação da luz, é feita a descrição dos elementos que constituem um polariscópio e a forma como estes interferem com o vector luminoso. Finalmente são descritas as configurações mais usuais do polariscópio e apresentadas as equações que definem a intensidade luminosa à saída tal como é interpretada pelo utilizador.

O **capítulo três** serve sobretudo para resumir o trabalho desenvolvido até à data por diversos investigadores ligados à area abrangida por esta dissertação. Não se pretende com este capítulo descrever detalhadamente o que cada um fez mas sim dar uma ideia das soluções adoptadas na utilização do processamento de imagem aplicado à fotoelasticidade.

No **capítulo quatro** é apresentado o equipamento utilizado com algumas considerações básicas acerca do seu funcionamento. É também incluída uma descrição do "software" auxiliar que é essencial à aplicação do processamento de imagem, mas que não é parte integrante dos métodos desenvolvidos nos capítulos seguintes. A sua apresentação torna-se necessária para uma melhor compreensão de certas operações realizadas naqueles capítulos.

O **capítulo cinco** é constituído pelo trabalho desenvolvido numa primeira fase. Com base em trabalhos anteriormente desenvolvidos são apresentados algoritmos que permitem obter as linhas centrais das franjas, que ao observador aparecem como bandas escuras nas quais é difícil indicar o seu centro. As técnicas apresentadas são de dois tipos básicos: a erosão das franjas após a transformação da imagem em dois níveis de intensidade, e a detecção de mínimos locais por análise de todos os pontos da imagem. Os métodos apresentados neste capítulo são de certo modo gerais, pois permitem o processamento de qualquer tipo de imagens de interferometria.

O **capítulo seis** apresenta métodos mais específicos, aplicáveis à análise fotoelástica, que tiram partido da boa qualidade das imagens obtidas em fotoelasticidade. Por esse motivo o aproveitamento de toda a informação contida na imagem é possível e desejável. O capítulo é teoricamente dividido em duas partes. A primeira é dedicada à obtenção das direcções principais de tensão usando-se para isso a configuração de polariscópio plano. São apresentados métodos com a utilização de diferentes imagens, usando técnicas de três ou quatro imagens. A segunda é orientada para a determinação do desfasamento angular que é proporcional à diferença entre as tensões principais. Apresentam-se métodos utilizando três e quatro imagens obtidas em polariscópio circular, sendo contudo necessária a utilização de informação adicional recolhida a quando da determinação das direcções principais. Devido à maior complexidade da expressão da intensidade no caso do polariscópio circular, o

tratamento destas imagens é mais complexo. Finalmente com base nos métodos implementados é sugerida uma forma alternativa de efectuar a multiplicação de franjas em fotoelasticidade.

Os capítulos cinco e seis contêm já alguns dos resultados obtidos com os métodos neles apresentados. Contudo a análise mais detalhada desses resultados impõe-se, sendo este o assunto tratado no *capítulo sete*. São também incluídas algumas aplicações mais particulares para ilustrar os referidos métodos.

Finalmente no *capítulo oito* apresentam-se as conclusões que é possível obter de todo o trabalho desenvolvido ao longo dos capítulos precedentes e indicações quanto a possíveis caminhos para a continuação do trabalho desenvolvido.

CAPÍTULO 2

TEORIA DA FOTOELASTICIDADE

2.1 INTRODUÇÃO

A fotoelasticidade é um método óptico de análise experimental de tensões que encontra larga aplicação no estudo de peças e estruturas de geometrias difíceis ou sujeitas a solicitações de alguma forma complexas. As peças a estudar poderão ser representadas por modelos fotoelásticos ou revestidas com películas de material fotoelástico de modo a proporcionar o estudo do campo de tensões nelas instaladas. As regiões a inspeccionar podem ser de dimensão apreciável, de tal modo que é possível a avaliação rápida da qualidade do dimensionamento da peça, pondo em evidência zonas de elevadas tensões que poderão ser modificadas de modo a otimizar o desenho final.

A fotoelasticidade baseia-se na propriedade que determinados materiais plásticos têm de alterar o seu comportamento óptico conforme o estado de tensão a que estão sujeitos. Como método óptico que é, a fotoelasticidade encontra o seu fundamento físico na teoria da propagação da luz. Por isso convém referir as teorias mais recentes da propagação da luz.

Uma das teorias é devida a Maxwell (1831-1879) segundo a qual a luz é de natureza electromagnética, ou seja, consiste na coexistência de dois campos de vectores nas ondas luminosas, um campo eléctrico e um campo magnético, fig. 2.1.

Outra das teorias surgiu devido à observação do efeito fotoeléctrico efectuada por Hertz (1887). Este concluiu que a propagação da luz não podia ser explicada pela teoria das ondas electromagnéticas, mas sim por movimento de partículas, o que conduziu posteriormente Einstein à teoria do fóton (1907).

A teoria moderna da propagação da luz concilia estas duas teorias. Assim a energia pode manifestar-se quer na forma de partículas quer na forma de ondas. No desenvolvimento que se segue as características individuais dos fótons não condicionam as equações utilizadas, por esse motivo será usada a teoria da propagação das ondas electromagnéticas sem qualquer perda de generalidade daquelas equações.

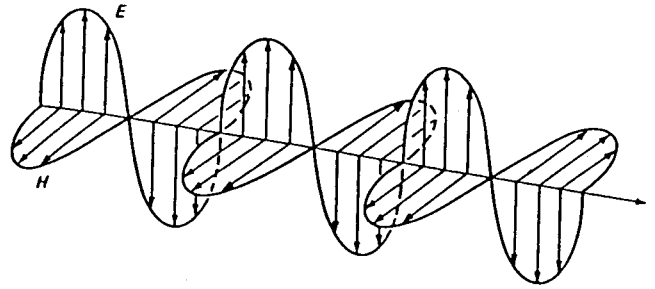


fig. 2.1 - Vectores eléctrico e magnético numa onda electromagnética.

2.2 A EQUAÇÃO DE ONDA

Utilizando a teoria da propagação electromagnética, podemos afirmar que uma onda luminosa é uma radiação que se propaga associada a um campo eléctrico e um magnético, os quais se encontram em fase mas são mutuamente perpendiculares, sendo eles próprios perpendiculares à direcção de propagação, fig. 2.1. Todos os tipos de radiação electromagnética se propagam com a mesma velocidade no vazio, 3×10^8 m/s. A distinção faz-se através de características como o comprimento de onda e a frequência, que estão relacionadas do seguinte modo:

$$\lambda f = c \quad (2.1)$$

onde λ - comprimento de onda
 f - frequência
 c - velocidade de propagação

Devido à natureza electromagnética, ambos os vectores (eléctrico e magnético) podem ser utilizados para descrever o fenómeno luminoso, contudo Wiener (1890) mostrou que é o vector eléctrico o responsável activo pela interacção entre a luz e as placas fotográficas. É por isso normal utilizar o vector eléctrico como base de todas as formulações que envolvam fenómenos ópticos.

A magnitude da componente eléctrica do vector luminoso pode ser representada pela solução da equação de onda a uma dimensão:

$$E = f(z - ct) + g(z + ct) \quad (2.2)$$

onde E - magnitude do vector luminoso

- z - posição no eixo de propagação
 t - tempo
 $f()$ - propagação da onda na direcção positiva
 $g()$ - propagação da onda na direcção negativa

A maioria dos fenómenos ópticos de interesse na análise experimental de tensões podem ser descritos através duma simples onda sinusoidal, assim uma onda desse tipo propagando-se na direcção positiva é representada pela equação:

$$E = f(z - ct) = a \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} (z - ct) \right) \quad (2.3)$$

onde a - amplitude da onda luminosa,

isto para o caso de ondas planas, para as quais não ocorre atenuação.

É frequente usar a frequência angular ω e o número de onda ζ para simplificar o argumento da equação anterior, que são definidos por:

$$\omega = 2\pi f \quad (2.4)$$

$$\zeta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.5)$$

a equação para o vector luminoso escreve-se agora:

$$E = a \cos (\zeta z - \omega t) \quad (2.6)$$

Duas ondas com o mesmo comprimento de onda e a mesma amplitude mas com diferença de fase podem ser expressas pelas equações:

$$E_1 = a \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} (z + \delta_1 - ct) \right)$$

$$E_2 = a \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} (z + \delta_2 - ct) \right) \quad (2.7)$$

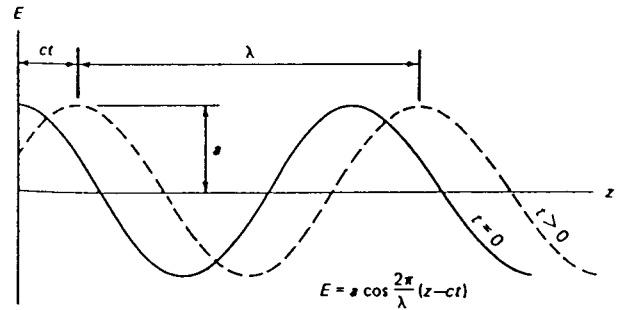


fig. 2.2 - Magnitude do vector luminoso como função da posição ao longo do eixo de propagação em dois instantes diferentes.

onde δ_1 - fase inicial da onda E_1

δ_2 - fase inicial da onda E_2

A diferença linear de fase δ referida frequentemente como desfasamento será dada por:

$$\delta = \delta_1 - \delta_2 \quad (2.8)$$

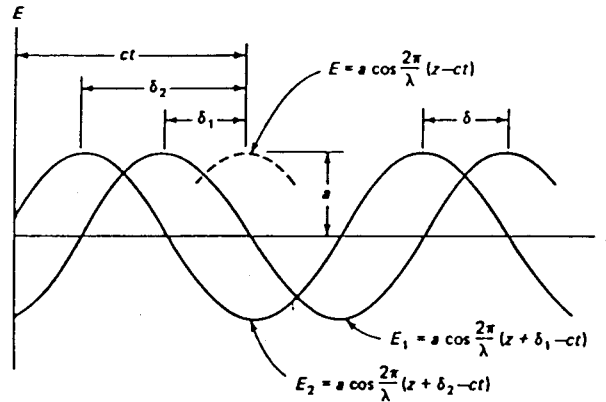


fig. 2.3 - Magnitude de dois vectores luminosos com diferente fase inicial.

2.3 SOBREPOSIÇÃO DE ONDAS

Os fenómenos observados em fotoelasticidade são sobretudo devidos à sobreposição de ondas com diferentes amplitude e fase, mas com a mesma frequência. Para uma determinada posição z_0 , de interesse para uma dada observação, as expressões para o vector luminoso serão:

$$E_1 = a_1 \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} (z_0 + \delta_1 - ct) \right) = a_1 \cos (\phi_1 - \omega t)$$

$$E_2 = a_2 \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} (z_0 + \delta_2 - ct) \right) = a_2 \cos (\phi_2 - \omega t) \quad (2.9)$$

onde ϕ_1 - desfasamento associado à onda E_1 na posição z_0

ϕ_2 - desfasamento associado à onda E_2 na posição z_0

a_1, a_2 - amplitudes

Se os vectores oscilarem no mesmo plano (luz polarizada), o vector resultante será dado por:

$$E = E_1 + E_2 = a \cos (\phi - \omega t) \quad (a)$$

onde:

$$a^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2 a_1 a_2 \cos (\phi_2 - \phi_1) \quad (2.10)$$

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{a_1 \sin \phi_1 + a_2 \sin \phi_2}{a_1 \cos \phi_1 + a_2 \cos \phi_2} \quad (2.11)$$

As equações anteriores mostram que a onda resultante tem a mesma frequência das suas progenitoras mas amplitude e desfasamento diferentes. Se as amplitudes dos vectores luminosos forem iguais, o quadrado da amplitude do vector resultante será dado por:

$$a^2 = 2 a_1^2 [1 + \cos (\phi_2 - \phi_1)] \quad (b)$$

Como $\phi_2 - \phi_1 = \frac{2 \pi \delta}{\lambda}$,

$$a^2 = 2 a_1^2 \left(1 + \cos \frac{2 \pi \delta}{\lambda} \right) = 4 a_1^2 \cos^2 \frac{\pi \delta}{\lambda} \quad (2.12)$$

O efeito da amplitude é frequentemente utilizado em óptica, pois tanto o olho humano como outros sensores ópticos (câmara ou película fotográfica) reagem à intensidade da luz. Devido à elevada frequência, o efeito da variação temporal do vector luminoso é pouco utilizado. Sendo a intensidade luminosa proporcional ao quadrado da amplitude, podemos então escrever de uma forma aproximada:

$$I \simeq a^2 = 4 a_1^2 \cos^2 \frac{\pi \delta}{\lambda} \quad (c)$$

A expressão (c) mostra que a intensidade é função da diferença de fase entre as duas ondas. O valor máximo obtem-se quando $\delta = n\lambda$, $n=0,1,2,3,\dots$, ou seja quando o desfasamento é múltiplo do comprimento de onda, e é dado por:

$$I \simeq 4 a_1^2 \quad (d)$$

isto é quatro vezes a intensidade de uma onda individual com amplitude a_1 . O valor mínimo dá-se quando $\delta = [(2n+1)/2]\lambda$, $n=0,1,2,3,\dots$, ou seja quando o desfasamento é um número ímpar de vezes meio comprimento de onda, sendo o seu valor:

$$I = 0 \quad (e)$$

A modificação da intensidade do vector luminoso por sobreposição é usualmente designada por interferência. No caso da expressão (d) é chamada interferência construtiva; no caso da

expressão (e) é a interferência destrutiva. Os fenómenos de interferência são a base dos métodos ópticos de análise experimental de tensões.

Outra forma de luz polarizada ocorre quando se sobrepõem duas ondas com a mesma frequência, que oscilam em planos perpendiculares entre si, fig. 2.4. Num dado ponto de interesse z_0 , as equações que descrevem as duas ondas são:

$$E_x = a_x \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} (z_0 + \delta_x - ct) \right] = a_x \cos (\phi_x - \omega t)$$

$$E_y = a_y \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} (z_0 + \delta_y - ct) \right] = a_y \cos (\phi_y - \omega t) \quad (2.13)$$

onde ϕ_x - desfasamento associado à onda E_x na posição z_0

ϕ_y - desfasamento associado à onda E_y na posição z_0

a_x, a_y - amplitudes

A soma das duas ondas resulta em:

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \quad (f)$$

Eliminando a variável tempo das equações (2.13), ou seja se "pararmos no tempo" a onda, obtemos:

$$\frac{E_x^2}{a_x^2} - 2 \frac{E_x E_y}{a_x a_y} \cos \frac{2\pi \delta}{\lambda} + \frac{E_y^2}{a_y^2} = \sin^2 \frac{2\pi \delta}{\lambda} \quad (2.14)$$

que é a equação de uma elipse. Com a variação temporal o vector resultante descreve uma elipse ao longo do eixo z , originando uma hélice elíptica, fig. 2.5. Este tipo de luz polarizada é denominada de elíptica.

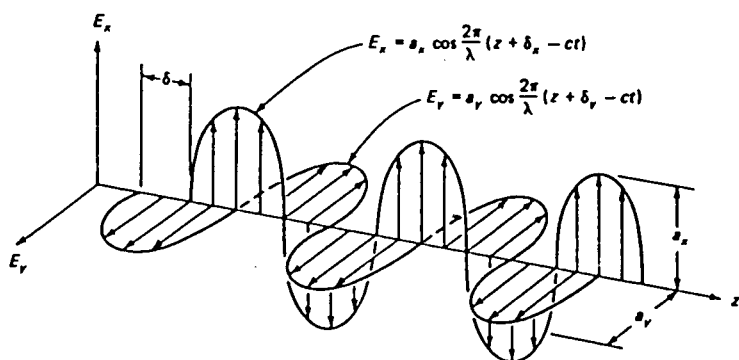


fig. 2.4 - Ondas luminosas com a mesma frequência, vibrando em planos perpendiculares entre si.

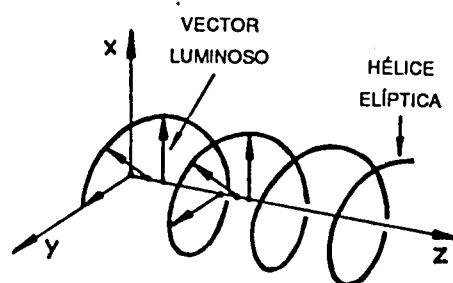


fig. 2.5 - Luz polarizada elíptica.

Um caso particular acontece quando a amplitude das duas ondas é igual e $\delta = [(2n+1)/2]\lambda$, $n=0,1,2,3,\dots$, reduzindo-se a equação (2.14) a:

$$E_x^2 + E_y^2 = a^2 \quad (g)$$

que é a equação de uma circunferência, daí a denominação de luz polarizada circular. Este tipo de luz polarizada é utilizada no polariscópio circular de que se falará mais adiante.

Outro caso particular surge quando $\delta = n\lambda/2$, $n=0,1,2,3,\dots$, neste caso a equação (2.14) reduz-se a:

$$E_y = \frac{a_y}{a_x} E_x \quad (h)$$

que é a equação de uma recta. O vector resultante vibra num só plano, por esse motivo se designa por luz polarizada plana.

2.4 ELEMENTOS ÓPTICOS

A obtenção de luz polarizada plana ou circular pode ser conseguida à custa de elementos ópticos com determinadas características de polarização. No texto que se segue faremos uma abordagem desses elementos bem como da sua combinação.

2.4.1 POLARIZADOR PLANO

Quando um feixe luminoso incide num polarizador plano, este divide o vector em duas componentes: uma segundo eixo de polarização e outra perpendicular, fig. 2.6. A componente com a direcção do eixo de polarização é transmitida enquanto a outra é absorvida ou reflectida, dependendo do material utilizado no polarizador plano. Como consequência disto a luz que atravessa o polarizador oscila num único plano, fig. 2.6, daí a sua designação de luz polarizada plana.

Se colocarmos o polarizador numa posição z_0 , a equação para o vector luminoso será:

$$E = a \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} (z_0 - ct) \right] \quad (a)$$

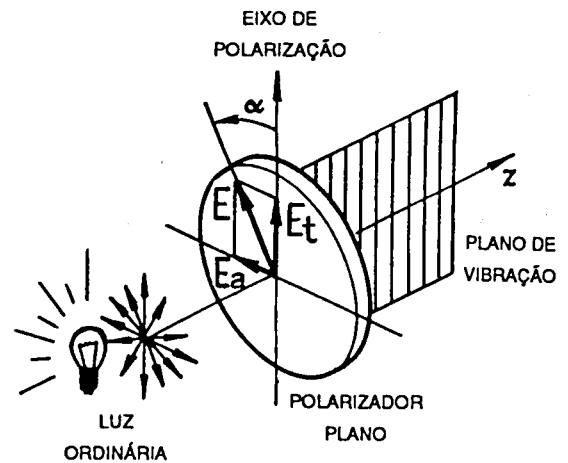


fig. 2.6 - O polarizador plano.

devido a não ser importante considerar a fase inicial nas expressões que se seguem, podemos escrever:

$$E = a \cos (2\pi f t) = a \cos \omega t \quad (2.15)$$

sendo ω a frequência angular da onda. As componentes absorvida e transmitida podem então escrever-se:

$$E_a = a \cos \omega t \sin \alpha$$

$$E_t = a \cos \omega t \cos \alpha \quad (2.16)$$

sendo α o ângulo entre o eixo de polarização e o vector luminoso.

Inicialmente a obtenção destes elementos constituiu um grande problema. A tecnologia desenvolvida pela Polaroid Corporation veio resolver este problema, permitindo a realização de polarizadores de grandes áreas.

2.4.2 PLACA BIRREFRINGENTE

A placa birrefringente tem como particularidade dividir o vector luminoso em duas componentes ortogonais e transmiti-las com velocidades diferentes. As componentes têm a direcção dos eixos da placa, 1 e 2. A componente segundo o eixo 1 tem uma velocidade maior que a outra, por conseguinte este eixo designa-se como eixo rápido, enquanto o eixo 2 como eixo lento.

Se a placa receber luz polarizada plana, E_t , de tal forma que o plano de polarização faça um ângulo β com o eixo rápido, o vector luminoso é dividido nas componentes:

$$E_{t1} = E_t \cos \beta = a \cos \alpha \cos \omega t \cos \beta = k \cos \omega t \cos \beta$$

$$E_{t2} = E_t \sin \beta = a \cos \alpha \cos \omega t \sin \beta = k \cos \omega t \sin \beta \quad (2.17)$$

Devido à diferença de velocidades de cada uma das componentes, estas emergem da placa birrefringente com um dado desfasamento, dado por:

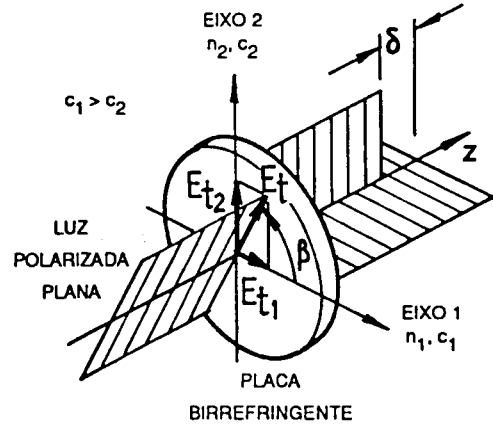


fig. 2.7 - A placa birrefringente.

$$\delta = \delta_2 - \delta_1 = h (n_2 - n_1) \quad (2.18)$$

onde h - espessura da placa
 n_1, n_2 - índices de refração

O desfasamento angular entre as duas componentes que emergem da placa birrefringente será dado por:

$$\Delta = \frac{2\pi\delta}{\lambda} = \frac{2\pi h}{\lambda} (n_2 - n_1) \quad (2.19)$$

Como se pode ver pela expressão (2.19) o desfasamento angular pode ser alterado pela espessura h , pelo comprimento de onda λ , ou pelas características do material da placa. Quando $\Delta = \pi/2$ a placa birrefringente é denominada de placa quarto de onda. Placas com desfasamento angular de π e 2π são respectivamente denominadas de meia onda e onda completa, tendo estas menos uso que a primeira.

Ignorando o desfasamento da onda incidente na placa birrefringente, as componentes transmitidas e o vector resultante podem escrever-se:

$$E'_{t_1} = k \cos \beta \cos \omega t$$

$$E'_{t_2} = k \sin \beta \cos (\omega t - \Delta) \quad (2.20)$$

$$E'_t = \sqrt{(E'_{t_1})^2 + (E'_{t_2})^2} = k \sqrt{\cos^2 \beta \cos^2 \omega t + \sin^2 \beta \cos^2 (\omega t - \Delta)} \quad (2.21)$$

onde β é o ângulo entre o plano de polarização e o eixo rápido da placa. O ângulo que o vector resultante faz com o eixo 1 será dado por:

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{E'_{t_2}}{E'_{t_1}} = \frac{\cos (\omega t - \Delta)}{\cos \omega t} \operatorname{tg} \beta \quad (2.22)$$

Torna-se claro que tanto a magnitude como a rotação do vector emergente podem ser controladas pela placa birrefringente. Os parâmetros de controle são o desfasamento angular Δ e o ângulo β que o plano de polarização faz com o eixo 1.

2.4.3 ARRANJO DOS ELEMENTOS ÓPTICOS

A luz emergente dos elementos ópticos descritos anteriormente é sempre luz polarizada, podendo ser plana, circular ou elíptica. Já sabemos também que os parâmetros que controlam esse resultado são o desfasamento angular Δ e o ângulo de orientação β . Vejamos então os três casos possíveis, quando a seguir à fonte de iluminação são colocados um polarizador e uma placa birrefringente.

LUZ POLARIZADA PLANA

Se o ângulo β for nulo e o desfasamento angular qualquer, o vector emergente será dado pelas equações (2.20):

$$E_t' = k \cos \omega t$$

$$\gamma = 0 \quad (a)$$

neste caso o vector não tem rotação quando passa pela placa birrefringente e portanto mantém-se como luz polarizada plana. A placa birrefringente somente atrasa a onda em relação à propagação no espaço livre.

Resultado idêntico será obtido se fizermos $\beta = \pi/2$, assim:

$$E_t' = k \cos (\omega t - \Delta)$$

$$\gamma = \pi/2 \quad (b)$$

LUZ POLARIZADA CIRCULAR

Se a placa birrefringente provocar um desfasamento $\Delta = \pi/2$, ou seja se for uma placa quarto de onda, e $\beta = \pi/4$, a magnitude e direcção do vector emergente serão:

$$E_t' = \frac{\sqrt{2}}{2} k \sqrt{\cos^2 \omega t + \sin^2 \omega t} = \frac{\sqrt{2}}{2} k$$

$$\gamma = \omega t \quad (c)$$

cujo significado é o de que o vector emergente tem uma norma constante e como projecção, num plano perpendicular à direcção de propagação, uma circunferência. O vector tem uma rotação em torno do eixo de propagação com uma velocidade angular contante e igual a ω .

LUZ POLARIZADA ELÍPTICA

No caso de $\Delta=\pi/2$ e β qualquer excepto $n\pi/4$, $n=0, 1, 2, \dots$, o vector resultante será representado por:

$$E_t = k \sqrt{\cos^2 \beta \cos^2 \omega t + \sin^2 \beta \sin^2 \omega t}$$

$$\operatorname{tg} \gamma = \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \omega t \quad (d)$$

Neste caso a luz emergente da placa birrefringente tem uma norma que varia com a posição angular, a sua projecção num plano perpendicular à direcção de propagação é uma elipse. A forma e a inclinação da elipse podem ser controladas pelo ângulo de orientação β .

NOTA FINAL

Vejamos agora o significado da equação (2.19) na produção de luz polarizada circular. Como já foi referido este tipo de luz polarizada exige a utilização duma placa quarto de onda, $\Delta=\pi/2$. Pode-se escolher uma placa com uma determinada espessura e com características ópticas, de modo a obter luz polarizada circular para um determinado comprimento de onda. No entanto se utilizarmos um comprimento de onda diferente a luz resultante já não será polarizada circular, pois agora $\Delta \neq \pi/2$. Não existe portanto nenhuma placa quarto de onda que permita obter luz branca polarizada circularmente, uma vez que esta contém os comprimentos de onda correspondentes ao espectro visível.

2.5 EFEITO FOTOELÁSTICO - LEI DE MAXWELL

Alguns materiais transparentes amorfos, isotrópicos quando livres de tensões, tornam-se anisotrópicos quando sujeitos a um estado de tensão não nulo. Apresentam portanto, nestas circunstâncias, características semelhantes às dos materiais cristalinos. Esta característica de anisotropia temporária persiste enquanto estão sob tensão. Este comportamento também conhecido por birrefringência temporária foi descoberto por Sir David Brewster em 1816. Os materiais com estas características são designados por materiais fotoelásticos.

Em 1853, Maxwell constatou que a variação dos índices de refração era proporcional à carga aplicada ao material fotoelástico, e consequentemente às tensões e às deformações. No caso do estado plano de tensão, as relações entre os índices de refração, segundo os eixos principais de um modelo fotoelástico, e as tensões traduzem-se da seguinte forma [1]:

$$\begin{aligned} n_1 - n_0 &= c_1 \sigma_1 + c_2 \sigma_2 \\ n_2 - n_0 &= c_1 \sigma_2 + c_2 \sigma_1 \end{aligned} \quad (2.23)$$

onde σ_1, σ_2 - tensões principais no ponto de interesse

n_0 - índice de refração do material livre de tensões

n_1, n_2 - índices de refração do material sujeito a um estado de tensão, associados às direcções principais de tensão

c_1, c_2 - constantes ópticas

Refira-se que quando um material fotoelástico apresenta birrefringência, a direcção principal 1 (direcção da maior tensão principal) comporta-se como o eixo rápido enquanto a direcção 2 se comporta como eixo lento.

As equações (2.23) são definidas em termos de "atrasos" absolutos, que encontram uso nos interferómetros "Mach-Zender" e série. Em fotoelasticidade é utilizado o "atraso" relativo, que é menos exigente na colocação dos elementos ópticos, sendo por isso utilizado com mais frequência. As equações (2.23) podem ser transformadas nesse sentido se eliminarmos o termo n_0 :

$$n_2 - n_1 = (c_2 - c_1) (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (2.24)$$

onde $c = c_2 - c_1$: característica fotoelástica do material

Comportando-se o material fotoelástico do mesmo modo que uma placa birrefringente, podemos usar a equação (2.19) para relacionar o desfasamento angular com a diferença entre os índices de refração nas duas direcções principais.

Considere-se um modelo de material fotoelástico com uma espessura h e atravessado por um feixe de luz polarizada plana. Substituindo $n_2 - n_1$ em (2.19) pelo segundo membro de (2.24), obtemos:

$$\Delta = \frac{2\pi h}{\lambda} c (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (2.25)$$

ou

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{N f_\sigma}{h} \quad (2.26)$$

onde $N = \frac{\Delta}{2\pi}$: desfasamento em termos de ciclo completo

$f_\sigma = \frac{\lambda}{c}$: constante de franja do material

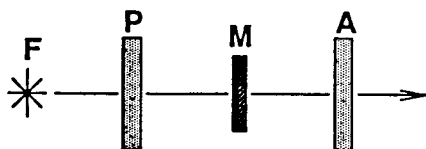
A equação (2.25) é a forma clássica da lei fundamental da fotoelasticidade. Na prática é habitual escrever esta equação sob a forma (2.26), devido à correspondência entre N e as franjas que aparecem no modelo fotoelástico. A constante de franja do material é normalmente fornecida pelo fabricante. É imediato concluir que a diferença entre as tensões principais pode ser obtida se para tal tivermos meios de medir o desfasamento N e de calibrar o material utilizado, f_σ .

2.6 O POLARISCÓPIO

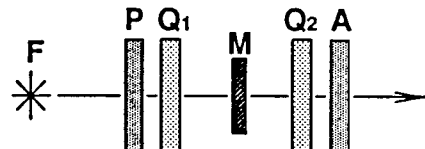
O polariscópio é o instrumento óptico que permite analisar o efeito fotoelástico, que se dá quando um modelo de material fotoelástico é colocado sob tensão. Existem dois tipos básicos de polariscópio, o de transmissão e o de reflexão.

O polariscópio de transmissão é destinado à análise de modelos fotoelásticos. A luz atravessa o modelo, sendo a análise do padrão de franjas feita do lado oposto ao da fonte de iluminação, fig. 2.8 e 2.9. Conforme o tipo de luz polarizada utilizada, a designação pode ser de polariscópio plano ou circular. Este foi o tipo de polariscópio utilizado neste trabalho, consequentemente concentraremos a nossa atenção nele.

Outro tipo é o polariscópio de reflexão, que se destina à ser utilizado com revestimentos fotoelásticos. O seu interesse surge quando há a necessidade de verificar o comportamento de um componente no próprio local de funcionamento, ou ainda quando o modelo fotoelástico é de difícil execução. Este tipo de polariscópio permite o estudo das tensões na superfície do corpo. Para a sua utilização a superfície deve ser espelhada de modo a tornar-se reflectora, sendo então revestida com a película fotoelástica. O feixe luminoso atravessa por duas vezes a película, devido à reflexão do feixe ao encontrar a superfície do corpo em análise. Na fig. 2.10 podem ver-se duas montagens típicas deste polariscópio. A análise das franjas neste caso é ligeiramente diferente do polariscópio de transmissão, por isso não é abordada neste trabalho.



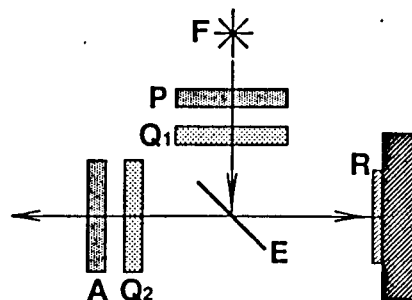
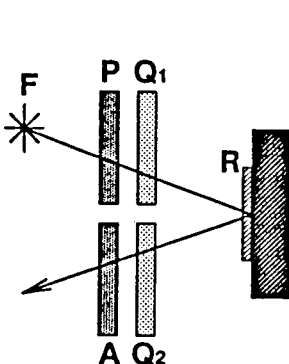
F - fonte de iluminação
P - polarizador
M - modelo fotoelástico
A - analisador



Q1, Q2 - placas quarto de onda

fig. 2.8 - Polariscópio plano de transmissão.

fig. 2.9 - Polariscópio circular de transmissão.



R - revestimento fotoelástico
E - espelho parcial

fig. 2.10 - Configurações típicas do polariscópio de reflexão.

2.6.1 POLARISCÓPIO PLANO

O polariscópio plano é a combinação mais simples utilizada em fotoelasticidade. Consiste em dois polarizadores planos e uma fonte de iluminação, fig. 2.11. O polarizador plano mais próximo da fonte luminosa é chamado polarizador, o outro é chamado analisador. Os eixos do polarizador e do analisador são sempre cruzados (90°). Assim, se não existir um modelo fotoelástico no caminho da luz, não haverá transmissão de luz através do analisador, esta situação diz-se de campo escuro.

Consideremos, agora, um modelo sob tensão, colocado entre o polarizador e o analisador, e designemos de α o ângulo entre o eixo vertical (paralelo ao eixo do polarizador) e a direcção principal 1. O modelo ao ser solicitado por um carregamento vai comportar-se como uma placa birrefringente temporária, logo vai alterar as características de polarização da luz procedente do polarizador.

Como já referimos, a fase inicial não é importante para as conclusões que pretendemos obter, por isso não será considerada. O vector luminoso emergente do polarizador pode ser representado por:

$$E_{py} = k \cos \omega t \quad (a)$$

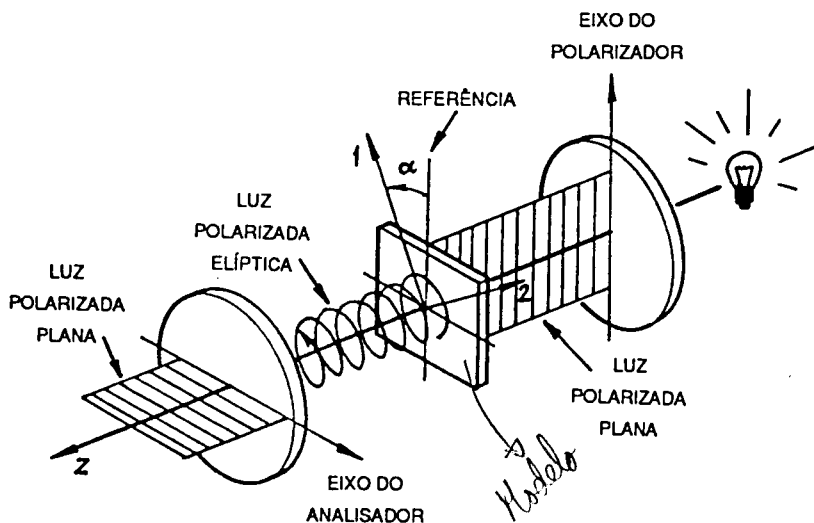


fig. 2.11 - O polariscópio plano.

Quando atinge o modelo fotoelástico este vector decompõe-se em duas componentes, que serão transmitidas a diferentes velocidades. Estas componentes são:

$$E_1 = k \cos \alpha \cos \omega t$$

$$E_2 = k \sin \alpha \cos \omega t \quad (b)$$

A relação entre as velocidades de propagação é $c > v_1 > v_2$, como consequência ambas as componentes adquirem atrasos de fase, Δ_1 e Δ_2 , em relação à luz que se propaga em espaço aberto. As componentes transmitidas pelo modelo fotoelástico serão dadas por:

$$E_1' = k \cos \alpha \cos (\omega t - \Delta_1)$$

$$E_2' = k \sin \alpha \cos (\omega t - \Delta_2) \quad (c)$$

$$\text{onde } \Delta_1 = \frac{2\pi h}{\lambda} (n_1 - 1) \quad \text{e} \quad \Delta_2 = \frac{2\pi h}{\lambda} (n_2 - 1)$$

Quando estas componentes atingem o analisador, este só transmite a componente segundo o seu eixo, absorvendo a componente perpendicular. O vector transmitido pelo analisador virá então:

$$E_{ax} = E_2' - E_1' = E_2' \cos \alpha - E_1' \sin \alpha \quad (d)$$

ou substituindo as equações (c) em (d)

$$E_{ax} = k \sin 2\alpha \sin \frac{\Delta_2 - \Delta_1}{2} \sin \left(\omega t - \frac{\Delta_2 + \Delta_1}{2} \right) \quad (2.27)$$

Note-se que a média dos desfasamentos angulares $(\Delta_1 + \Delta_2)/2$, afecta a fase da onda resultante, enquanto o desfasamento relativo $\Delta = \Delta_2 - \Delta_1$, afecta a amplitude, sendo portanto um dos factores que contribui para a variação da intensidade da onda resultante. Como a intensidade é a grandeza a considerar, podemos dizer que só o desfasamento relativo é importante. A intensidade é proporcional ao quadrado da amplitude, por conseguinte será dada por:

$$I = K \sin^2 2\alpha \sin^2 \frac{\Delta}{2} \quad (2.28)$$

$$\text{onde } \Delta = \Delta_2 - \Delta_1 = \frac{2\pi h}{\lambda} (n_2 - n_1) = \frac{2\pi h c}{\lambda} (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (e)$$

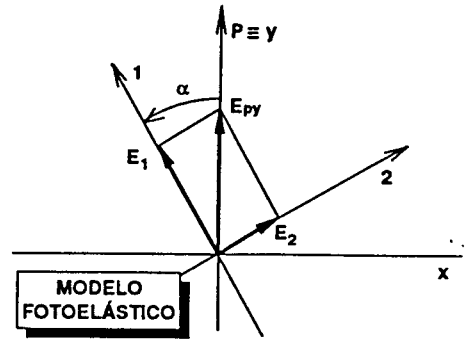


fig. 2.12 - Divisão do vector luminoso quando atinge o modelo fotoelástico.

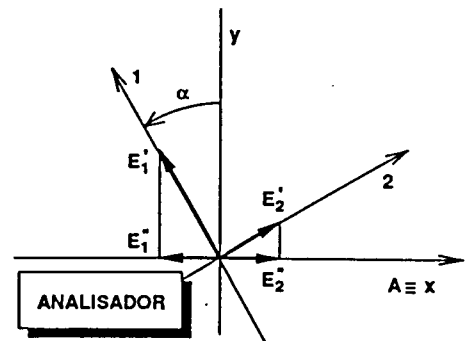


fig. 2.13 - Componentes transmitidas pelo analisador.

Analise agora a expressão da intensidade, e vejamos os casos em que ocorre a extinção de luz ($I=0$).

EFEITO DAS DIRECÇÕES PRINCIPAIS DE TENSÃO

Uma das situações em que ocorre a extinção de luz é quando $\sin^2 2\alpha = 0$. Isto verifica-se quando $2\alpha = n\pi$, $n=0,1,2,\dots$, ou seja quando uma das direcções principais de tensão coincide com o eixo do polarizador. Esta análise é válida para todos os pontos do modelo, apesar de ter sido deduzida para um ponto em particular. Quando todo o modelo é observado, esta condição de extinção origina uma família de franjas (bandas escuras) denominadas franjas isoclínicas. Estas representam o lugar dos pontos em que uma das direcções principais de tensão coincide com o eixo do polarizador.

EFEITO DA DIFERENÇA ENTRE AS TENSÕES PRINCIPAIS

Outra das condições ocorre quando $\sin^2(\Delta/2) = 0$, portanto para os valores $\Delta/2 = n\pi$, $n=0,1,2,\dots$. Isto é equivalente a dizer que há extinção quando a diferença das tensões principais é nula ou provoca um atraso de um número inteiro de vezes o comprimento de onda. Quando a imagem é observada como um todo, esta condição origina outra família de franjas designadas por isocromáticas.

Recordemos a equação (2.25), que podemos transformar em:

$$n = N = \frac{\Delta}{2\pi} = \frac{hc}{\lambda} (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (f)$$

A equação (f) mostra que a ordem de extinção n depende da diferença das tensões principais e do comprimento de onda da radiação luminosa. Como consequência disto, as franjas isocromáticas só serão negras se a luz for monocromática. No caso de se usar luz branca, as franjas aparecem como uma série de bandas coloridas. A única franja negra acontece quando a diferença das tensões principais é nula, pois neste caso dá-se a extinção para todos os comprimentos de onda. Assim, as franjas de ordem superior a zero tornam-se pálidas e difíceis de identificar, contudo esta técnica é frequentemente utilizada em fotoelasticidade pois é possível identificar a ordem das franjas através da coloração característica.

Outro aspecto a salientar, é o aparecimento simultâneo das franjas isoclínicas e isocromáticas, que exige o uso de técnicas de separação. Teoricamente as franjas são linhas, no entanto, devido às características do olho humano elas aparecem como bandas. Contudo, uma análise mais rigorosa da intensidade mostra a existência de mínimos que constituem as franjas propriamente ditas.

FREQUÊNCIA DA RADIAÇÃO LUMINOSA

A frequência angular da luz no espectro visível é aproximadamente 10^{15} rad/s. Para este valor, nem o olho humano, nem qualquer tipo de filme rápido pode detectar esta condição de extinção periódica, motivo pelo qual nunca é tomada em consideração.

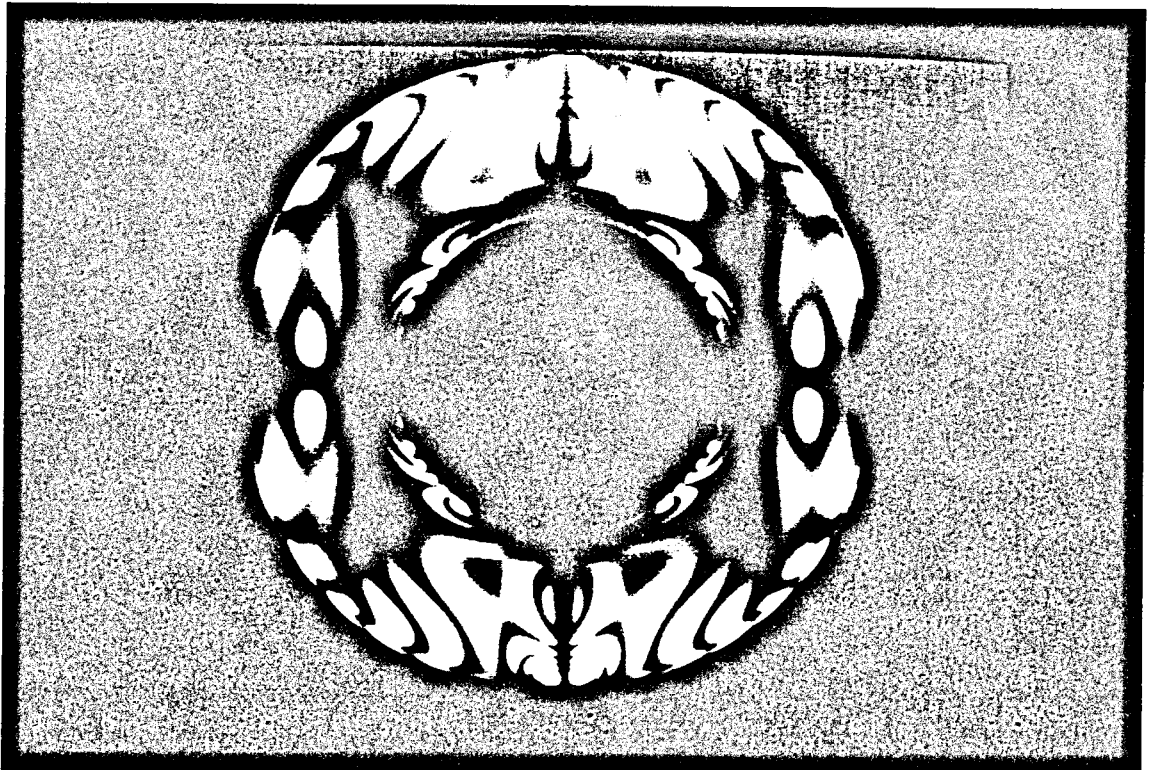


fig. 2.14 - Imagem obtida no polariscópio plano para um anel em compressão diametral na direcção vertical.

2.6.2 GENERALIZAÇÃO DO POLARISCÓPIO PLANO (ROTAÇÃO CONJUNTA DOS ELEMENTOS ÓPTICOS)

A equação (2.28) pode tornar-se mais geral se considerarmos a rotação conjunta de todos os elementos do polariscópio plano (excepto o modelo). Mantendo a mesma referência, a vertical, o ângulo α tem a mesma definição dada anteriormente. Chamando γ ao ângulo rodado pelo conjunto, no sentido dos ponteiros do relógio (posição do observador), a equação (2.28) transformar-se-á em:

$$I_{\gamma} = K \sin^2 2(\alpha + \gamma) \sin^2 \frac{\Delta}{2} \quad (2.29)$$

ou substituindo $\sin^2$ pelo seu equivalente trigonométrico:

$$I_{\gamma} = K' (1 - \cos 4(\alpha + \gamma)) \sin^2 \frac{\Delta}{2} \quad (2.30)$$

onde $K' = K/2$

A equação sob esta forma é a mais adequada na utilização que vai ter nos próximos capítulos.

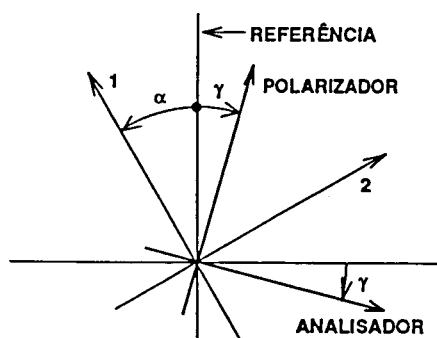


fig. 2.15 - Rotação conjunta dos elementos ópticos no polariscópio plano.

2.6.3 POLARISCÓPIO CIRCULAR

Como o próprio nome indica, este polariscópio utiliza luz polarizada circular. Além da fonte de iluminação inclui quatro elementos ópticos, dois polarizadores planos e duas placas quarto de onda, fig. 2.16. O elemento mais próximo da fonte de iluminação é o polarizador, transformando a luz ordinária em polarizada plana. O elemento que se segue é o primeiro quarto de onda ($\beta = \pi/4$), cuja função é a de transformar a luz em polarizada circular. O terceiro elemento, outra placa quarto de onda denominada segundo quarto de onda, é colocada de modo que o seu eixo rápido seja paralelo ao eixo lento do primeiro quarto de onda. A finalidade deste é reconverter a luz em polarizada plana. O último elemento é o analisador (polarizador plano), cujo eixo se pode colocar em qualquer posição. As disposições mais frequentes são, colocar o eixo perpendicular (campo escuro) ou paralelo ao eixo do polarizador (campo iluminado). A disposição dos elementos em campo escuro impede a passagem de luz através do analisador, na ausência de modelo fotoelástico. Em campo iluminado há passagem de luz nas mesmas condições.

A colocação dos eixos rápidos cruzados, das placas quarto de onda, é aconselhável pois nesta situação os erros introduzidos pelo primeiro quarto de onda podem ser corrigidos pelo segundo. Isto tem a sua justificação no facto de as placas quarto de onda serem algo imperfeitas. Podem no

entanto utilizar-se montagens em que os quartos de onda tem os eixos paralelos. Na fig. 2.17 podem ver-se as quatro combinações possíveis.

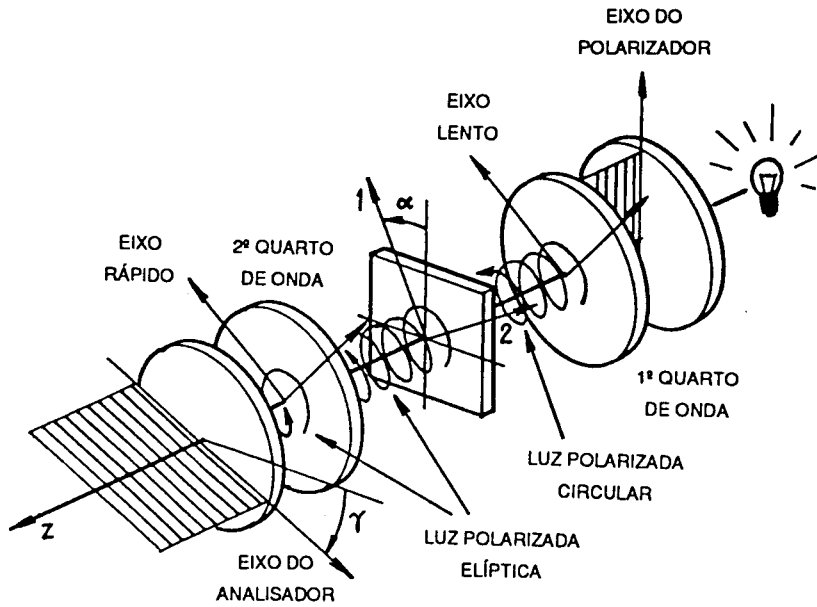


fig. 2.16 - O polariscópio circular.

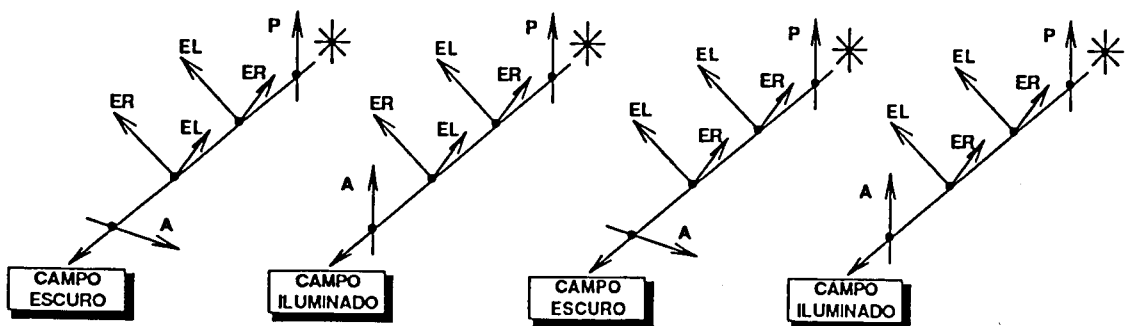


fig. 2.17 - Disposições possíveis no polariscópio circular.

Quando se coloca um modelo fotoelástico entre as duas placas quarto de onda, o efeito obtido é diferente do polariscópio plano. A luz transmitida pelo polarizador é, como já vimos:

$$E_{py} = k \cos \omega t \quad (a)$$

Quando atinge o primeiro quarto de onda, este vector é separado em duas componentes, segundo os eixos rápido e lento da placa, respectivamente:

$$E_r = \frac{\sqrt{2}}{2} k \cos \omega t$$

$$E_i = \frac{\sqrt{2}}{2} k \cos \omega t \quad (b)$$

À medida que estas componentes atravessam a espessura, a componente segundo o eixo lento sofre um atraso em relação à outra, devido à diferença de velocidades, que será à saída igual a $\pi/2$. As componentes transmitidas serão:

$$E'_r = \frac{\sqrt{2}}{2} k \cos \omega t$$

$$E'_i = \frac{\sqrt{2}}{2} k \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = \frac{\sqrt{2}}{2} k \sin \omega t \quad (c)$$

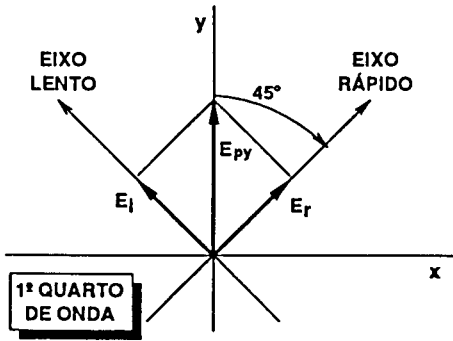


fig. 2.18 - Divisão das componentes quando atingem o 1º quarto de onda.

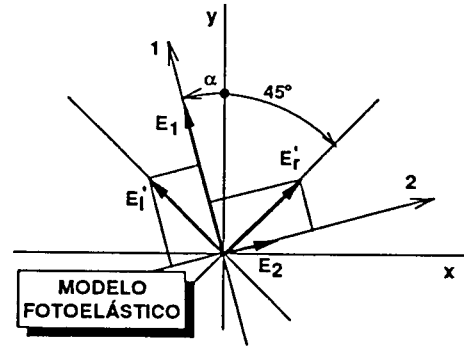


fig. 2.19 - Divisão das componentes quando atingem o modelo fotoelástico.

De seguida, estas duas componentes atingem o modelo fotoelástico (placa birrefringente temporária), fig. 2.19. São então transformadas em duas novas componentes segundos os eixos principais de tensão:

$$E_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} k \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{4} - \alpha \right)$$

$$E_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} k \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{4} - \alpha \right) \quad (d)$$

Após atravessarem o modelo, a componente segundo o eixo 2 adquiriu um desfasamento Δ , equação (2.25), relativamente à componente segundo o eixo 1, deste modo as componentes transmitidas serão dadas por:

$$E'_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} k \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{4} - \alpha \right)$$

$$E_2' = \frac{\sqrt{2}}{2} k \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{4} - \alpha - \Delta \right) \quad (e)$$

Atingindo o segundo quarto de onda, temos de novo a mudança das componentes para os eixos principais daquela, fig. 2.20, obtendo-se:

$$E_r = \frac{\sqrt{2}}{2} k \left[\sin \left(\omega t + \frac{\pi}{4} - \alpha \right) \cos \left(\frac{\pi}{4} - \alpha \right) - \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{4} - \alpha - \Delta \right) \sin \left(\frac{\pi}{4} - \alpha \right) \right]$$

$$E_l = \frac{\sqrt{2}}{2} k \left[\sin \left(\omega t + \frac{\pi}{4} - \alpha \right) \sin \left(\frac{\pi}{4} - \alpha \right) - \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{4} - \alpha - \Delta \right) \cos \left(\frac{\pi}{4} - \alpha \right) \right] \quad (f)$$

Depois de atravessarem o segundo quarto de onda a componente segundo o eixo lento adquire um desfaseamento de $\pi/2$ em relação à componente segundo o eixo rápido, donde:

$$E_r' = \frac{\sqrt{2}}{2} k \left[\sin \left(\omega t + \frac{\pi}{4} - \alpha \right) \cos \left(\frac{\pi}{4} - \alpha \right) - \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{4} - \alpha - \Delta \right) \sin \left(\frac{\pi}{4} - \alpha \right) \right]$$

$$E_l' = \frac{\sqrt{2}}{2} k \left[-\cos \left(\omega t + \frac{\pi}{4} - \alpha \right) \sin \left(\frac{\pi}{4} - \alpha \right) + \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{4} - \alpha - \Delta \right) \cos \left(\frac{\pi}{4} - \alpha \right) \right] \quad (2.31)$$

Finalmente o vector luminoso atinge o analisador, vamos por isso fazer a análise em separado para o caso de campo escuro e campo iluminado.

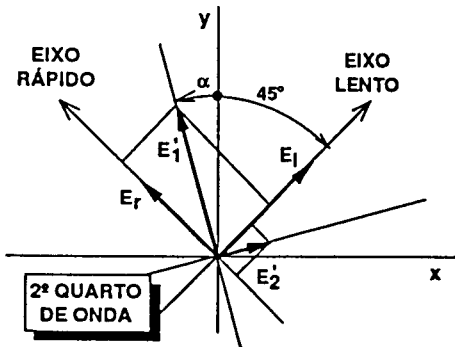


fig. 2.20 - Divisão das componentes quando atingem o 2º quarto de onda.

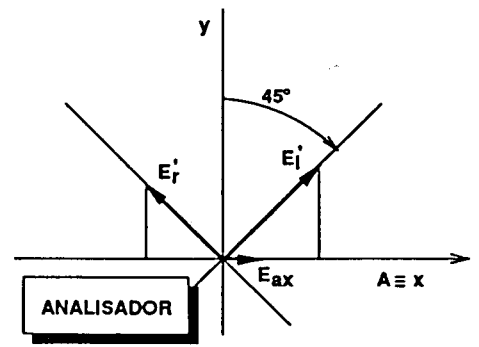


fig. 2.21 - Componentes transmitidas pelo analisador (campo escuro).

CAMPO ESCURO

Na configuração de campo escuro, o analisador encontra-se cruzado em relação ao polarizador ($\gamma=0^\circ$). Neste caso a componente vertical é absorvida, fig. 2.21, sendo a horizontal (segundo o eixo do analisador) transmitida e dada por:

$$E_{ax} = \frac{\sqrt{2}}{2} (E_l' - E_r') = k \sin \frac{\Delta}{2} \sin \left(\omega t - 2\alpha - \frac{\Delta}{2} \right) \quad (2.32)$$

Sendo a intensidade proporcional ao quadrado da amplitude, teremos para o caso do polariscópio circular em campo escuro:

$$I = K \sin^2 \frac{\Delta}{2} \quad (2.33)$$

Comparando esta equação com a (2.28), podemos constatar o desaparecimento das franjas isoclínicas (factor $\sin^2 2\alpha$). Assim, no polariscópio circular aparecem somente as franjas isocromáticas, que correspondem à condição de extinção $\Delta/2 = n\pi$, $n=0,1,2,\dots$. A análise é idêntica à efectuada para o caso do polariscópio plano. Na fig 2.22 podem ver-se as franjas isocromáticas tal como aparecem no polariscópio circular em campo escuro.

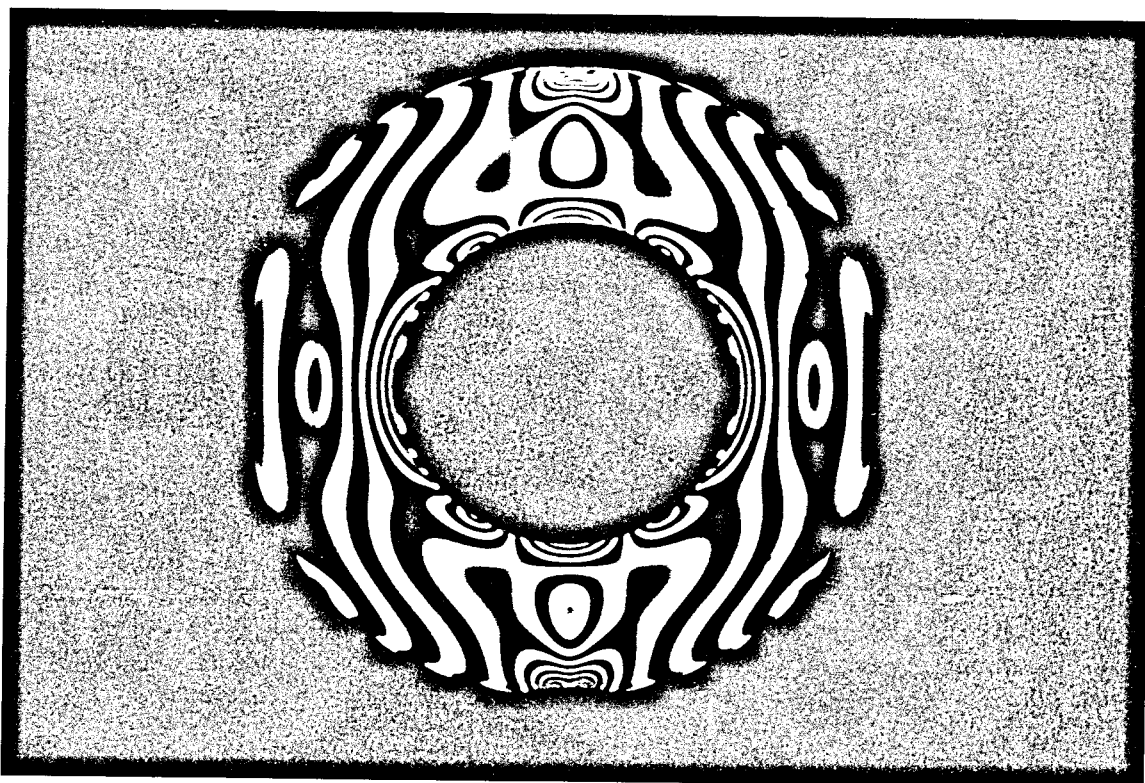


fig. 2.22 - Franjas isocromáticas obtidas no polariscópio circular em campo escuro para um anel em compressão diametral na direcção vertical.

CAMPO ILUMINADO

No caso de o analisador estar paralelo ao polarizador ($\gamma=90^\circ$), acontece o oposto, isto é a componente horizontal é absorvida e a ^{vertical} horizontal é transmitida, fig. 2.23. A componente transmitida será neste caso:

$$E_{ay} = \frac{\sqrt{2}}{2} (E'_l + E'_r) = k \cos \frac{\Delta}{2} \sin \left(\omega t - \frac{\Delta}{2} \right) \quad (2.34)$$

sendo a intensidade dada por:

$$I = K \cos^2 \frac{\Delta}{2} \quad (2.35)$$

A equação (2.35) mostra que a extinção ($I = 0$) ocorrerá quando:

$$\frac{\Delta}{2} = \frac{1+2n}{2} \pi, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

ou de (2.26):

$$N = \frac{\Delta}{2\pi} = \frac{1}{2} + n$$

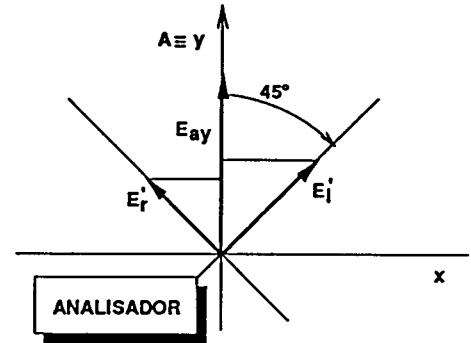


fig. 2.23 - Componentes transmitidas pelo analisador (campo iluminado).

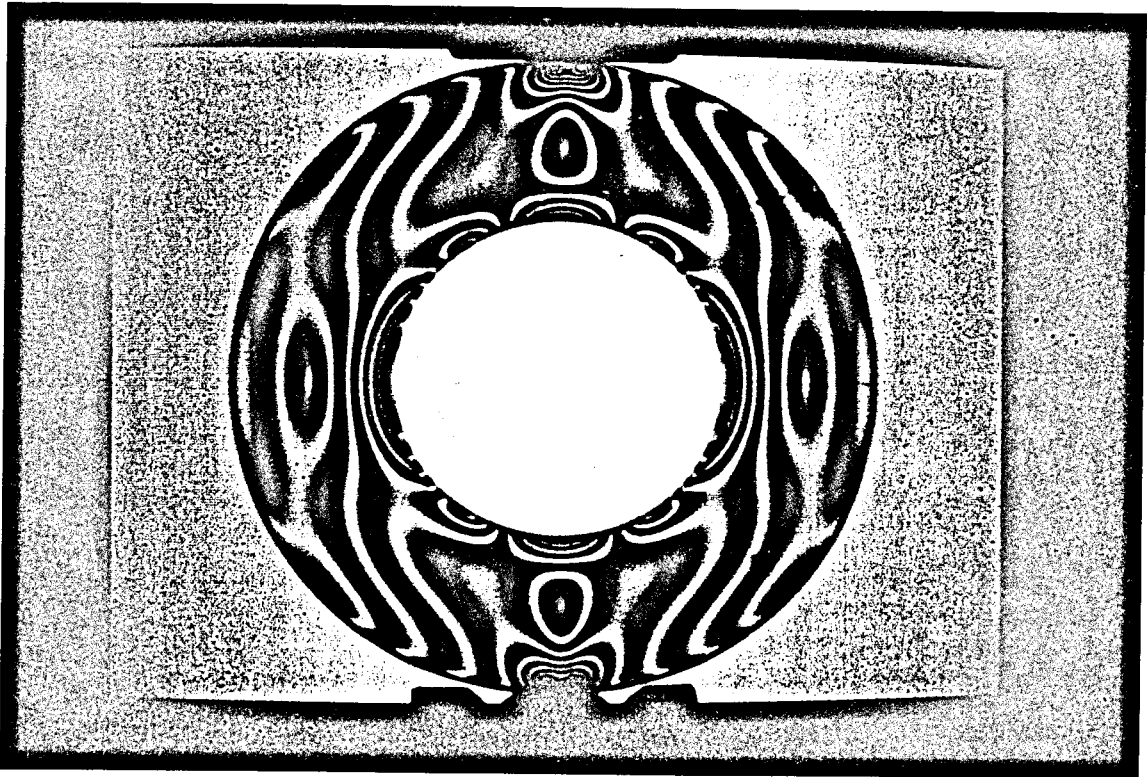


fig. 2.24 - Franjas isocromáticas obtidas no polariscópio circular em campo iluminado para um anel em compressão diametral na direcção vertical.

o que implica que as franjas observadas, no polariscópio circular em campo iluminado, sejam de ordem $1/2, 3/2, 5/2, \dots$. A vantagem de usar o campo escuro e iluminado, na fotoelasticidade convencional, é a de se poder duplicar a resolução das observações efectuadas. Na fig.2.24 pode ver-se uma imagem típica do polariscópio circular em campo iluminado, que comparando com a fig.2.22 mostra a existência das franjas nos locais onde anteriormente existia a luminosidade máxima.

2.6.4 GENERALIZAÇÃO DO POLARISCÓPIO CIRCULAR (POSIÇÃO ARBITRÁRIA DO ANALISADOR)

No caso de o analisador fazer um ângulo γ , qualquer, com a direcção horizontal (caso geral), a componente transmitida será agora:

$$E_{a\gamma} = E'_i \cos \left(\frac{\pi}{4} + \gamma \right) - E'_r \sin \left(\frac{\pi}{4} + \gamma \right) \quad (2.36)$$

Substituindo em (2.36) as equações (2.31), e sabendo que a intensidade é proporcional ao quadrado da amplitude, podemos, após efectuar as convenientes substituições trigonométricas, chegar a [1]:

$$I_\gamma = K (1 - \cos 2\gamma \cos \Delta - \cos 2\alpha \sin 2\gamma \sin \Delta) \quad (2.37)$$

Esta é uma das equações que virá a ser utilizada mais tarde, nos capítulos que se seguem. As condições de extinção não são importantes, neste caso, pois a sua utilização será feita doutra forma, conforme se verá.

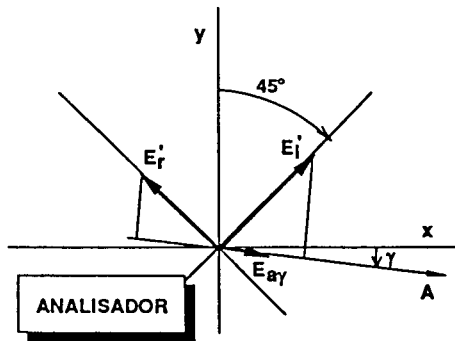


fig. 2.25 - Componentes transmitidas pelo analisador no caso geral.

CAPÍTULO 3

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 INTRODUÇÃO

A aplicação das técnicas de processamento de imagem à fotoelasticidade atraíu muitos investigadores, pelas vantagens que oferece. No que diz respeito ao processamento de imagens obtidas no polariscópio de transmissão, foram dois os caminhos seguidos, a saber:

- Tratamento de todo o campo da imagem
- Análise pontual

O primeiro exige a utilização de um meio de iluminação de grande área, a utilização de uma câmara de video para a aquisição das imagens, e um computador provido de uma placa de processamento de imagem para o tratamento daquelas. O processamento propriamente dito tomou por sua vez dois rumos paralelos:

- Fotoelasticidade de meia franja
- Fotoelasticidade de múltiplas franjas.

A primeira técnica permite um nível de automatização mais elevado, pois a identificação do desfasamento angular é imediato, ao não ultrapassar o valor de π . No entanto, a utilização de materiais menos sensíveis dá origem a imagens de pior qualidade. A origem do tratamento de todo o campo deve-se, sobretudo, à evolução dos meios computacionais, que permitem, actualmente,

realizar numerosos cálculos e armazenar grande quantidade de imagens. O "software" de processamento de imagem está em permanente evolução, o que permite prever grandes avanços destas técnicas num futuro próximo.

A análise pontual em contrapartida vai procurar o seu fundamento a uma das virtudes da fotoelasticidade: o "transdutor de comprimento nulo". Pode afirmar-se que esta técnica é mais dedicada à análise quantitativa, enquanto a de campo total visa mais uma análise qualitativa.

3.2 PROCESSAMENTO DE IMAGEM EM FOTOELASTICIDADE

Em 1978, Müller et. al. [8] apresentaram o que chamaram de "Análise completamente automatizada de franjas em fotoelasticidade". Tratava-se de um sistema de processamento de imagem, que permitia armazenar e tratar imagens obtidas a partir de um polariscópio. Baseados em trabalhos de Redner [9], utilizaram um polariscópio com sincronização do polarizador e do analisador, obtendo assim franjas de várias ordens por métodos de compensação. Após algumas manipulações, para eliminação do ruído, a imagem é transformada em binária, isto é dois níveis de intensidade ("threshold"). Usando um algoritmo de erosão ("thinning"), extraem-se os centros das franjas. O processo é utilizado tanto nas imagens de polariscópio plano como de polariscópio circular. A posterior integração, usando a equação de Laplace, permite a separação das tensões. O processo não deixa de ser interactivo, exigindo o acompanhamento do utilizador. O desperdício de informação e tempo é evidente, pois após o isolamento das franjas é consumido tempo de computação para recriar, por interpolação, a informação não obtida entre franjas.

Funnel [12] implementou um processo de detecção de franjas interessante, e mais rápido que a erosão. Este processo não tem sido utilizado em trabalhos que envolvam fotoelasticidade. O princípio consiste em traçar a linha central das franjas, começando num ponto definido pelo utilizador, seguindo o caminho em que a intensidade da imagem é mínima ("fringe tracking"). O processo revela-se algo instável nas franjas utilizadas por Funnel, mas poderia ter mais sucesso em franjas de fotoelasticidade. Funnel acrescentou ainda um processo de contagem das franjas, tomando como referência um ponto definido pelo utilizador. Este processo de contagem não tem aplicação em fotoelasticidade.

Seguchi et. al. [10] desenvolveram um outro algoritmo para erosão de franjas, neste a eliminação era efectuada após a análise das condições de ligação, do ponto em análise com os seus vizinhos. Os outros algoritmos são baseados em padrões pré-definidos, e portanto menos flexíveis, resultando geralmente em piores resultados. Após o isolamento das franjas isoclínicas e isocromáticas, fazia-se a separação das tensões recorrendo à equação de Laplace, que é resolvida utilizando o método dos elementos finitos. Para obter as isoclínicas, utilizaram a redução de carga, que é pouco aconselhável, devido a introduzir ligeiros desalinhamentos que alteram as condições de carregamento em relação à

situação em que são obtidas as isocromáticas. Os autores referem que a única falha do sistema é a ausência de um processo de ordenar automaticamente as franjas. A isto talvez se acrescentasse o facto de o processo de obter as franjas continuar a ser a erosão, que como já dissemos desperdiça informação que poderia ser utilizada com vantagens.

Uma nova abordagem da automatização da fotoelasticidade foi proposta por Voloshin e Burger [11]: a utilização de meia franja como desfaseamento máximo. As vantagens do método é que nesta situação ter-se-á uma variação monótona da intensidade, e os materiais utilizados podem ser de baixa sensibilidade. Após a calibração do sistema, muito importante neste caso, podem ser adquiridas as imagens de polariscópio circular para posterior processamento. Estas imagens revelam uma qualidade bastante fraca, talvez devido à baixa sensibilidade dos materiais utilizados, não permitindo retirar a informação de todo o campo de imagem. A grande vantagem do método é sem dúvida a possibilidade de utilizar praticamente qualquer tipo de material, desde que transparente, incluindo-se nestes o vidro e plásticos vulgares.

Redner [13] propôs um método baseado na análise espectral da luz utilizada, com vários comprimentos de onda. Para tal utilizou um polariscópio circular em conjunto com uma placa de fotodíodos que permitiam recolher a informação correspondente aos diversos comprimentos de onda. O principal inconveniente do método é ser pontual, permitindo apenas registar a informação de um ponto de cada vez. O próprio autor refere outro inconveniente, o de não ser possível com este processo determinar as direcções principais de tensão.

Hecker e Morche [14] utilizando um polariscópio circular, no qual era permitido rodar independentemente o analisador e o segundo quarto de onda, e baseados nas equações da intensidade luminosa, deduziram expressões que permitiam utilizar toda a informação contida nas imagens. Com três imagens obtidas na configuração de polariscópio plano poderiam obter as direcções principais. A partir de cinco imagens obtidas com configurações pouco usuais do polariscópio circular, possíveis graças à particularidade já referida, obtinham o desfaseamento angular que é relacionável com a diferença das duas tensões principais. O sistema era parcialmente automatizado recorrendo ao uso de um sistema de processamento de imagem integrado no computador utilizado. Segundo os autores o sistema não dispunha de grande precisão e em [14] a obtenção das direcções não chegou a ser explorado.

Chen e Taylor [15] apresentaram um método generalizado de tratamento de franjas de interferência, que abrangia a fotoelasticidade, a interferometria holográfica e a interferometria speckle (granitado laser). Torna-se óbvio que um método geral não pode tirar vantagens das características e particularidades das imagens obtidas em cada um dos campos de análise experimental de tensões. O processo de extrair informação dos padrões de franjas foi mais uma vez a erosão. Após a transformação da imagem em dois níveis de intensidade, as franjas são sujeitas ao processo de erosão até se tornarem em linhas. O algoritmo de erosão é algo imperfeito, pois na imagem final

surgem ramificações indesejáveis que deveriam ser eliminadas. Tentaram ainda automatizar a ordenação das franjas, mas tal processo exige a intervenção do utilizador. Mesmo no caso de se utilizar dois comprimentos de onda diferentes o processo introduz alguns erros que é necessário corrigir, antes de todo o processo continuar. Na análise fotoelástica feita, só foi utilizada a imagem correspondente ao polariscópio circular em campo escuro, o que comprova o que se disse inicialmente.

Umezaki et. al. [16] sugeriram que as técnicas de erosão até então usadas, não conduziam a resultados precisos. Para resolver tal limitação propuseram um método de detecção dos centros das franjas por análise de mínimos locais nas imagens. Utilizando uma matriz de 5x5 pontos, na qual eram analisadas oito direcções, o ponto central é classificado como mínimo ou não, após a análise de determinadas condições padrão. É sem dúvida um método mais rápido que a erosão, contudo se a imagem tiver muito ruído, o seu tratamento torna-se algo complicado. Para determinar a ordem das franjas utilizaram luz com dois comprimentos de onda diferentes, que permite identificá-las por comparação. Quanto à determinação das tensões foi referida a acumulação de erros que caracteriza o "shear-difference method". Seguindo a sugestão de Berghaus [17] utilizaram para aquele fim o método dos mínimos quadrados, usando as equações de equilíbrio, condições fronteira, equilíbrio de momentos e obviamente os dados experimentais (isoclínicas e isocromáticas). Foi ainda desenvolvido um programa que permitia desenhar as linhas isostáticas (representação gráfica das direcções principais) a partir das isoclínicas.

Convém referir também o trabalho de quem optou pela via totalmente experimental da obtenção das tensões em problemas planos. Como é evidente, a determinação das duas tensões principais e das respectivas direcções necessita de mais qualquer coisa além das isocromáticas e isoclínicas. Essa lacuna pode ser preenchida pelas franjas designadas de "isopachics", das quais é possível obter a soma das tensões principais, $\sigma_1 + \sigma_2$. Estas franjas exigem a utilização dum outro tipo de interferómetro que permita detectar as variações de espessura no modelo fotoelástico, no caso do estado plano de tensão, a deformação segundo a espessura é proporcional àquela soma. Para obter as "isopachics" é necessário recorrer à interferometria holográfica, daí o nome dado a esta técnica: holo-fotoelasticidade. Brown e Sullivan [19] baseados em trabalhos de Post, Fournery, Hovanesian, Holloway e Ajovalasit, adicionaram o processamento de imagem à holo-fotoelasticidade. Na obtenção do desfasamento angular foi utilizada a técnica da meia franja, introduzida por Voloshin [11]. Há que referir, como comentário final, que o equipamento utilizado além de dispendioso, exige posicionamento cuidadoso. Por este motivo a técnica não tem sido muito explorada, é contudo um caminho bem sucedido na resolução completa dos problemas planos pela via exclusivamente experimental.

Yao [20, 21] dedicou-se a um problema mais específico, o de extrair as isoclínicas das imagens de polariscópio plano, usando o processamento de imagem. Para tal apresentou uma sequência de métodos, que mais não são do que melhoramentos sucessivos dos anteriores. O primeiro, método da

divisão de imagens ("IDV"), consistia em efectuar a divisão a imagem do polariscópio plano pela do circular, em campo escuro, divisão esta feita ponto a ponto. O método da diferenciação das imagens ("IDF"), aproxima a derivada em ordem ao ângulo que define uma das direcções principais por subtracção de duas imagens de polariscópio plano muito próximas. Neste caso as isocromáticas continuam, presentes, mas o contraste das isoclínicas aumenta. A combinação dos dois métodos resulta no método da diferenciação e divisão ("IDD"), que consiste em aplicar o método "IDV" após a aplicação do "IDF". Este método tem no entanto problemas, se o incremento utilizado para simular a derivada for pequeno, as isoclínicas aparecem muito esbatidas, à medida que se aumenta aquele incremento as franjas tornam-se mais nítidas, mas o erro cometido na aproximação aumenta. Por outro lado o número de imagens necessárias à obtenção de várias isoclínicas é elevado, o que complica bastante o processo.

Na nona Conferência Internacional de Mecânica Experimental, 1990, foram apresentados alguns dos trabalhos mais recentes no campo do processamento de imagem aplicado à análise experimental de tensões, de seguida serão abordados aqueles que têm o âmbito deste trabalho.

Pancewicz [22] usou um algoritmo de detecção de mínimos idêntico ao de Umezaki et. al. [16], ou seja, numa matrix 5x5 são analisadas oito direcções e em função dos padrões encontrados, o ponto central é ou não classificado como mínimo. Como se trata de um algoritmo geral, tem uma parte dedicada à restauração das imagens baseada em dados estatísticos recolhidos das próprias imagens. A detecção de mínimos tem também um tratamento estatístico que permite determinar a probabilidade de um ponto ser um mínimo pela análise dos seus vizinhos. Apesar de todas as análises estatísticas, é necessária uma fase final de regeneração das franjas que aparecem frequentemente cortadas.

Kihara [23] utilizou um polariscópio algo diferente do usual. A fonte luminosa é um laser de argon ao que se seguia um polarizador plano, cuja posição é controlada por um computador. Trata-se portanto de um polariscópio que utiliza luz polarizada plana com a orientação que se quiser. Segue-se um difusor destinado à abertura do feixe do laser. Após o modelo fotoelástico aparecem uma placa quarto de onda e um polarizador plano (analisador), ambos controlados pelo computador já referido. Finalmente existe uma câmara "CCD", que permite adquirir as imagens. Para obter a diferença de fase são armazenadas quatro imagens obtidas com uma determinada orientação do polarizador, a que se juntam outras quatro, obtidas com o polarizador rodado de 45° em relação à posição anterior. A partir das equações deduzidas para o polariscópio utilizado, as imagens armazenadas permitem então obter o desfasamento. Com quatro das imagens anteriores as direcções principais podem também ser obtidas. Os resultados apresentados para o desfasamento angular são muito bons, contudo as direcções principais ficam mal definidas em determinadas regiões. Parece que o propósito de utilizar luz polarizada plana será o de colocar o equipamento ao alcance de mais bolsas, o que é contrariado pelo restante material utilizado.

Tsuji et. al. [24] optaram também pela utilização de um laser, de Hélio-Neon, como fonte iluminação. A aquisição da informação é pontual, isto é, analisa-se um ponto de cada vez, sendo usado um polariscópio circular comum. Para a localização do ponto a analisar existe um sistema constituído por um posicionador xy (para o laser) e uma mesa xy dotada de um fotodíodo que recebe o feixe proveniente do polariscópio. O posicionador e a mesa são controlados através do computador do sistema. Para a obtenção do desfasamento angular são utilizadas as configurações de polariscópio circular em campo escuro e campo iluminado, sendo isto possível graças ao conhecimento do valor de disparo do fotodíodo. A obtenção das isoclínicas é feita utilizando a configuração de polariscópio plano em duas posições diferindo angularmente de 45° . Para evitar ambiguidades na determinação do desfasamento, a carga utilizada é pequena. As tensões são obtidas recorrendo ao "shear-difference method". Apesar do método ser pontual, a velocidade de aquisição é suficientemente elevada para tornar viável a análise de uma determinada área.

Mawatari et. al. [25, 26] implementaram, explorando as equações do polariscópio plano, um método bastante elaborado que com quatro imagens de polariscópio plano permite a obtenção das direcções principais. A partir de duas imagens do polariscópio plano, com uma rotação relativa de 45° , que são posteriormente adicionadas, obtêm uma imagem equivalente à do polariscópio circular em campo escuro (veja-se 6.2.2.1). Baseados nesta imagem, e utilizando um processo de análise matemática algo complexo, obtêm então o desfasamento angular. O método consiste em analisar a imagem segundo as direcções x e y, independentemente, fazendo depois uma comparação, de modo a eliminar possíveis erros relativos a cada uma das situações. A imagem obtida com o polariscópio plano é mais fiável que a equivalente no circular, uma vez que as placas quarto de onda são de um modo geral imperfeitas, introduzindo erros nas medições efectuadas (elipticidade). Contudo, as imagens obtidas em polariscópio circular contêm informação preciosa que, quanto a nós, deveria ser utilizada de modo a eliminar algumas ambiguidades resolvidas no presente caso por análise matemática, talvez não da melhor forma.

CAPÍTULO 4

EQUIPAMENTO E "SOFTWARE"

4.1 EQUIPAMENTO

O sistema de processamento utilizado pode ver-se nas fig.s 4.1. Começando pelo componente inicial, o polariscópio, que dispõe de uma fonte de luz branca (ordinária) que após atravessar o conjunto constituído pelo polarizador e o primeiro quarto de onda se transforma em luz polarizada plana ou circular (só para um dos comprimentos de onda). O polariscópio possui um mecanismo de regulação das placas quarto de onda que permite gerar luz polarizada plana (um dos eixos principais da placa é paralelo ao eixo do polarizador) ou luz polarizada circular (um dos eixos da placa faz 45° com o eixo do polarizador). Seguidamente existe um mecanismo de carregamento do modelo fotoelástico, provido de uma célula de carga com quatro extensómetros ligados em ponte de "Wheatstone". O valor do desequilíbrio da ponte pode ser lido num visor, sob a forma de deformação, existente no aparelho que contém a ponte de medida. Na trajectória da luz aparecem de seguida a segunda placa quarto de onda, com o eixo lento paralelo ao eixo rápido da primeira, e o segundo polarizador plano (analisador) que pode ter a orientação que se desejar.

As fig.s 4.2 e 4.3 resumem os tipos de configuração que podem existir no polariscópio utilizado. Na configuração de polariscópio plano, a rotação conjunta de todos os elementos permite alterar as franjas isoclínicas visíveis. Na configuração de polariscópio circular, a rotação independente do analisador permite obter as situações de campo escuro ($\gamma=0^\circ$), campo iluminado ($\gamma=90^\circ$) e outras que seja de interesse obter.

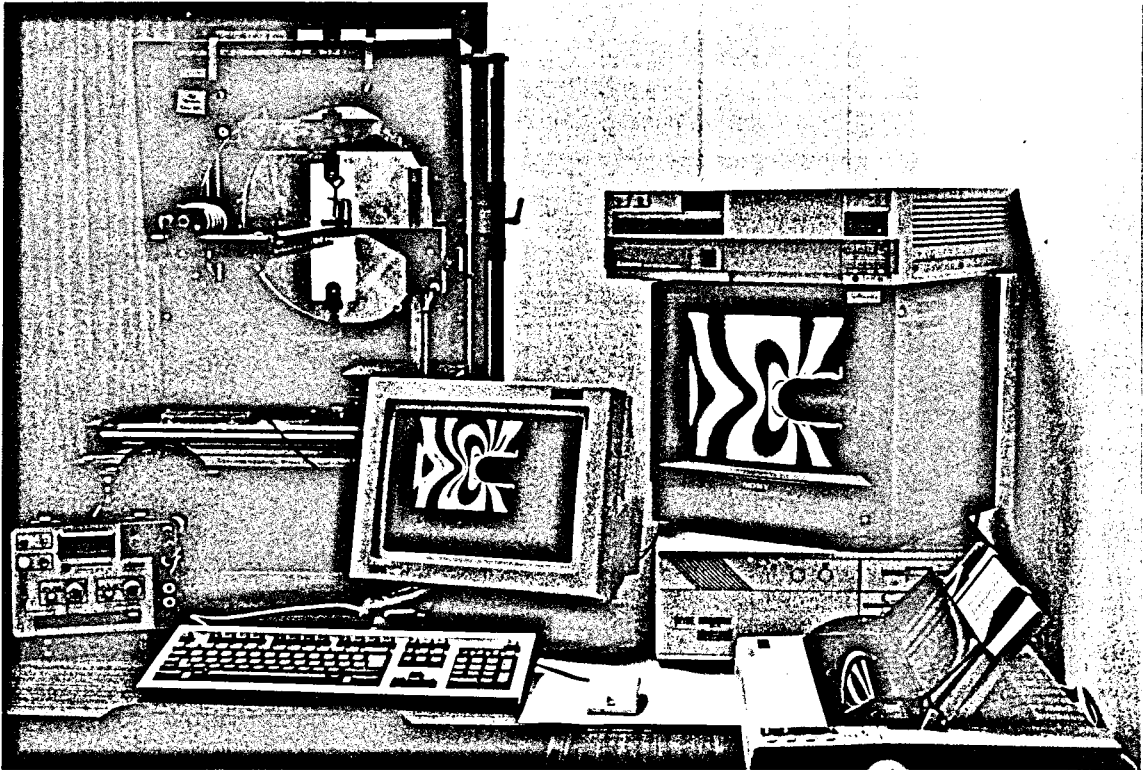


fig. 4.1 a) Foto do sistema de processamento de imagem aplicado à fotoelasticidade.

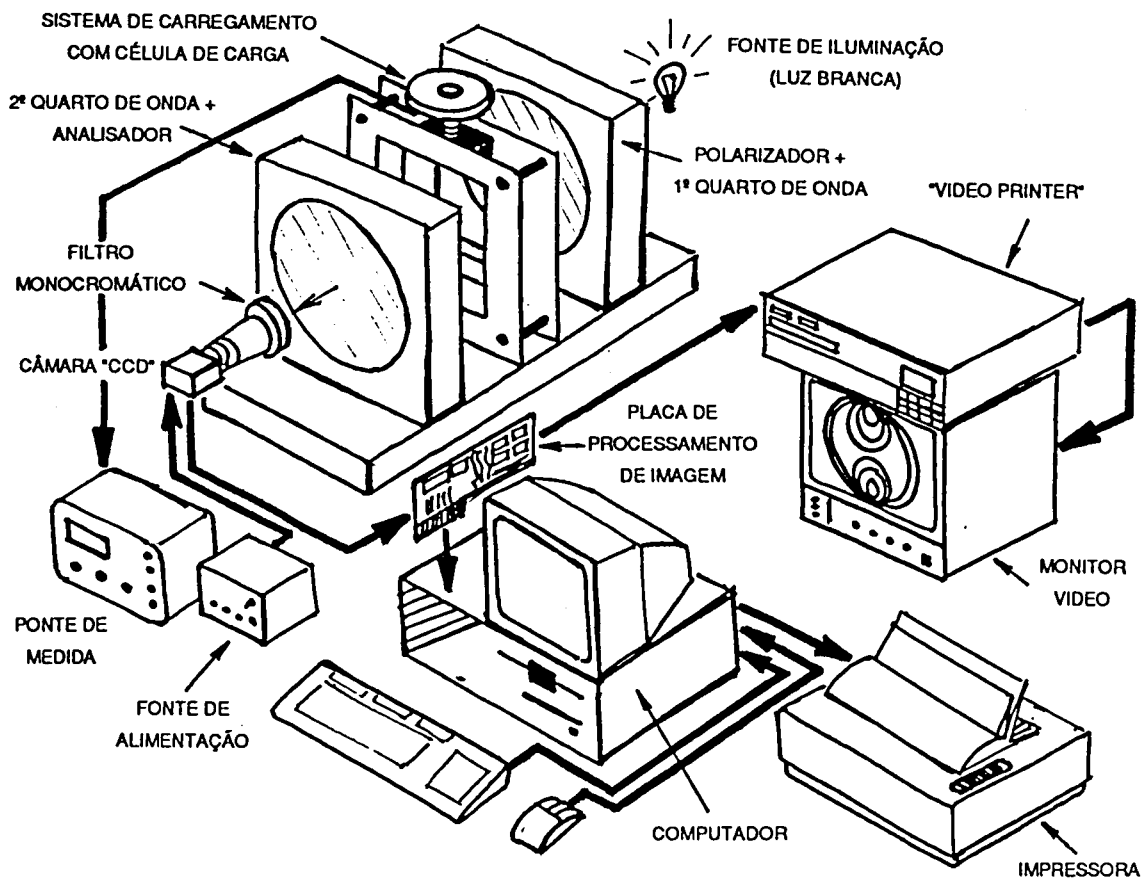


fig. 4.1 b) Esquema da disposição dos vários componentes do sistema.

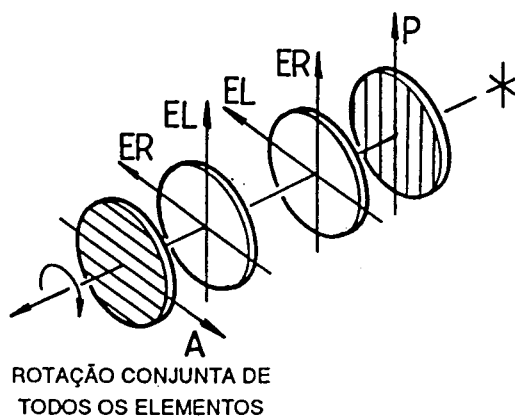


fig. 4.2 - Configuração de polariscópio plano.

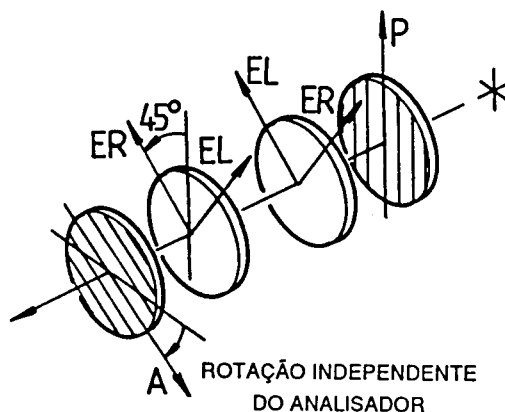


fig. 4.3 - Configuração de polariscópio circular.

A câmara "CCD" ("charge coupled device") tem como função adquirir as imagens, e trata-se de uma câmara a preto e branco. Com o fim de se utilizar luz monocromática, é colocado um filtro monocromático que permite deixar passar exclusivamente luz com o comprimento de onda em que a luz é polarizada circularmente. A câmara está dotada de uma lente "zoom" que possibilita a ampliação da imagem obtida. A corrente necessária ao funcionamento da câmara é fornecida por uma fonte de alimentação de corrente contínua de 12 Volt. A câmara transmite o sinal video a uma placa de processamento de imagem, "tipo PC", hospedada no computador do sistema. A placa de processamento possui memória própria, que permite o armazenamento simultaneo de duas imagens. A ligação da placa ao barramento do computador permite o controle das operações através daquele. A placa inclui ainda uma saída vídeo, que possibilita a visualização da imagem, recebida ou em memória, num monitor colorido ("RGB"). Existe também a possibilidade de introduzir, entre a placa e o monitor de vídeo, um "vídeo printer" que pode reproduzir a imagem visualizada no monitor.

Finalmente temos o "cérebro" do sistema de processamento de imagem, o computador (PC compatível) dotado de disco rígido e coprocessador matemático. Além da caixa que contém os componentes principais, existe um teclado, um monitor "VGA", e um "rato". O software utilizado foi implementado neste computador, usando contudo rotinas básicas adquiridas juntamente com a placa de processamento de imagem. Como periférico adicional, existe uma impressora que além de permitir o registo de resultados, foi programada de modo a poder imprimir imagens de baixa definição.

4.2 "SOFTWARE"

Como já foi referido, as rotinas base que permitem comunicar com a placa de processamento de imagem são fornecidas pelo fabricante, dentre estas incluem-se a aquisição de uma imagem, mudança de imagem, armazenar imagens em disco, colocar imagens na memória da placa, escrever texto, seleccionar as tabelas de entrada e saída ("input/output look-up tables"), manipulação dessas tabelas, obtenção de dados para construção de histogramas, obtenção de áreas de imagem e algumas outras funções. Contudo estas rotinas não se encontram numa forma "amigável" de

utilização, por isso há necessidade de criar programas que as utilizem e permitam o diálogo com o utilizador.

Todo este trabalho de utilização das rotinas básicas, bem como o desenvolvimento de outros programas importantes para o pré e pós-processamento das imagens foi feita no computador do sistema. Como linguagem de programação foi utilizada o "C", muito utilizada actualmente devido à sua versatilidade e poder de manipulação do sistema operativo do computador.

Pelo facto de não serem parte integrante deste trabalho, alguns programas poderiam ficar esquecidos, por isso uma breve referência será dada de seguida. Todo o "software" de processamento de imagem foi reunido num programa gerido por um sistema de menus, que permite a escolha de um modo intuitivo, por parte do utilizador, daquilo que pretende fazer.

Dentre as rotinas implementadas, inclui-se uma que permite adquirir imagens, com possibilidade de executar a média entre várias aquisições, com a finalidade de eliminar o ruído proveniente da fonte de iluminação.

Duas outras rotinas permitem armazenar ou recuperar imagens das unidades de disco, rígido ou flexível, permitindo definir uma janela para adquirir uma área mais reduzida, alterar a resolução da imagem ou mesmo o número de "bits" utilizados por cada ponto ("pixel").

Inclui-se também uma rotina que permite fazer uma ampliação ("zoom") de uma determinada zona da imagem global, com possibilidade de filtragem das altas frequências. A rotina permite a colocação da imagem ampliada em qualquer local do "ecran", sendo o local escolhido com o auxílio do "rato". Outra rotina permite efectuar a operação inversa, ou seja obter uma redução da imagem, para tal é calculada a intensidade média dos vários pontos que na transformação se vão fundir num só. O posicionamento da nova imagem é permitido, também neste caso. Na fig. 4.4 pode ver-se um exemplo da utilização destas rotinas.

Existe uma rotina que permite executar operações aritméticas e lógicas entre as imagens. Dentre estas operações, incluem-se a soma, a subtracção, o "E" lógico, o "OU" lógico e o "OU" exclusivo. Pode ainda fazer-se a troca de imagens entre os dois "buffers" (bancos de memória) da placa de processamento, e ainda a operação de "feedback", que consiste em transformar uma imagem já adquirida, fazendo-a passar por uma determinada tabela de entrada ("ILUT"), colocando os novos valores da intensidade em memória.

Outra rotina permite escrever comentários directamente sobre a imagem, sendo o posicionamento controlado pelo dispositivo de apontar ("rato"). É permitida a escolha da intensidade dos caracteres, bem como a utilização de um fundo para maior nitidez do texto. Esta rotina utiliza também uma das rotinas fornecidas com a placa de processamento.

Três rotinas de edição são também incluídas, com as quais se podem alterar directamente os valores da intensidade dos pontos. Estas encontram utilização, por exemplo, na obtenção de máscaras, que permitem definir a área de interesse (modelo fotoelástico) para a aplicação do processamento.

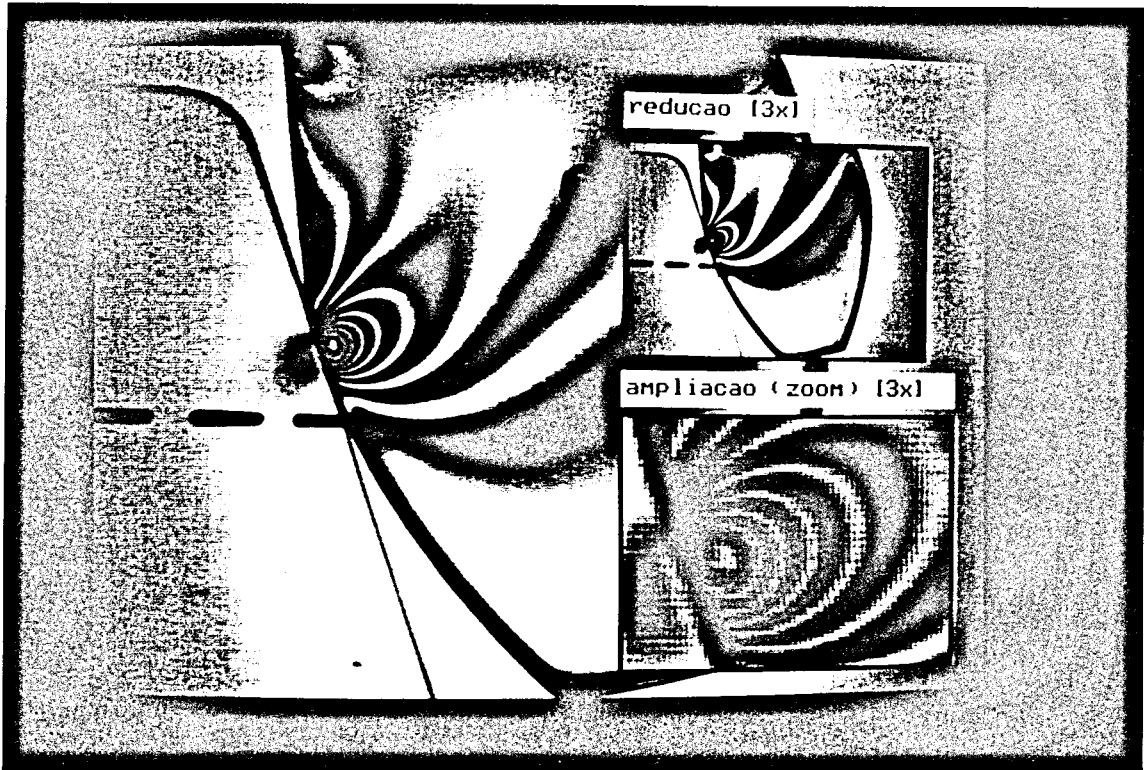


fig. 4.4 - Aplicação das rotinas de ampliação ("zoom") e redução.

Existe uma série de rotinas que permite escolher e visualizar (no monitor do computador) as tabelas de entrada e saída ("LUT's"). Convém referir que estas tabelas permitem fazer transformações dos valores da intensidade, que entram ou saem da placa de processamento de imagem, sendo por isso bastante úteis. Por exemplo, se a "LUT" de saída for invertida em relação à de entrada, fig. 4.5, a imagem obtida no monitor será o negativo da imagem adquirida. Existem sete "LUT's" de entrada e vinte e quatro de saída, 8x3 (vermelho, verde e azul: "RGB"), que se encontram pré-definidas, sendo no entanto possível alterá-las. Dentre as rotinas que manipulam as "LUT's", vamos referir de seguida as mais importantes.

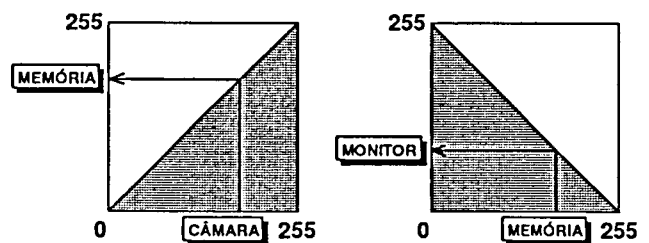


fig. 4.5 - "LUT's" de entrada e saída para obter o negativo duma imagem adquirida.

A rotina que permite alterar o brilho da imagem, controla as "LUT's" de saída (igual para as três cores) do modo indicado na fig. 4.6, isto é, translada a recta original paralelamente, por conseguinte a recta tem sempre um declive unitário. Tudo é feito de um modo interactivo, com o auxílio do "rato". É evidente que para grandes aumentos ou diminuições de brilho, o número de níveis de intensidade diminui, perdendo-se qualidade na imagem.

A rotina de contraste permite, como o seu nome indica, maximizar o contraste da imagem, para isso são determinados os valores máximo e mínimo de intensidade que ocorrem na imagem, e para esta gama é utilizada na saída a gama total (0-255), fig. 4.6. Existe a possibilidade de alterar estes valores de forma a fazer pequenos ajustes.

A rotina de equalização do histograma é outro processo de aumentar o contraste da imagem. Baseia-se na tentativa de que todos os valores de intensidade tenham a mesma probabilidade de ocorrência (tentativa, porque é praticamente impossível que tal aconteça). Frequentemente este tipo de transformação opera autênticos milagres em imagens mal definidas, outras vezes a rotina de contraste é mais eficiente. São operações que requerem uma certa experiência para se conseguirem os melhores resultados.

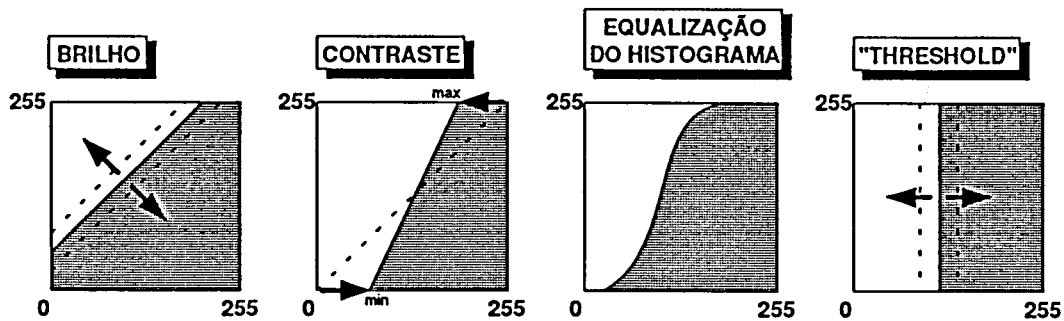


fig. 4.6 - Forma das "LUT's" utilizadas pelas rotinas desenvolvidas.

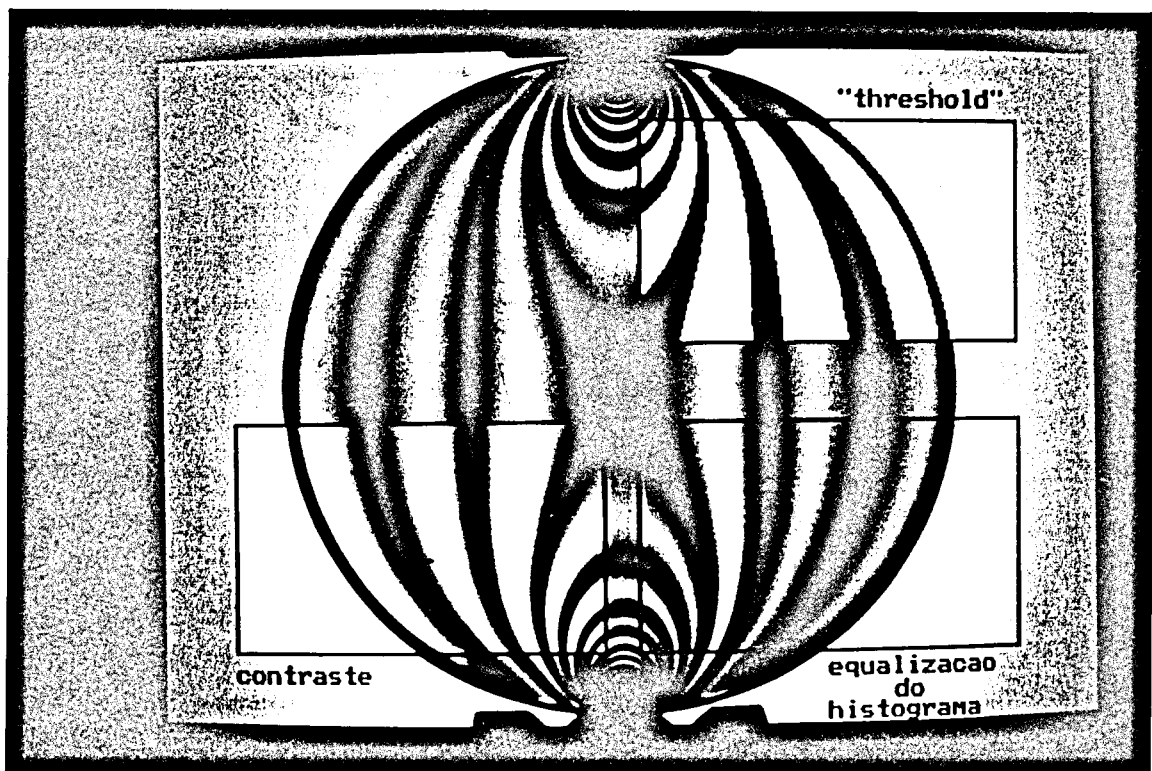


fig. 4.7 - Utilização de algumas rotinas que manipulam as "LUT's".

A rotina de "threshold" (binarização do nível de saída) encontra larga aplicação em processos que façam a determinação de centros de franjas, como se verá no capítulo 5. O que esta rotina faz é, a partir de um valor definido pelo utilizador, coloca todos os pontos com intensidade superior no valor máximo (255) e todos os inferiores no valor mínimo (0). Todo o processo é interactivo com o auxílio do "rato", permitindo portanto um ajuste fino.

Na fig. 4.7 pode ver-se a utilização de algumas das rotinas descritas.

Uma variante da rotina anterior é utilizada para visualizar os pontos que têm uma determinada intensidade. A amplitude de níveis abrangidos pode ser ajustada com o "rato" e a zona pretendida pode ser escolhida do mesmo modo. Uma utilização para esta rotina é a de visualizar a evolução das franjas numa dada imagem. A "LUT" típica desta rotina pode ver-se na fig. 4.8.

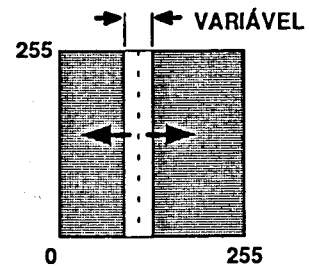


fig. 4.8 - "LUT" para visualização de pontos com uma dada gama de intensidades.

Como já dissemos, existem conjuntos de três "LUT's" de saída, uma para o vermelho, outra para o verde e mais uma para o azul. As operações descritas anteriormente alteravam as três "LUT's" do mesmo modo, criando portanto imagens a preto e branco. Se a modificação for independente, podem ser criadas imagens com cores falsas, que muitas das vezes tornam a imagem mais fácil de interpretar, por ser mais fácil a distinção entre os diversos níveis existentes.

Assim foi criada uma rotina que cria uma variação contínua de cor (espectro), desde o preto, passando pelo azul, anil, verde, amarelo, laranja, terminando no vermelho. Esta coloração permite distinguir mais claramente a variação da intensidade em toda a imagem do que no caso do preto e branco. As três "LUT's" modificadas para o efeito podem ver-se na fig. 4.9.

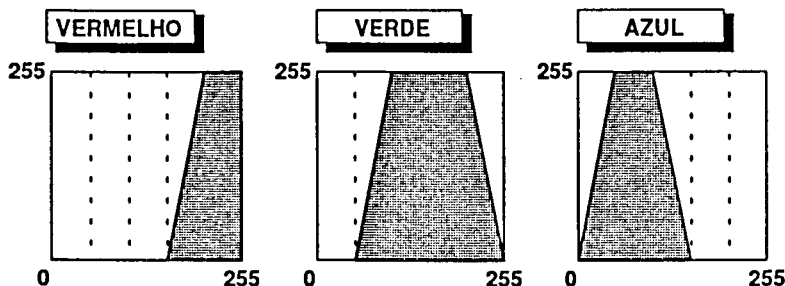


fig. 4.9 - "LUT's" utilizadas na rotina de cores falsas.

Existe uma variante da rotina anterior, que em vez de usar uma coloração esbatida, utiliza faixas de cor constante que abrangem a gama de níveis que se desejar. São dez as cores utilizadas, vão do azul ao vermelho, numa sequência semelhante à rotina anterior. A intensidade é constante para cada

conjunto de dez cores, aumentando quando se entra nas dez seguintes, isto é, as cores mantêm-se distinguindo-se pela intensidade (brilho).

Finalmente inclui-se uma rotina que permite criar imagens tridimensionais, estas podem ser vistas usando óculos providos de filtros, vermelho para o olho esquerdo e verde ou azul para o direito. As "LUT's" têm a aparência mostrada na fig. 4.11. A junção, no cérebro, das duas imagens obtidas de ângulos diferentes permite criar a sensação de tridimensionalidade. Como é evidente ao dividir os 8 "bits" em duas partes, fig. 4.10, uma para cada um dos ângulos de observação, o número de níveis de cinzento diminui para 16 (em vez dos 256 originais). Isto não impede a obtenção de imagens em que o efeito tridimensional é conseguido com bons resultados. Exemplos podem ser encontrados na capa deste trabalho e na fotografia do autor.

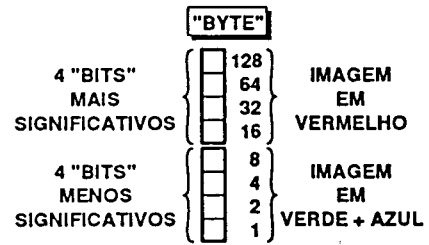


fig. 4.10 - Divisão dos bits para a junção de duas imagens.

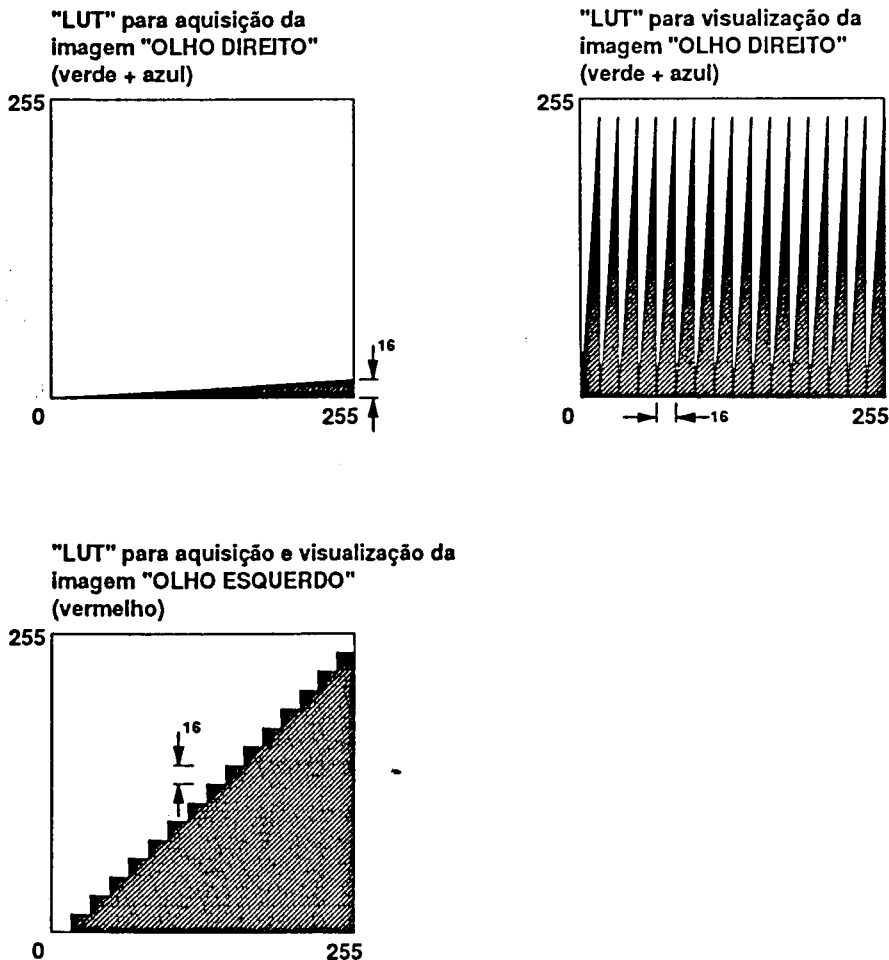


fig. 4.11 - "LUT's" utilizadas para obter imagens tridimensionais.

Para a análise prévia das imagens, incluem-se ainda outras rotinas. Existe uma que permite fazer uma análise estatística da imagem, consistindo na construção de um histograma dos níveis de intensidade existentes numa dada janela, definida pelo utilizador. É também apresentado o valor do nível médio da imagem. A utilidade desta rotina é evidente quando se pretende calibrar a câmara "CCD", de modo a impedir danos na imagem devidos a corte (nível inferior a 0) ou saturação (nível superior a 255).

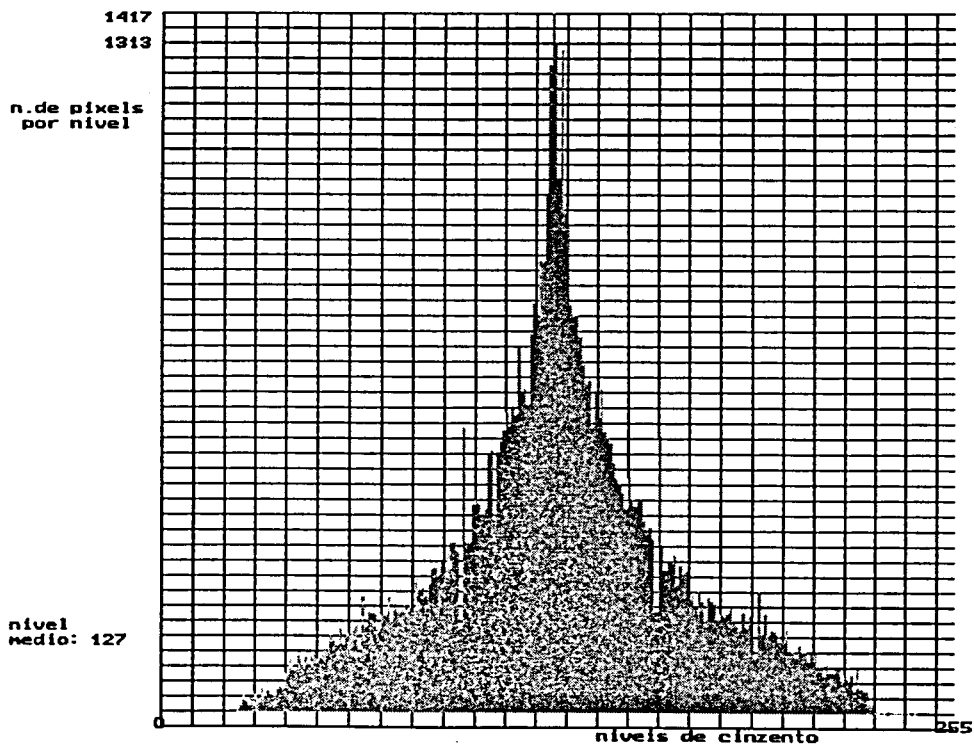


fig. 4.12 - Histograma de uma dada área definida numa imagem.

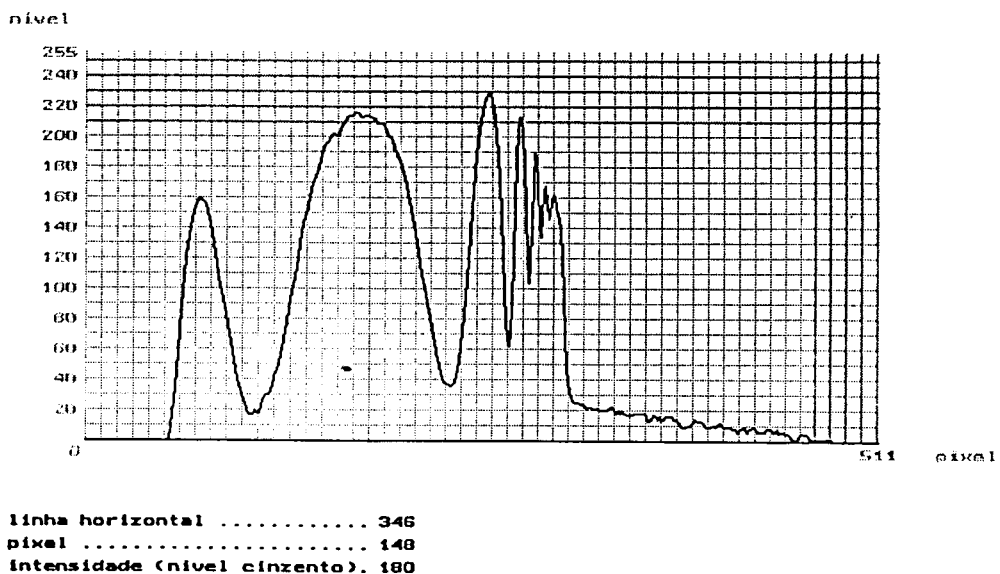


fig. 4.13 - Visualização da intensidade ao longo de uma linha horizontal.

Existem ainda duas rotinas que permitem visualizar os níveis de uma linha horizontal ou vertical, fig. 4.13, com a possibilidade de caminhar ao longo dessas linhas e visualizar a intensidade de um qualquer ponto. O processo é controlado com o auxílio do "rato".

Duas outras rotinas permitem transferir as imagens da placa de processamento para o monitor do computador ou então para a impressora. A segunda tem como utilidade, permitir a obtenção de imagens, com pouca definição, de uma forma mais rápida, para uma análise mais atenta do que no próprio monitor, fig. 4.14.

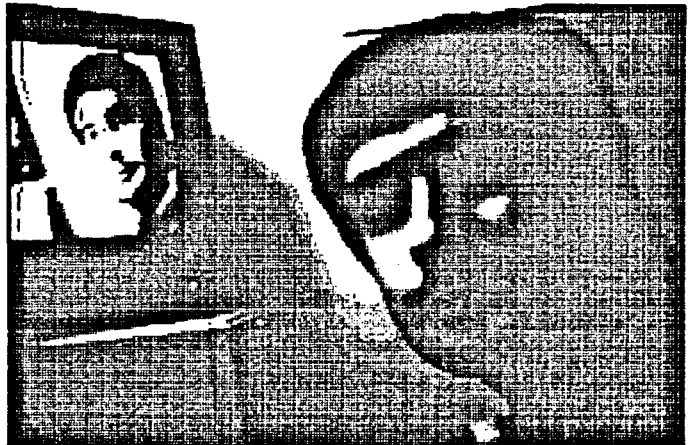


fig. 4.14 - Imagem de baixa definição obtida na impressora.

Por fim, refira-se a implementação de rotinas de filtragem de imagens. Estas encontram grande utilização quando o ruído luminoso ou electrónico é perceptível, ou quando há a necessidade de realçar contornos, por exemplo. Foram utilizados dois tipos de matrizes, 3x3 e 5x5, com filtros pré-definidos:

- filtro passa-baixo (elimina as altas frequências)
- filtro passa-alto (elimina as baixas frequências)
- laplaciano (elimina as baixas frequências)
- filtro para realce de linhas verticais
- filtro para realce de linhas horizontais

As matrizes utilizadas, no caso da matriz 3x3, podem ver-se na fig. 4.15. O processo de filtragem é executado da seguinte forma, o ponto a filtrar (ponto central da matriz) é substituído pela soma algébrica dos produtos dos elementos da matriz pelos valores da intensidade dos pontos que tem a mesma distribuição espacial encontrada na matriz (convolução). Esta matriz percorre todos os pontos da janela definida pelo utilizador, para executar a filtragem.

	PASSA-BAIXO	PASSA-ALTO	LAPLACIANO	REALCE VERTICAL	REALCE HORIZONTAL																																													
$\frac{1}{9}$	<table><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	<table><tr><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td></tr><tr><td>-1</td><td>9</td><td>-1</td></tr><tr><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td></tr></table>	-1	-1	-1	-1	9	-1	-1	-1	-1	<table><tr><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td></tr><tr><td>-1</td><td>8</td><td>-1</td></tr><tr><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td></tr></table>	-1	-1	-1	-1	8	-1	-1	-1	-1	<table><tr><td>-1</td><td>2</td><td>-1</td></tr><tr><td>-1</td><td>2</td><td>-1</td></tr><tr><td>-1</td><td>2</td><td>-1</td></tr></table>	-1	2	-1	-1	2	-1	-1	2	-1	<table><tr><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td></tr><tr><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr><tr><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td></tr></table>	-1	-1	-1	2	2	2	-1	-1	-1
1	1	1																																																
1	1	1																																																
1	1	1																																																
-1	-1	-1																																																
-1	9	-1																																																
-1	-1	-1																																																
-1	-1	-1																																																
-1	8	-1																																																
-1	-1	-1																																																
-1	2	-1																																																
-1	2	-1																																																
-1	2	-1																																																
-1	-1	-1																																																
2	2	2																																																
-1	-1	-1																																																

fig. 4.15 - Matrizes 3x3 utilizadas na filtragem de imagens.

Além destes filtros pré-definidos existe a possibilidade de o utilizador definir os elementos da matriz, e por conseguinte definir qualquer tipo de filtro que se queira. Por exemplo um filtro que executasse a eliminação das altas frequências existentes em cada linha podia ser implementado na forma indicada na fig.4.16. Na fig.4.17 pode ver-se a aplicação de alguns dos algoritmos de filtragem aplicados a um caso concreto.

$\frac{1}{3}$	0	0	0
	1	1	1
	0	0	0

$\frac{1}{5}$	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0

fig. 4.16 - Exemplo de filtros destinados a eliminar as altas frequências existentes numa linha.

Algumas das técnicas utilizadas foram encontradas em bibliografia especificamente dedicada ao processamento de imagem [27, 28, 29, 30]. Contudo estas obras dedicam-se mais a técnicas de melhoramento, restauração, codificação (aliada à optimização do uso da memória) e segmentação (identificação de formas), assuntos que encontram pouca utilização em imagens como as utilizadas neste trabalho. Todavia, uma leitura atenta daquelas ajuda sempre na integração às técnicas do processamento de imagem. Pode-se dizer que grande parte das técnicas desenvolvidas resultaram fundamentalmente da experiência adquirida e das necessidades que um problema específico nos colocou.

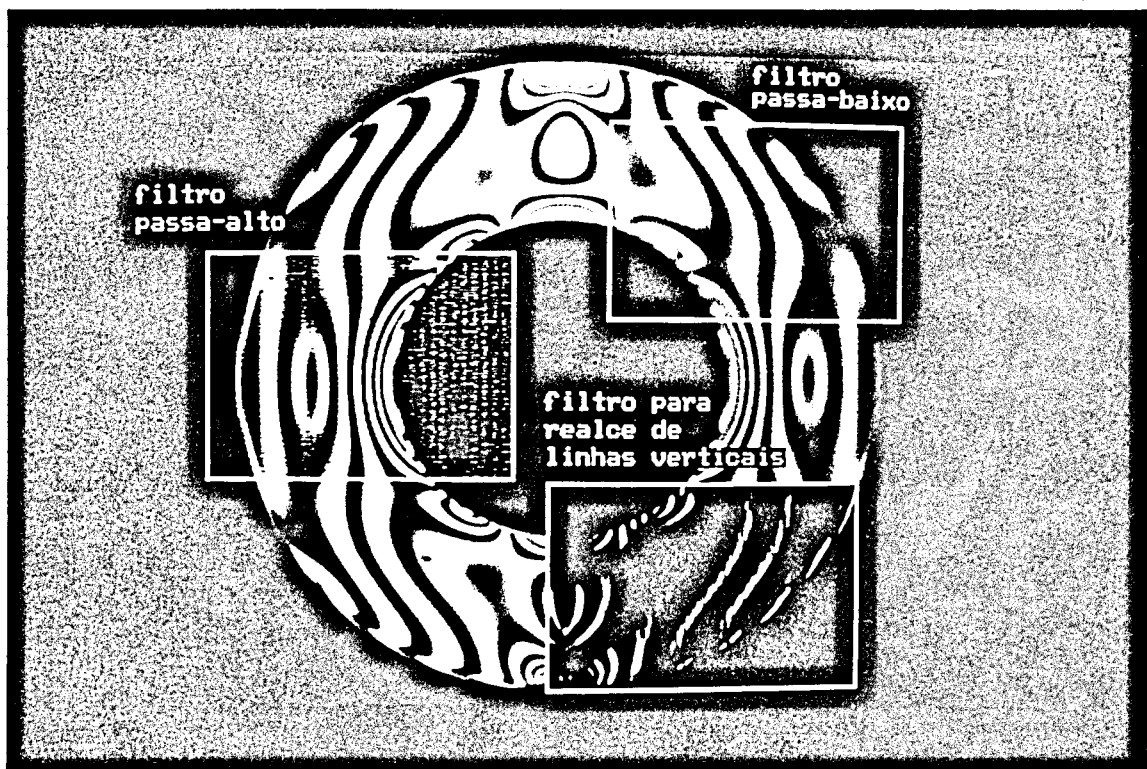


fig. 4.17 - Aplicação dos algoritmos de filtragem a uma imagem.

CAPÍTULO

5

MÉTODOS DISCRETOS DE ANÁLISE DE FRANJAS

5.1 INTRODUÇÃO

Por métodos discretos designam-se, neste trabalho, aqueles que apesar de pretenderem analisar uma área relativamente extensa da imagem, não utilizam toda a informação contida nessa área, mas somente as características mais relevantes (neste caso as franjas).

Estes métodos constituíram a parte inicial deste trabalho e uma forma que tende de algum modo a ser menos utilizada em fotoelasticidade, pelo facto de as imagens obtidas serem de boa qualidade, permitindo o seu tratamento integral. Contudo, continuam a encontrar uso em técnicas que originam imagens de menor qualidade (mais ruído) que necessitem de ser processadas, por exemplo em interferometria holográfica, "speckle" (ou "ESPI") e mesmo "moiré".

5.2 MÉTODOS DE EROSÃO POR ANÁLISE DE CONDIÇÕES PADRÃO

Os métodos aqui apresentados constituem uma modificação aos trabalhos efectuados por Chen e Taylor [15]. O motivo desta modificação reside no facto de o algoritmo apresentado por aqueles se revelar pouco "abrasivo", deixando frequentemente linhas que nada têm haver com as franjas propriamente ditas. Este efeito pode ver-se na fig. 5.5.

De referir que estes algoritmos fazem o tratamento a partir de uma imagem binária ("threshold") havendo, por conseguinte, necessidade de utilizar uma rotina que execute esta operação (capítulo 4).

5.2.1 VERSÃO 1

Após reduzir a imagem a dois níveis de intensidade, o processo de erosão é executado em quatro varrimentos distintos, isto para garantir a simetria do processo, fig. 5.1.

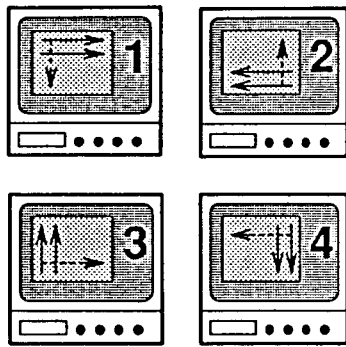


fig. 5.1 - Varrimentos efectuados no processo de erosão.

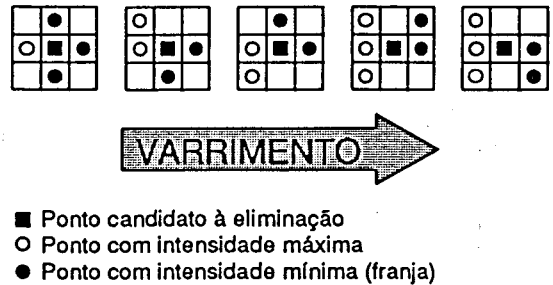


fig. 5.2 - Matrizes padrão que permitem estabelecer as condições de eliminação.

Em primeiro lugar é feito o varrimento de linha no sentido esquerda-direita (movimento principal). Terminada uma linha, regressa-se à esquerda da janela incrementando a linha de uma unidade (sentido descendente no monitor, movimento secundário). O processo repete-se até à última linha da janela definida. Segue-se o varrimento de linha no sentido direita-esquerda, com um movimento secundário da zona inferior para a superior. Posteriormente são feitos os varrimentos de coluna, o primeiro é feito no sentido parte superior-parte inferior (movimento principal) com um movimento secundário da direita para a esquerda, ou seja quando termina a análise de uma coluna avança-se para a coluna à esquerda. Finalmente é feito o varrimento de coluna da parte inferior para a parte superior, com uma movimento secundário no sentido esquerda-direita.

Para cada ponto analisado é considerada uma matriz de 3x3, cujo elemento central é o próprio ponto em análise. Em função do padrão existente na matriz é decidido se há ou não lugar à sua eliminação. Na fig. 5.2 podem ver-se as condições de eliminação correspondentes ao varrimento de linha da esquerda para a direita (só são indicados os pontos analisados, a situação dos outros é indiferente). Para os outros sentidos de varrimento as condições são idênticas, basta para tal orientar as matrizes segundo o sentido conveniente. O processo de erosão termina quando não existir mais nenhum ponto em condições de ser eliminado.

Falando agora das condições de eliminação, as três primeiras são idênticas às definidas por Chen e Taylor, tendo-se acrescentado as duas últimas com o propósito de eliminar o efeito desagradável referido anteriormente. Pode dizer-se que a maior parte das linhas parasitas

desaparece, contudo por vezes aparecem ainda algumas devidas a particularidades da imagem, o que levou à realização de modificações das condições originando a versão que se segue.

5.2.2 VERSÃO 2

Nesta versão o varrimento é basicamente igual ao anterior, com uma alteração apenas no que diz respeito às condições de eliminação. Assim, as duas últimas condições da versão 1 são substituídas pela sua intersecção, resultando na quarta condição apresentada na fig. 5.3.

Este algoritmo revelou-se mais eficiente que o anterior no que diz respeito à eliminação das linhas parasitas. Contudo, há casos que ainda não são resolvidos, como certas linhas cuja orientação é na diagonal. Para resolver este problema foi criada a versão 3, que será discutida de seguida. Um problema deste algoritmo, em relação ao anterior, é a eliminação de alguns pontos no início das franjas. A

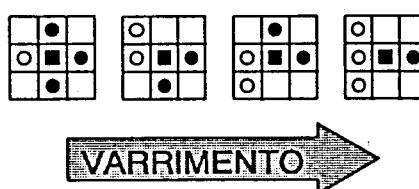


fig. 5.3 - Condições de eliminação da versão 2.

quarta condição elimina esses pontos (só no início das franjas) se as linhas que constituem as franjas forem horizontais ou verticais. No entanto, isto não é problemático, pois a franja não é totalmente eliminada, uma vez que não é vulgar existirem franjas completamente na horizontal ou na vertical.

5.2.3 VERSÃO 3

A versão 3 não é mais do que a versão 2 com duas novas condições, que pretendem eliminar as linhas parasitas que resistem às versões anteriores, fig. 5.5. A solução é no entanto uma solução de compromisso, motivo pelo qual se optou por considerar as três versões em separado, pois se há casos em que uma das versões é a mais adequada para tratar a imagem, outras há em que esta não o é. As objecções postas no caso da versão 2 são também aplicáveis neste caso, pois não só as franjas com início na horizontal ou na vertical mas também as que têm início na diagonal (relativa à matriz) são ligeiramente danificadas pelo processo de erosão. Além disso, as duas novas condições eliminam, por vezes, pontos a meio das franjas, problema que poderia ser resolvido com uma rotina que ao mesmo tempo que numerasse as franjas restaurasse as franjas nos locais danificados.

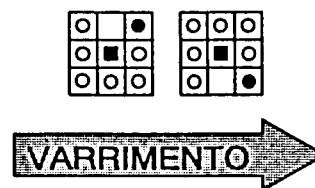


fig. 5.4 - Condições adicionais introduzidas na versão 3.

Como exemplo de aplicação, apresenta-se na fig. 5.5 uma comparação entre os métodos apresentados, bem como a comparação com o algoritmo de Chen e Taylor.

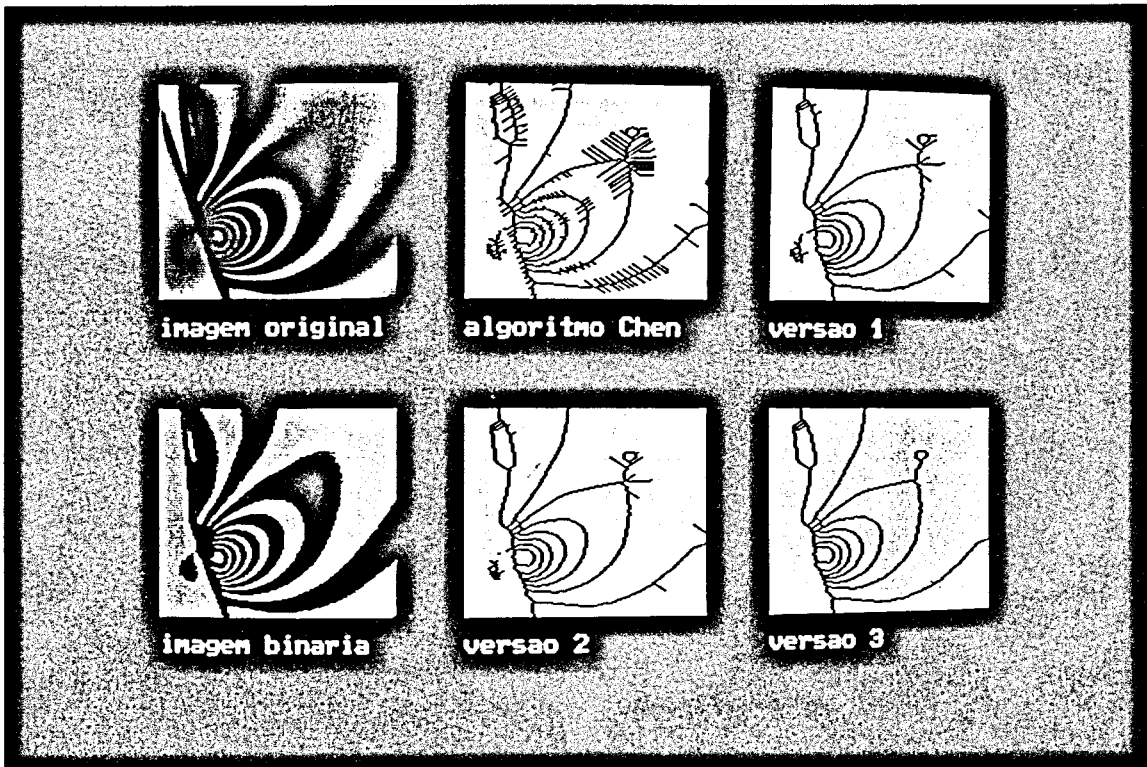


fig. 5.5 - Comparação entre os diversos algoritmos de erosão.

5.3 MÉTODOS DE EROÇÃO POR CONDIÇÕES DE LIGAÇÃO (VERSÃO 4)

Esta é outra abordagem possível ao processo de erosão, que geralmente fornece bons resultados se as imagens forem de boa qualidade. Seguchi et. al. [10] foram os primeiros a utilizar esta técnica. O processo utilizado por estes para definir o número de ligações é talvez, quanto a nós, algo ineficiente e por isso foi implementado um outro que será descrito mais à frente. Resumindo, a "essência" do método mantém-se, mas o modo de o implementar é novo, tanto no que diz respeito às condições de eliminação, como no processo de varrimento (Seguchi utiliza unicamente os varrimentos de linha).

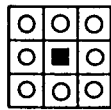
Em primeiro lugar a imagem deve ser transformada numa imagem binária (tal como em 5.2). O varrimento utiliza a mesma sequência que os métodos apresentados em 5.2, fig. 5.1. Consideremos agora a matriz 3x3, fig. 5.6, que vai servir para definir as condições de eliminação do seu ponto central. Se analisarmos o sentido de varrimento esquerda-direita, o ponto p_0 será eliminado se se verificarem simultaneamente as três condições:

p_4	p_3	p_2
p_5	p_0	p_1
p_6	p_7	p_8

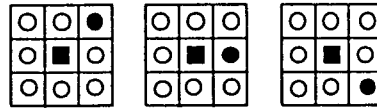
fig. 5.6 - Matriz 3x3 utilizada.

- i) $p_5 \neq 0$ e $p_0 = 0$
- ii) $N_l < 2$ (numero de ligações)
- iii) $\sum_{i=1}^8 \bar{p}_i \neq 1$

A primeira condição diz-nos que o ponto só é potencial de eliminação se p_5 não fizer parte de uma franja. A segunda condição permite a eliminação desde que o ponto em análise não seja ponto de continuação ou de junção de franjas ($N_l > 1$). O facto de se incluir $N_l = 0$ permite eliminar pontos isolados, fig. 5.7. A terceira condição impede que se eliminem as extremidades das franjas como nos casos da fig. 5.8. O significado da barra sobre p_i é o de negação lógica, assim quando p_i é máximo $\bar{p}_i = 0$, quando p_i é mínimo $\bar{p}_i = 1$ (franja).



$$N_l = 0$$



$$N_l = 1 ; \quad \sum_{i=1}^8 \bar{p}_i = 1$$

fig. 5.7 - Ponto isolado.

fig. 5.8 - Extremidades de franjas.

O número de ligações é obtido do seguinte modo, partindo do ponto p_1 são contados o número de ramos, pontos de intensidade mínima (frangas), que se ligam ao ponto em análise. Esta contagem é incrementada se os pontos não forem adjacentes aos que constituem a franja anterior. A definição de ponto adjacente pode ser feita de dois modos:

- i) Consideram-se adjacentes os pontos que estão encostados face com face.
- ii) Consideram-se adjacentes os pontos que estão ligados pelo menos por uma esquina (na diagonal). Neste caso (p_1, p_2, p_3) , (p_3, p_4, p_5) , (p_5, p_6, p_7) e (p_7, p_8, p_1) são conjuntos de pontos adjacentes.

Os dois critérios permitem chegar à mesma linha com a diferença de no caso i) esta ser menos espessa nas diagonais, fig. 5.9. Para esclarecer em definitivo a obtenção do número de ligações veja-se a aplicação dos dois critérios a alguns casos, fig. 5.10.

Resta referir que nos restantes três sentidos de varrimento as condições de eliminação ii) e iii) são idênticas, há só que ajustar convenientemente o ponto inicial da condição i) que será nos outros casos p_1 , p_3 , e p_7 , respectivamente à ordem estabelecida para os varrimentos. O processo terminará

quando não houver nenhum ponto em condições de ser eliminado, contudo, o utilizador pode interromper o processo quando o desejar.

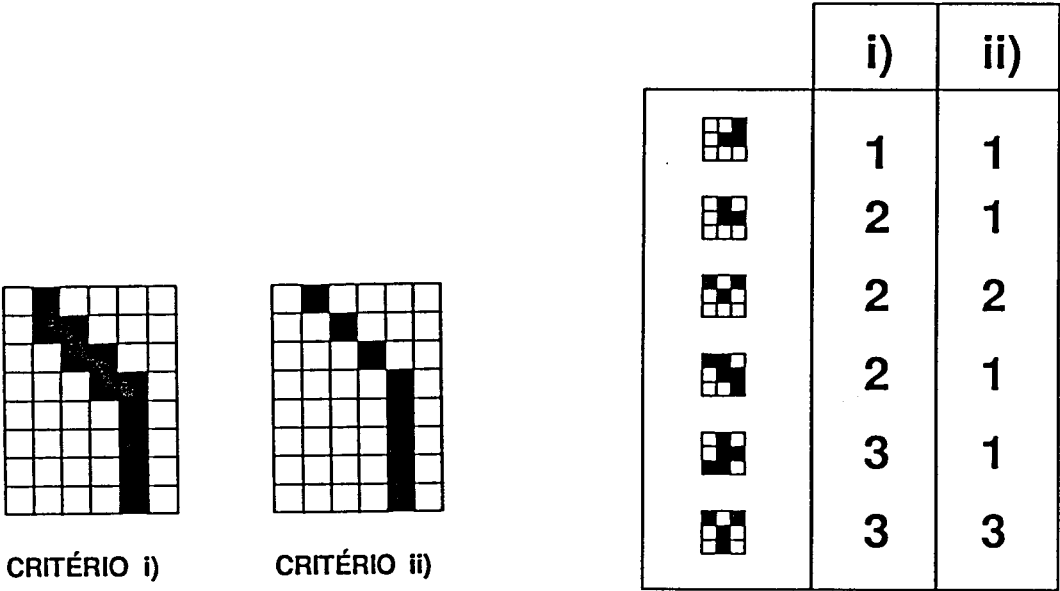


fig. 5.9 - Aplicação dos dois critérios de adjacência.

fig. 5.10 - Exemplos.

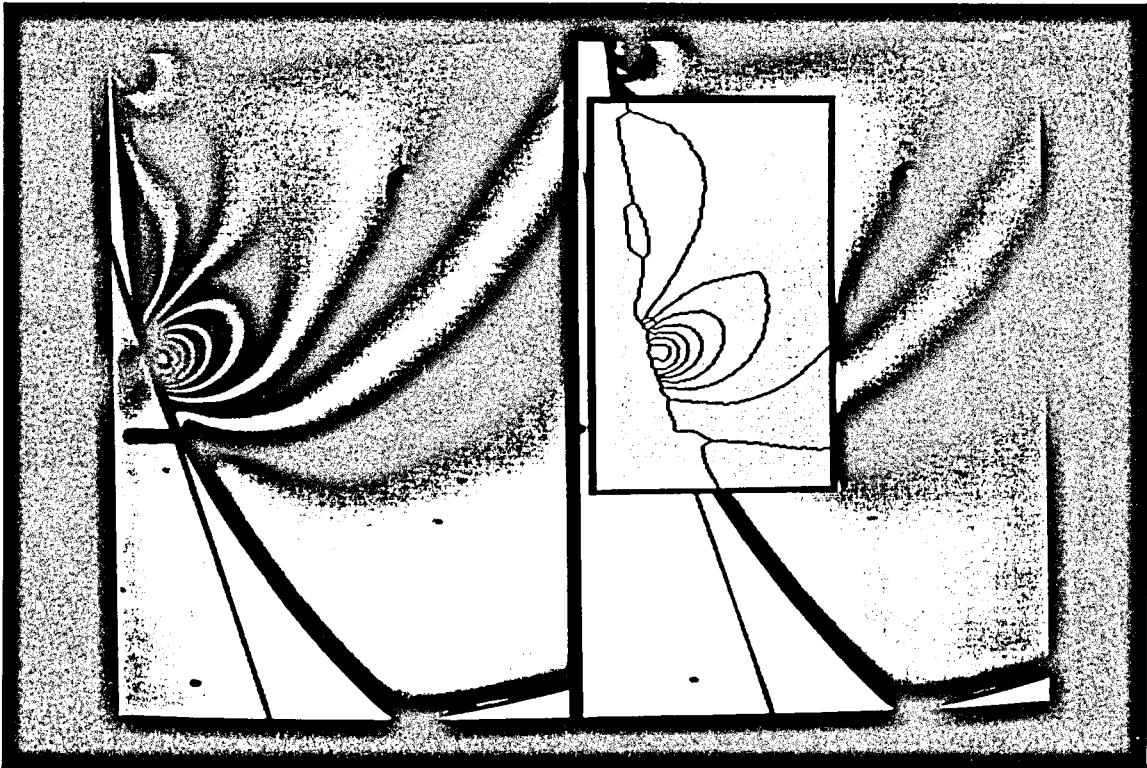


fig. 5.11 - Aplicação combinada de algoritmos de erosão.

Este processo de erosão permite eliminar alguns dos problemas existentes nos três anteriores, não sendo no entanto a solução de todos os problemas. O mais sensato será usar uma combinação dos quatro, conforme a situação em análise. Como exemplo, na fig. 5.11, mostra-se o processamento da imagem que serviu para comparar os três métodos anteriores com um tratamento que incluiu a utilização da versão 3 e posteriormente a versão agora apresentada.

5.4 MÉTODOS DE DETECÇÃO DE MÍNIMOS LOCAIS

Tanto os algoritmos apresentados em 5.2 como em 5.3 são grandes consumidores de tempo, para a obtenção do resultado final. Esse é o motivo pelo qual se procurou uma forma alternativa de resolver o problema. Umezaki et. al. [16] primeiro e Pancewicz [22] depois, utilizaram um método que funciona com base na detecção dos mínimos existentes numa imagem. Este método funciona quando a imagem tem pouco ruído. Caso contrário, há necessidade de recorrer a filtragens de modo a eliminar as altas frequências existentes na imagem, ou alternativamente poder-se-á recorrer a métodos estatísticos [22] para evitar determinados erros inerentes à má qualidade da imagem. Em fotoelasticidade as imagens são geralmente de boa qualidade, permitindo a utilização desta técnica com êxito. Refira-se ainda, que neste caso não há necessidade de binarizar a imagem, podendo-se utilizar directamente a imagem original se esta tiver qualidade suficiente. As imagens necessitam contudo de um pós-processamento, pois as franjas obtidas nunca têm a espessura mínima.

De seguida, são apresentados dois métodos que pertencem a esta família, um primeiro um tanto primitivo mas que fornece bons resultados nos casos para que foi concebido, e um segundo que é baseado nos trabalhos desenvolvidos por Umezaki e Pancewicz.

5.4.1 DETECÇÃO DE MÍNIMOS COM ORIENTAÇÃO PREFERENCIAL

Este algoritmo foi desenvolvido tendo em consideração que certas imagens de interferometria têm uma orientação preferencial das franjas. O seu funcionamento é, como consequência disto, muito satisfatório no caso em que as franjas têm tendência vertical, fig. 5.12. Apesar de ser esta a orientação preferencial com que foi desenvolvido, pode também processar franjas com tendência horizontal, basta para tal rodar a câmara de 90°.

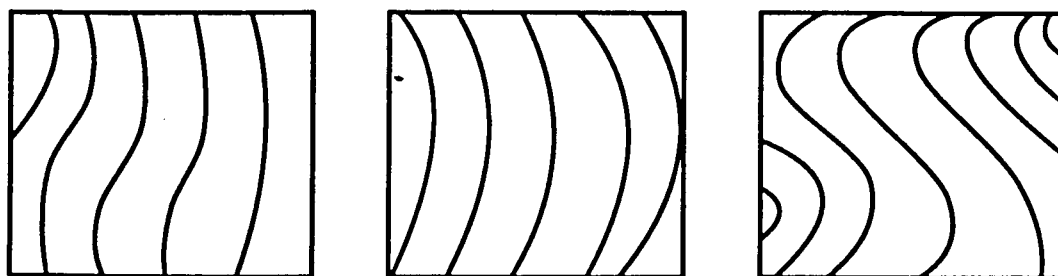


fig. 5.12 - Franjas com tendência vertical.

Como já foi dito por diversas vezes, as imagens obtidas em fotoelasticidade têm uma qualidade bastante boa, por isso se utilizou um só varrimento, esquerda-direita, que abrange a janela definida para análise, fig. 5.13. A análise é feita exclusivamente nos pontos da linha, detectando-se a condição de mínimo quando a intensidade inverte a sua tendência. Quando a intensidade começa a diminuir, uma variável ("flag") é colocada com o valor lógico verdadeiro, o que diz ao programa que logo que a intensidade aumente se acabou de passar num ponto que é um mínimo local. No caso de haver pontos consecutivos com a mesma intensidade, a localização do primeiro ponto nestas condições é armazenada e após se obter o último, a localização da franja é atribuída ao ponto central. No caso de após uma sequência de pontos com igual intensidade surgir um ponto com menor intensidade o processo continua sem dar lugar à classificação do ponto como mínimo. Após a detecção de um mínimo, a variável referida é posta com o valor lógico falso e só volta a ser verdadeira quando a intensidade for novamente decrescente, fig. 5.14.

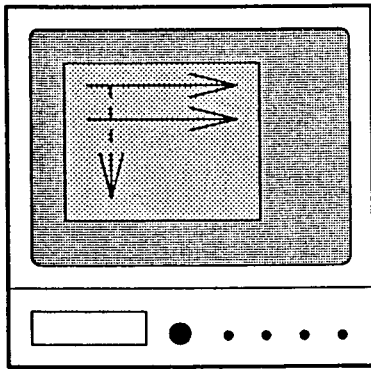


fig. 5.13 - Sequência do varrimento.

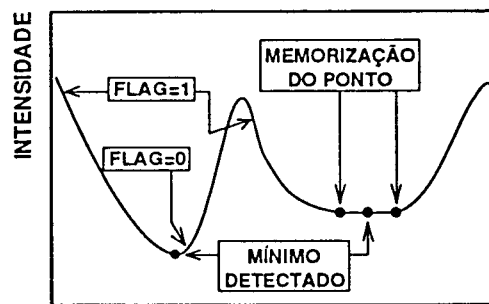


fig. 5.14 - Processo de detecção de mínimos relativos.

Na fig. 5.19 pode ver-se os resultados da aplicação deste algoritmo, e é imediato verificar que no caso de franjas verticais o resultado é melhor que o método apresentado seguidamente. Também se pode verificar a sua inadequação relativamente a franjas horizontais, onde o resultado é desastroso.

5.4.2 DETECÇÃO DE MÍNIMOS TESTANDO 8 DIRECÇÕES

Este processo de obtenção de mínimos é, como já dissemos, semelhante ao implementado por Umezaki et. al. [16]. O varrimento é feito de modo idêntico ao método anterior, fig. 5.13. O processo de classificação do ponto é baseado numa matriz 5x5, em que o ponto em análise é o seu ponto central, fig. 5.15.

Pode dizer-se que função do padrão de intensidades dos 24 pontos vizinhos, o ponto central é ou não classificado como mínimo. Para tal são consideradas 8 direcções segundo as quais o padrão de intensidades é avaliado, essas direcções são, fig.5.15:

direcção 1 :	$p_{18}, p_5,$	$p_0, p_1,$	p_{10}
direcção 2 :	$p_{19}, (p_5, p_6),$	$p_0, (p_1, p_2),$	p_{11}
direcção 3 :	$p_{20}, p_6,$	$p_0, p_2,$	p_{12}
direcção 4 :	$p_{21}, (p_6, p_7),$	$p_0, (p_3, p_2),$	p_{13}
direcção 5 :	$p_{22}, p_7,$	$p_0, p_3,$	p_{14}
direcção 6 :	$p_{23}, (p_7, p_8),$	$p_0, (p_4, p_3),$	p_{15}
direcção 7 :	$p_{24}, p_8,$	$p_0, p_4,$	p_{16}
direcção 8 :	$p_9, (p_1, p_8),$	$p_0, (p_4, p_5),$	p_{17}

em que o significado de (p_i, p_j) é que nesta situação se considera a média dos dois pontos entre parentesis. Para cada uma das 8 direcções é analisado o padrão de intensidades comparando-o com os padrões básicos definidos na fig. 5.16. Esta figura pretende dar simplesmente uma ideia da intensidade relativa entre pontos vizinhos, não sendo portanto níveis de intensidade rígidos. O ponto em análise é classificado de mínimo local se duas ou mais direcções tiverem um padrão de intensidades dentre os que são apresentados na fig. 5.16.

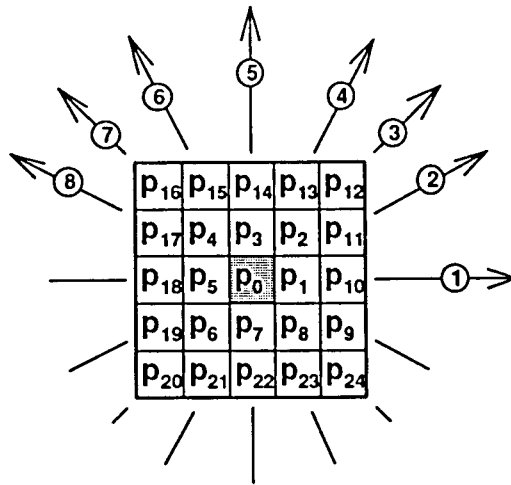


fig. 5.15 - Matriz utilizada para a detecção de mínimos e direcções de análise.



fig. 5.16 - Padrões básicos usados para a detecção de mínimos locais.

O conjunto de padrões utilizado é idêntico ao utilizado por Pancewicz [22], e foi escolhido depois de várias tentativas de afinação do algoritmo, nas quais se chegou à conclusão que este era o mais eficiente. Umezaki et. al. [16] em vez dos dois últimos padrões tem um padrão constante, fig. 5.17. Este padrão origina ruído nas zonas onde a intensidade atinge um máximo local, e por isso, não é aconselhável o seu uso, segundo o nosso ponto de vista.



fig. 5.17- Padrão usado em [16].

Como comentário final, saliente-se as vantagens deste método, que permite processar as franjas, qualquer que seja a sua orientação, com resultados que são bastante interessantes se previamente se usar uma filtragem, de modo a eliminar as altas frequências. Refira-se também que geralmente as imagens processadas por este algoritmo exigem uma depuração para reduzir as franjas a linhas. Um meio de o fazer é utilizar um algoritmo de erosão, sendo agora todo o processo muito mais rápido. Outro ponto importante que abona a favor desta técnica é que quando uma franja não é simétrica, fig. 5.18., este algoritmo consegue ser mais rigoroso que o processo de erosão, que pode introduzir erros assinaláveis. Mais uma vez se reforça a ideia de que a combinação de vários métodos é provavelmente a melhor forma de resolver a maior parte dos problemas de detecção de centros de franjas em imagens de interferometria.

Nas fig.s 5.19 e 5.20 podem ver-se alguns resultados obtidos com a aplicação das técnicas até agora apresentadas, nelas poderão ser apreciadas algumas das observações antes efectuadas.

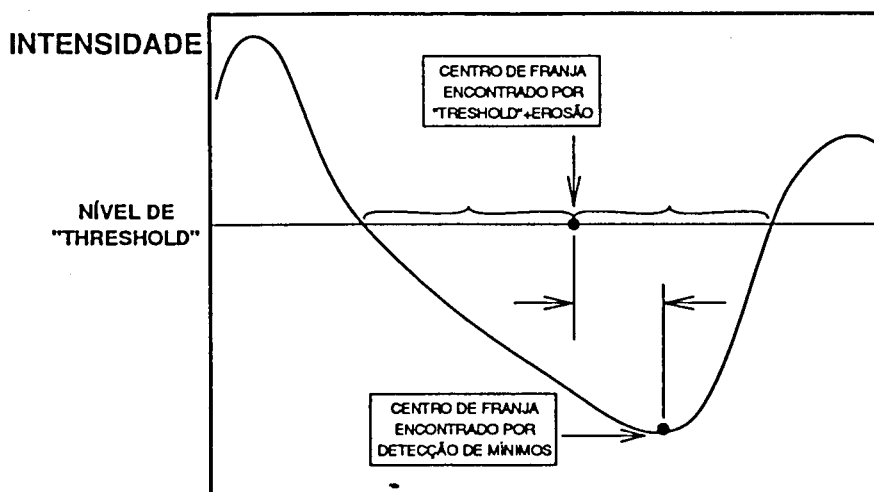


fig. 5.18 - Mínimos encontrados pelos processos de erosão e de detecção de mínimos.

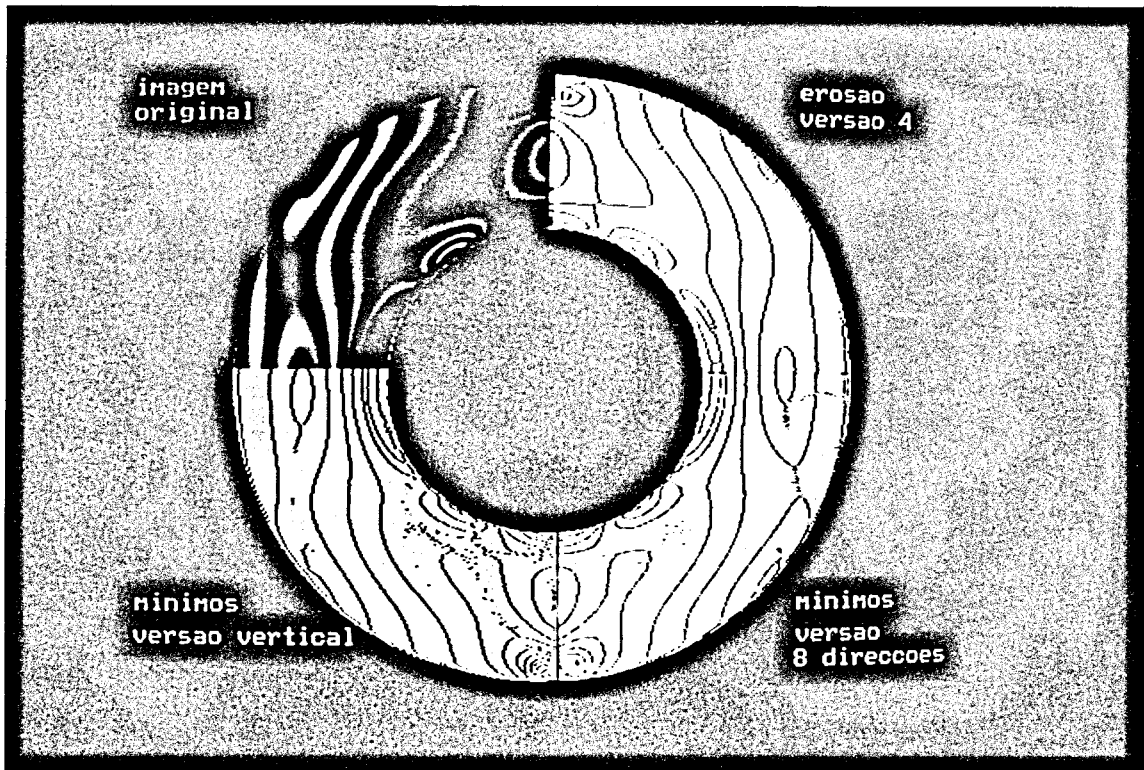


fig. 5.19 - Comparação entre os métodos de erosão e de detecção de mínimos (vertical e 8 direcções).

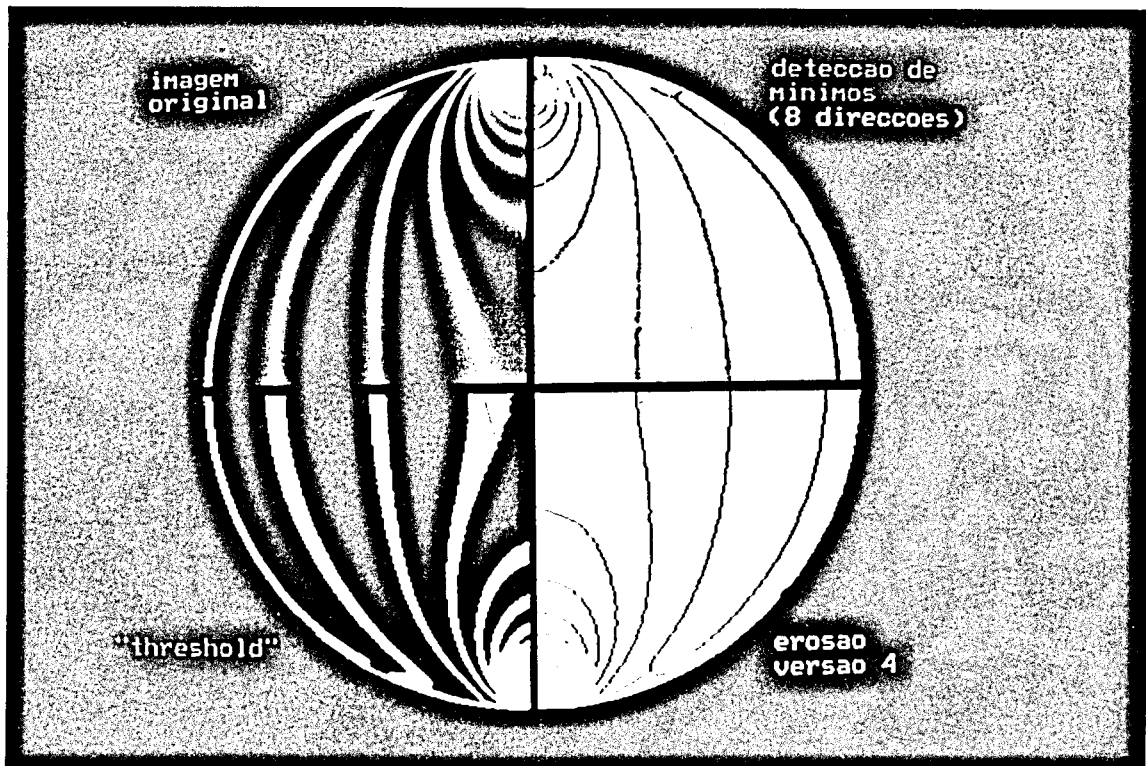


fig. 5.20 - Comparação entre os métodos de erosão e detecção de mínimos.

CAPÍTULO 6

MÉTODOS CONTÍNUOS DE ANÁLISE DE FRANJAS

6.1 INTRODUÇÃO

Consideram-se métodos contínuos aqueles que fazem uso de toda a informação existente numa imagem adquirida. Por esse motivo são métodos mais específicos, sendo a sua aplicação mais subjectiva do que os métodos discretos (capítulo 5). As imagens obtidas em fotoelasticidade são muito boas, permitindo o uso destas técnicas com bastante sucesso. Não se pretende com isto dizer que outros métodos de análise experimental de tensões não possam recorrer a técnicas semelhantes, mas sim que o exposto neste capítulo se destina exclusivamente a imagens resultantes da interferometria fotoelástica.

Pelo facto de utilizarem toda a informação e desde que convenientemente implementados, estes métodos permitem obter resultados mais precisos que os métodos antes apresentados. Esta observação é feita porque estes métodos são mais complicados de implementar.

6.2 SEPARAÇÃO DAS ISOCLÍNICAS

Como já foi referido no capítulo 2, as imagens obtidas no polariscópio plano contêm simultaneamente as franjas isoclínicas (direcções principais com uma dada orientação) e as franjas isocromáticas ($\sigma_1 - \sigma_2$ constante). A separação destas duas famílias de franjas é um dos problemas mais antigos da fotoelasticidade, que tem originado o interesse de vários investigadores pela sua solução.

A primeira solução encontrada para contornar este problema foi a de registar a ocorrência das franjas isoclínicas com um carregamento reduzido do modelo fotoelástico. Nesta situação as tensões instaladas no modelo são baixas, aparecendo somente algumas isocromáticas e por conseguinte facilitando a identificação das isoclínicas. Teoricamente as isoclínicas mantêm-se seja qual for o carregamento, mas na prática, devido a pequenos desalinhamentos, quando se varia o carregamento, elas movem-se, sendo por isso difícil obter as isoclínicas que correspondem rigorosamente à situação com que se obtêm as isocromáticas (carga maior). Um processo de melhorar a nitidez das isoclínicas consiste em utilizar luz branca, pois assim as isocromáticas aparecem sob a forma de bandas coloridas (ordem superior a zero), e no caso de se utilizar a fotografia, tempos de exposição longos de modo a que as isoclínicas quase desapareçam, com a vantagem de as isoclínicas ficarem mais finas e portanto melhor definidas.

Berghaus [31] propôs um método para resolver o problema. Utilizando um polariscópio plano em que podia rodar o analisador em relação ao polarizador, apresentou o que chamou de "terceira condição de extinção". No entanto o método apresenta isoclínicas como bandas em lugar de franjas contínuas, o que parece à primeira vista pior que o método tradicional. Permite contudo resolver o problema do carregamento, pois as isoclínicas obtêm-se com a carga definitiva, isto relativamente à carga utilizada para obter as isocromáticas.

Hecker e Morche [14] apresentaram a formulação para a obtenção das direcções principais para todo o campo de observação. Baseados em operações executados com três imagens obtidas no polariscópio plano com rotações dos elementos ópticos em relação à horizontal de 0° , 30° e -30° . Apesar desta apresentação, em [14], não se mostraram resultados obtidos com tal técnica.

Yao [21] mostrou-nos a método de "diferenciação e divisão" apresentando resultados interessantes. O problema é que o número de imagens necessárias para uma razoável quantidade de isoclínicas é muito elevado. Outros problemas surgem quando o desfasamento entre imagens, utilizado para aproximar a derivada, é muito pequeno, pois origina franjas muito espessas, tornando difícil a identificação do seu centro. Quando se aumenta aquele desfasamento as franjas tornam-se mais finas, mas os erros cometidos no processo começam a tornar-se elevados. Na fig. 6.1 pode ver-se o aspecto típico das franjas obtidas por este processo, conseguidas com uma implementação do método executada por nós.

Tsuji et. al. [24], com um polariscópio tendo como fonte de iluminação um laser e fotodíodo como detector, formulou um método e obteve resultados a partir de duas imagens de polariscópio plano desfasadas de 45° .

Finalmente Mawatari et. al. [25] apresentaram um método algo elaborado para obter as direcções principais, com resultados muito bons. O método consiste na obtenção de quatro imagens de polariscópio plano, sob determinadas condições, que são depois subtraídas duas a duas e analisadas por um programa apropriado.

Os métodos de seguida propostos são baseados em técnicas de extracção da fase a partir de imagens de interferometria fotoelástica, e constituem a tendência actual para uma melhor exploração da informação existente nas imagens obtidas em análise experimental de tensões.

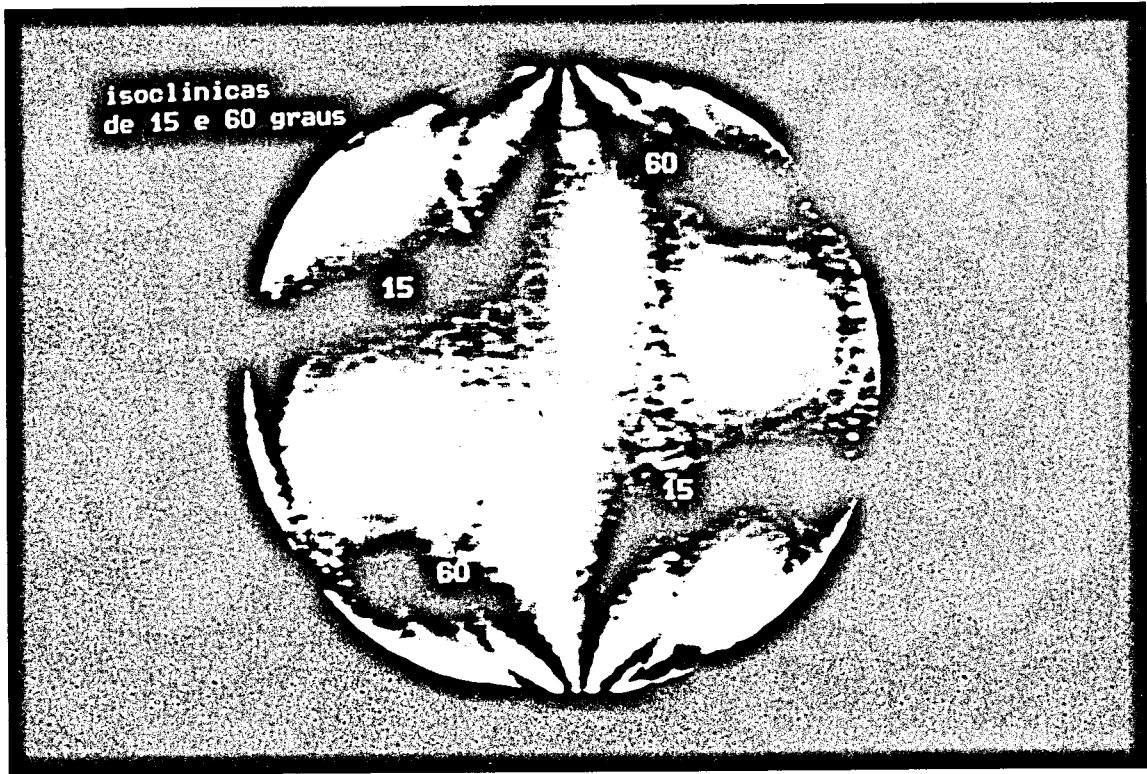


fig. 6.1 - Isoclínicas de 15° e 60° obtidas com o método de "diferenciação e divisão" desenvolvido por Yao [21].

6.2.1 MODELAÇÃO DAS IMAGENS DO POLARISCÓPIO PLANO

Conforme foi mostrado no capítulo 2, a luz emergente do analisador num polariscópio plano tem uma intensidade dada por (2.30):

$$I_{\gamma} = K' [1 - \cos 4(\alpha + \gamma)] \sin^2 \frac{\Delta}{2} \quad (a)$$

Esta é contudo uma expressão teórica que é necessário ajustar à realidade. Lembre-se também que a equação apesar de ter sido deduzida para um só ponto, é válida qualquer que seja esse ponto desde que contido no campo do polariscópio. Assim, para uma dada área K' não será uma constante, mas sim função das coordenadas x e y . É concretamente dependente da iluminação de fundo e da própria modulação das franjas interferométricas [32] e inclui ainda ruído originado pela própria fonte de iluminação. Desprezando o efeito do ruído, podemos afirmar que:

$$K' = I_0 \phi_0 \quad (b)$$

em que I_0 - intensidade luminosa de fundo

ϕ_0 - modulação das franjas de interferência

Além disso há que considerar um outro termo que vem adicionado à equação (a), que é devido sobretudo ao ruído electrónico originado por todo o circuito de processamento de imagem. A não uniformidade da luminosidade de fundo contribui também para a variação deste termo, na medida em que quanto maior for a intensidade mais se nota o efeito do ruído. Este termo é designado por termo médio, $M(x,y)$.

A equação poderá agora ser escrita como função das variáveis x e y do seguinte modo:

$$I_\gamma(x,y) = K'(x,y)[1 - \cos 4(\alpha(x,y) + \gamma)] \sin^2 \frac{\Delta(x,y)}{2} + M(x,y) \quad (6.1)$$

Por conveniência de notação vamos omitir, daqui em diante, as variáveis x e y e designar

$$K(x,y) = K'(x,y) \sin^2 \frac{\Delta(x,y)}{2} \quad (6.2)$$

uma vez que isso não altera em nada as conclusões a obter. A equação (6.1) virá então na sua forma simplificada como:

$$I_\gamma = K[1 - \cos 4(\alpha + \gamma)] + M \quad (6.3)$$

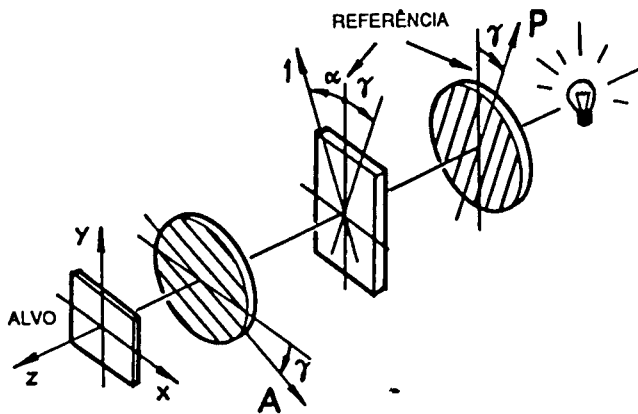


fig. 6.2 - O polariscópio plano.

6.2.2 TÉCNICAS DE 3 IMAGENS

Como se pode verificar por observação da equação (6.3), três é o número mínimo de imagens necessárias para resolver o problema da determinação da função $\alpha(x,y)$, uma vez que são também três as incógnitas existentes ($K(x,y)$, $\alpha(x,y)$ e $M(x,y)$).

O método de obtenção da função $\alpha(x,y)$ consiste na aquisição de três imagens igualmente desfasadas (incremento de fase $\Delta 4\gamma$), que posteriormente são combinadas matematicamente de modo a ser possível explicitar aquela função ponto a ponto. As combinações possíveis são várias, dependendo da fase inicial (4γ) e do incremento de fase. Vamos, por esse motivo, referir apenas algumas das combinações possíveis.

6.2.2.1 FASE INICIAL $4\gamma=0^\circ$ INCREMENTO $\Delta 4\gamma=90^\circ$

Neste caso as imagens a utilizar correspondem a rotações $\gamma=0^\circ$, $\gamma=22.5^\circ$ e $\gamma=45^\circ$ de todo o conjunto formado pelos elementos do polariscópio. Para $\gamma=0^\circ$ a equação (6.3) virá dada por:

$$I_{0^\circ} = K [1 - \cos 4\alpha] + M \quad (6.4)$$

Para $\gamma=22.5^\circ=\pi/8$ rad a mesma equação vem:

$$I_{22.5^\circ} = K [1 - \cos (4\alpha + \pi/2)] + M = K [1 + \sin 4\alpha] + M \quad (6.5)$$

Finalmente para $\gamma=45^\circ=\pi/4$ rad obteremos:

$$I_{45^\circ} = K [1 - \cos (4\alpha + \pi)] + M = K [1 + \cos 4\alpha] + M \quad (6.6)$$

Adicionando e subtraindo as equações (6.6) e (6.4) obtemos respectivamente:

$$I_{45^\circ} + I_{0^\circ} = 2K + 2M = 2K' \sin^2 \frac{\Delta}{2} + 2M \quad (6.7)$$

$$I_{45^\circ} - I_{0^\circ} = 2K \cos 4\alpha \quad (6.8)$$

A equação (6.7) é, após a substituição de $K(x,y)$, idêntica à equação (2.33), obtida com o polariscópio circular em campo escuro. Este resultado verifica-se sempre que se adicionam duas imagens obtidas no polariscópio plano desfasadas de 45° entre si. Por conseguinte, este seria um processo expedito de obter franjas isocromáticas, no caso de se dispor exclusivamente de um polariscópio plano.

Se combinarmos agora as equações (6.5), (6.7) e (6.8) do seguinte modo:

$$\frac{2 I_{22.5^\circ} - (I_{45^\circ} + I_{0^\circ})}{I_{45^\circ} - I_{0^\circ}} = \operatorname{tg} 4\alpha \quad (6.9)$$

obtemos uma equação que nos permite obter a função $\alpha(x,y)$ através da função inversa da tangente, explicitando então $\alpha(x,y)$ em (6.9), obtemos:

$$\alpha = \frac{1}{4} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{2 I_{22.5^\circ} - (I_{45^\circ} + I_{0^\circ})}{I_{45^\circ} - I_{0^\circ}} \quad (6.10)$$

Esta é a equação base que permite a partir de três imagens, obtidas no polariscópio plano, determinar o ângulo α em cada ponto, que representa a inclinação que uma das direcções principais faz com a vertical, tomada como referência.

Nas fig.s 6.3 a 6.7 pode ver-se uma sequência de imagens, com as três obtidas no polariscópio plano e os resultados obtidos com o processamento, antes e após o ajustamento. Este ajustamento destina-se a transformar a função $\alpha(x,y)$ numa função contínua. Como se sabe a função arco-tangente fornece como resultado um valor no domínio $[-\pi/2, \pi/2]$ ou $[-\pi, \pi]$ (por análise do sinal do seno e do cosseno), donde resultam descontinuidades que podem ser ajustadas.

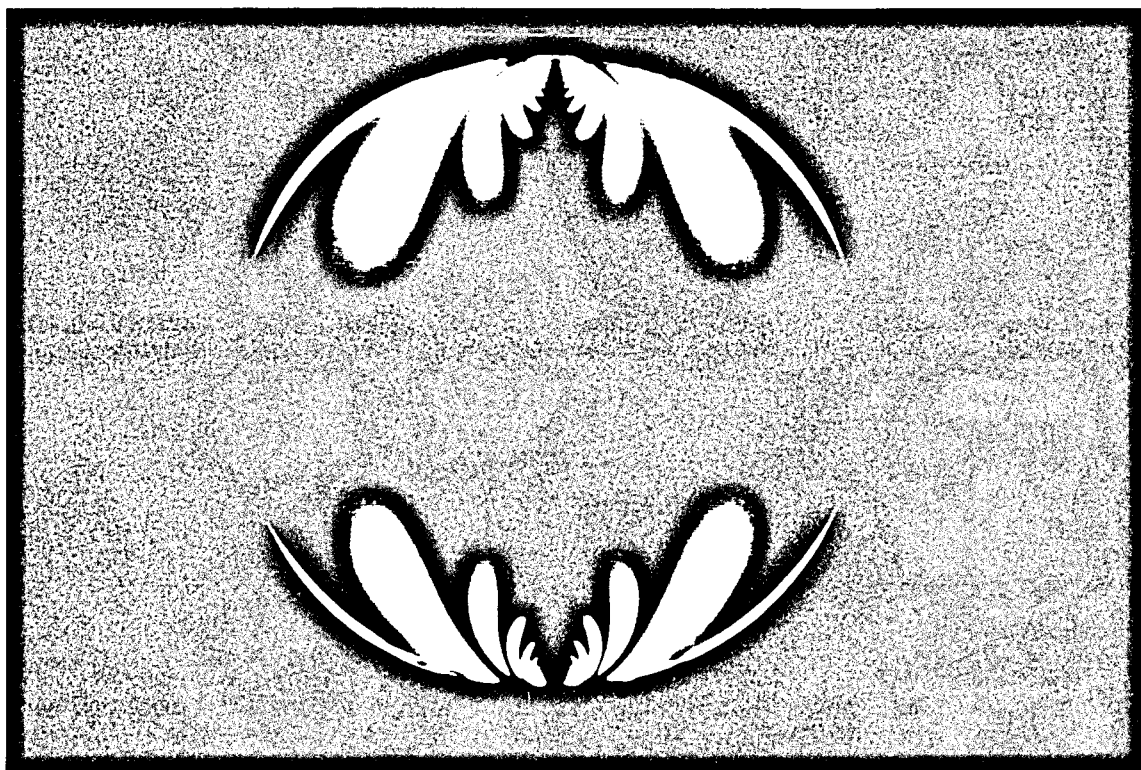


fig. 6.3 - Imagem do polariscópio plano para $\gamma=0^\circ$ dum disco em compressão diametral.

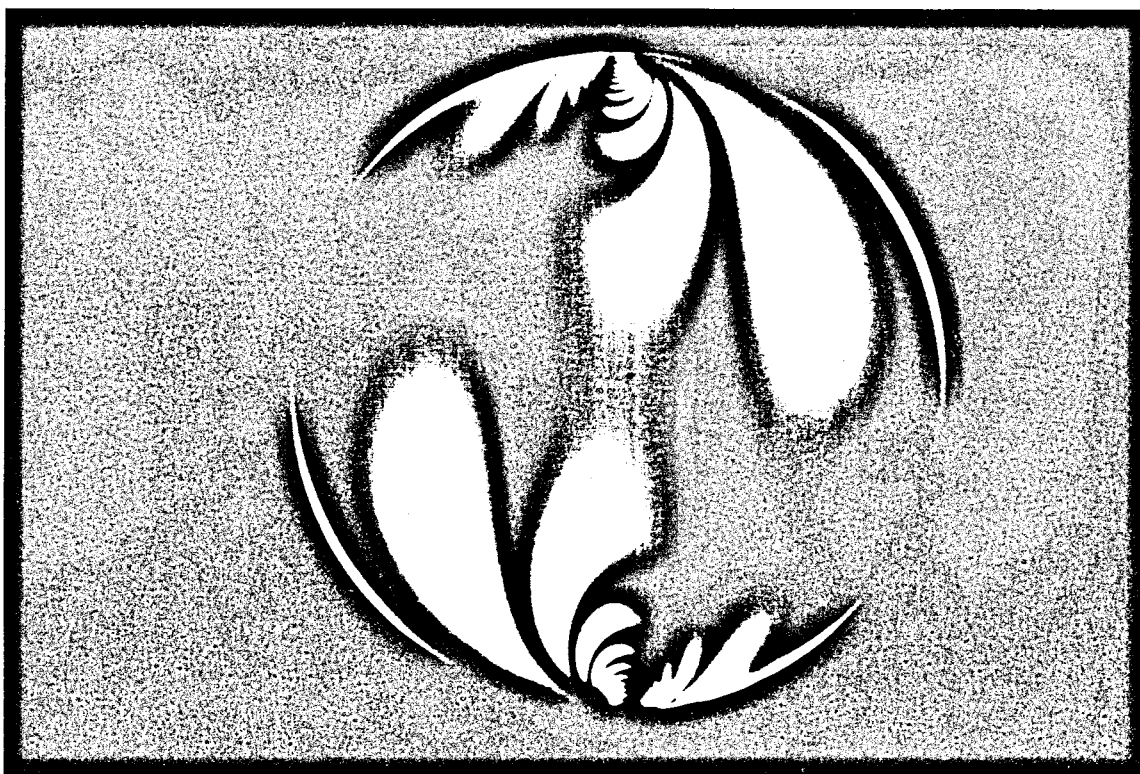


fig. 6.4 - Imagem do polariscópio plano para $\gamma=22.5^\circ$ dum disco em compressão diametral.

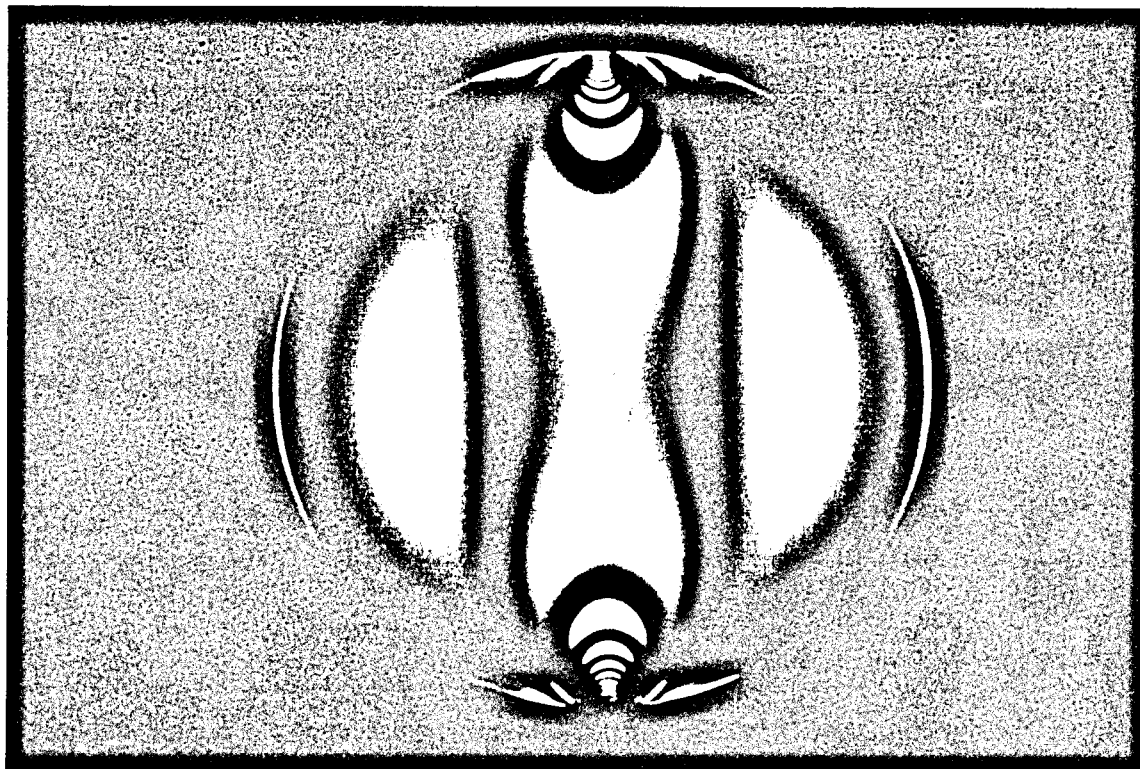


fig. 6.5 - Imagem do polariscópio plano para $\gamma=45^\circ$ dum disco em compressão diametral.

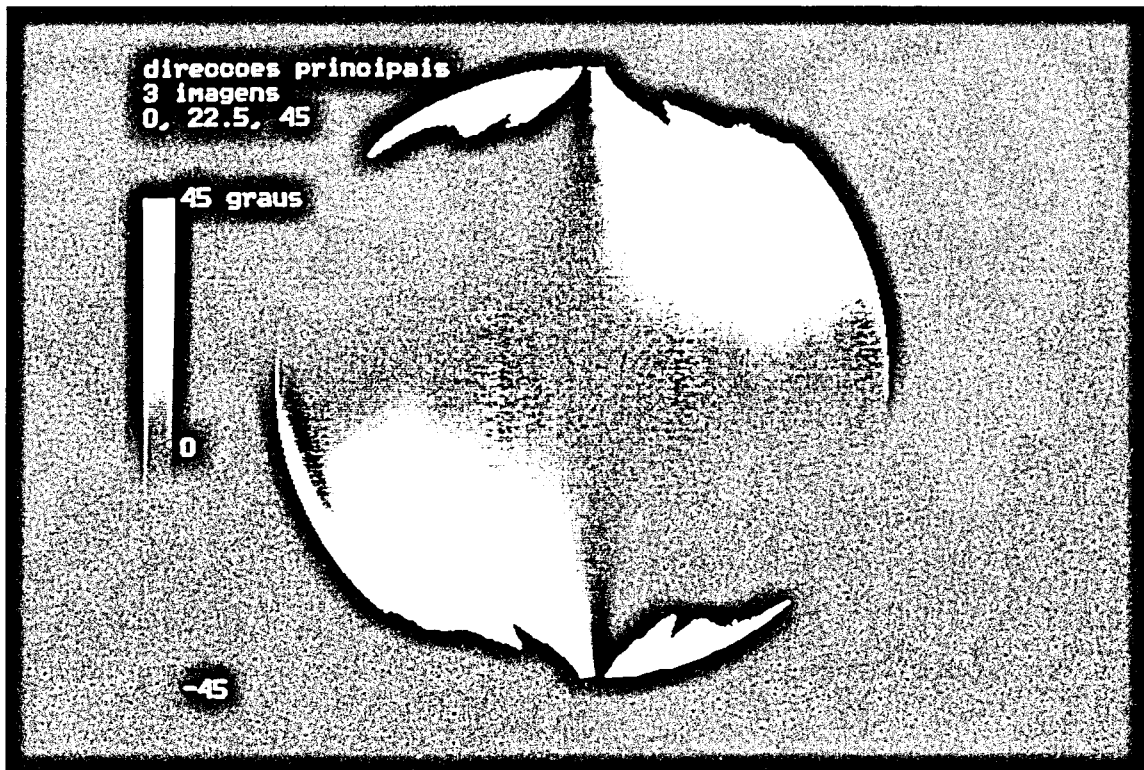


fig. 6.6 - Imagem processada, permitindo a análise do mapa das direções principais.

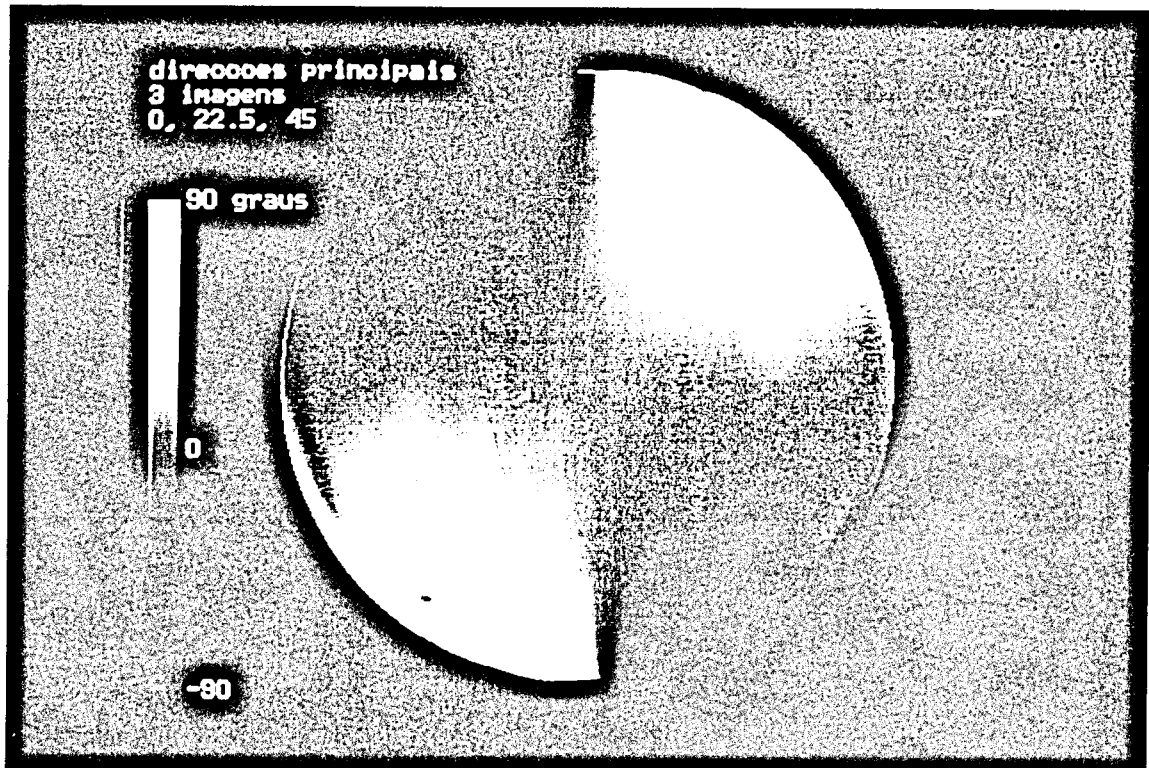


fig. 6.7 - Imagem após ajustamento da função $\alpha(x,y)$.

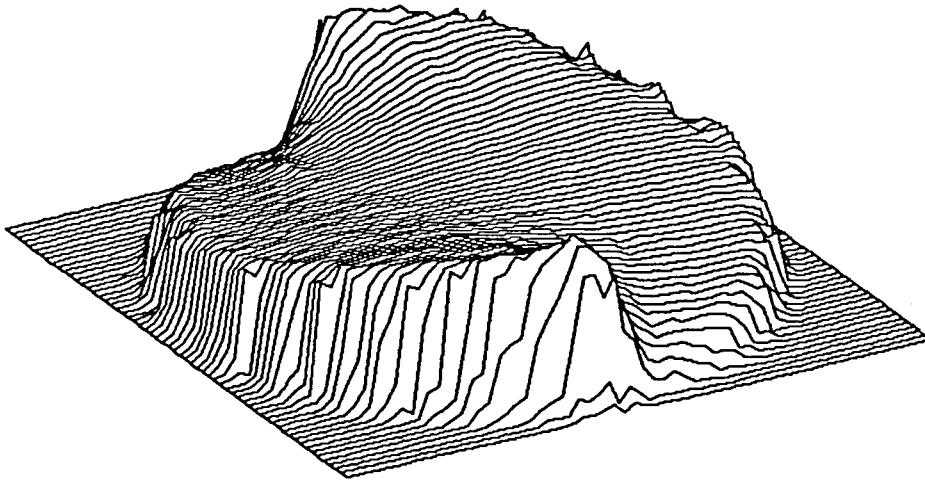


fig. 6.8 - Levantamento tridimensional das direcções principais após ajustamento.

Na fig. 6.9 é ilustrado o processo de ajustamento da continuidade da função. Note-se que no caso das direcções principais o interesse deste ajustamento é mínimo, pois o resultado inicialmente obtido serve para efectuar qualquer análise, por exemplo se uma das direcções principais é 30° a direcção que lhe é perpendicular será -60° , ou seja, o ajustamento não altera em nada o resultado antes obtido.

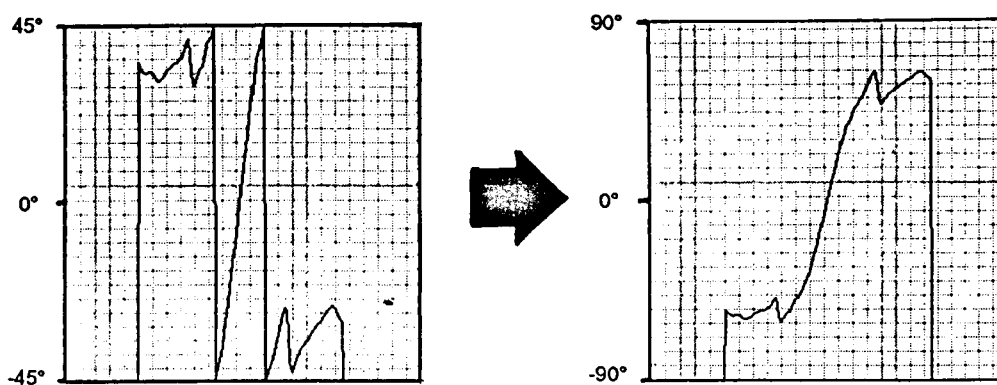


fig. 6.9 - O processo de ajustamento de continuidade da função.

O uso de cores falsas pode melhorar ainda mais a visualização das várias gamas de direcções principais, conforme se pode ver na fig. 6.10.

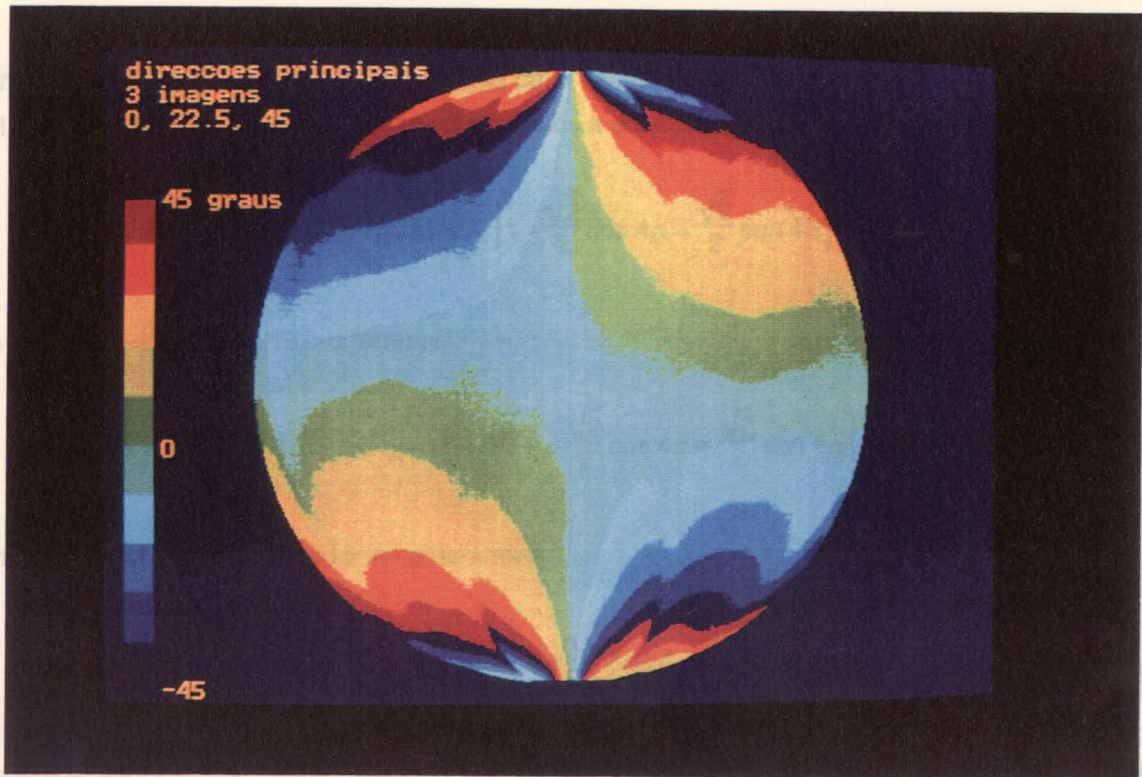


fig. 6.10 - O uso de cores falsas para uma melhor visualização das direcções principais.

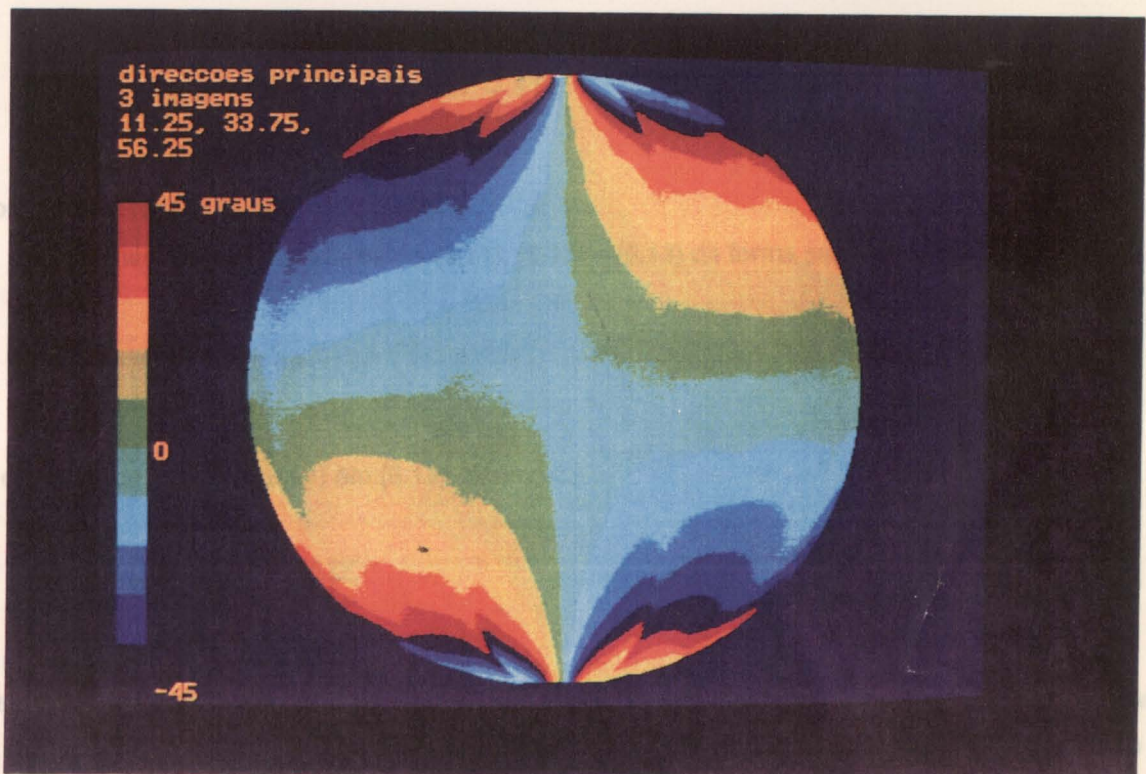


fig. 6.11 - Mapa das direcções principais usando as imagens $\gamma=11.25^\circ$, $\gamma=33.75^\circ$ e $\gamma=56.25^\circ$.

6.2.2.2 FASE INICIAL $4\gamma=45^\circ$ INCREMENTO $\Delta 4\gamma=90^\circ$

Considerando o mesmo incremento de fase mas um início diferente, consegue-se uma outra forma de obter as direcções principais. Neste caso vamos necessitar das imagens correspondentes a $\gamma=11.25^\circ$, $\gamma=33.75^\circ$ e $\gamma=56.25^\circ$. Se particularizarmos a equação (6.3) para $\gamma=11.25^\circ=\pi/16$ rad virá:

$$I_{11.25^\circ} = K [1 - \cos (4\alpha + \pi/4)] + M = K \left[1 - \frac{\sqrt{2}}{2} \cos 4\alpha + \frac{\sqrt{2}}{2} \sin 4\alpha \right] + M \quad (6.11)$$

No caso de $\gamma=33.75^\circ=3\pi/16$ rad teremos:

$$I_{33.75^\circ} = K [1 - \cos (4\alpha + 3\pi/4)] + M = K \left[1 + \frac{\sqrt{2}}{2} \cos 4\alpha + \frac{\sqrt{2}}{2} \sin 4\alpha \right] + M \quad (6.12)$$

Finalmente para $\gamma=56.25^\circ=5\pi/16$ rad obteremos:

$$I_{56.25^\circ} = K [1 - \cos (4\alpha + 5\pi/4)] + M = K \left[1 + \frac{\sqrt{2}}{2} \cos 4\alpha - \frac{\sqrt{2}}{2} \sin 4\alpha \right] + M \quad (6.13)$$

Podemos agora provar, mais uma vez, a afirmação já feita de que duas imagens de polariscópio plano desfasadas de 45° resultam, por adição, num padrão de franjas isocromáticas idênticas às obtidas com o polariscópio circular em campo escuro. Assim se adicionarmos (6.11) com (6.13) obtem-se:

$$I_{11.25^\circ} + I_{56.25^\circ} = 2K + 2M = 2K' \sin^2 \frac{\Delta}{2} + 2M \quad (a)$$

como na expressão (6.7).

Combinando agora as expressões (6.11), (6.12) e (6.13) da forma seguinte:

$$\frac{I_{33.75^\circ} - I_{56.25^\circ}}{I_{33.75^\circ} - I_{11.25^\circ}} = \tan 4\alpha \quad (6.14)$$

e explicitando a função $\alpha(x,y)$ em (6.14), teremos:

$$\alpha = \frac{1}{4} \arctan \frac{I_{33.75^\circ} - I_{56.25^\circ}}{I_{33.75^\circ} - I_{11.25^\circ}} \quad (6.15)$$

Este seria outro modo de obter a função $\alpha(x,y)$ a partir de três imagens obtidas no polariscópio plano. O único inconveniente desta versão é as casas decimais do ângulo γ , que tornam difícil o acerto do

polariscópio, no entanto o erro que daí resulta é pequeno, é muito mais importante aquele que resulta de folgas existentes no mecanismo.

Os resultados obtidos são semelhantes ao caso anterior, fig. 6.11. Seria interessante efectuar um estudo comparativo com a solução teórica e verificar se os erros cometidos são aceitáveis ou não.

6.2.2.3 FASE INICIAL $4\gamma=-120^\circ$ INCREMENTO $\Delta 4\gamma=120^\circ$

Considerando agora esta situação, as imagens necessárias serão as correspondentes a $\gamma=-30^\circ$, $\gamma=0^\circ$ e $\gamma=30^\circ$. Calculando a expressão (6.3) para o caso $\gamma=-30^\circ=-\pi/6$ rad virá:

$$I_{-30^\circ} = K [1 - \cos (4\alpha - 2\pi/3)] + M = K \left[1 + \frac{1}{2} \cos 4\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin 4\alpha \right] + M \quad (6.16)$$

No caso de $\gamma=30^\circ=\pi/6$ rad teremos:

$$I_{30^\circ} = K [1 - \cos (4\alpha + 2\pi/3)] + M = K \left[1 + \frac{1}{2} \cos 4\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin 4\alpha \right] + M \quad (6.17)$$

Para $\gamma=0^\circ$ a expressão para a intensidade já foi obtida (6.4) e é:

$$I_{0^\circ} = K [1 - \cos 4\alpha] + M \quad (a)$$

Se combinarmos agora as expresões (a), (6.16) e (6.17) da forma seguinte:

$$\frac{I_{30^\circ} - I_{-30^\circ}}{I_{30^\circ} + I_{-30^\circ} - 2 I_{0^\circ}} = \sqrt{3} \operatorname{tg} 4\alpha \quad (6.18)$$

e explicitando a função $\alpha(x,y)$ em (6.18), obteremos:

$$\alpha = \frac{1}{4} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{I_{30^\circ} - I_{-30^\circ}}{I_{30^\circ} + I_{-30^\circ} - 2 I_{0^\circ}} \right) \quad (6.19)$$

Este foi o algoritmo referido por Hecker e Morche [14], do qual não foram explorados os resultados. Conforme já foi dito, existem várias combinações que permitem obter outras tantas expressões para a solução do problema em equação, os apresentados são contudo aqueles que tornam a sua dedução mais fácil.

Na fig. 6.12 mostra-se os resultados obtidos com a aplicação deste algoritmo.

6.2.3 TÉCNICAS DE 4 IMAGENS

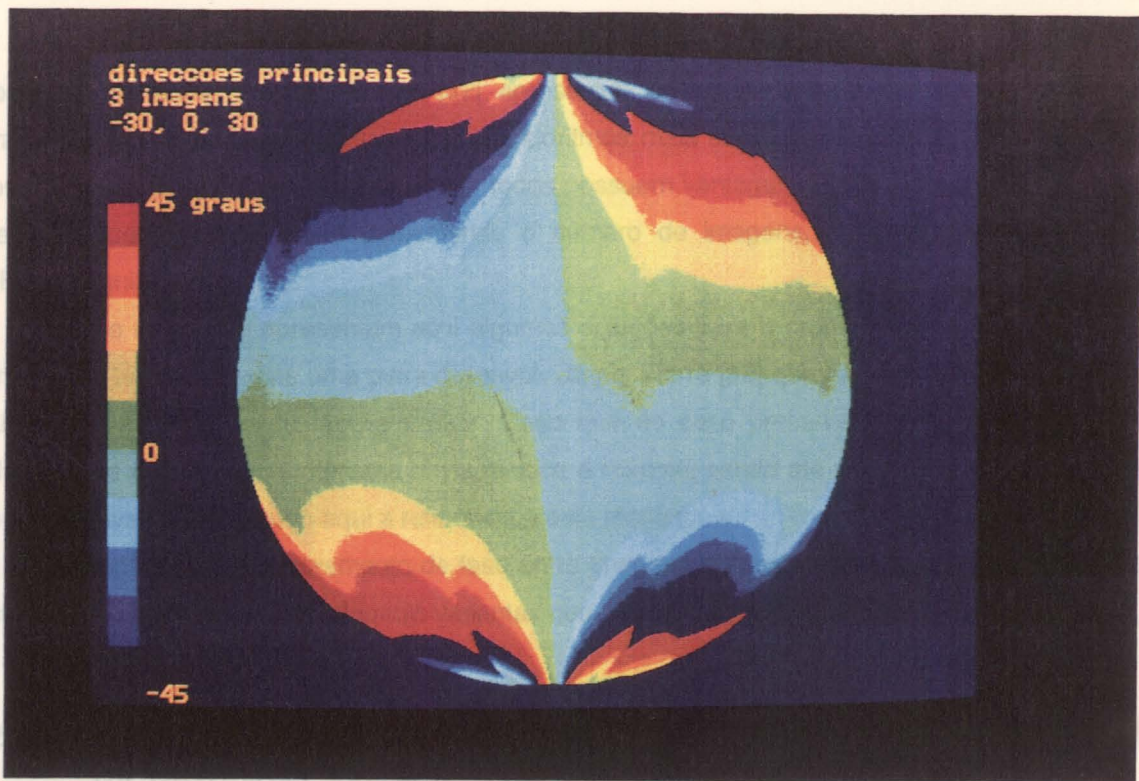


fig. 6.12 - Mapa das direcções principais usando as imagens $\gamma = -30^\circ$, $\gamma = 0^\circ$ e $\gamma = 30^\circ$.

As imagens necessárias serão por conseguinte as correspondentes a $\gamma = 0^\circ$, $\gamma = 22.5^\circ$, $\gamma = 45^\circ$ e $\gamma = 67.5^\circ$. As expressões para as intensidades correspondentes às três primeiras já foram obtidas em

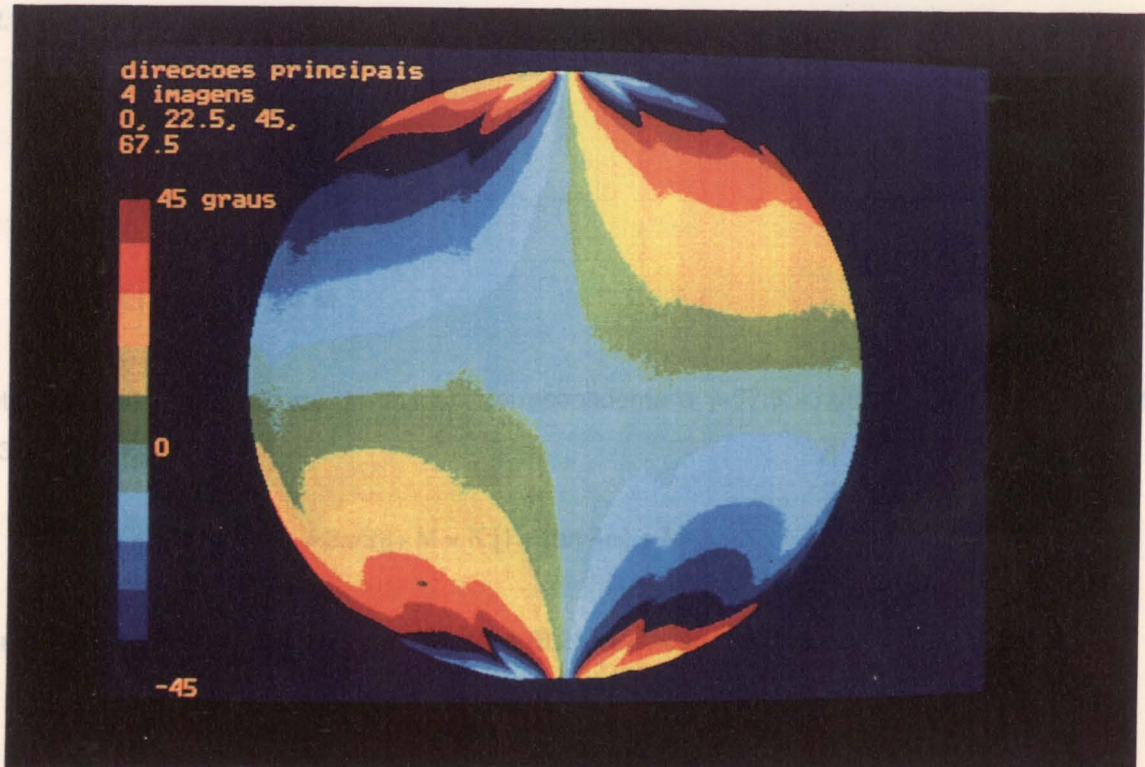


fig. 6.13 - Mapa das direcções principais usando as imagens $\gamma = 0^\circ$, $\gamma = 22.5^\circ$, $\gamma = 45^\circ$ e $\gamma = 67.5^\circ$.

6.2.3 TÉCNICAS DE 4 IMAGENS

A determinação da fase em imagens de interferometria envolve sempre a introdução de erros pelos mais variados motivos. Creath [32] apresentou uma comparação de vários métodos de extracção da fase, onde se constata que há algoritmos mais susceptíveis a determinados tipos de erros do que outros, mas a realidade é que todos possuem vantagens e desvantagens. No entanto, parece ser ponto assente que aumentando o número de imagens, os erros devidos ao ruído diminuem significativamente.

Por esse motivo se apresentam aqui algumas soluções para o problema utilizando 4 imagens. Além destas técnicas, existe uma outra desenvolvida por Carré [32] que parte do princípio que não é conhecido o incremento de fase a utilizar. Dado que no caso presente o incremento de fase é perfeitamente conhecido, o interesse desta técnica é mínimo, sendo até mais difícil o cálculo, o que não é desejável. Fica contudo aqui a referência a esta técnica.

Tal como em 6.2.2 o incremento de fase entre imagens é constante. A imagem inicial permite, neste caso, encontrar também algumas variantes que não serão totalmente exploradas aqui.

6.2.3.1 FASE INICIAL $4\gamma=0^\circ$ INCREMENTO $\Delta 4\gamma=90^\circ$

As imagens necessárias serão por conseguinte as correspondentes a $\gamma=0^\circ$, $\gamma=22.5^\circ$, $\gamma=45^\circ$ e $\gamma=67.5^\circ$. As expressões para as intensidades correspondentes às três primeiras já foram obtidas em 6.2.2.1, e são as seguintes:

$$I_{0^\circ} = K [1 - \cos 4\alpha] + M \quad (a)$$

$$I_{22.5^\circ} = K [1 + \sin 4\alpha] + M \quad (b)$$

$$I_{45^\circ} = K [1 + \cos 4\alpha] + M \quad (c)$$

Obtendo agora a intensidade da imagem correspondente a $\gamma=67.5^\circ=3\pi/8$ rad, por substituição em (6.3) obteremos:

$$I_{67.5^\circ} = K [1 - \cos (4\alpha + 3\pi/2)] + M = K [1 - \sin 4\alpha] + M \quad (6.20)$$

Combinando agora as igualdades (a), (b), (c) e (6.21) do modo seguinte:

$$\frac{I_{22.5^\circ} - I_{67.5^\circ}}{I_{45^\circ} - I_{0^\circ}} = \tan 4\alpha \quad (6.21)$$

e explicitando a função $\alpha(x,y)$ em (6.21), teremos:

$$\alpha = \frac{1}{4} \arctg \frac{I_{22.5^\circ} - I_{67.5^\circ}}{I_{45^\circ} - I_{0^\circ}} \quad (6.22)$$

obtemos assim mais uma expressão que permite calcular a função $\alpha(x,y)$. Na fig. 6.13 apresenta-se o resultado da aplicação desta expressão para a determinação das direcções principais.

6.2.3.2 FASE INICIAL $\gamma=0^\circ$ INCREMENTO $\Delta\gamma=60^\circ$

Neste caso vamos usar imagens correspondentes a $\gamma=0^\circ$, $\gamma=15^\circ$, $\gamma=30^\circ$ e $\gamma=45^\circ$. A primeira e as duas últimas têm como expressões para as intensidades as igualdades (6.4), (6.17) e (6.5), ou seja:

$$I_{0^\circ} = K [1 - \cos 4\alpha] + M \quad (a)$$

$$I_{30^\circ} = K \left[1 + \frac{1}{2} \cos 4\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin 4\alpha \right] + M \quad (b)$$

$$I_{45^\circ} = K [1 + \cos 4\alpha] + M \quad (c)$$

Considerando agora a imagem com $\gamma=15^\circ=\pi/12$ rad, a equação (6.3) transforma-se em:

$$I_{15^\circ} = K [1 - \cos (4\alpha + \pi/3)] + M = K \left[1 - \frac{1}{2} \cos 4\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin 4\alpha \right] + M \quad (6.23)$$

Adicionando e subtraindo as expressões (b) e (6.23) obtemos:

$$I_{30^\circ} + I_{15^\circ} = K (2 + \sqrt{3} \sin 4\alpha) + 2M \quad (6.24)$$

$$I_{30^\circ} - I_{15^\circ} = K \cos 4\alpha \quad (6.25)$$

Recordando as igualdades (6.7) e (6.8):

$$I_{45^\circ} + I_{0^\circ} = 2K + 2M \quad (d)$$

$$I_{45^\circ} - I_{0^\circ} = 2K \cos 4\alpha \quad (e)$$

Repare-se que da análise de (6.25) e (e) se pode concluir que a intensidade da subtracção das imagens $\gamma=45^\circ$ com $\gamma=0^\circ$ é o dobro da mesma operação efectuada com as imagens $\gamma=30^\circ$ e $\gamma=15^\circ$.

Combinando agora as expressões (6.24), (6.25), (d) e (e) podemos obter:

$$\frac{I_{30^\circ} + I_{15^\circ} - (I_{45^\circ} + I_{0^\circ})}{I_{30^\circ} - I_{15^\circ}} = \sqrt{3} \operatorname{tg} 4\alpha \quad (6.26)$$

ou

$$\frac{I_{30^\circ} + I_{15^\circ} - (I_{45^\circ} + I_{0^\circ})}{I_{45^\circ} - I_{0^\circ}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{tg} 4\alpha \quad (6.27)$$

explicitando a função $\alpha(x,y)$ chega-se respectivamente a:

$$\alpha = \frac{1}{4} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{I_{30^\circ} + I_{15^\circ} - (I_{45^\circ} + I_{0^\circ})}{I_{30^\circ} - I_{15^\circ}} \right) \quad (6.28)$$

e

$$\alpha = \frac{1}{4} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{I_{30^\circ} + I_{15^\circ} - (I_{45^\circ} + I_{0^\circ})}{I_{45^\circ} - I_{0^\circ}} \right) \quad (6.29)$$

ou seja mais duas alternativas de obter a função $\alpha(x,y)$. Na fig. 6.14 mostra-se o resultado da aplicação da expressão (6.28).

6.2.3.3 FASE INICIAL $4\gamma=0^\circ$ INCREMENTO $\Delta 4\gamma=90^\circ$ (MÉDIA DE 3 A 3 IMAGENS)

Nesta versão são utilizadas as mesmas imagens que em 6.2.3.1, $\gamma=0^\circ$, $\gamma=22.5^\circ$, $\gamma=45^\circ$ e $\gamma=67.5^\circ$, mas o processo de obtenção de $\alpha(x,y)$ é o utilizado em 6.2.2.1. A técnica usada consiste em aplicar o método 6.2.2.1 às três primeiras imagens e às três últimas em separado. Finalmente é feita a média dos dois resultados. Teoricamente, a vantagem deste método é a redução dos erros através do cálculo da média.

As expressões para as intensidades das quatro imagens são dadas por:

$$I_{0^\circ} = K [1 - \cos 4\alpha] + M \quad (a)$$

$$I_{22.5^\circ} = K [1 + \sin 4\alpha] + M \quad (b)$$

$$I_{45^\circ} = K [1 + \cos 4\alpha] + M \quad (c)$$

$$I_{67.5^\circ} = K [1 - \sin 4\alpha] + M \quad (d)$$

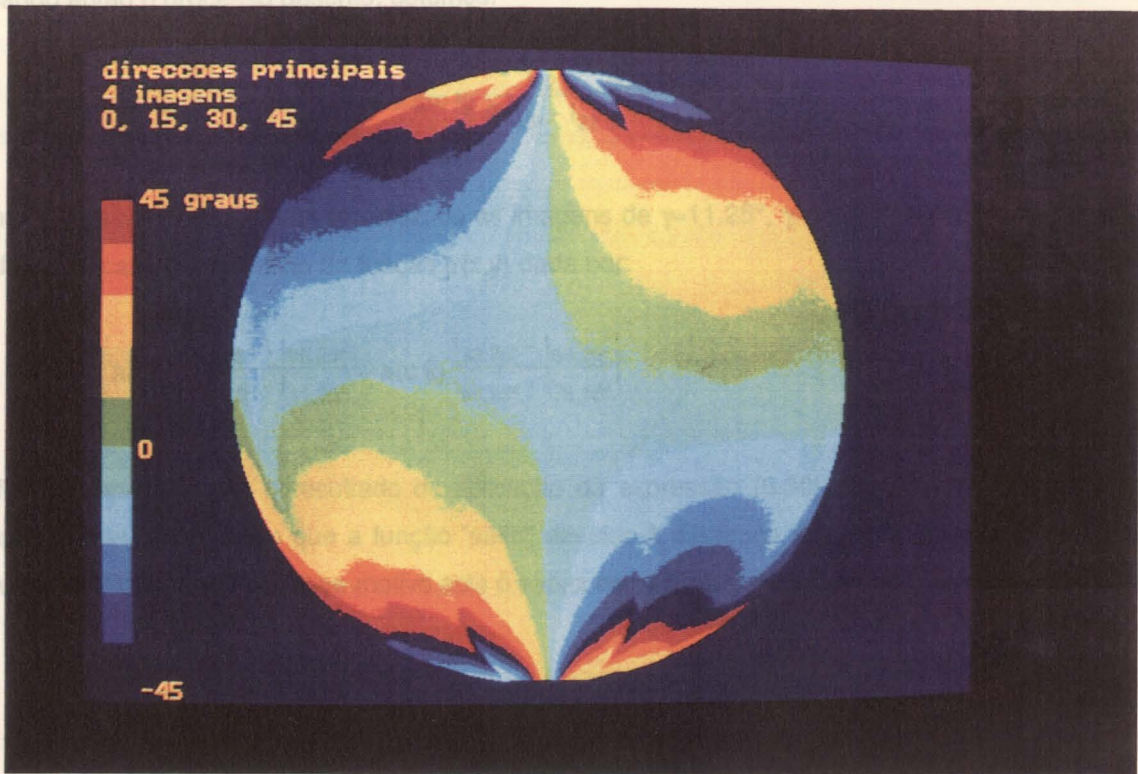


fig. 6.14 - Mapa das direcções principais usando as imagens $\gamma=0^\circ$, $\gamma=15^\circ$, $\gamma=30^\circ$ e $\gamma=45^\circ$.

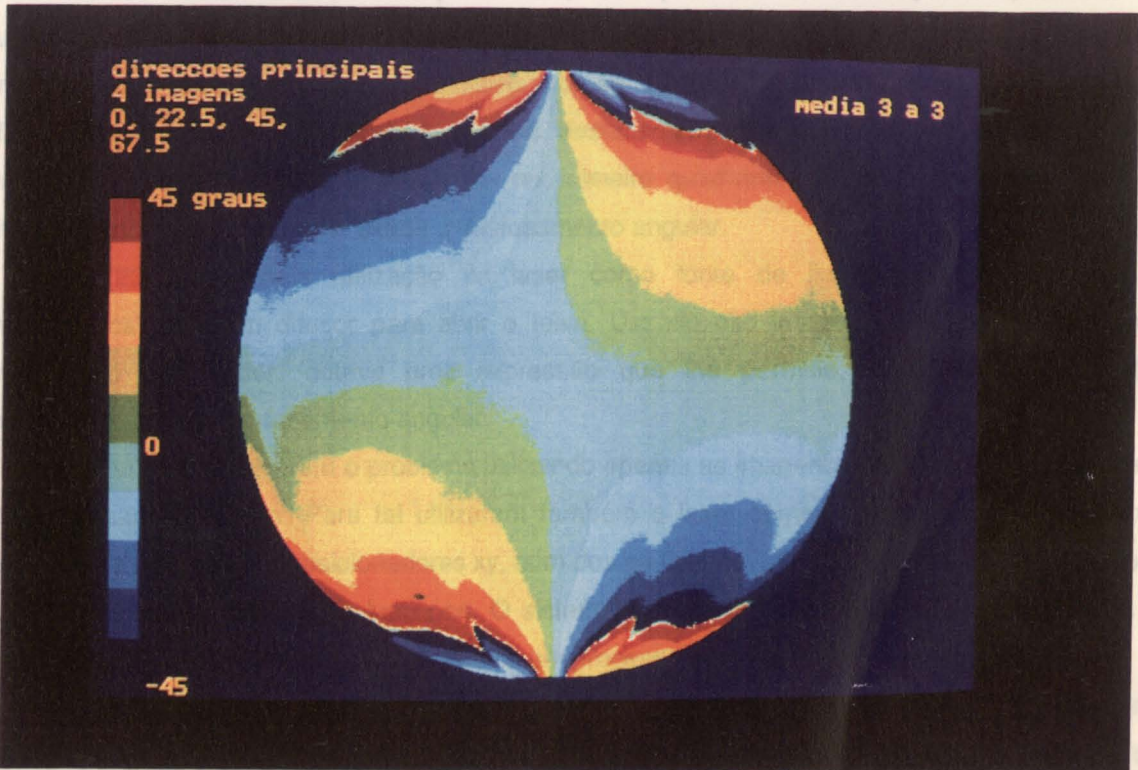


fig. 6.15 - Mapa das direcções principais usando as imagens $\gamma=0^\circ$, $\gamma=22.5^\circ$, $\gamma=45^\circ$ e $\gamma=67.5^\circ$, com o uso da técnica da média 3 a 3 imagens.

utilizando então o processo descrito, obtemos:

$$\alpha = \frac{1}{8} \left[\arctg \frac{2 I_{22.5^\circ} - I_{45^\circ} - I_{0^\circ}}{I_{45^\circ} - I_{0^\circ}} + \arctg \frac{I_{22.5^\circ} - I_{67.5^\circ}}{2 I_{45^\circ} - I_{22.5^\circ} - I_{67.5^\circ}} \right] \quad (6.30)$$

Como alternativa poder-se-iam ter utilizado as imagens de $\gamma=11.25^\circ$, $\gamma=33.75^\circ$, $\gamma=56.25^\circ$ e $\gamma=78.75^\circ$, sendo neste caso a expressão da função $\alpha(x,y)$ dada por:

$$\alpha = \frac{1}{8} \left[\arctg \frac{I_{33.75^\circ} - I_{56.25^\circ}}{I_{33.75^\circ} - I_{11.25^\circ}} + \arctg \frac{I_{33.75^\circ} - I_{56.25^\circ}}{I_{56.25^\circ} - I_{78.75^\circ}} \right] \quad (6.31)$$

Na fig.6.15 apresenta-se o resultado da aplicação da expressão (6.30). Aí, podem notar-se umas zonas distintas, no local em que a função "salta", devidas à diferença das duas soluções (para cada conjunto de 3 imagens), por esse motivo este é capaz de não ser o método mais adequado a aplicar.

6.3 OBTENÇÃO DO DESFASAMENTO ANGULAR (ISOCROMÁTICAS)

No capítulo 3 já foi focado o facto de vários investigadores terem tentado implementar um método de obter o desfaseamento angular para todo o campo de imagem.

Voltamos a referir aqui o trabalho de Hecker e Morche [14] em que, utilizando um polariscópio com os mesmos elementos do polariscópio circular, têm a possibilidade de rotação independente do segundo quarto de onda. O processo utilizado consistia em adquirir 5 imagens com diferentes orientações dos elementos ópticos, conseguindo-se separar o valor absoluto do seno do desfaseamento angular e o cosseno do mesmo desfaseamento. O conjunto destas duas funções permitia então obter a função tangente (só no primeiro quadrante, devido ao seno ser sempre positivo) a partir da qual se podia extrair o desfaseamento angular.

Kihara [23] optou pela utilização do laser como fonte de iluminação (mais estável e monocromática) com um difusor para abrir o feixe. Usando oito imagens com duas orientações diferentes do polarizador, obteve uma expressão que lhe permitia, por cálculo da função arco-cosseno, obter o desfaseamento angular.

Tsuji et. al. [24] resolveram o problema utilizando apenas as imagens de polariscópio circular em campo iluminado e escuro. Para tal utilizaram também o laser como fonte de iluminação (o feixe apenas atingia um ponto) e posicionadores xy, num dos quais estava um fotodiodo (acompanhando o feixe) que recolhia a informação luminosa. O sistema permitia abranger uma área grande, pois a velocidade de aquisição sendo elevada permitia um processamento rápido de cada ponto.

Mawatari et. al. [26] propuseram-se obter a informação toda a partir de uma única imagem, equivalente à do polariscópio circular em campo escuro, mas obtida pela adição de duas imagens de polariscópio plano desfasadas de 45° . Para isso desenvolverem um programa que à custa da análise matemática da função imagem lhes permitia tirar conclusões relativamente ao desfaseamento angular.

Neste trabalho, o método apresentado baseia-se na utilização de um vulgar polariscópio, que permite as configurações de plano e circular. Não é por isso necessária a utilização do equipamento sofisticado que alguns dos casos citados utilizaram. A técnica utilizada por Hecker não é possível ser implementada com o material do nosso laboratório, pois as placas quarto de onda estão ligadas permanentemente, não podendo alterar-se a sua posição relativa. Assim para extrair o desfaseamento angular baseamo-nos simplesmente na rotação do analisador em relação aos outros elementos do polariscópio, fazendo uso da equação da intensidade obtida para esta situação.

6.3.1 MODELAÇÃO DAS IMAGENS DO POLARISCÓPIO CIRCULAR

Já foi apresentada no capítulo 2 a expressão mais geral que representa a intensidade da luz emergente do analisador num polariscópio circular, (2.37):

$$I_{\gamma} = K (1 - \cos 2\gamma \cos \Delta - \cos 2\alpha \sin 2\gamma \sin \Delta) \quad (a)$$

Esta expressão não tem em conta o facto de haver todo um processo de aquisição que introduz ruído. Assim as razões apresentadas em 6.2.1 aplicam-se também aqui. Portanto K será uma função das variáveis x e y, que inclui dois termos fundamentais, a intensidade luminosa de fundo e a modulação das franjas de interferência. Assim:

$$K = I_0 \phi_0 \quad (b)$$

em que I_0 - intensidade luminosa de fundo

ϕ_0 - modulação das franjas de interferência

Refira-se que a intensidade luminosa de fundo não é necessariamente a mesma de 6.2.1 (devido à alteração da posição dos elementos ópticos) e a modulação das franjas de interferência não é certamente, pois agora as franjas isoclínicas não aparecem.

Existirá também um termo adicionado à expressão (a) pelos mesmos motivos apresentados em 6.2.1, sendo também designada como termo médio, $M(x,y)$. Este termo médio é também diferente do existente nas imagens do polariscópio plano.

Como consequência do exposto a equação (a) virá modificada do seguinte modo:

$$I_{\gamma}(x,y) = K(x,y) [1 - \cos 2\gamma \cos \Delta(x,y) - \cos 2\alpha(x,y) \sin 2\gamma \sin \Delta(x,y)] + M(x,y) \quad (6.32)$$

vamos também aqui omitir as variáveis x e y, de modo a tornar a expressão (6.32) mais facilmente manipulável:

$$I_{\gamma} = K (1 - \cos 2\gamma \cos \Delta - \cos 2\alpha \sin 2\gamma \sin \Delta) + M \quad (6.33)$$

Observando a equação (6.33) podemos verificar que ela é algo mais complexa que a equação (6.3). Isto vai trazer algumas complicações ao seu tratamento, como iremos ver. Neste caso estamos interessados em obter o desfasamento angular Δ a partir de um conjunto de imagens. Poderíamos enunciar todos os métodos utilizados em 6.2.2, para resolver este problema. No entanto não é esta a melhor forma de o abordar, sendo por esse motivo referido apenas um dos algoritmos sugeridos em 6.2.2. É evidente que em 6.2.2 também poderíamos ter usado os métodos alternativos que vão ser usados aqui, tal torna-se desnecessário pois seria complicar a questão. E isto porque as soluções alternativas recorrem à função inversa do cosseno, que é mais difícil de tratar que a inversa da tangente. Além disso na função inversa da tangente podemos obter resultados para o intervalo $[0, 2\pi]$ (por análise do sinal das funções seno e cosseno), enquanto na função inversa do cosseno os resultados aparecem no intervalo $[0, \pi]$.

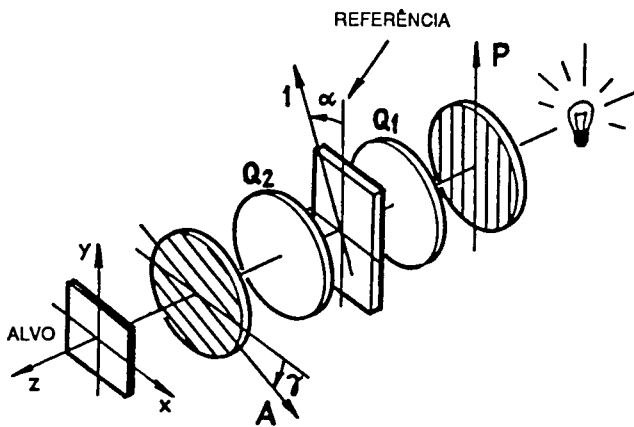


fig. 6.16 - Disposição mais geral do polariscópio circular.

6.3.2 TÉCNICAS DE 3 IMAGENS

Reparando na equação (6.33), podemos encontrar quatro incógnitas, $K(x,y)$, $\Delta(x,y)$, $\alpha(x,y)$ e $M(x,y)$. Por conseguinte, a não ser que se elimine a incógnita $\alpha(x,y)$, que não tem qualquer interesse para a presente análise, as imagens necessárias serão mais de três. É precisamente este o problema que se vai tentar resolver. Vejamos então a aplicação de um método semelhante ao aplicado em 6.2.2.1.

6.3.2.1 FASE INICIAL $2\gamma=0^\circ$ INCREMENTO $\Delta 2\gamma=90^\circ$

As imagens a utilizar serão as correspondentes a $\gamma=0^\circ$, $\gamma=45^\circ$ e $\gamma=90^\circ$ (neste caso γ refere-se ao ângulo rodado exclusivamente pelo analisador, mantendo-se todos os outros elementos na mesma posição).

Obtendo agora as expressões para as intensidades, para $\gamma=0^\circ$ a equação (6.33) virá:

$$I_{0^\circ} = K (1 - \cos \Delta) + M \quad (6.34)$$

que como é evidente é da mesma forma que a equação (2.33), ou seja corresponde ao polariscópio circular em campo escuro. Para $\gamma=45^\circ=\pi/4$ rad a equação (6.33) será transformada em:

$$I_{45^\circ} = K (1 - \cos 2\alpha \sin \Delta) + M \quad (6.35)$$

Finalmente se $\gamma=90^\circ=\pi/2$ rad, obter-se-á:

$$I_{90^\circ} = K (1 + \cos \Delta) + M \quad (6.36)$$

que será da mesma forma que a equação (2.35) e corresponde à imagem de polariscópio circular em campo iluminado.

Adicionando e subtraindo (6.34) e (6.36) obtemos respectivamente:

$$I_{90^\circ} + I_{0^\circ} = 2K + 2M \quad (6.37)$$

$$I_{90^\circ} - I_{0^\circ} = 2K \cos \Delta \quad (6.38)$$

Combinando as equações (6.35), (6.37) e (6.38) da forma seguinte:

$$\frac{I_{90^\circ} + I_{0^\circ} - 2 I_{45^\circ}}{I_{90^\circ} - I_{0^\circ}} = \text{tg } \Delta \cos 2\alpha \quad (6.39)$$

e explicitando a função $\Delta(x,y)$:

$$\Delta = \text{arc tg} \left[\frac{1}{\cos 2\alpha} \frac{I_{90^\circ} + I_{0^\circ} - 2 I_{45^\circ}}{I_{90^\circ} - I_{0^\circ}} \right] \quad (6.40)$$

ou seja, obtemos uma expressão que nos permite obter o desfasamento angular Δ , se para tal conhecermos a função $\alpha(x,y)$. Em 6.2.2 foram deduzidas expressões que nos permitem obter esta função, que podem ser utilizadas agora para tornar este método possível. O único problema reside no facto de a expressão (6.34) ter sido obtida considerando que α representa, para cada ponto, o ângulo que a direcção principal 1 faz com a vertical (referência), e dos métodos 6.2.2 o resultado poder ser esta solução ou a que lhe é perpendicular

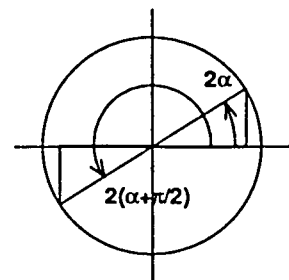


fig. 6.17 - Diferença para $\cos 2\alpha$ considerando as direcções principais 1 e 2.

(direcção principal 2). Daqui se pode concluir que este método é grandemente dependente da função $\alpha(x,y)$, e por isso a sua automatização torna-se praticamente impossível.

Como se pode ver na fig.6.17 a única diferença dos dois resultados, para $\cos 2\alpha$, é apenas no sinal, mas a impossibilidade de detecção da transição (por exemplo nos pontos isotrópicos, $\Delta=0$) torna os resultados algo estranhos e difíceis de interpretar. Só para casos em que as direcções principais têm variações pouco pronunciadas o método pode ser aplicado com êxito, como no caso do disco em compressão diametral na direcção vertical, que é apresentado na sequência das fig.s 6.18 a 6.22.

Como a função inversa da tangente dá resultados no intervalo $[-\pi/2, \pi/2]$ ou $[-\pi, \pi]$ (por análise dos sinais do seno e do cosseno), quando o carregamento é elevado, o desfasamento angular ultrapassa esses limites, havendo necessidade de efectuar um ajustamento da função de modo a torná-la contínua, fig.6.23.

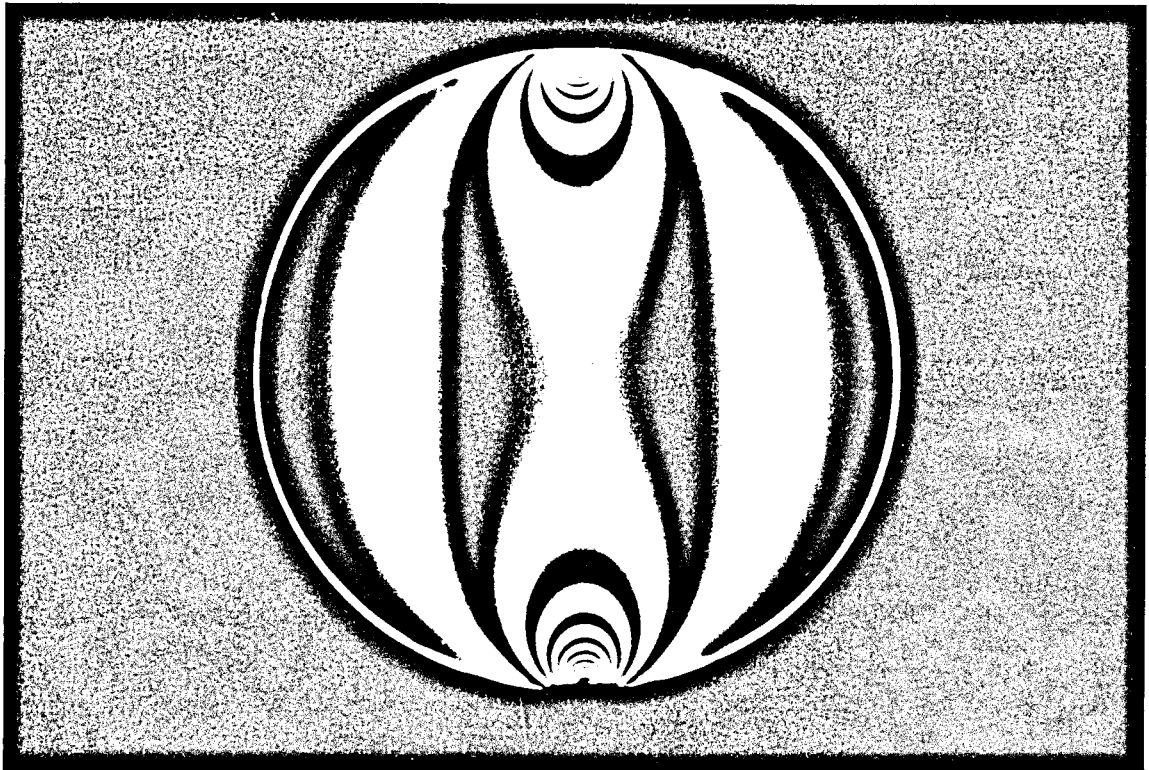


fig. 6.18 - Imagem dum disco em compressão diametral, $\gamma=0^\circ$ (polariscópio circular em campo escuro).

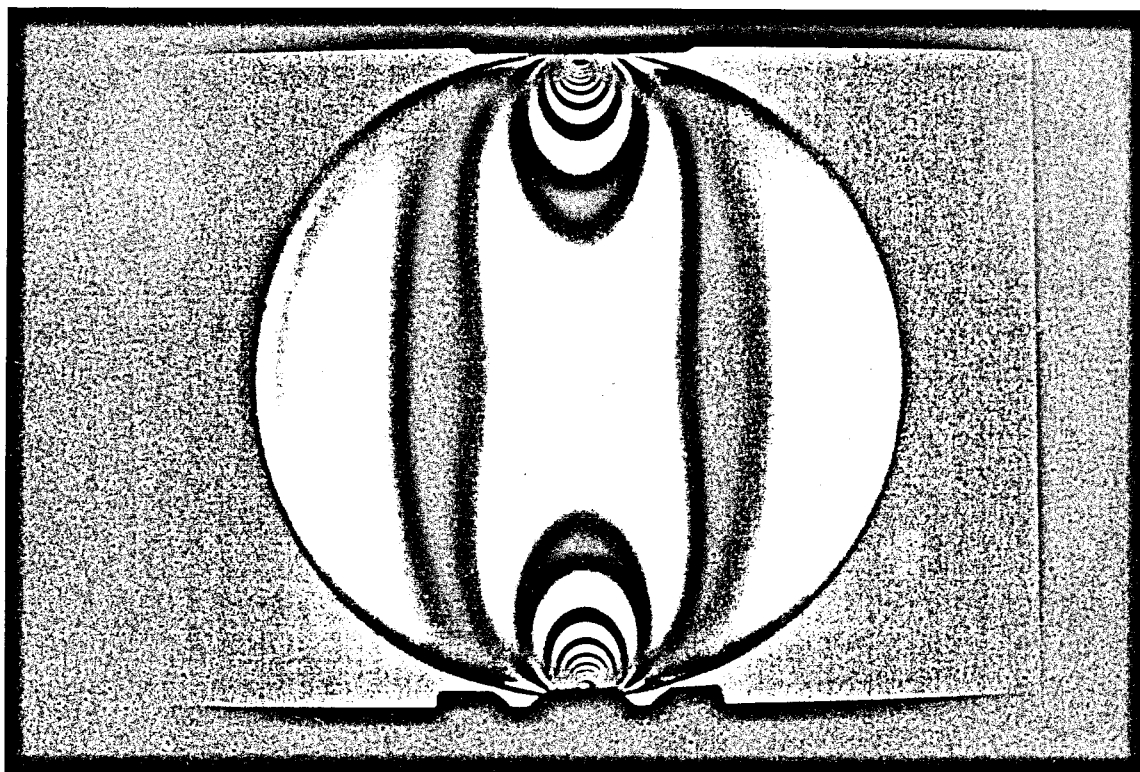


fig. 6.19 - Imagem dum disco em compressão diametral, $\gamma=45^\circ$.

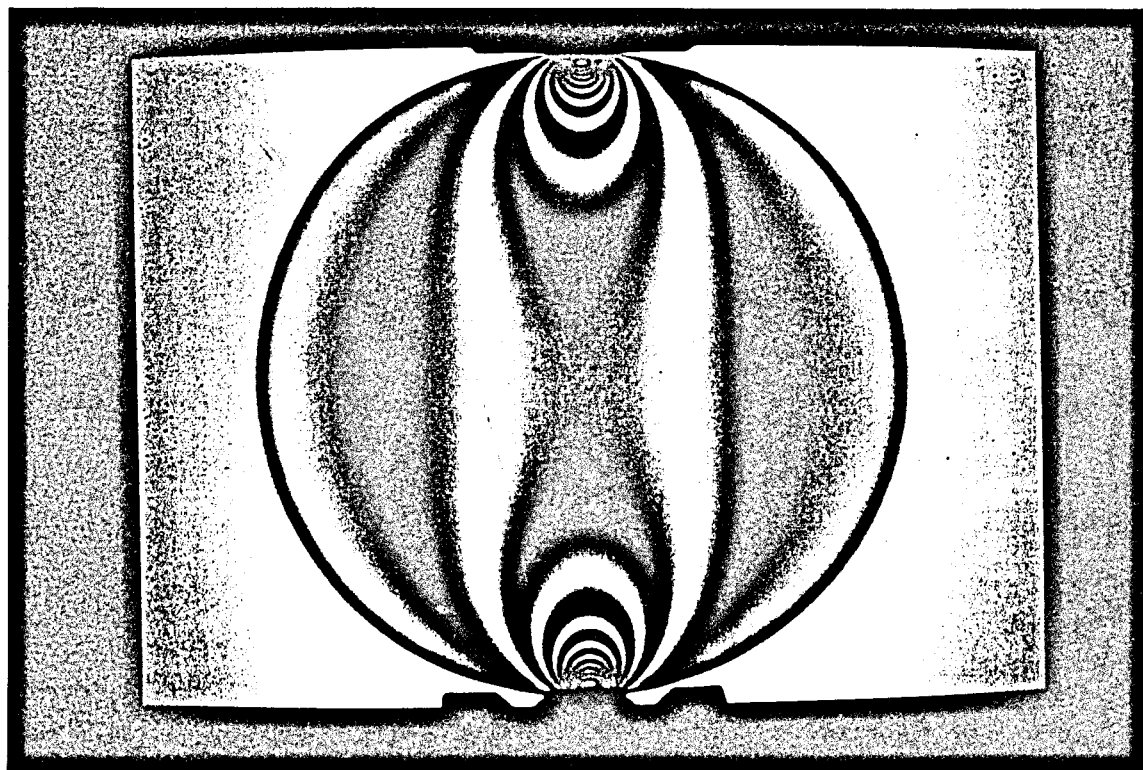


fig. 6.20 - Imagem dum disco em compressão diametral, $\gamma=90^\circ$ (polariscópio circular em campo iluminado).

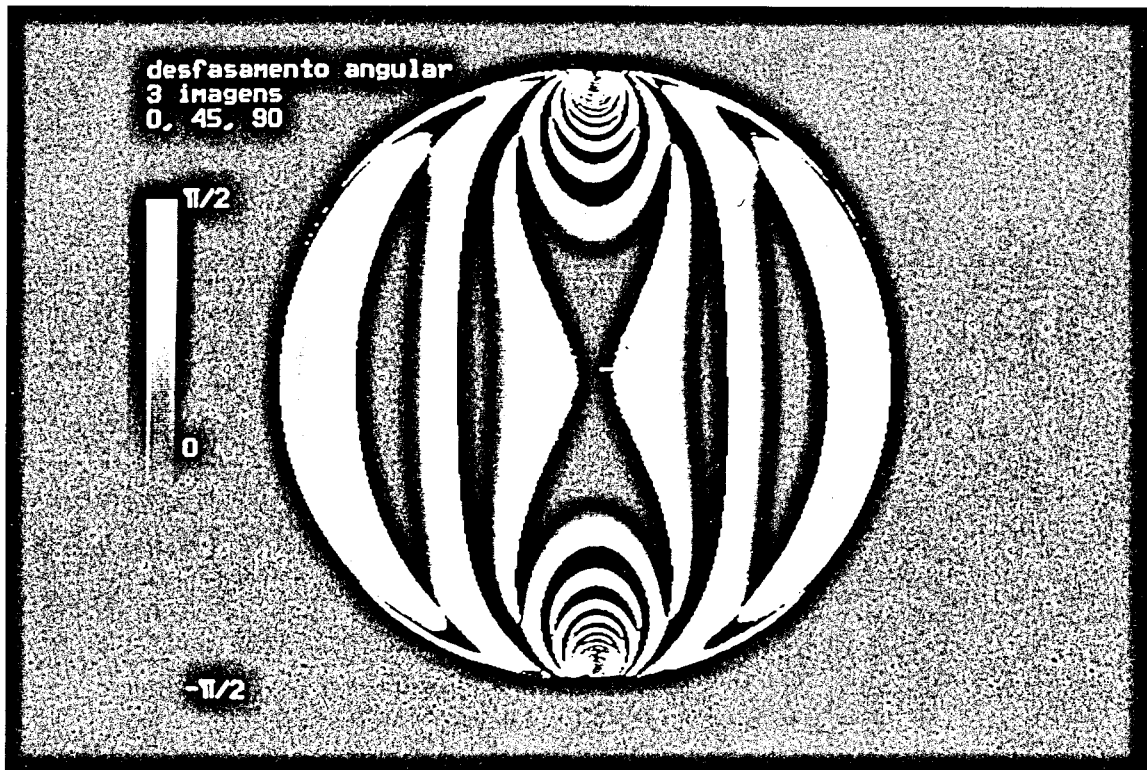


fig. 6.21 - Imagem processada permitindo a análise do desfasamento angular.

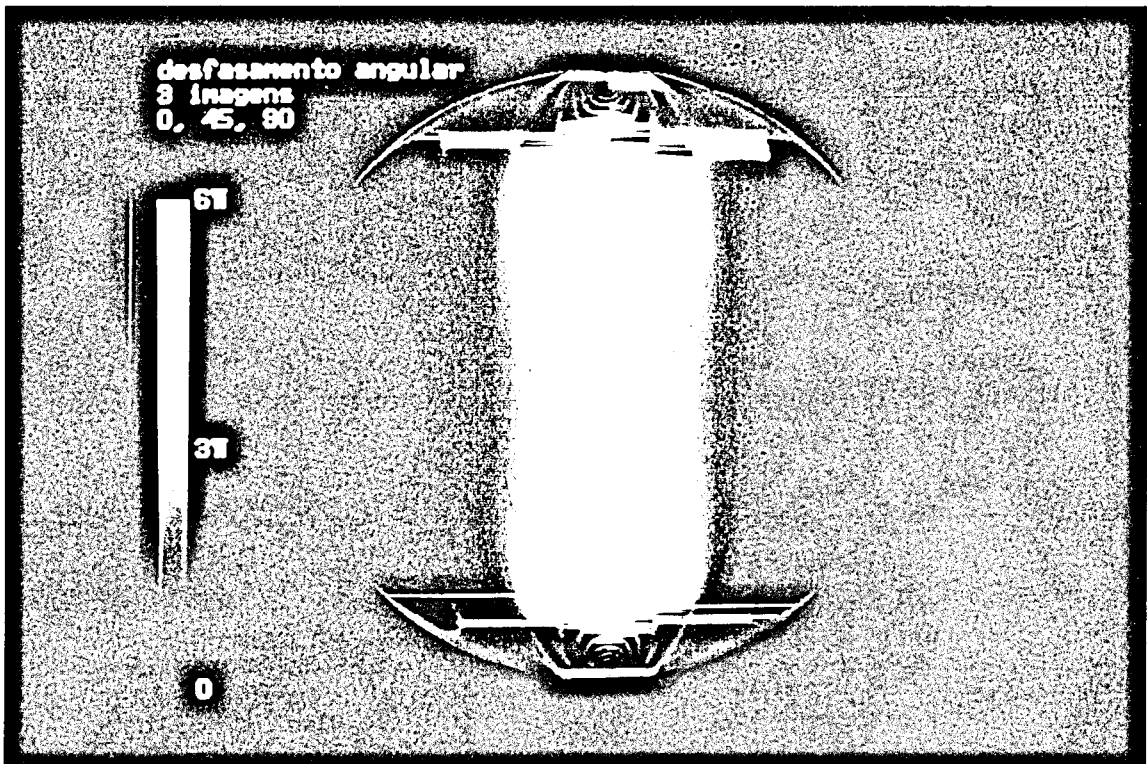


fig. 6.22 - Imagem do desfasamento angular após o ajustamento da função $\Delta(x,y)$.

6.3.2.2 FASE INICIAL $2\gamma=0^\circ$
INCREMENTO $\Delta 2\gamma=90^\circ$
(COM ELIMINAÇÃO DE $\alpha(x,y)$)

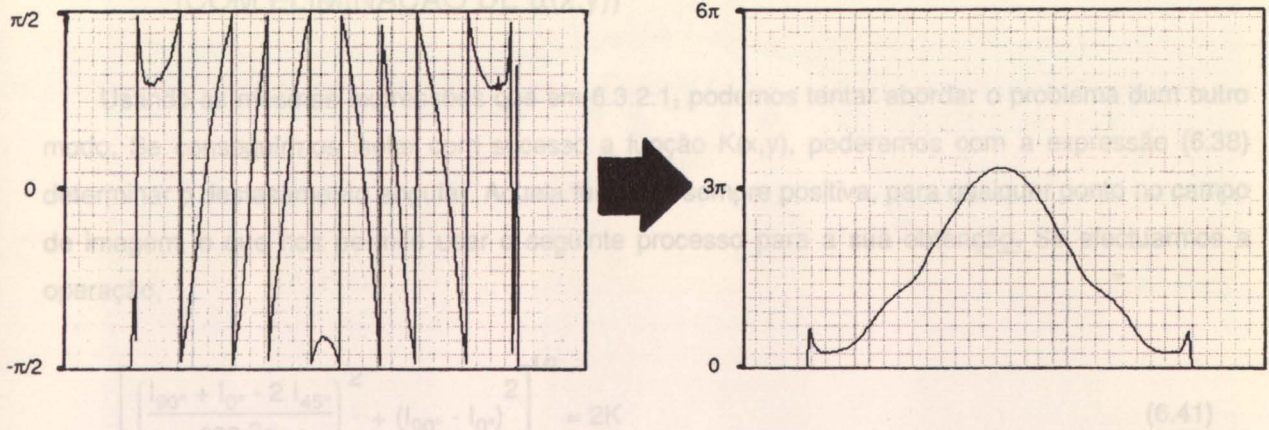


fig. 6.23 - Processo de ajustamento da continuidade da função.

eliminamos assim o problema de $\alpha(x,y)$ ser referido à direcção principal 1 pois a diferença no resíduo é constante. O uso de cores falsas permite visualizar melhor zonas dentro de uma determinada gama do desfaseamento angular. Esta afirmação pode ser comprovada por comparação das fig.s 6.22 e 6.24.

Como já foi referido, poderíamos agora aplicar outros algoritmos dos tipos apresentados em 6.2.2, mas o problema da utilização da função $\alpha(x,y)$ manter-se-ia. Por esse motivo vamos explorar antes uma via alternativa que nos permita eliminar esta ambiguidade.

ou explicitando a função $\Delta(x,y)$:

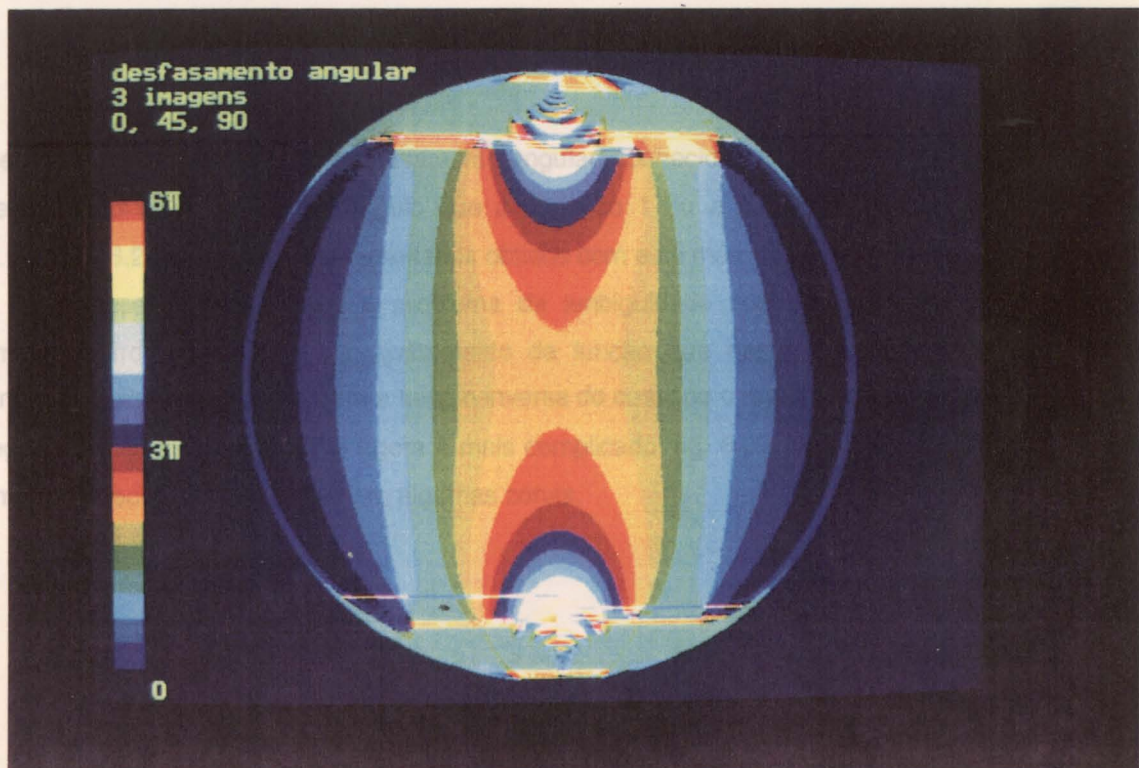


fig. 6.24 - O uso de cores falsas para uma melhor visualização do desfaseamento angular $\Delta(x,y)$.

6.3.2.2 FASE INICIAL $2\gamma=0^\circ$
INCREMENTO $\Delta 2\gamma=90^\circ$
(COM ELIMINAÇÃO DE $\alpha(x,y)$)

Usando as mesmas expressões que em 6.3.2.1, podemos tentar abordar o problema dum outro modo. Se conseguirmos isolar com sucesso a função $K(x,y)$, poderemos com a expressão (6.38) determinar o desfasamento angular. Aquela função é sempre positiva, para qualquer ponto no campo de imagem, o que nos permite usar o seguinte processo para a sua obtenção. Se efectuarmos a operação,

$$\left[\left(\frac{I_{90^\circ} + I_{0^\circ} - 2 I_{45^\circ}}{\cos 2\alpha} \right)^2 + (I_{90^\circ} - I_{0^\circ})^2 \right]^{1/2} = 2K \quad (6.41)$$

eliminamos assim o problema de $\alpha(x,y)$ ser referido à direcção principal 1 pois a diferença no resultado, sendo só de sinal (fig. 6.17), deixa de existir ao elevar-se ao quadrado.

Se agora dividirmos a equação (6.38) por (6.41) obtemos:

$$\frac{I_{90^\circ} - I_{0^\circ}}{2K} = \cos \Delta \quad (6.42)$$

ou explicitando a função $\Delta(x,y)$:

$$\Delta = \arccos \frac{I_{90^\circ} - I_{0^\circ}}{2K} \quad (6.43)$$

que nos permite determinar o desfasamento angular, conhecidas as direcções principais, mas sem a preocupação de se tratar do ângulo que a direcção 1 ou a direcção 2 faz com a vertical. Nas fig.s 6.25 e 6.26 mostram-se os resultados obtidos com este método.

Se conseguimos resolver o problema da ambiguidade nas direcções principais, ganhamos também outro problema, o do ajustamento da função que neste caso se torna mais difícil de ultrapassar. Primeiro porque com a função inversa do cosseno o resultado é obtido no intervalo $[0, \pi]$. Segundo porque o ajustamento agora é mais complicado, fig. 6.27, pois além da "subida" da função também é necessário invertê-la em algumas zonas.

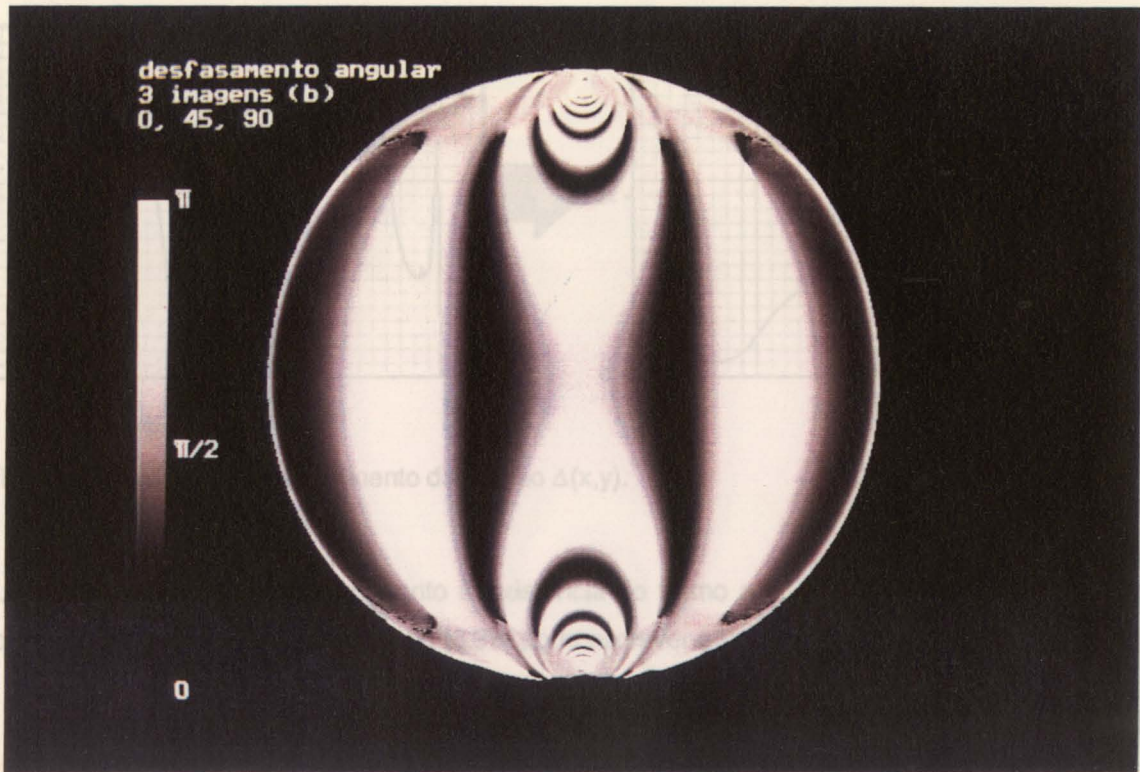


fig .6.25 - Obtenção do desfasamento angular $\Delta(x,y)$, eliminando a ambiguidade de $\alpha(x,y)$.

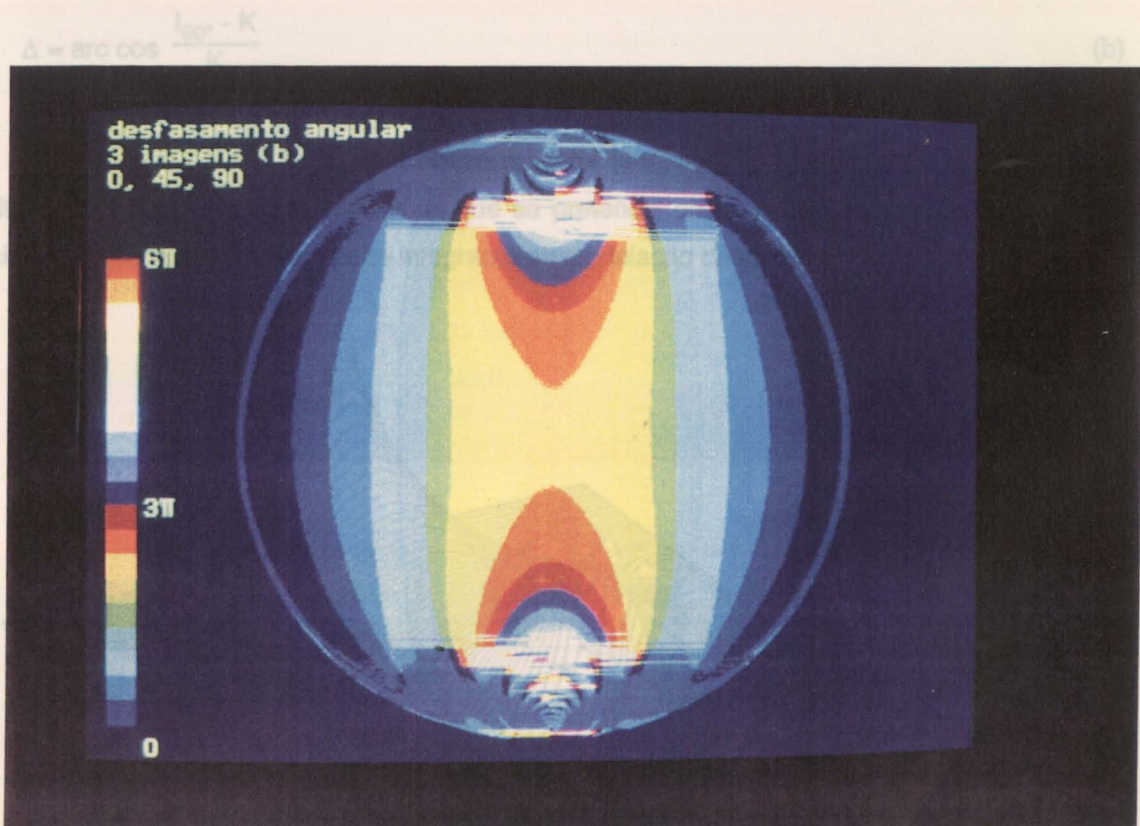


fig.6.26 - Mapa do desfasamento angular $\Delta(x,y)$ após ajustamento da função.

fig. 6.28 - Levantamento tridimensional da função $\Delta(x,y)$.

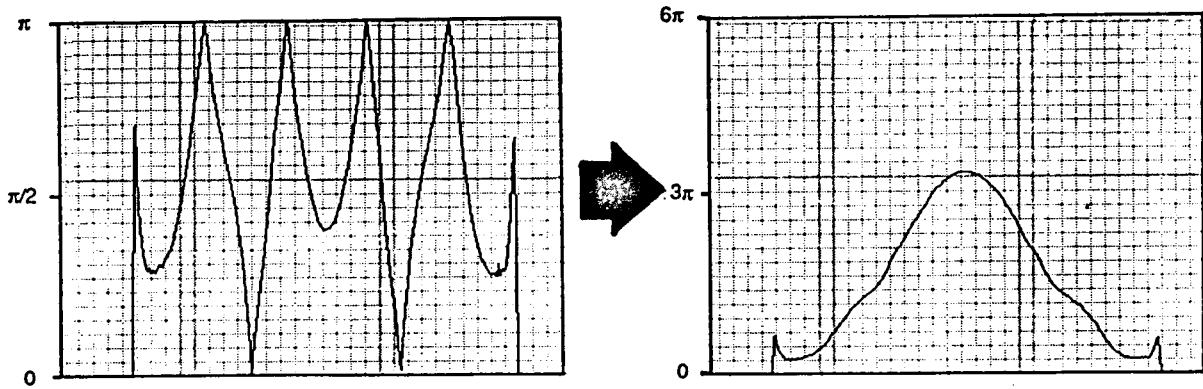


fig. 6.27 - Processo de ajustamento da função $\Delta(x,y)$.

Uma última abordagem impõe-se quanto à existência do termo médio, $M(x,y)$, assim se o termo médio for constantemente nulo a equação (6.36) pode escrever-se:

$$I_{90^\circ} = K (1 + \cos \Delta) \quad (a)$$

conhecendo a função $K(x,y)$ de (6.41) podemos então afirmar que:

$$\Delta = \arccos \frac{I_{90^\circ} - K}{K} \quad (b)$$

cujo resultado é o da fig. 6.29. Pela observação da imagem processada pode concluir-se que o resultado está longe de corresponder ao que se pretendia obter, o que demonstra a obrigação de considerar o termo médio como parte integrante na modelação da imagem.

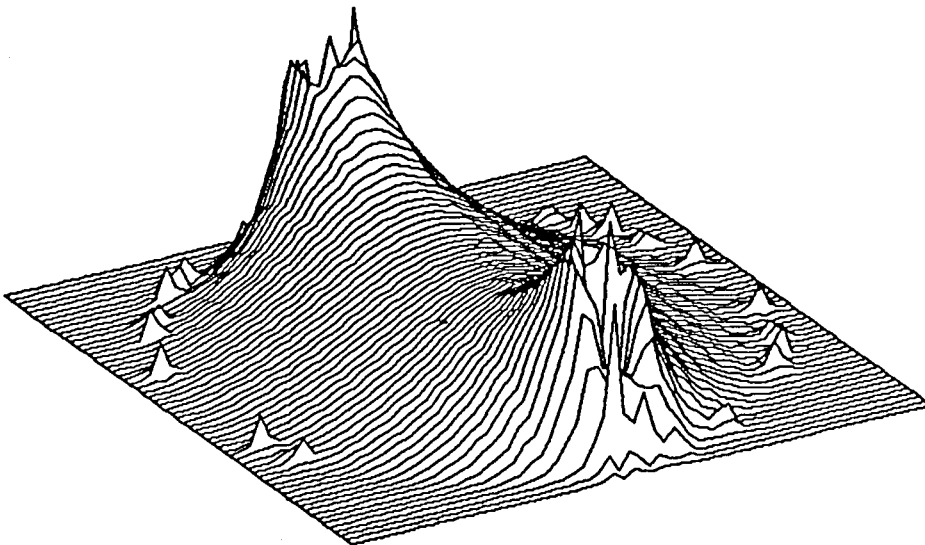


fig. 6.28 - Levantamento tridimensional da função $\Delta(x,y)$.

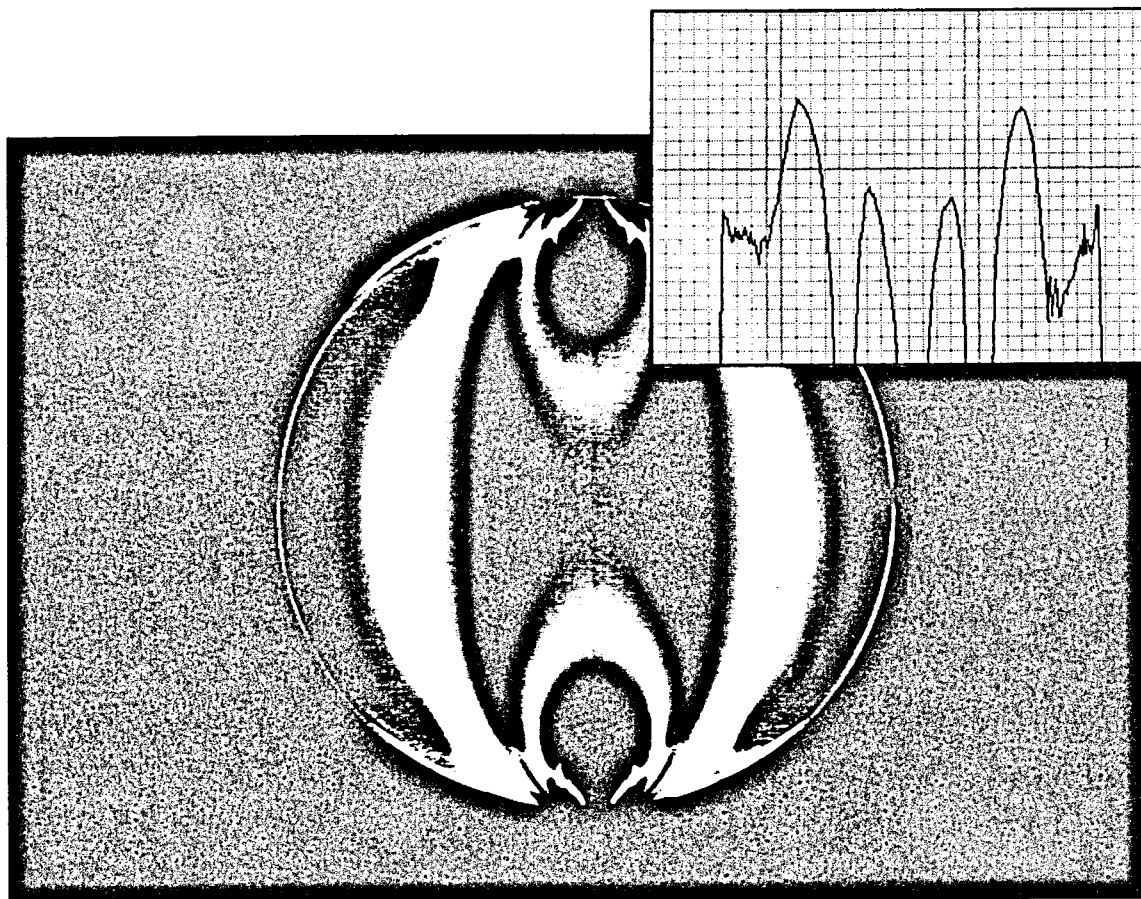


fig. 6.29 - Resultado do processamento sem considerar o termo médio $M(x,y)$, incluindo o perfil obtido para a linha utilizada na fig. 6.27.

6.3.3 TÉCNICAS DE 4 IMAGENS

Podíamos novamente recorrer aos métodos convencionais de separação de fase, usados em 6.3.3, mas como já vimos tal não é o caminho mais aconselhável. Vamos por isso usar apenas os métodos alternativos do mesmo tipo aplicado em 6.3.2, mas agora com o uso de quatro imagens. Os motivos que nos levam a apresentar estas técnicas de quatro imagens, são idênticos aos referidos em 6.2.3, por isso nos escusamos de os referir.

6.3.3.1 FASE INICIAL $2\gamma=0^\circ$ INCREMENTO $\Delta 2\gamma=90^\circ$ (COM ELIMINAÇÃO DE $\alpha(x,y)$)

As imagens utilizadas para esta situação são as correspondentes a $\gamma=0^\circ$, $\gamma=45^\circ$, $\gamma=90^\circ$ e $\gamma=135^\circ$. As três primeiras têm como expressões para a intensidade (6.34), (6.35) e (6.36), respectivamente:

$$I_0 = K (1 - \cos \Delta) + M \quad (a)$$

$$I_{45^\circ} = K (1 - \cos 2\alpha \sin \Delta) + M \quad (b)$$

$$I_{90^\circ} = K (1 + \cos \Delta) + M \quad (c)$$

Se agora na equação (6.33) substituirmos $\gamma=135^\circ=3\pi/4$ rad, obteremos:

$$I_{135^\circ} = K (1 + \cos 2\alpha \sin \Delta) + M \quad (6.45)$$

Para usar o método convencional de determinação da fase bastaria fazer:

$$\frac{I_{135^\circ} - I_{45^\circ}}{I_{90^\circ} - I_{0^\circ}} = \tan \Delta \cos 2\alpha \quad (d)$$

A obtenção da função $K(x,y)$ pode ser feita a partir de:

$$\left[\left(\frac{I_{135^\circ} - I_{45^\circ}}{\cos 2\alpha} \right)^2 + (I_{90^\circ} - I_{0^\circ})^2 \right]^{1/2} = 2K \quad (6.45)$$

O desfasamento angular pode agora ser obtido com a mesma expressão que anteriormente, (6.43). Nas fig.s 6.30 e 6.31 mostram-se os resultados obtidos com a utilização desta variante de cálculo da função $K(x,y)$.

6.3.3.2 FASE INICIAL $2\gamma=0^\circ$ INCREMENTO $\Delta 2\gamma=60^\circ$ (COM ELIMINAÇÃO DE $\alpha(x,y)$)

Para esta situação necessitamos das imagens $\gamma=0^\circ$, $\gamma=30^\circ$, $\gamma=60^\circ$ e $\gamma=90^\circ$. A primeira e a última das quais tem como expressões para a intensidade dadas por (6.34) e (6.36), ou seja:

$$I_{0^\circ} = K (1 - \cos \Delta) + M \quad (a)$$

$$I_{90^\circ} = K (1 + \cos \Delta) + M \quad (b)$$

Obtendo agora as intensidades para $\gamma=30^\circ=\pi/6$ rad e $\gamma=60^\circ=\pi/3$ rad, chegamos respectivamente a:

$$I_{30^\circ} = K \left(1 - \frac{1}{2} \cos \Delta - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \Delta \cos 2\alpha \right) + M \quad (6.46)$$

e

$$I_{60^\circ} = K \left(1 + \frac{1}{2} \cos \Delta - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \Delta \cos 2\alpha \right) + M \quad (6.47)$$

Para usar o método convencional de determinação da fase far-se-ia agora:

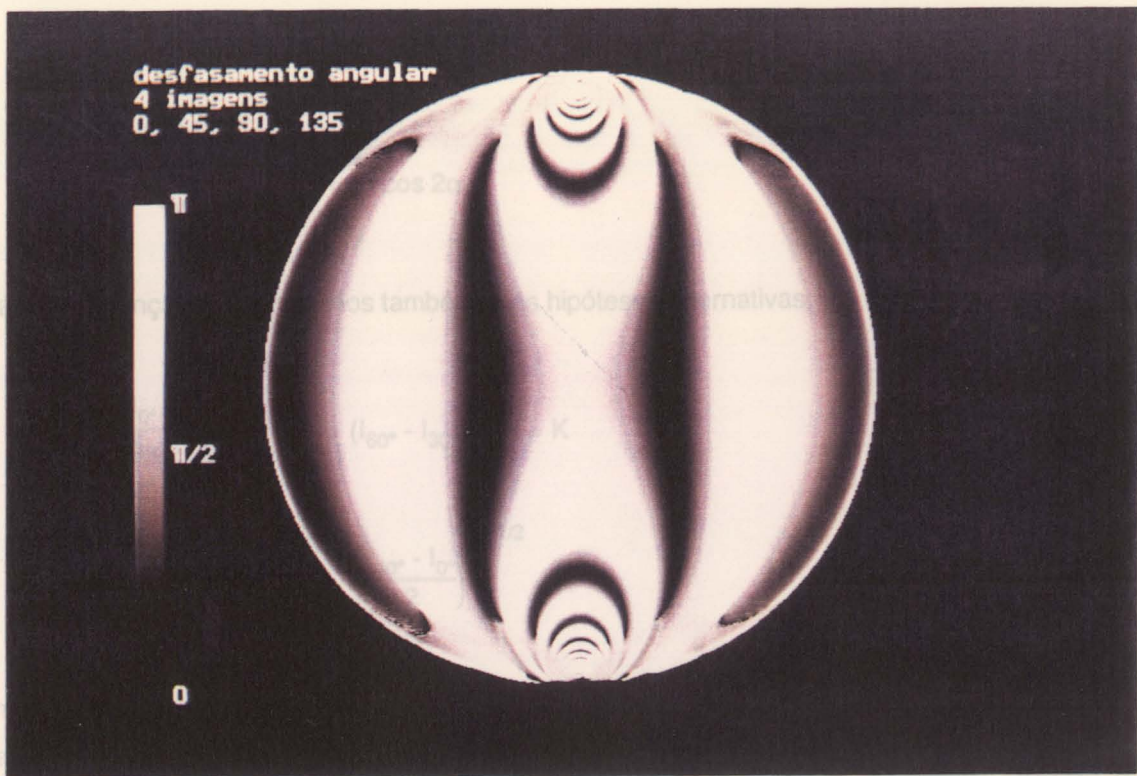


fig. 6.30 - Obtenção do desfasamento angular $\Delta(x,y)$, eliminando a ambiguidade de $\alpha(x,y)$.

O desfasamento angular pode agora ser obtido usando a expressão (6.43), ou pode criar-se uma

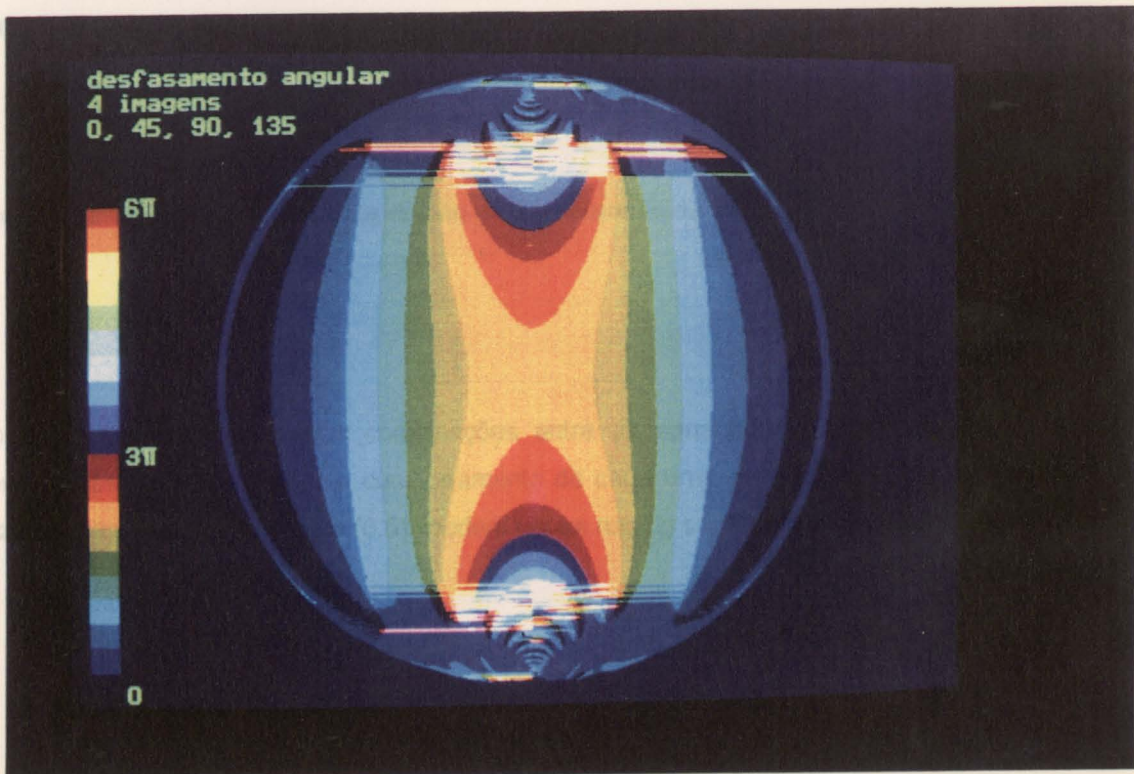


fig. 6.31 - Mapa do desfasamento angular $\Delta(x,y)$ após ajustamento da função.

Para usar o método convencional de determinação da fase far-se-ia agora:

$$\frac{I_{90^\circ} + I_{0^\circ} - I_{60^\circ} - I_{30^\circ}}{I_{60^\circ} - I_{30^\circ}} = \sqrt{3} \Delta \cos 2\alpha \quad (c)$$

ou

$$\frac{I_{90^\circ} + I_{0^\circ} - I_{60^\circ} - I_{30^\circ}}{I_{90^\circ} - I_{0^\circ}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \Delta \cos 2\alpha \quad (d)$$

Para obter a função $K(x,y)$ teremos também duas hipóteses alternativas:

$$\left[\left(\frac{I_{90^\circ} + I_{0^\circ} - I_{60^\circ} - I_{30^\circ}}{\sqrt{3} \cos 2\alpha} \right)^2 + (I_{60^\circ} - I_{30^\circ})^2 \right]^{1/2} = K \quad (6.48)$$

ou

$$\left[\left(\frac{I_{90^\circ} + I_{0^\circ} - I_{60^\circ} - I_{30^\circ}}{\sqrt{3} \cos 2\alpha} \right)^2 + \left(\frac{I_{90^\circ} - I_{0^\circ}}{2} \right)^2 \right]^{1/2} = K \quad (6.49)$$

Como curiosidade, também aqui se verifica uma relação semelhante à encontrada no caso do polariscópio plano, isto é:

$$I_{90^\circ} - I_{0^\circ} = 2(I_{60^\circ} - I_{30^\circ}) \quad (e)$$

O desfaseamento angular pode agora ser obtido usando a expressão (6.43), ou pode criar-se uma alternativa, uma vez que:

$$I_{60^\circ} - I_{30^\circ} = K \cos \Delta \quad (6.50)$$

podemos assim obter uma nova expressão para a obtenção da função $\Delta(x,y)$:

$$\Delta = \arccos \frac{I_{60^\circ} - I_{30^\circ}}{K} \quad (6.51)$$

São portanto permitidas várias combinações entre as equações já obtidas, que talvez tivesse interesse comparar e verificar o comportamento de cada uma delas. Os resultados obtidos com a utilização das equações (6.48) e (6.51) podem ver-se nas fig.s 6.32 e 6.33.

6.3.4 MULTIPLICAÇÃO DE FRANJAS

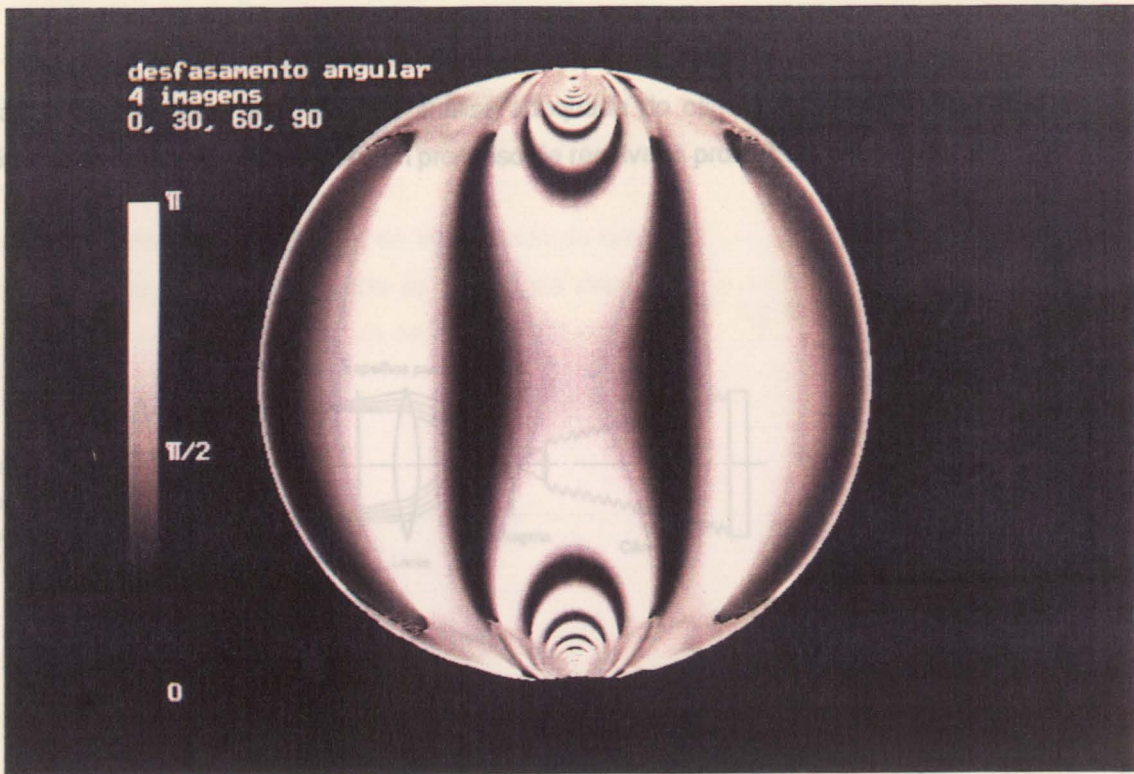


fig. 6.32 - Obtenção do desfasamento angular $\Delta(x,y)$, eliminando a ambiguidade de $\alpha(x,y)$, com as imagens $\gamma=0^\circ$, $\gamma=30^\circ$, $\gamma=60^\circ$ e $\gamma=90^\circ$.

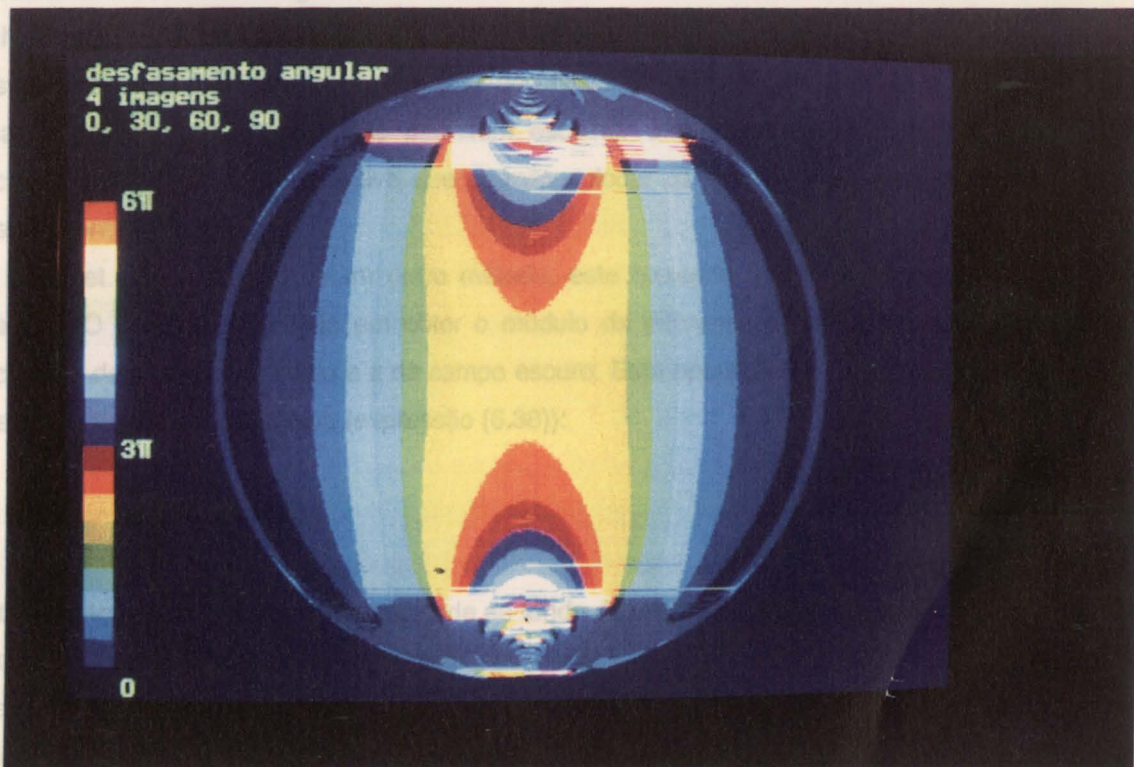


fig. 6.33 - Mapa do desfasamento angular $\Delta(x,y)$ após ajustamento da função.

6.3.4 MULTIPLICAÇÃO DE FRANJAS

Quando os materiais utilizados nos modelos fotoelásticos são pouco sensíveis, a quantidade de franjas é escassa para permitir uma análise adequada do campo de tensões. Por esse motivo a multiplicação de franjas se tomou num processo de resolver o problema.

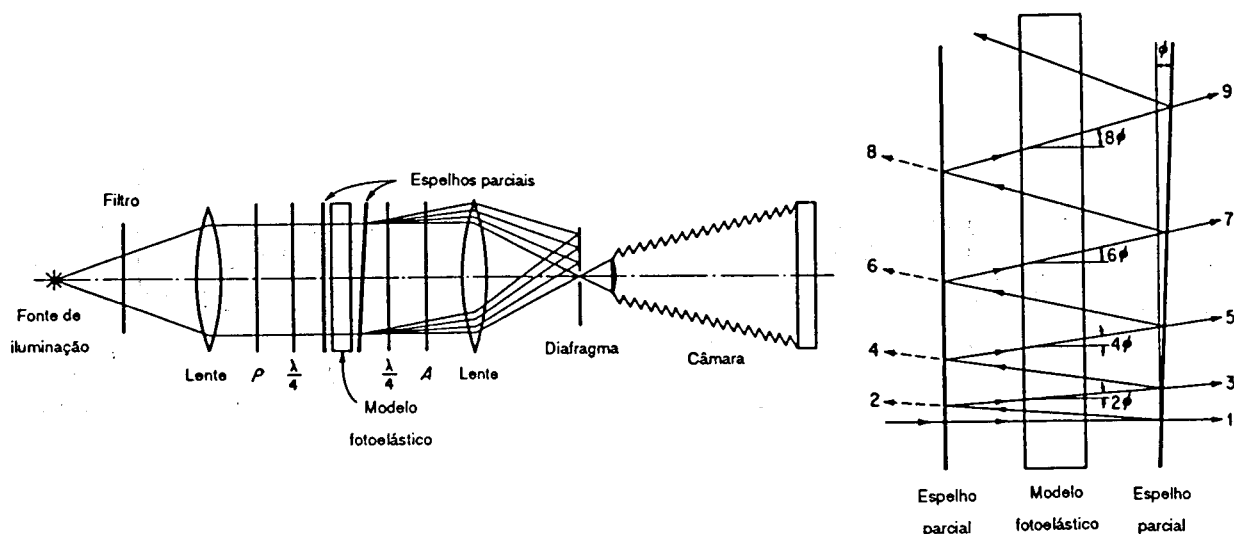


fig. 6.34 - A multiplicação de franjas desenvolvida por Post [33, 3].

Post [33] usou uma técnica de espelhos parciais colocados de ambos os lados do modelo fotoelástico, em que um deles está ligeiramente inclinado em relação ao outro, fig. 6.34. Deste modo os raios luminosos são obrigados a atravessar várias vezes o modelo fotoelástico criando o efeito de multiplicação, por interferência múltipla, do número ímpar de vezes que se quiser. Uma das desvantagens do método é a necessidade de utilizar um polariscópio provido de lentes de modo a focar a imagem em pontos, que permitem escolher o número de multiplicação. Além disso é necessário construir um dispositivo que permita colocar os espelhos e ajustar a inclinação de um relativamente ao outro.

Toh et. al. [34] propuseram outro método, este baseado em técnicas de processamento de imagem. O processo consiste em obter o módulo da diferença de duas imagens de polariscópio circular: a de campo iluminado e a de campo escuro. Esta operação permite obter uma nova imagem que tem o dobro da frequência (expressão (6.38)):

$$|I_{90^\circ} - I_{0^\circ}| = 2K |\cos \Delta| \quad (a)$$

Esta operação é feita após a luminosidade de fundo de uma das imagens ser normalizada em relação à outra. Com esta operação as franjas são multiplicadas por 2. Posteriormente invertendo esta imagem (usando uma "LUT" de inversão da imagem, fig. 6.35) e subtraindo-a (usando também o valor absoluto) à imagem não invertida, obtém-se a multiplicação por 4 do padrão de franjas. A limitação desta técnica é precisamente esta, de permitir, como máximo, uma multiplicação por 4.

Com os métodos de obtenção do desfasamento angular desenvolvidos em 6.3.3, é possível obter a multiplicação de franjas por um número de vezes que se quiser, sem a necessidade de alterar o polariscópio. Se dispusermos os resultados do cálculo do desfasamento angular, compreendidos no intervalo $[0, \pi]$, na gama 0-255 correspondente aos diversos níveis de intensidade de uma imagem, teremos na imagem obtida as franjas de ordem inteira com o nível 0 e as franjas de ordem metade com o nível 255, fig. 6.36.

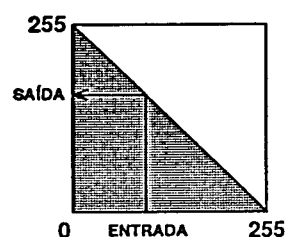


fig. 6.35 - "LUT" de inversão da imagem (negativo).

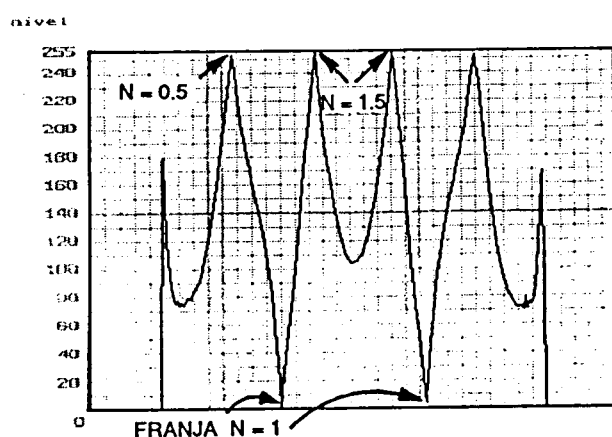


fig. 6.36 - Localização das franjas numa imagem com o desfasamento angular transformado em intensidade.

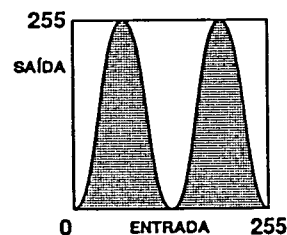


fig. 6.37 - "LUT" para executar a multiplicação de franjas (4x).

Construindo uma "LUT" com uma forma sinusoidal, fig.6.37, que permita dividir os níveis de 0 a 255 em faixas, conseguimos um efeito, na imagem de saída, que simula a multiplicação de franjas. A criação da "LUT", deve permitir definir o número de vezes que se pretende multiplicar o padrão de franjas.

Uma das virtudes desta técnica é que as franjas assim obtidas são muito nítidas, pois o contraste utilizado na imagem é sempre máximo. Este efeito pode ver-se por comparação das fig.s 6.38 (polariscópio circular em campo escuro) e 6.39 (esta utilizando o processo de multiplicação) correspondentes a uma placa com um entalhe lateral, traccionada na direcção vertical. Nas fig.s 6.40 e 6.41 mostram-se as multiplicações por 2 e 4, respectivamente.

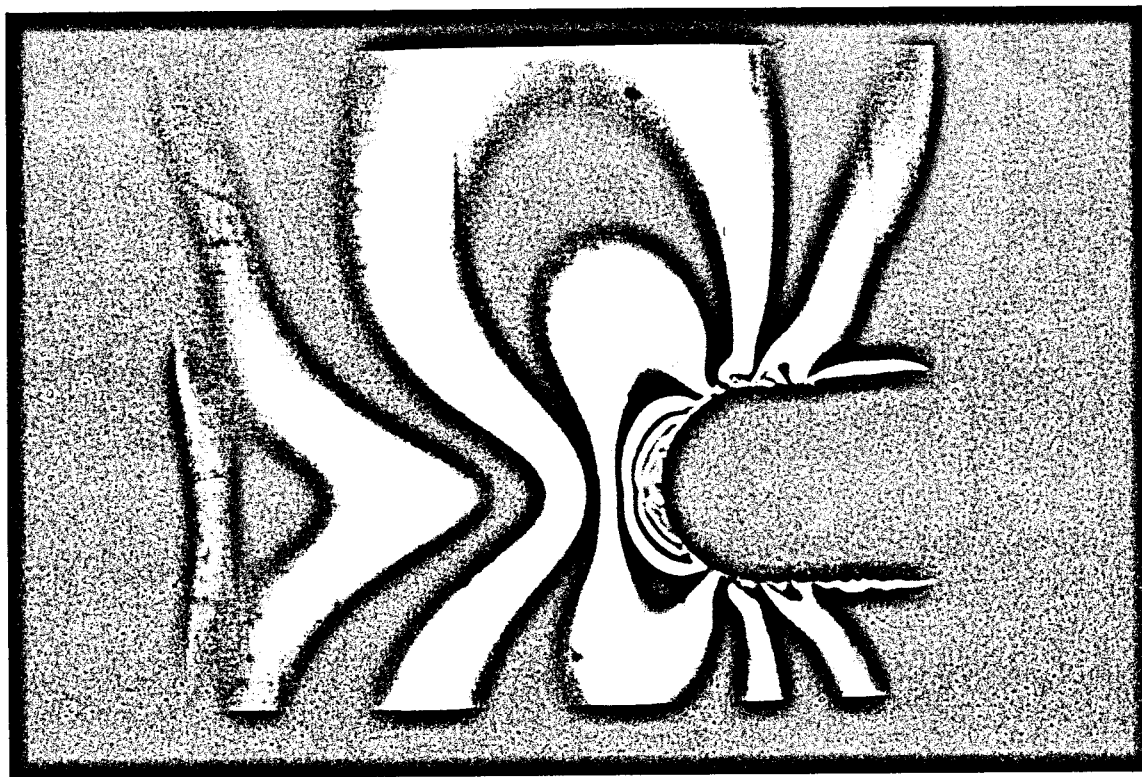


fig. 6.38 - Imagem de polariscópio circular (campo escuro) de uma placa com entalhe lateral traccionada na direcção vertical.

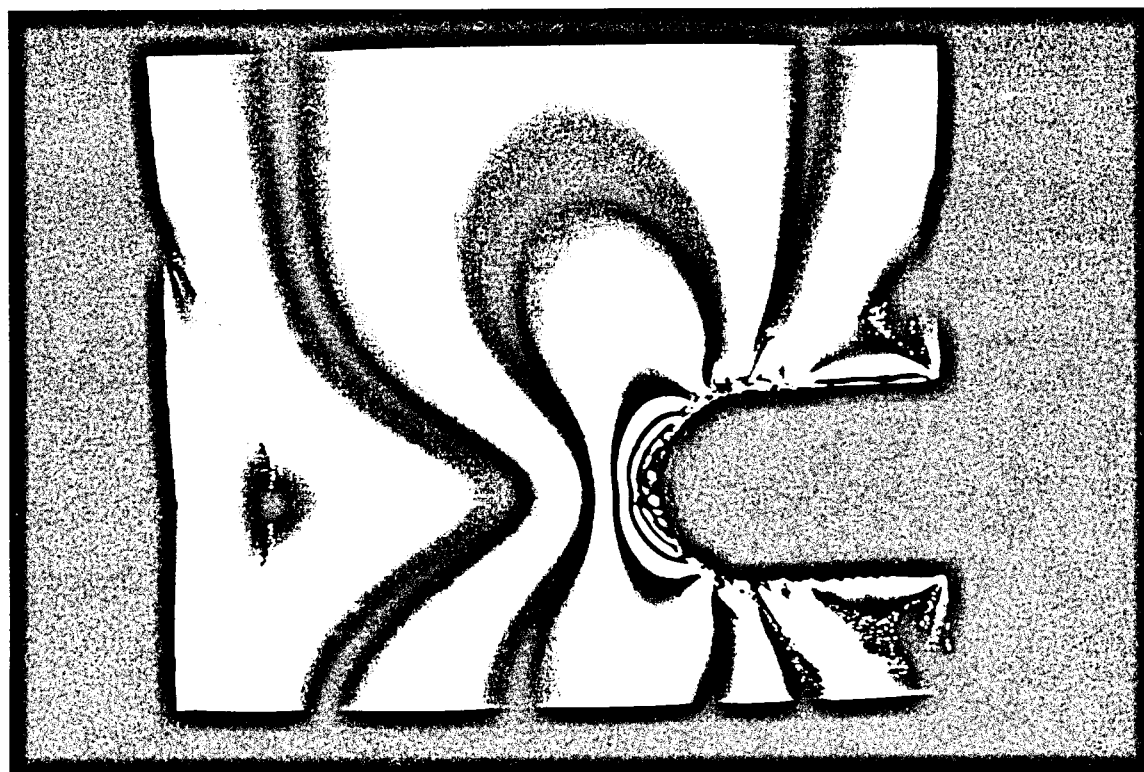


fig. 6.39 - Multiplicação por 1 após processamento para determinação do desfasamento angular.

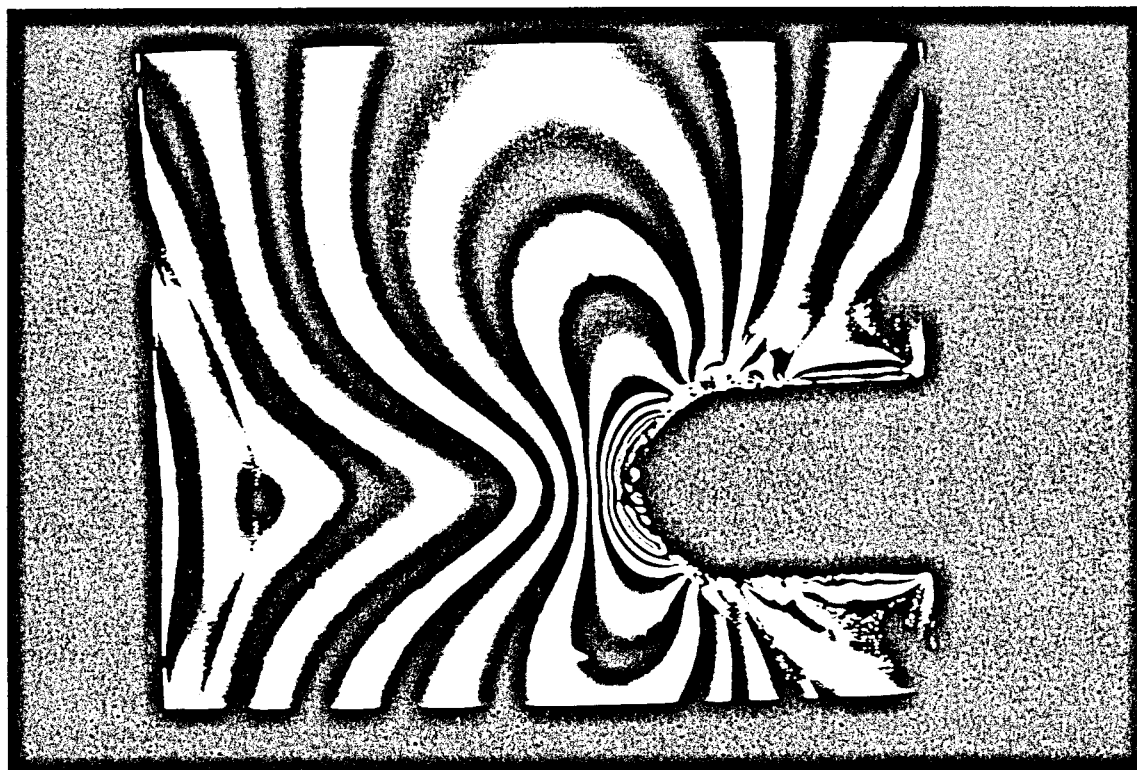


fig. 6.40 - Multiplicação por 2 após processamento para determinação do desfasamento angular.

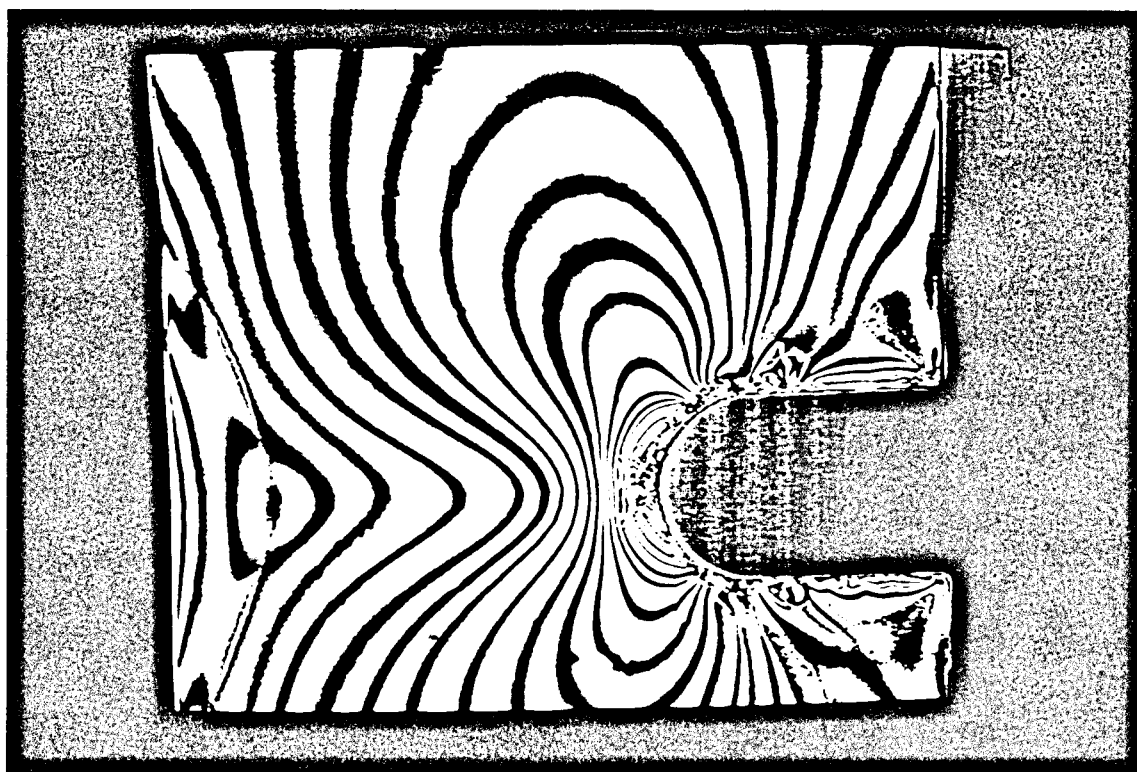


fig. 6.41 - Multiplicação por 4 após processamento para determinação do desfasamento angular.

CAPÍTULO 7

EXEMPLOS E RESULTADOS

7.1 INTRODUÇÃO

Os capítulos 5 e 6 são já uma demonstração de resultados. Contudo convém detalhar um pouco mais esses resultados de modo a particularizar a análise. Tal será feito no presente capítulo.

Num primeiro ponto, será estudado o caso do disco em compressão diametral na direcção vertical. Aliás foi este o exemplo utilizado no capítulo 6. Para este exemplo criou-se um programa que permite fazer a representação dos resultados fornecidos pela teoria da elasticidade, tanto para as direcções principais como para o desfasamento angular (ou diferença de fase). Após a obtenção dos resultados teóricos, faz-se a sua comparação com os resultados obtidos, com uma pequena análise de pormenores.

De seguida é analisado o caso de um anel também em compressão diametral na direcção vertical. Neste ponto são analisadas apenas as direcções principais e comparadas com resultados encontrados na bibliografia utilizada.

Finalmente é referido um exemplo de aplicação em que foi utilizada a interferometria holográfica. O componente em análise é uma lâmina duma guilhotina hidráulica. Sem a preocupação de explicar todo o processo de obtenção da imagem com as franjas de interferência, esta foi processada usando algumas técnicas de processamento de imagem, incluindo os algoritmos de erosão apresentados no capítulo 5. Convém talvez referir que neste caso as franjas correspondem a pontos de igual deslocamento. Após processada, a imagem permite fazer o levantamento dos deslocamentos na zona de interesse e eventualmente efectuar o cálculo das tensões instaladas na peça.

7.2 DISCO EM COMPRESSÃO DIAMETRAL

A situação que se vai analisar de seguida diz respeito a um disco em compressão diametral na direcção vertical, como se indica na fig.7.1. O disco foi maquinado a partir dum material fotoelástico, PSM-1, e tem as seguintes características:

- diâmetro: $D = 74.8 \text{ mm}$
- espessura: $h = 6.1 \text{ mm}$
- constante fotoelástica: $f_{\sigma} = 12000 \text{ N/m/franja}$

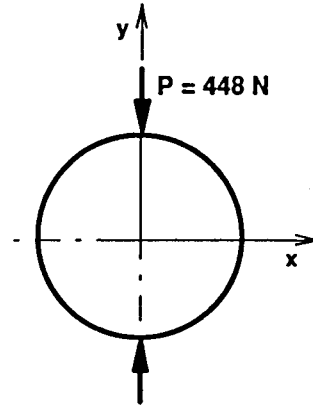


fig. 7.1 - Disco em compressão.

A constante fotoelástica foi obtida por calibração. Tal calibração torna-se necessária pois os materiais plásticos alteram as suas características com o tempo, quer devido aos raios ultravioletas quer à própria humidade.

7.2.1 SOLUÇÃO TEÓRICA

Com o fim de permitir a análise dos resultados obtidos com os métodos implementados, recorreu-se à bibliografia para obter a solução teórica relativa ao disco em compressão diametral. Recorrendo ao trabalho de Frocht [3] podemos aí encontrar as expressões que nos permitirão atingir tal objectivo.

Considerando um sistema de eixos como o indicado na fig.7.1, as direcções principais em cada ponto podem ser obtidas a partir da seguinte expressão:

$$\alpha(x,y) = \arctan \frac{2xy}{R^2 - y^2 + x^2} \quad (7.1)$$

onde R - raio do disco

Esta expressão torna evidente a afirmação feita anteriormente de que, desde que se mantenham as mesmas características geométricas, as direcções principais de tensão não se alteram com o carregamento.

Ainda recorrendo à mesma referência, podemos obter a expressão que nos permita obter o desfasamento angular, considerando o mesmo sistema de eixos. Assim o desfasamento angular originado pelo modelo fotoelástico poderá ser obtido a partir da seguinte expressão:

$$\frac{4PR}{\pi h (\sigma_1 - \sigma_2)} = \frac{(x^2 + R^2 + y^2)^2 - 4R^2 y^2}{R^2 - y^2 - x^2} \quad (7.2)$$

onde P - carga aplicada diametralmente
 h - espessura do disco
 σ_1, σ_2 - tensões principais

conhecida a relação entre a diferença das tensões principais e o desfasamento angular, expressão (2.25):

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\Delta f_\sigma}{2 \pi h} \quad (a)$$

podemos então obter:

$$\Delta(x,y) = \frac{8 P R}{f_\sigma} \frac{R^2 - y^2 - x^2}{(x^2 + R^2 + y^2)^2 - 4 R^2 y^2} \quad (7.3)$$

expressão que nos permite obter o desfasamento angular em qualquer ponto do modelo fotoelástico.

Com as expressões (7.1) e (7.3) podemos obter imagens idênticas às apresentadas no capítulo 6, para mostrar os resultados obtidos com os métodos utilizados.

A obtenção das imagens teóricas é conseguida a partir de um programa apropriado. Este começa por adquirir a imagem correspondente à máscara do modelo a analisar (a máscara permite separar o modelo do restante fundo). Assim esta imagem é definida por um nível máximo (255) na zona do modelo, e um nível mínimo (0) nos restantes pontos. O processo de obtenção é simples, e é feito a partir da imagem de polariscópio circular em campo escuro, à qual se aplica um "threshold" de modo a obter o nível máximo na zona do modelo. Não se consegue de imediato obter a máscara, pois algumas manchas ficam ainda na zona definida pelo modelo, mas após a utilização de um algoritmo que permita eliminar todas as manchas nessas condições, obtém-se uma imagem que define perfeitamente a região de interesse para a análise.

Após a especificação da região de interesse, o programa encarrega-se de definir o centro do disco, por análise da máscara. Conhecido o centro é possível definir as coordenadas x e y , relacionando o número de pontos que constituem o raio nas direcções x e y com o raio conhecido para o disco. Note-se que a relação não é igual para x e y , pois a imagem é constituída por 512x512 pontos sendo contudo rectangular, isto significa que no monitor cada ponto é um rectângulo.

Definidas as coordenadas de cada ponto, resta utilizar as expressões (7.1) e (7.3) para obter os resultados teóricos. Nas fig.s 7.2 e 7.3 são apresentadas as imagens obtidas pela utilização do programa descrito.

7.2.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos foram apresentados no capítulo 6, podendo agora comparar-se com os resultados teóricos obtidos em 7.2.1. Para facilitar a análise comparativa agruparam-se todos os resultados.

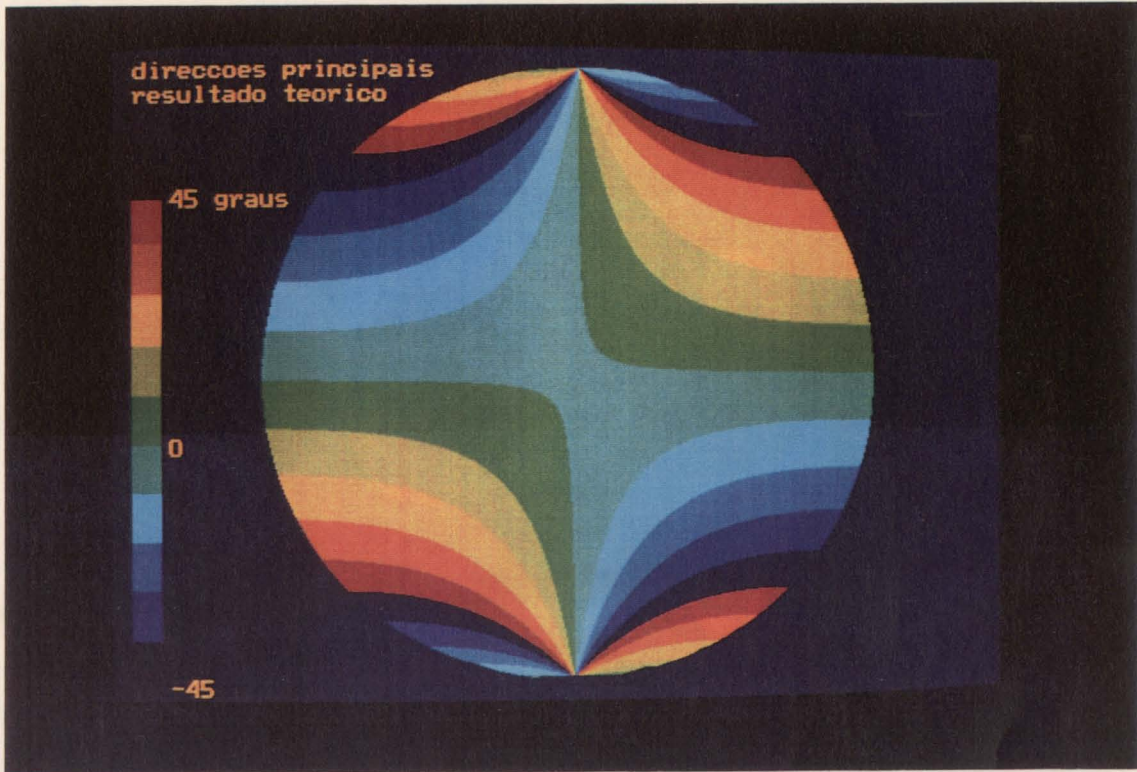


fig. 7.2 - Resultados teóricos correspondentes às direcções principais.

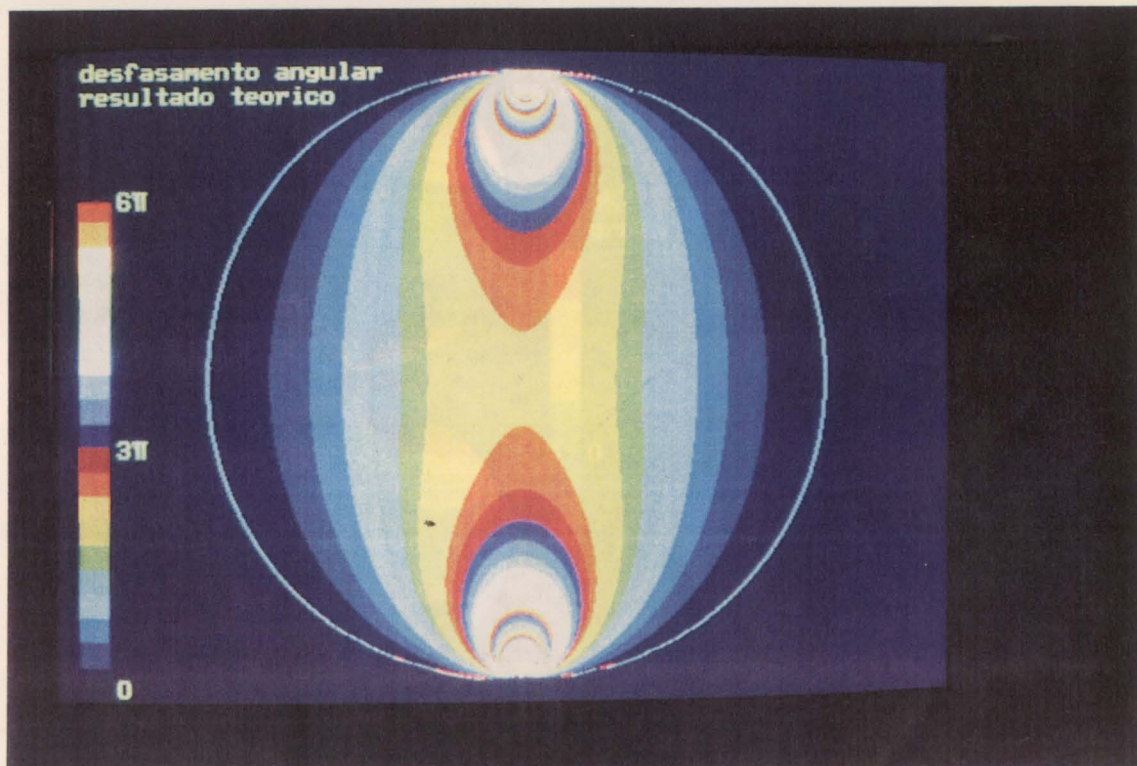


fig. 7.3 - Resultados teóricos correspondentes ao desfaseamento angular.

DIRECÇÕES PRINCIPAIS

Nas fig.s 7.4 e 7.5 encontram-se reunidos todos os resultados. Na primeira apresenta-se os resultados obtidos com as técnicas de 3 imagens em conjunto com o resultado teórico e na segunda o mesmo conjunto, mas agora para as técnicas de 4 imagens.

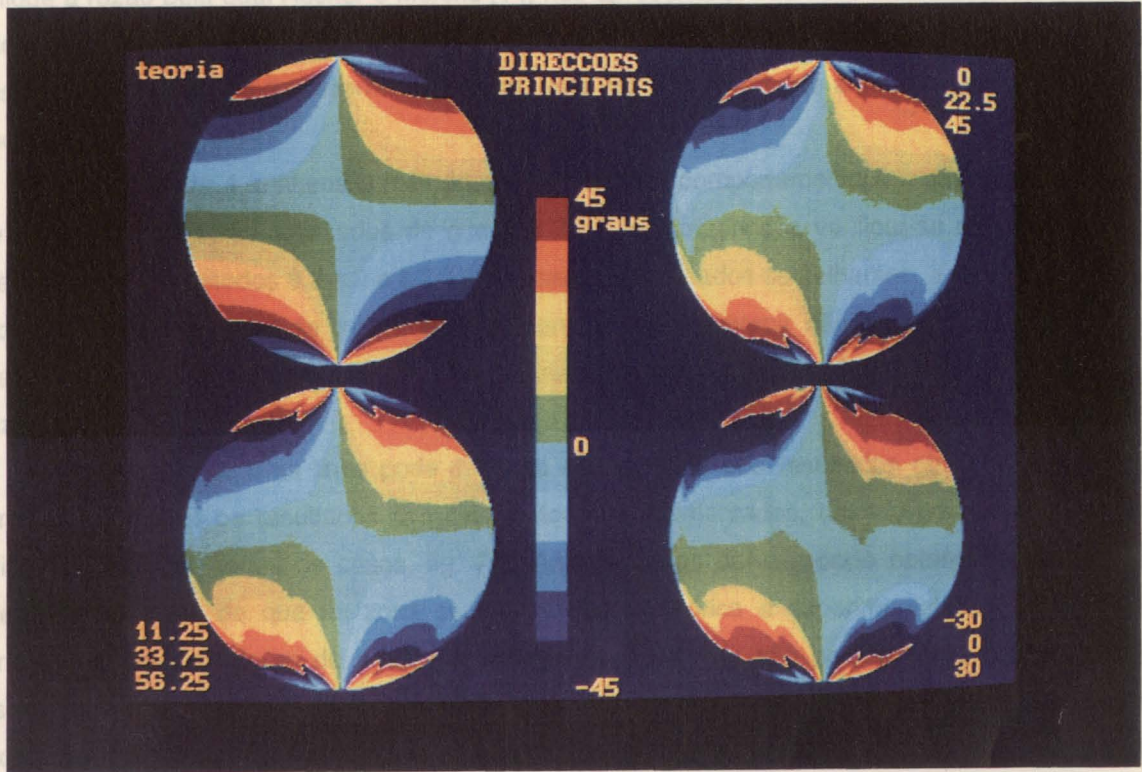


fig. 7.4 - Comparação de resultados para a determinação das direcções principais (3 imagens).

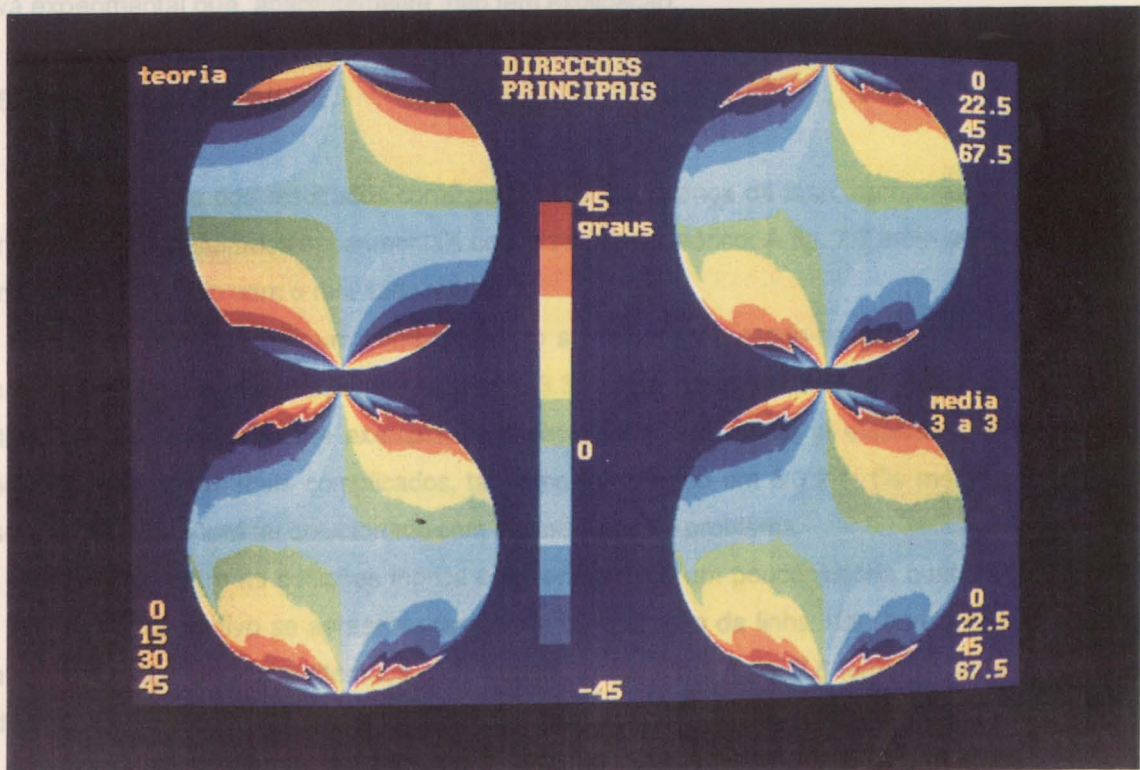


fig. 7.5 - Comparação de resultados para a determinação das direcções principais (4 imagens).

Nas técnicas de 3 imagens obtêm-se ótimos resultados com o método 6.2.2.2, muito próximos do resultado teórico, com ligeiras perturbações nas regiões onde surgem as franjas isocromáticas. Os resultados fornecidos pelo método 6.2.2.1 também são bons. No entanto as isoclínicas apresentam-se mais arredondadas do que no caso anterior, continuando a notar-se alguns erros nos locais das isocromáticas. O método 6.2.2.3 é sem dúvida o que fornece piores resultados. Isto talvez explique a razão pela qual Hecker e Morche [14] não apresentaram os seus resultados. Em todos os métodos a zona de transição, entre os 45° e -45° , é fonte de alguns erros que aliás se vão manifestar mais tarde no cálculo do desfasamento angular, uma vez que se recorre à informação das direcções principais.

Nas técnicas de 4 imagens o método que tem melhor comportamento é o descrito em 6.2.3.1, que apresenta melhores resultados do que o 6.2.2.2, continuando a verificar-se alguns dos erros antes citados. Os métodos 6.2.3.2 e 6.2.3.3 apresentam resultados semelhantes, a técnica de fazer a média do processamento de três a três imagens (6.2.3.3) parece não sortir o efeito desejado, revelando mesmo erros acrescidos na zona de transição pelos motivos já referidos na altura da sua utilização.

A visualização de uma linha pode dar uma melhor ideia dos resultados obtidos, pelo que se comparam a seguir os resultados dos seis métodos implementados, usando por exemplo a linha horizontal 120 para todos os casos, fig. 7.6. Analisando as curvas, pode notar-se a observação anteriormente feita, de que na zona central as curvas teórica e experimental são praticamente coincidentes, verificando-se de ambos os lados uns picos que são precisamente os locais onde passam as isocromáticas. Esta zona terminal foge também um pouco ao resultado teórico. Todos os algoritmos apresentam, tomando como análise as curvas, desempenhos semelhantes com excepção do algoritmo 6.2.2.3 que é o que fornece piores resultados. É estranha a forma sinusoidal da curva experimental que, aparentemente, não tem explicação.

DESFASAMENTO ANGULAR

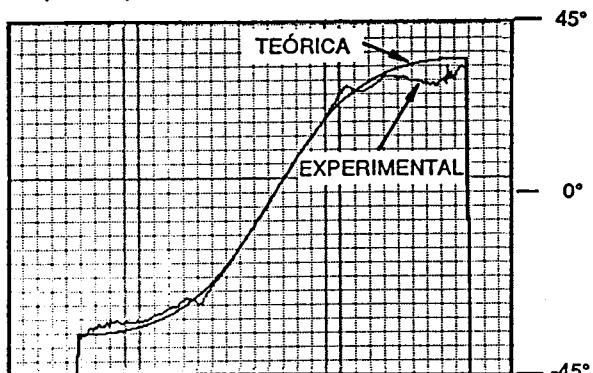
Tratando agora dos resultados correspondentes à diferença de fase, apresenta-se na fig. 7.7 a comparação dos resultados experimentais com o resultado teórico. A fig. 7.7 inclui as técnicas de 3 e 4 imagens lado a lado com o resultado teórico.

Todos os métodos têm um comportamento semelhante, notando-se uma maior diferença, em relação ao resultado teórico, para o método 6.3.3.2, que no entanto não é muito pronunciada. O método 6.3.2.1 fornece, neste exemplo, bons resultados mas, como já dissemos, não é fácil tirar conclusões em casos mais complicados, tal como foi referido em 6.3.2.1. Os métodos alternativos desenvolvidos parecem ter solucionado com sucesso aquele problema.

A diferença entre as soluções teórica e experimental é um pouco ilusória quando observada na fig. 7.7. Por esse motivo se apresenta também a comparação da linha 120 (horizontal), que permite avaliar com maior clareza a diferença entre aqueles resultados. A fig. 7.8 tem precisamente esse fim, podendo nela observar-se a qualidade dos resultados obtidos.

MÉTODO 6.2.2.1

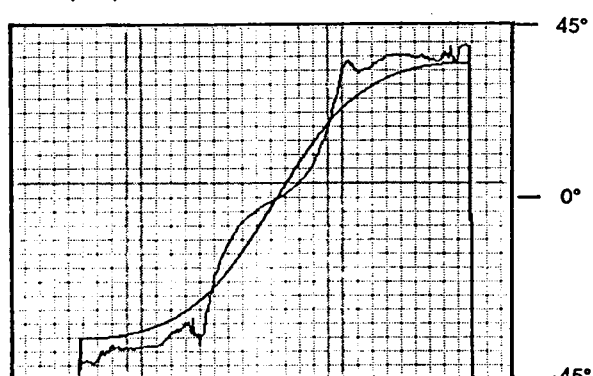
0°, 22.5°, 45°

**MÉTODO 6.2.2.2**

11.25°, 33.75°, 56.25°

**MÉTODO 6.2.2.3**

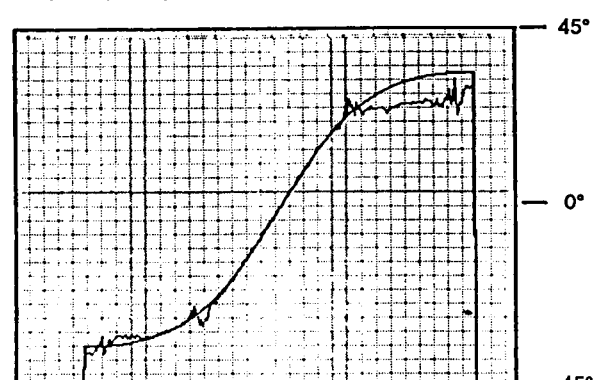
-30°, 0°, 30°

**MÉTODO 6.2.3.1**

0°, 22.5°, 45°, 67.5°

**MÉTODO 6.2.3.2**

0°, 15°, 30°, 45°

**MÉTODO 6.2.3.3**

0°, 22.5°, 45°, 67.5° (média 3 a 3)

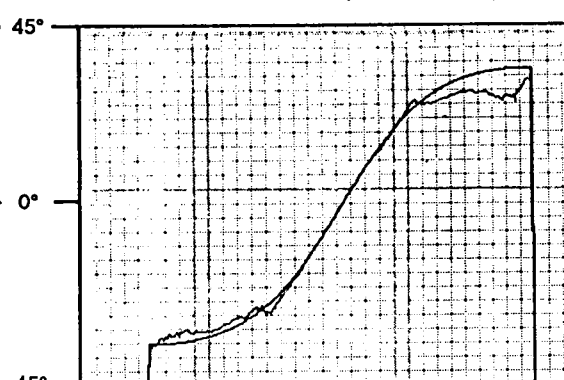


fig. 7.6 - Direcções principais: comparação das curvas experimentais com a teórica, para a linha 120.

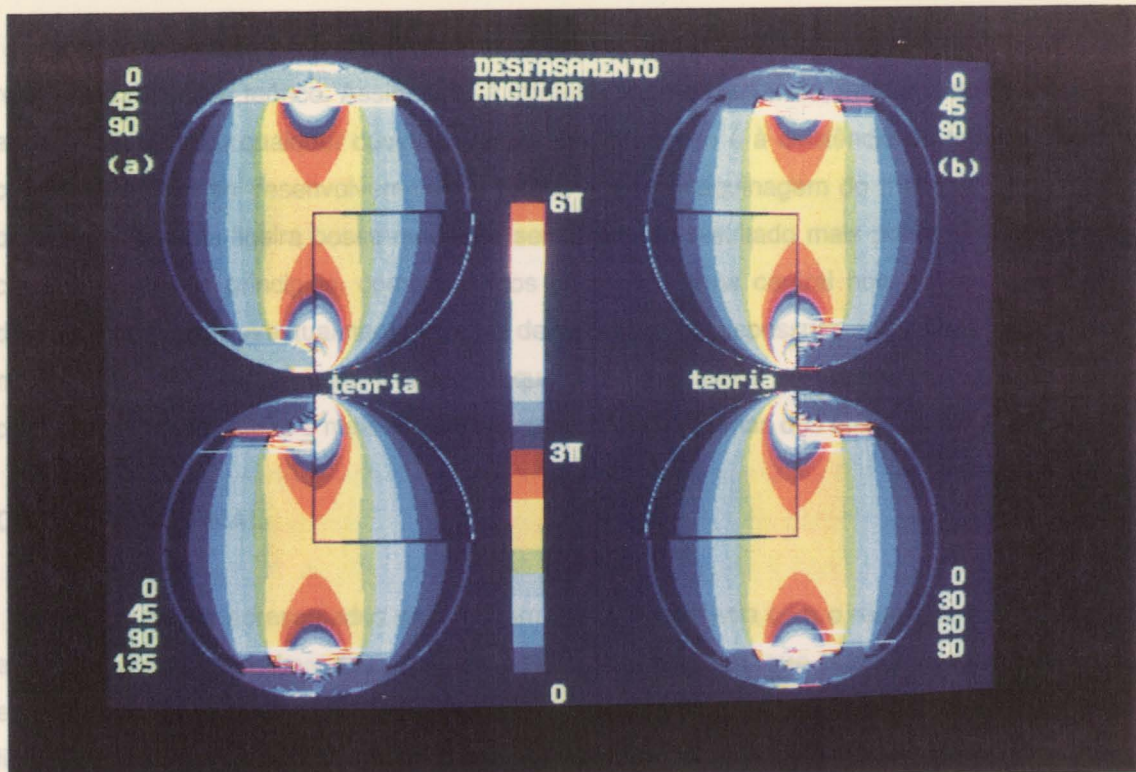


fig. 7.7 - Comparação de resultados para a obtenção do desfasamento angular.

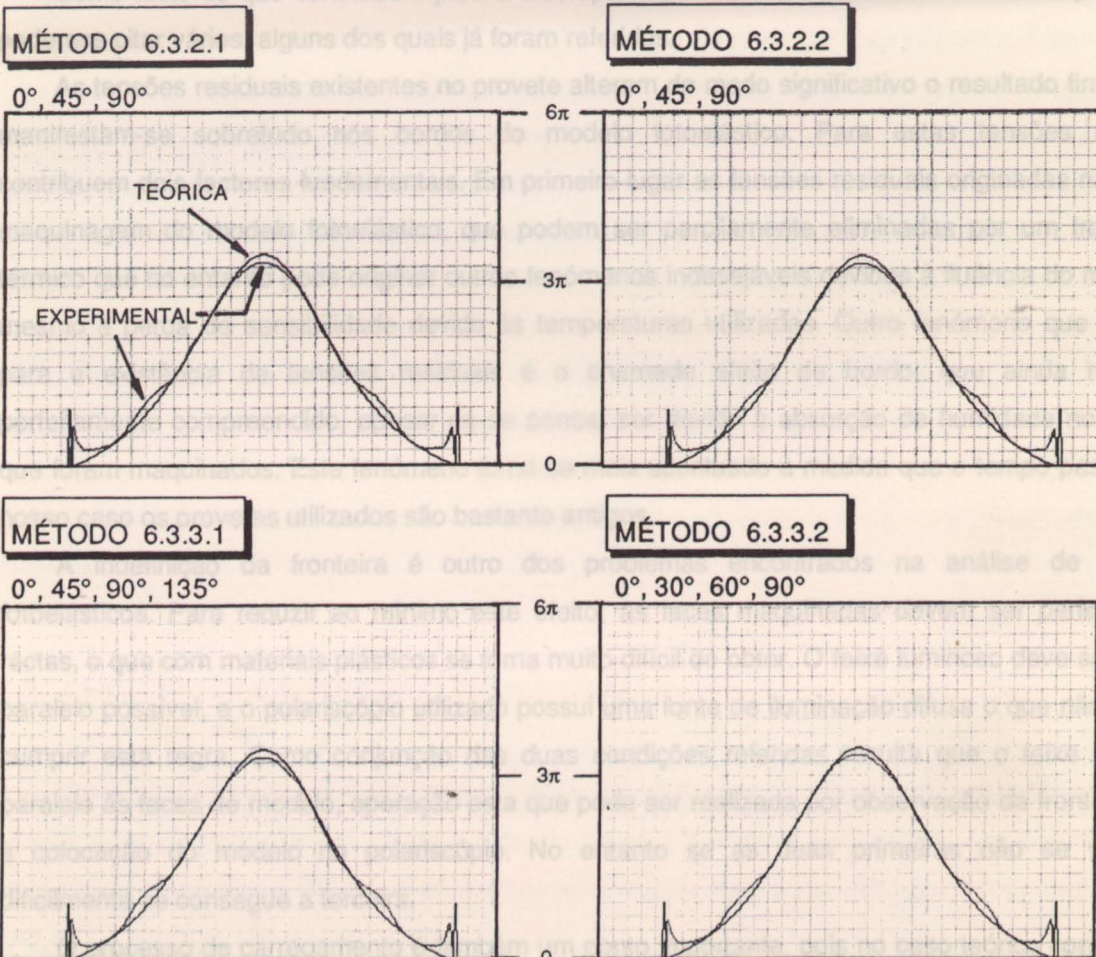


fig. 7.8 - Desfasamento angular: comparação das curvas experimentais com a teórica, para a linha 120.

Mais uma vez se nota idênticos resultados dos quatro métodos, com algumas diferenças em relação ao resultado teórico. Assim junto à fronteira pode observar-se um aumento do desfasamento angular devido sem qualquer dúvida ao efeito de bordo, isto é à existência de tensões residuais de compressão, que se desenvolvem com o tempo após a maquinagem do material. Logo de seguida pode notar-se uma ligeira bossa que pode ser devida ao resultado mais pobre obtido naquela zona com as direcções principais, como já vimos antes. Na zona central nota-se também uma ligeira diferença que pode eventualmente resultar de variações na espessura do provete e de deficiências no processo de carregamento. É evidente que estes problemas se manifestam ao longo de todo o provete, mas o seu efeito é mais notado nas zonas mais próximas dos eixos de simetria material.

COMENTÁRIO FINAL

Os resultados apresentados demonstram boa concordância com o resultado teórico. No entanto esta observação não deve ser tomada como rígida uma vez que é o caso real que está a ser estudado experimentalmente e não o caso teórico. São vários os factores que contribuem para ligeiras diferenças entre as duas situações. No entanto a tendência é idêntica nas duas situações, o que pensamos ser um bom indicador para a avaliação dos resultados obtidos.

Como factores que contribuem para a discrepância entre o caso teórico e o caso experimental podemos citar vários, alguns dos quais já foram referidos.

As tensões residuais existentes no provete alteram de modo significativo o resultado final. Estas manifestam-se sobretudo nos bordos do modelo fotoelástico. Para estas tensões residuais contribuem dois factores fundamentais. Em primeiro lugar as tensões residuais originadas na própria maquinagem do modelo fotoelástico, que podem ser parcialmente eliminadas por um tratamento térmico que no entanto pode originar outros fenómenos indesejáveis devidos à fluência do material e mesmo à perda de sensibilidade devido às temperaturas utilizadas. Outro fenómeno que contribui para a existência de tensões residuais é o chamado efeito de bordo, que ainda não está perfeitamente compreendido, apesar de se pensar ser devido à absorção de humidade nos bordos que foram maquinados. Este fenómeno torna-se mais acentuado à medida que o tempo passa, e no nosso caso os provetes utilizados são bastante antigos.

A indefinição da fronteira é outro dos problemas encontrados na análise de modelos fotoelásticos. Para reduzir ao mínimo este efeito, as faces maquinadas devem ser perfeitamente rectas, o que com materiais plásticos se torna muito difícil de obter. O feixe luminoso deve ser o mais paralelo possível, e o polariscópio utilizado possui uma fonte de iluminação difusa o que não permite cumprir esta regra. Como conjugação das duas condições referidas resulta que o feixe deve ser paralelo às faces do modelo, operação esta que pode ser realizada por observação da fronteira após a colocação do modelo no polariscópio. No entanto se as duas primeiras não se verificam, dificilmente se consegue a terceira.

O processo de carregamento é também um ponto importante, pois no caso teórico considera-se uma carga concentrada, o que na prática é impossível de obter. Além disso, podem existir desalinhamentos no carregamento o que contribui significativamente para a divergência do resultado

experimental em relação ao teórico. O carregamento deve ser uniforme ao longo da espessura, a utilização de uma superfície macia entre o sistema de carregamento permite melhorar este aspecto, no entanto alguns efeitos continuam a manifestar-se.

A existência de riscos e eventualmente sujidade no modelo fotoelástico podem também contribuir para os resultados finais, apesar de que os métodos utilizados permitem compensar parcialmente estes efeitos pois é utilizada a subtracção das imagens. A acumulação de pó nos elementos ópticos também se pode incluir aqui, pois existem zonas de acesso impossível e que consequentemente não podem ser limpas.

Relativamente aos elementos ópticos do polariscópio pode também referir-se eventuais erros introduzidos pelas placas quarto de onda que são de realização difícil e geralmente algo imperfeitas, tendo como consequência que a luz que atinge o modelo não seja perfeitamente circular. Ainda neste aspecto refira-se o facto de ser utilizada luz branca, que depois é filtrada de modo a transformar-se em monocromática. Neste processo pode haver pequenas variações relativamente ao comprimento de onda que é polarizado circularmente no polariscópio e o comprimento de onda para que está previsto o filtro monocromático. Apesar disso experimentou-se a utilização da luz branca, sem o uso do filtro monocromático, e os resultados revelaram-se idênticos aos obtidos com aquele, o que aumenta a versatilidade dos métodos apresentados. No caso da determinação das direcções principais, o uso de luz branca revela-se mesmo mais eficiente pois assim o efeito nefasto das isocromáticas é menos visível, uma vez que nesta situação estas só são negras para a ordem zero.

Ainda no respeitante ao modelo fotoelástico podemos referir pequenas irregularidades dimensionais, ou ainda o processo de obtenção da máscara que serve para construir as imagens relativas ao resultado teórico, que pode não ter exactamente as mesmas dimensões do provete, devido à dificuldade em obter essa mesma máscara. Variações de espessura ao longo do provete podem ser também fonte de pequenas alterações no comportamento global. A determinação da constante fotoelástica é também importante, pois como já referimos com o tempo o material perde sensibilidade, quer devido aos raios ultra-violetas, devido à absorção de humidade, ou mesmo às variações de temperatura, se o modelo for sujeito a grandes gradientes térmicos. Há por isso necessidade de efectuar a calibração do modelo, utilizando variantes na sua realização que não fornecem necessariamente o mesmo valor, recorrendo-se usualmente a um valor ponderado entre as diversas técnicas.

7.3 ANEL EM COMPRESSÃO DIAMETRAL

Neste ponto vamos analisar a determinação das direcções principais num anel em compressão diametral na direcção vertical, como é indicado na fig.7.9. O anel é construído no mesmo material fotoelástico que o disco, PSM-1, e as suas características, apesar de não serem importantes para o que se vai analisar, são as seguintes:

- diâmetro exterior: $D_e = 74.7 \text{ mm}$

- diâmetro interior: $D_i = 33.4 \text{ mm}$
- espessura: $h = 6.1 \text{ mm}$

Usando, por exemplo, o método 6.2.2.1 obtém-se a imagem apresentada na fig. 7.11. Nesta foram utilizadas cores falsas de modo a ser mais perceptível a variação das direcções principais ao longo de todo o anel. Usando agora um algoritmo semelhante ao utilizado para a multiplicação de franjas podemos marcar naquela imagem as isoclínicas que desejarmos, bastando para tal definir o número de divisões que se vão fazer na gama $[-45^\circ, 45^\circ]$. Essa divisão será efectuada nas "LUT's" de saída que terão a forma da fig. 7.10. Se usarmos seis divisões obtemos as isoclínicas de $-45^\circ, -30^\circ, -15^\circ, 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ e 45° que poderão também ser designadas de $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ e 90° , se substituirmos as isoclínicas negativas pelas suas correspondentes positivas (adicionando 90°). Na fig. 7.12 pode ver-se o resultado desta operação.

Para a análise dos resultados aqui obtidos, recorreremos à bibliografia utilizada [1], onde se encontra um anel, não necessariamente com as mesmas dimensões mas semelhante ao nosso, o que para a comparação qualitativa da obtenção das direcções principais serve perfeitamente, fig. 7.13.

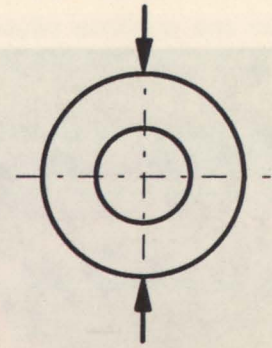


fig. 7.9 - Anel em compressão.



fig. 7.10 - "LUT" utilizada para obter as isoclínicas da fig. 7.12.

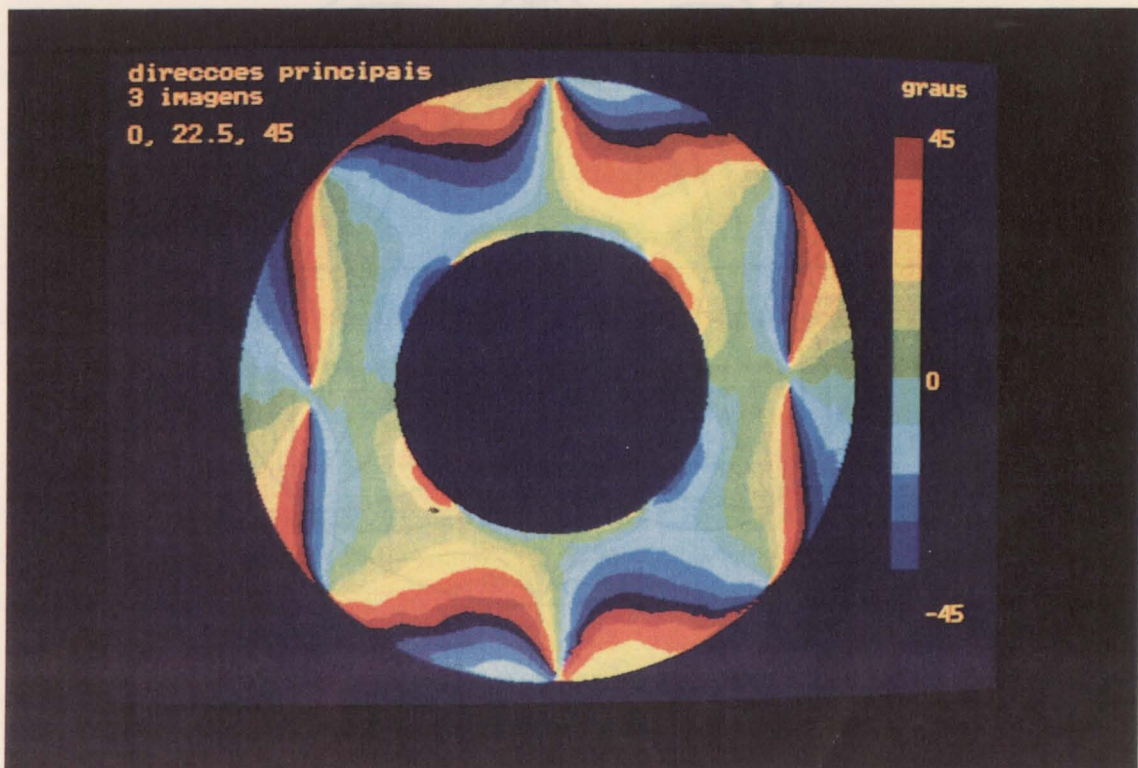


fig. 7.11 - Direcções principais para um anel em compressão diametral.

Na imagem apresentada na fig. 7.12 foi usado um algoritmo do qual ainda não se tinha mostrado nenhum exemplo. Trata-se do algoritmo que permite criar uma variação contínua das cores do

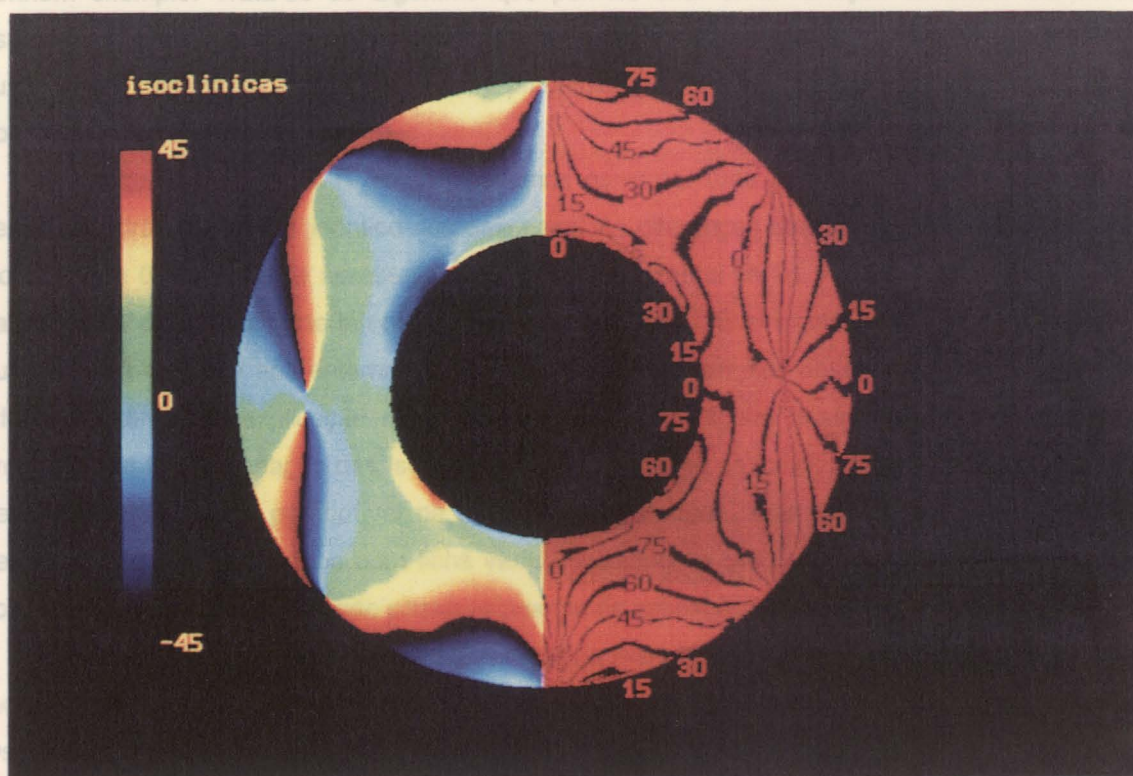


fig. 7.12 - Particularização das isoclínicas num anel em compressão diametral.

7.4 ENSAIO DUMA LÂMINA DE GUILHOTINA

Neste exemplo pretende-se mostrar a utilização dos algoritmos de erosão apresentados no capítulo 5 para a determinação dos deslocamentos sofridos por uma lâmina de guilhotina. A situação de corte, fig. 7.14. Para esse ensaio foi utilizada a técnica de interferometria, podendo ser feita a obtenção da imagem de interferência de duas maneiras: a) através de um holograma, correspondente a uma situação de corte, e a b) através de um interferograma, correspondente a uma situação de corte. Da interferência das duas situações resulta um holograma de interferência de duas situações de corte. Este holograma envolve a utilização de uma técnica de iluminação laser, que fornece um interferômetro. Sem entrarmos em muitos detalhes, pode-se dizer que a obtenção de um holograma é feita por interferência entre o feixe de luz que incide sobre o objecto e o feixe reflectido pelo objecto, que resulta da interferência por difracção dum feixe de luz incidente ao de referência. Após a revelação do holograma, a obtenção da imagem de interferência do feixe reflectido pelo objecto de tal modo que se consegue a obtenção da imagem de interferência do objecto. No caso presente são sobrepostos dois hologramas correspondentes a duas situações diferentes do objecto, pelo que além do efeito tridimensional surgem faixas de interferência que representam pontos que tiveram o mesmo deslocamento numa determinada direcção.

fig. 7.13 - Padrão de isoclínicas num anel sujeito a uma compressão diametral [1].

Na imagem apresentada na fig. 7.12 foi usado um algoritmo do qual ainda não se tinha mostrado nenhum exemplo. Trata-se do algoritmo que permite criar uma variação contínua das cores do espectro utilizado, este traduz os níveis de intensidade numa variação contínua, e portanto mais suave que é menos elucidativa que o outro processo que tem sido utilizado ao longo deste trabalho, por exemplo fig. 7.10.

Comparando as fig.s 7.12 e 7.13 podemos constatar uma boa concordância dos resultados, sendo o padrão de franjas idêntico nos dois caso. As diferenças que se notam mais são o caso da isoclínica de 0° que não se apresenta como a linha horizontal da fig. 7.13, e a diferença encontrada na isoclínica de 75° na parte inferior do modelo fotoelástico. É evidente que existem diferenças nas outras isoclínicas que aparentemente não são visíveis por simples observação das imagens. Estas diferenças têm uma explicação muito simples, que é um ligeiro desalinhamento no modelo, que provoca uma ligeira variação das isoclínicas, nomeadamente da localização da isoclínica de 0° . Este desalinhamento não é perceptível na fotografia apresentada, mas no monitor video pode ver-se perfeitamente. Se colocarmos uma linha vertical partindo de um dos pontos de aplicação da carga constata-se que essa vertical não passa pelo ponto de aplicação oposto.

Este exemplo demonstra mais uma vez que os métodos desenvolvidos permitem com rapidez e facilidade determinar dados experimentais que de outro modo seriam morosos e talvez enfadonhos. Os resultados obtidos provam também uma boa precisão dos métodos utilizados.

7.4 ENSAIO DUMA LÂMINA DE GUILHOTINA

Neste exemplo pretende-se mostrar uma possível utilização para os algoritmos de erosão apresentados no capítulo 5 deste trabalho. O objectivo do ensaio era determinar os deslocamentos sofridos por uma lâmina duma guilhotina hidráulica quando em trabalho de corte, fig. 7.14. Para esse ensaio foi utilizada a interferometria holográfica. Resumindo o princípio de obtenção da imagem de interferometria, podemos dizer que se faz um primeiro registo numa placa fotográfica, correspondente à situação de ausência de carregamento ao qual é sobreposto um outro registo correspondente a uma situação de carregamento. Da interferência das duas imagens resulta um holograma de interferência do qual se apresenta uma fotografia na fig. 7.15. O registo de um holograma envolve a utilização de uma fonte de iluminação laser, que fornece iluminação para um interferómetro. Sem entrarmos em muitos pormenores pode-se dizer que o registo de um holograma é feito por interferência entre o feixe de referência, que ilumina directamente a placa fotográfica, e o feixe objecto que resulta da reflexão por parte do objecto dum feixe idêntico ao de referência. Após a revelação do holograma é possível a reconstituição da frente de onda do feixe reflectido pelo objecto de tal modo que se consegue a visualização tridimensional do objecto. No caso presente são sobrepostos dois hologramas correspondentes a estados diferentes do objecto, pelo que além do efeito tridimensional surgem franjas de interferência que representam pontos que tiveram o mesmo deslocamento numa determinada direcção.

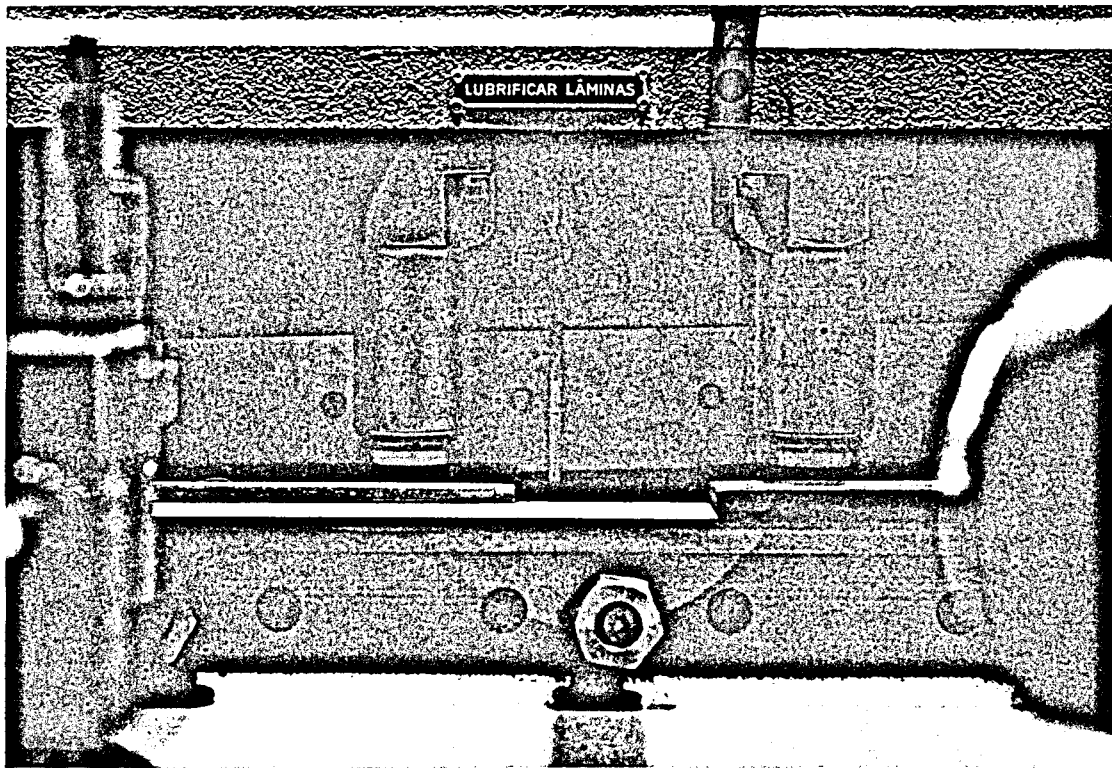


fig. 7.14 - Ensaio duma lâmina de guilhotina hidráulica.

Para serem obtidas as franjas na configuração da fig. 7.16, a imagem teve que ser sujeita a um pré-processamento de modo a melhorar as suas características para a utilização dos algoritmos de erosão. Primeiro utilizou-se o algoritmo de maximização do contraste para permitir um maior campo de manobra nas operações que se seguem. De seguida aplicou-se uma filtragem das baixas frequências, pela utilização de um filtro passa-alto, operação esta que permitiu acentuar o contraste das próprias franjas, melhorando a sua definição. Como já se disse, para utilizar o algoritmo de erosão é necessário transformar a imagem para dois únicos níveis de intensidade operação essa realizada com o algoritmo de "threshold". A imagem está assim pronta para ser processada de modo a obterem-se os centros das franjas. Para esta operação foi utilizada primeiro a versão 3, que como é bastante "abrasiva" permite eliminar algum do ruído ainda existente. Após algum tempo de processamento interrompe-se o processo e utiliza-se a versão 4, que permite agora continuar a erosão das franjas sem efectuar cortes que eliminariam a continuidade daquelas. Os resultados podem ser vistos na fig. 7.16, que mostra um resultado bastante bom partindo de uma imagem de baixa qualidade, fig. 7.15. Há zonas em que ainda surgem "nós" nas franjas, estes devem-se como é evidente à má definição das franjas nessas regiões, contudo este processamento permite chegar ao resultado desejado, ou seja o levantamento dos deslocamentos, fig. 7.17. Não vamos entrar em considerações quanto ao cálculo dos deslocamentos pois isso fugiria ao âmbito deste trabalho. Podemos no entanto dizer que a interferometria holográfica permite medir deslocamentos da ordem de metade do comprimento de onda do laser utilizado, neste caso $\lambda=632.8 \text{ nm}$. Portanto cada franja representa aproximadamente $0.3\mu\text{m}$ de deslocamento na direcção vertical.

Com este exemplo pretendeu-se mostrar que os métodos desenvolvidos podem ter aplicação noutros campos da análise experimental com bons resultados, para tal pode ainda fazer-se uma adaptação mais específica de modo a tirar partido de certas particularidades daqueles campos.

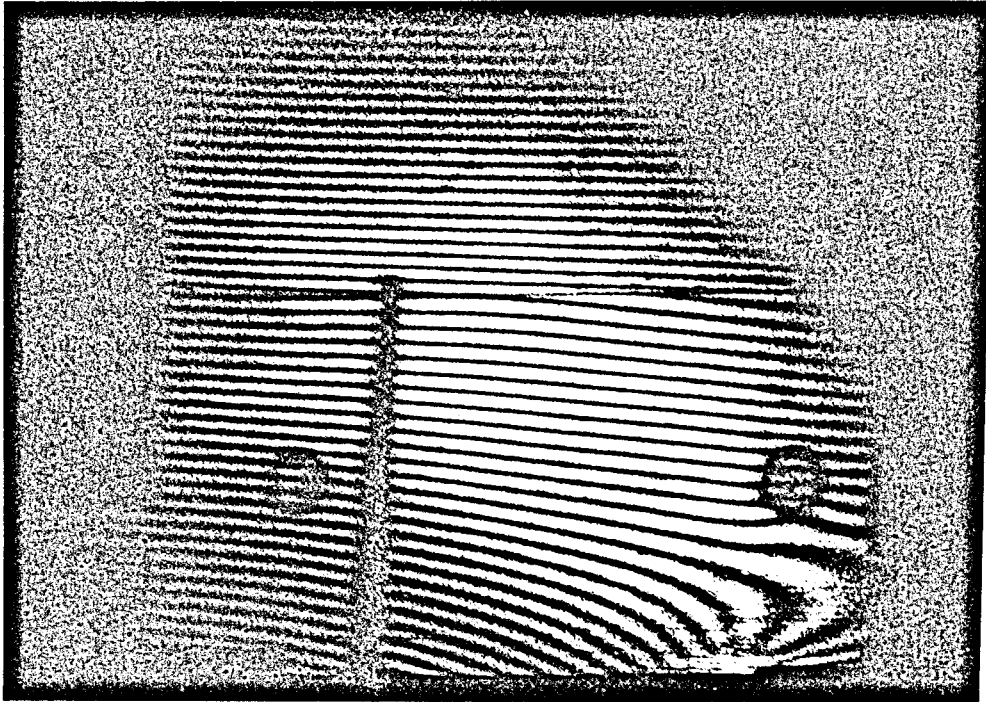


fig. 7.15 - Fotografia do holograma obtido no ensaio.

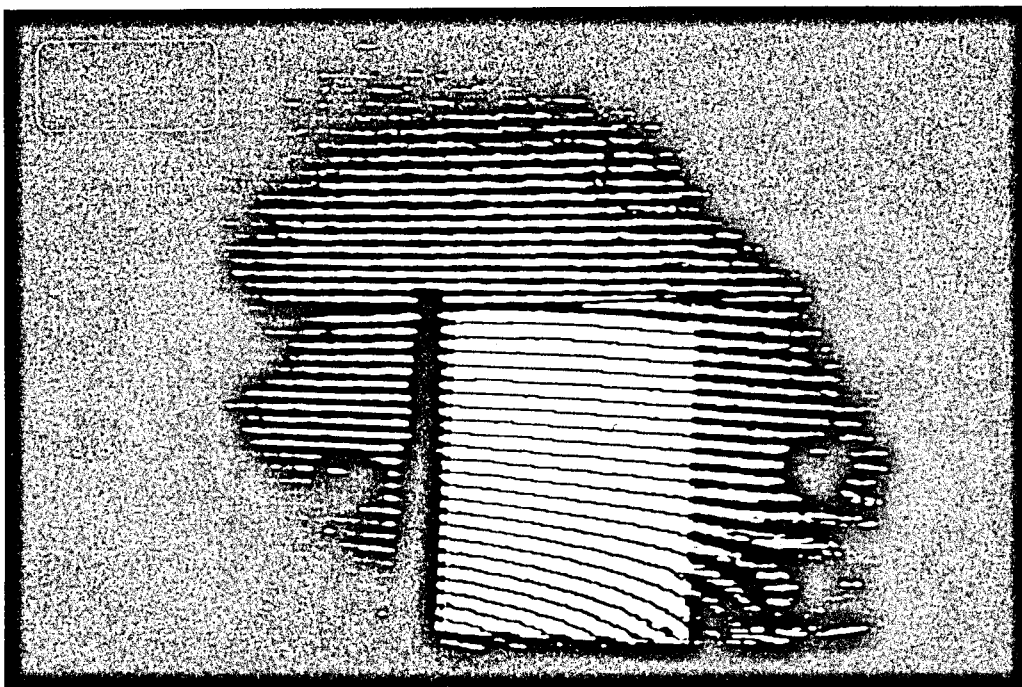


fig. 7.16 - Processamento das franjas existentes na fig.7.15.

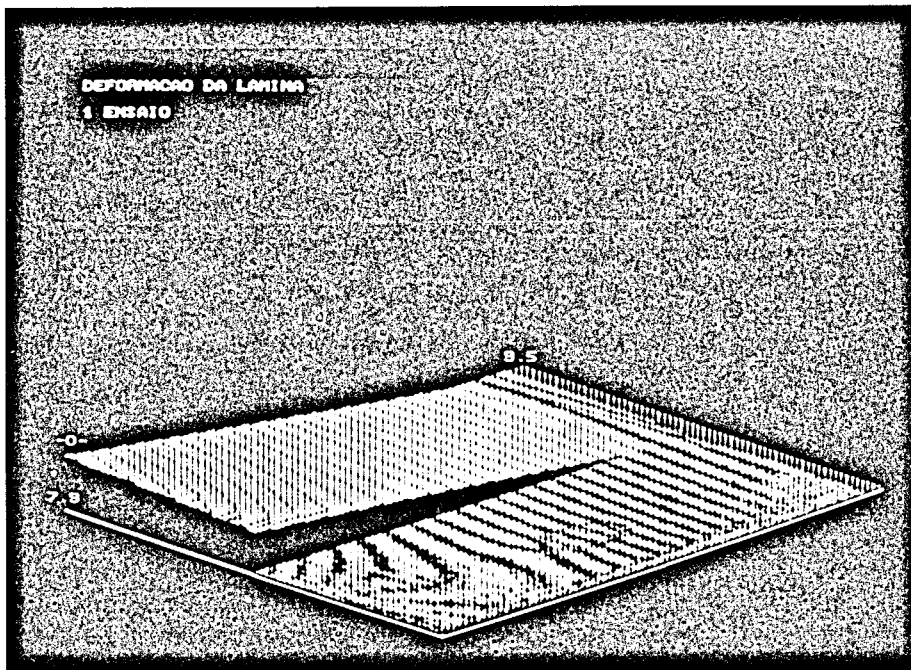


fig. 7.17 - Levantamento dos deslocamentos na zona processada da fig. 7.16.

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

8.1 CONCLUSÕES

Como conclusão principal a extrair do presente trabalho, podemos dizer que foi criada, com êxito, uma ferramenta que permite melhorar e facilitar a obtenção de informação fornecida por um sistema fotoelástico, baseado na utilização de um polariscópio de transmissão.

Uma das vantagens dos métodos implementados é a sua utilização num polariscópio disponível comercialmente, o que torna todo o processo mais acessível e facilmente realizável.

Foi mostrado que alguns dos métodos desenvolvidos permitem também a aplicação a outros campos da análise experimental de tensões. Referimo-nos concretamente àqueles que permitem obter os centros das franjas de interferometria, ou seja as franjas propriamente ditas.

Os métodos de erosão foram aperfeiçoados a partir daquilo que já era conhecido, permitindo obter resultados de muito boa qualidade, mesmo em imagens de baixa qualidade.

A exploração das particularidades da fotoelasticidade permitiu desenvolver métodos mais específicos, que evidentemente trazem consigo vantagens assinaláveis. Neste âmbito a determinação das direcções principais de tensão foi conseguida com resultados bastante convincentes. Com três imagens apenas, pode-se obter, quase de imediato, um "mapa" para todo o modelo das referidas direcções. Os métodos tradicionais exigem tempo e paciência até se conseguir

algum resultado, geralmente menos completo e mais susceptível de introduzir erros devido à má definição das franjas.

Ainda explorando as mesmas particularidades conseguiu-se, também com sucesso, obter o atraso de fase introduzido pelo modelo fotoelástico, quando sob tensão. Este pode ser relacionado com a diferença entre as duas tensões principais existentes num problema plano. Reunindo a informação obtida para as direcções principais e a diferença entre as tensões principais é possível, recorrendo à utilização dum método numérico, fazer a separação das tensões e portanto definir o campo das tensões instaladas no modelo.

Um aspecto que foi testado, mas não detalhadamente descrito neste trabalho, é a utilização de luz branca em lugar da luz monocromática. Os resultados obtidos revelaram-se idênticos, ou mesmo superiores na obtenção das direcções principais, pois deste modo a interferência das franjas isocromáticas é debilitada, permitindo assim reduzir a sua influência nefasta nas regiões onde se localizam. Isto é possível, pois a câmara "CCD" utilizada sendo monocromática (preto e branco) adquire as imagens como níveis de cinzento, cuja variação é a que se espera para uma fonte monocromática. Assim as franjas apresentam-se com um perfil sinusoidal bastante perfeito, correspondendo os mínimos de intensidade precisamente às ordens esperadas para as franjas. Esta conclusão permite ainda uma maior versatilidade na utilização do sistema de análise fotoelástica aqui apresentado.

Uma outra conclusão importante a tirar é a atenuação de defeitos existentes no próprio modelo fotoelástico, riscos e sujidade, ao serem utilizados os métodos descritos no capítulo 6. Isto deve-se sobretudo ao facto de estes métodos trabalharem com subtracções de imagens, as quais atenuam bastante defeitos daquele tipo.

Um comentário final impõe-se relativamente à completa automatização de todo o processo. Pensamos que esta ainda está algo distante, apesar de haver frequentemente designações do tipo "automatização completa de ...". Há ainda que aperfeiçoar bastante os algoritmos bem como melhorar os sistemas de processamento de imagem especialmente no capítulo da resolução, de modo a aproximarmo-nos dessa meta. Contudo as ferramentas desenvolvidas são para serem usadas por quem as compreenda, o que neste caso constitui uma grande ajuda na investigação em análise experimental de tensões.

8.2 SUGESTÕES DE TRABALHO FUTURO

A continuação natural e óbvia deste trabalho é a separação das tensões, de modo a permitir definir as tensões para uma dada região de interesse. A utilização de métodos numéricos é o caminho mais comum para atingir este objectivo.

Dentre os métodos numéricos podemos citar o "shear-difference method", o método dos mínimos quadrados, o método das diferenças finitas e o método dos elementos finitos. Destes o primeiro tem perdido credibilidade devido à acumulação de erros que o caracteriza, e isto quando se efectua a integração da equação de equilíbrio. O último tem o inconveniente de necessitar das condições fronteira em termos de deslocamentos, sendo na fotoelasticidade imediato definir aquelas condições em termos de tensões, havendo portanto a necessidade dessa adaptação que dificulta a aplicação deste método. Os dois restantes parecem os mais adequados para o fim que se pretende, tendo Berghaus [17] dado já boas indicações quanto ao método dos mínimos quadrados, que fornece equações em abundância para possíveis verificações e melhoramento dos resultados.

A junção dos métodos experimentais com os numéricos é frequentemente designada de métodos híbridos, e como já se disse é a solução mais utilizada para a obtenção do campo das tensões em análise de tensões por fotoelasticidade.

Outra via para o fim em discussão, seria a montagem dum interferómetro no polariscópio, de modo a ser possível obter as franjas "isopachics", que representam os locais do modelo onde houve a mesma variação de espessura. No caso do estado plano de tensão a deformação segundo a direcção da espessura é directamente proporcional ao primeiro invariante das tensões, $\sigma_1 + \sigma_2$, fornecendo a equação que faltava para a determinação totalmente experimental do campo de tensões.

Também é possível enveredar pelo melhoramento dos métodos desenvolvidos. Um ponto que poderia e deveria ser implementado é o da detecção das franjas de ordem zero, permitindo depois determinar com clareza a evolução do desfasamento angular. Tal detecção pode conseguir-se com a utilização de duas fontes de iluminação monocromáticas de comprimentos de onda diferentes, pois comparando duas imagens obtidas com cada uma das fontes, somente as franjas de ordem zero se mantêm estáticas. É evidente que outros melhoramentos haverá a fazer, nos algoritmos, de modo a torná-los mais eficientes e "user friendly".

A mudança de rumo poderá também dar os seus frutos. A aplicação à interferometria holográfica já foi aqui mostrada, mas outras áreas existem onde o processamento de imagem pode cumprir o seu papel. Dentre estas podem citar-se o método "moiré", o "ESPI" ("Electronic Speckle Pattern Interferometry"), ou até na holografia "moiré".

Mas não são estas as únicas hipóteses, a fotoelasticidade oferece mais algumas. Por exemplo, o polariscópio de reflexão pode constituir um campo onde o processamento de imagem pode ser aplicado, apesar de neste caso as imagens serem de menor qualidade e portanto mais difíceis de tratar. O uso do polariscópio de reflexão tem a vantagem de se poderem analisar as tensões no próprio componente mecânico. Ainda na fotoelasticidade, pode falar-se da fotoelasticidade

tridimensional que sendo mais complicada que a bidimensional, pode também beneficiar da aplicação do processamento de imagem. Alguns trabalhos têm sido realizados nesta área, mas poucos com o auxílio do processamento de imagem.

Das sugestões feitas pode concluir-se, que muitos são os caminhos a explorar com técnicas do género das utilizadas neste trabalho. Caminhos esses, que envolvem novas soluções com vantagens assinaláveis oferecidas pela aplicação do processamento de imagem. Torna-se por isso evidente a importância que o processamento de imagem está a adquirir nos métodos ópticos usados na análise experimental de tensões.



BIBLIOGRAFIA

- [1] Dally, J. W., Riley, W. F.
Experimental Stress Analysis
McGraw Hill, New York, 1978
- [2] Gomes, J. F. S.
Análise Experimental de Tensões por Fotoelasticidade
LNEC, Lisboa, 1984
- [3] Frocht, M. M.
Photoelasticity - Vol. I,II
John Wiley and Sons, New York, 1941
- [4] Hetényi, M.
Handbook of Experimental Stress Analysis
John Wiley and Sons, New York, 1950
- [5] Holliester, G. S.
Experimental Stress Analysis
Cambridge University Press, Cambridge, 1967
- [6] Dove, R. C., Adams, P. H.
Experimental Stress Analysis and Motion Measurement
Charles E. Merrill Publishing Company, Columbus, 1964
- [7] Redner, A. S.
Computer Based Photoelasticity
Proceedings of the SEM Spring Conference on Experimental Mechanics,
Cambridge - Massachusetts, 1989, pp. 588-592
- [8] Müller, R. K., Saackel, L. R.
Complete Automatic Analysis of Photoelastic Fringes
Experimental Mechanics, Julho 1979, pp. 245-251

-
- [9] Redner, S.
Compensation Method Using Synchronized Polarizer-Analyser Rotation
Experimental Mechanics, Junho 1976, pp. 221-225
- [10] Seguchi, Y., Tomita, Y., Watanabe, M.
Computer-aided Fringe-pattern Analyzer - A Case of Photoelastic Fringe
Experimental Mechanics, Outubro 1979, pp. 362-370
- [11] Voloshin, A. S., Burger, C. P.
Half-fringe Photoelasticity: A New Approach to Whole-field Stress Analysis
Experimental Mechanics, Setembro 1983, pp. 304-313
- [12] Funnell, W. R. J.
Image processing applied to the interactive analysis of interferometric fringes
Applied Optics, 15 Setembro 1981, pp. 3245-3250
- [13] Redner, A. S.
Photoelastic Measurement by Means of Computer-Assisted Spectral-Contents Analysis
Experimental Mechanics, Junho 1985, pp. 148-153
- [14] Hecker, F. W., Morche, B.
Computer-Aided Measurement of Relative Retardations in Plane Photoelasticity
in Wieringa, H. (ed), ***Experimental Stress Analysis***
Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht - Netherlands, 1986, pp. 535-542
- [15] Chen, T. Y., Taylor, C. E.
Computerized Fringe Analysis in Photomechanics
Experimental Mechanics, Setembro 1989, pp. 323-329
- [16] Umezaki, E., Tamaki, T., Takahashi, S.
Automatic Stress Analysis of Photoelastic Experiment by use of Image Processing
Experimental Techniques, Dezembro 1989, pp. 22-27
- [17] Berghaus, D. G.
Overdetermined Photoelastic Solutions using Least Squares
Experimental Mechanics, Março 1973, pp. 97-104
- [18] Sanford, R. J.
Photoelastic Holography - A Modern Tool for Stress Analysis
Experimental Mechanics, Dezembro 1980, pp. 427-436
- [19] Brown, G. M., Sullivan, J. L.
The Computer-aided Holophotoelastic Method
Experimental Mechanics, Junho 1990, pp. 135-144
- [20] Yao, J. Y.
Extracting Isoclinics Using Image-Processing Techniques
Experimental Techniques, Outubro 1987, pp. 30-31
- [21] Yao, J. Y.
Digital Image Processing and Isoclinics
Experimental Mechanics, Setembro 1990, pp. 264-269
- [22] Pancewicz, T.
Application of Computer-Aided Fringe Pattern Analysis in Investigations of Mechanical Phenomena by use of Optical Methods
Proceedings of the 9th International Conference on Experimental Mechanics, Copenhagen, 1990, pp. 2019-2028

- [23] Kihara, T.
Automatic Whole-Field Measurement of Photoelasticity Using Linear Polarized Incident Light
Proceedings of the 9th International Conference on Experimental Mechanics, Copenhagen, 1990, pp. 821-827
- [24] Tsuji, T., Kusumoto, H., Noda, N., Inoue, H.
New Automatic Stress Analysis System by Using Photoelasticity and Laser
Proceedings of the 9th International Conference on Experimental Mechanics, Copenhagen, 1990, pp. 812-820
- [25] Mawatari, S., Takashi, M., Toyoda, Y., Kunio, T.
A Single-Valued Representative Function for Determination of Principal Stress Direction in Photoelastic Analysis
Proceedings of the 9th International Conference on Experimental Mechanics, Copenhagen, 1990, pp. 2019-2028
- [26] Mawatari, S., Takashi, M., Toyoda, Y., Kunio, T.
A New Method of Computer-Aided Fringe Determination of Isochromatics in Two Dimensional Photoelasticity
Proceedings of the 9th International Conference on Experimental Mechanics, Copenhagen, 1990, pp. 2019-2028
- [27] Gonzalez, R. C., Wintz, P.
Digital Image Processing
Addison-Wesley Publishing Company, Reading - Massachusetts, 1977
- [28] Pratt, W. K.
Digital Image Processing
John Wiley & Sons, New York, 1978
- [29] Schalkoff, R. J.
Digital Image Processing and Computer Vision
John Wiley & Sons, New York, 1989
- [30] Rosenfeld, A., Kak, A. C.
Digital Picture Processing
Academic Press, New York, 1976
- [31] Berghaus, D. G.
Isoclinics Without Isochromatics: The Third Condition for Extinction
Experimental Techniques, Novembro 1984, pp. 21-22
- [32] Creath, K.
Phase-Measurement Interferometry Techniques
in Wolf, E. (ed), ***Progress in Optics*** - Vol. XXVI
Elsevier Science Publisher B. V., New York, 1988, chapter V, pp. 349-393
- [33] Post, D.
Isochromatic Fringe Sharpening and Fringe Multiplication in Photoelasticity
Proceedings of SESA, Cincinnati, 1954, Vol. XII - nº 2, pp. 143-156
- [34] Toh, S. L., Tang, S. H., Hovanesian, J. D.
Computerized Photoelastic Fringe Multiplication
Experimental Techniques, Julho/Agosto 1990, pp. 21-23





FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



0000031877