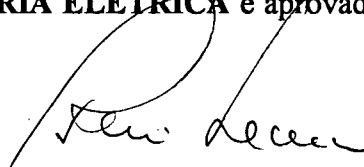


**TRATAMENTO DE IMAGENS  
GERADAS POR HOLOGRAFIA  
ELETRÔNICA**

# TRATAMENTO DE IMAGENS GERADAS POR HOLOGRAFIA ELETRÔNICA

CANDIDATO: POLICARPO BATISTA ULIANA

Esta dissertação foi julgada para obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA - ESPECIALIDADE ENGENHARIA ELÉTRICA** e aprovada em sua forma final pelo Curso de Pós-Graduação.

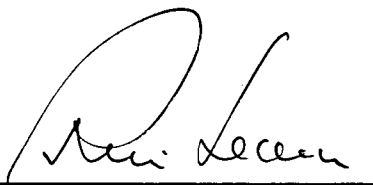


Prof. RUI SEARA, Dr.  
ORIENTADOR

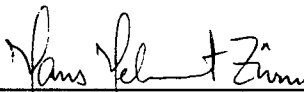


Prof. ENIO VALMOR KASSICK, Dr.  
COORDENADOR DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

BANCA EXAMINADORA:



Prof. RUI SEARA, Dr.  
PRESIDENTE



Prof. HANS HELMUT ZÜRN, Ph.D.



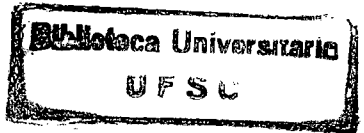
Prof. JAIME FREJLICH SOCHACZEWSKY, Dr.



Prof. FRANK HREBABETZKY, Dr.



Prof. ARMANDO ALBERTAZZI GONÇALVES JR., Dr.



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**TRATAMENTO DE IMAGENS GERADAS POR  
HOLOGRAFIA ELETRÔNICA**

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

**POLICARPO BATISTA ULIANA**

**FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO - 1994**

À minha esposa Karla, que com seu amor, trabalho  
e dedicação participou desta jornada.

Aos meus pais, João e Salete e aos meus  
sogros Aroldo e Lenir que sempre me  
deram muito apoio e incentivo.

## AGRADECIMENTOS

Desejo registrar meus agradecimentos:

Ao Laboratório de Instrumentação e Eletrônica (LINSE) e aos professores que o integram, pelo suporte dado a realização desta dissertação. Em especial ao Prof. Rui por sua orientação a este trabalho.

Ao Laboratório de Metrôlogia (LABMETRO) e aos profissionais a ele ligados que viabilizaram toda a parte experimental deste trabalho. Em especial ao Prof. Armando por seu apoio e orientação.

A Fundação Centro Regional de Tecnologia e Informática (CERTI), que tanto contribuiu para complementação da minha formação acadêmica.

Ao Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) e ao Centro de Tecnologia em Automação e Informática (CTAI) que deram condições para o desenvolvimento e a finalização deste trabalho.

Aos colegas do LINSE, LABMETRO, CERTI, SENAI e CTAI dos quais além do apoio irrestrito, sempre recebi muita amizade.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	x
LISTA DE TABELAS .....	xiv
RESUMO .....	xv
ABSTRACT .....	xvi
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....	1
1.1 - Objetivos do Trabalho .....	2
1.2 - Organização do Trabalho .....	3
CAPÍTULO 2 - CONCEITOS BÁSICOS DA HOLOGRAFIA.....	5
2.1 - Introdução .....	5
2.2 - Interferência Entre Duas Ondas .....	5
2.3 - Holografia .....	7
2.4 - Holograma.....	8
2.5 - Holografia Interferométrica.....	12
2.6 - O Speckle .....	15
2.7 - A Variação da Fase do Speckle.....	17
2.8 - Holografia Eletrônica.....	18
2.9 - O Mapa de Fase .....	20
2.10 - Vetor de Sensibilidade.....	20
2.11 - Iluminação Simples .....	21

2.12 - Iluminação Dupla .....	22
2.13 - Determinação de Deslocamentos Tridimensionais Através da Holografia.....	24
2.14 - Holografia Convencional x Holografia Eletrônica.....	27
CAPÍTULO 3 - HOLOGRAFIA ELETRÔNICA .....	28
3.1 - Introdução .....	28
3.2 - Métodos Baseados na Holografia Eletrônica.....	28
3.3 - Método do Esqueleto .....	28
3.4 - Método da Frequência Portadora Temporal .....	30
3.5 - Método da Transformada de Fourier .....	31
3.6 - Método do Deslocamento de Fase .....	34
3.7 - Comparação Entre os Métodos de Determinação da Fase.....	36
3.7.1 - Requisitos Experimentais .....	37
3.7.2 - Resolução e Incertezas de Medição .....	37
3.7.3 - Erros e Distorções .....	38
3.8 - Conclusões .....	39
CAPÍTULO 4 - ERROS NA HOLOGRAFIA ELETRÔNICA.....	40
4.1 - Introdução .....	40
4.2 - Fontes de Erros Sistemáticos.....	40
4.3 - Fontes de Erros Aleatórios .....	41
4.4 - Minimização das Fontes de Erros .....	41
4.5 - Tratamento dos Erros Gerados na Medição.....	42
4.6 - Modelagem dos Erros no Mapa de Franjas .....	42
4.7 - Modelagem dos Erros no Método do Deslocamento de Fase.....	43
4.8 - Resultados Experimentais .....	48
4.9 - Conclusões .....	51

CAPÍTULO 5 - FILTRAGEM DO MAPA DE FASE.....	52
5.1 - Introdução .....	52
5.2 - Modelagem do Mapa de Fase .....	52
5.3 - Método de Filtragem com Deslocamento de Fase.....	53
5.4 - Método de Filtragem com Transformação Sinusoidal .....	60
5.5 - Análise Comparativa .....	61
CAPÍTULO 6 - FILTRAGEM PONDERADA DO MAPA DE FASE .....	62
6.1 - Introdução .....	62
6.2 - Filtragem com Ponderação de Amplitude.....	62
6.3 - Aplicação do Filtro Ponderado.....	66
6.4 - Resultados Obtidos por Simulação .....	66
6.5 - Resultados Experimentais .....	81
6.6 - Conclusões .....	85
CAPÍTULO 7 - REMOÇÃO DE SALTOS DE FASE.....	87
7.1 - Introdução .....	87
7.2 - Modelagem Matemática .....	88
7.3 - Algoritmo Básico para Remoção de Saltos de Fase.....	90
7.4 - Fontes de Erros na Remoção dos Saltos de Fase.....	91
7.5 - Algoritmos de Remoção de Saltos de Fase Aprimorados .....	92
7.6 - Critérios para Avaliação dos Algoritmos de Remoção de Saltos de Fase .....	95
7.7 - Avaliação dos Algoritmos de Remoção de Saltos de Fase .....	97



CAPÍTULO 8 - ALGORITMO DE REMOÇÃO DE SALTO DE FASE POR MINIMIZAÇÃO DA ENERGIA DO ERRO DE FASE .....	98
8.1 - Introdução .....	98
8.2 - Desenvolvimento do Algoritmo .....	98
8.3 - Aplicação do Algoritmo em Imagens Geradas por Simulação .....	107
8.4 - Avaliação do Novo Algoritmo .....	112
8.5 - Aplicação do Algoritmo a Imagens Reais .....	113
8.6 - Futuros Aprimoramentos.....	115
8.7 - Conclusões .....	116
CAPÍTULO 9 - ALGORITMO DE FILTRAGEM APÓS A REMOÇÃO DE SALTOS DE FASE .....	116
9.1 - Introdução .....	116
9.2 - Análise do Algoritmo Convencional .....	116
9.3 - Apresentação do Novo Algoritmo .....	117
9.4 - Modelagem Matemática do Novo Algoritmo.....	118
9.5 - Análise Realizada por Simulação.....	120
9.6 - Conclusões .....	129
CAPÍTULO 10 - CONCLUSÕES.....	130
APÊNDICE 1 - A ESTAÇÃO HOLOGRÁFICA .....	133
A1.1 - Introdução .....	133
A1.2 - Composição da Estação Holográfica .....	133
A1.2.1- Mesa para Montagem e Suportes de Fixação .....	133
A1.2.2 - Laser .....	134
A1.2.3 - Espelho Parcial.....	134
A1.2.4 - Espelho de Deslocamento de Fase .....	135
A1.2.5 - Controle do Microdeslocador Piezoelétrico (PZT).....	135

A1.2.6 - Fibras Ópticas .....	135
A1.2.7 - Chaveador de Fibras Ópticas.....	135
A1.2.8 - Câmera de Vídeo .....	136
A1.2.9 - Monitor de Vídeo.....	136
A1.2.10 - Microcomputador .....	136
A1.2.11 - Placa de Aquisição e Processamento de Imagens .....	137
A1.2.12 - Software de Aquisição e Controle.....	138
A1.3 - Manipulação da Estação Holográfica .....	139
A1.3.1 - Operações de Ajuste da Estação .....	139
A1.3.2 - Operações de Medição .....	139
A1.3.3 - Operações de Processamento .....	140
A1.3.4 - Operações de Análise .....	140
APÊNDICE 2 - FILTRO PONDERADO - MODELAGEM E DESENVOLVIMENTO.....	141
A2.1 - Introdução .....	141
A2.2 - Modelagem .....	141
A2.3 - Análise.....	142
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	147

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 2.1 - Gravação de um holograma .....	9
Fig. 2.2 - Reconstrução de um holograma .....	9
Fig. 2.3 - Variação do caminho óptico devido ao deslocamento do objeto .....	13
Fig. 2.4 - Mapa de franjas .....	15
Fig. 2.5 - Processo de formação do speckle .....	16
Fig. 2.6 - Padrão de speckle .....	17
Fig. 2.7 - Variação da fase do speckle .....	18
Fig. 2.8 - Iluminação simples .....	22
Fig. 2.9 - Iluminação dupla .....	23
Fig. 2.10 - Vetor de sensibilidade no plano (x,y) .....	25
Fig. 3.1 - Determinação da fase e da ordem de franja. ....	29
Fig. 4.1 - Representação gráfica do erro $\phi_e(x,y)$ .....	46
Fig. 4.2 - Variação do erro $\phi_e$ em função da variação do fator de modulação $I_1$ .....	47
Fig. 4.3 - Uma linha do mapa de fase com ruído. ....	49
Fig. 4.4 - Uma linha do mapa de fase após o processo de filtragem .....	49
Fig. 4.5 - Uma linha do fator de modulação .....	50
Fig. 4.6 - Uma linha do ruído sobreposto ao mapa de fase .....	50
Fig. 4.7 - Gráfico relacionando o erro com o fator de modulação .....	51
Fig. 5.1 - Uma linha do mapa de fase original .....	56
Fig. 5.2 - Uma linha do mapa de fase deslocado .....	56
Fig. 5.3 - Uma linha da matriz de ponderação .....	57
Fig. 5.4 - Uma linha do mapa de fase filtrado .....	57

Fig. 5.5 - Uma linha do mapa de fase filtrado .....	58
Fig. 5.6 - Uma linha do mapa de fase filtrado e deslocado.....	58
Fig. 5.7 - Uma linha do mapa de fase filtrado e ponderado.....	59
Fig. 5.8 - Uma linha do mapa de fase filtrado, deslocado e ponderado .....	59
Fig. 5.9 - Uma linha do mapa de fase final .....	60
Fig. 6.1 - Fator de modulação .....	69
Fig. 6.2 - Ruído ponderado .....	69
Fig. 6.3 - Sinal original .....	70
Fig. 6.4 - Sinal com ruído.....	70
Fig. 6.5 - Sinal com ruído e saltos de fase .....	71
Fig. 6.6 - Sinal após a transformação sinusoidal .....	71
Fig. 6.7 - Sinal após a transformação senoidal.....	72
Fig. 6.8 - Filtro aplicado.....	72
Fig. 6.9 - Filtragem do sinal apresentado na Fig. 6.6.....	73
Fig. 6.10 - Filtragem do sinal apresentado na Fig. 6.7.....	73
Fig. 6.11 - Sinal filtrado $\Delta\phi_3(x)$ .....	74
Fig. 6.12 - Sinal $\Delta\phi_3(x)$ após a remoção dos saltos de fase.....	74
Fig. 6.13 - Ruído $e_3(x)$ remanescente da filtragem.....	75
Fig. 6.14 - Espectro de frequências do ruído $e_3(x)$ .....	75
Fig. 6.15 - Sinal após a transformação senoidal multiplicado por $I_1(x)$ . .....	76
Fig. 6.16 - Sinal após a transformação sinusoidal multiplicado por $I_1(x)$ .....	76
Fig. 6.17 - Filtragem do sinal apresentado na Fig. 6.15.....	77
Fig. 6.18 - Filtragem do sinal apresentado na Fig. 6.16.....	77
Fig. 6.19 - Sinal filtrado com ponderação de amplitude $\Delta\phi_4(x)$ .....	78
Fig. 6.20 - Sinal $\Delta\phi_4(x)$ após a remoção dos saltos de fase.....	78
Fig. 6.21 - Ruído $e_4(x)$ remanescente da filtragem.....	79
Fig. 6.22 - Espectro de frequências do ruído $e_4(x)$ .....	79

Fig. 6.23 - Análise comparativa das relações sinal-ruído dos filtros convencional e ponderado. ....	80
Fig. 6.24 - Uma linha do mapa de fase com ruído e saltos de fase. ....	82
Fig. 6.25 - Uma linha do mapa de fase tratado através de filtragem sinusoidal.....	82
Fig. 6.26 - Uma linha do mapa de fase tratado através de filtragem sinusoidal com ponderação de amplitude.....	83
Fig. 6.27 - Mapa de fase com ruído e saltos de fase. ....	83
Fig. 6.28 - Mapa de fase tratado através de filtragem sinusoidal .....	84
Fig. 6.29 - Mapa de fase tratado através de filtragem sinusoidal com ponderação .....	84
Fig. 7.1 - Representação gráfica da remoção de saltos de fase.....	89
Fig. 7.2 - Remoção do saltos de fase em uma linha partindo de um ponto de referência .....	91
Fig. 7.3 - Remoção do saltos de fase nas colunas partindo de uma linha de referência .....	91
Fig. 8.1 - Imagens que ilustram duas possibilidades de propagação do erro de remoção de saltos em $E(x,y)$ em uma linha.....	104
Fig. 8.2 - Imagens que ilustram o processo de separação dos erros.....	107
Fig. 8.3 - Simulação do mapa de fase com uma região descontínua.....	108
Fig. 8.4 - Remoção dos saltos de fase nas colunas .....	109
Fig. 8.5 - Remoção dos saltos de fase nas linhas .....	109
Fig. 8.6 - Erro cuja energia deve ser minimizada.....	110
Fig. 8.7 - Erro após a minimização .....	110
Fig. 8.8 - Fase obtida com o novo algoritmo.....	111
Fig. 8.9 - Fase obtida com o algoritmo básico .....	111
Fig. 8.10 - Erro $E(x,y)$ com regiões que dificultam a operação do algoritmo de separação em linhas e colunas .....	113
Fig. 8.11 - Remoção de saltos de fase obtida com o algoritmo básico.....	115
Fig. 8.12 - Remoção de saltos de fase obtida com o novo algoritmo.....	115

Fig. 9.1 - Sinal de referência ( $\varphi(x,y)$ ).....	121
Fig. 9.2 - Espectro de frequência do sinal de referência.....	121
Fig. 9.3 - Sinal com ruído.....	122
Fig. 9.4 - Espectro de frequência do sinal com ruído. ....	122
Fig. 9.5 - Sinal com ruído e saltos de fase.....	123
Fig. 9.6 - Cosseno do sinal com ruído.....	123
Fig. 9.7 - Espectro de frequência do cosseno do sinal com ruído.....	124
Fig. 9.8 - Cosseno filtrado.....	124
Fig. 9.9 - Espectro de frequência do cosseno filtrado.....	125
Fig. 9.10 - Sinal após a transformação tangente inversa.....	125
Fig. 9.11 - Sinal após a remoção dos saltos de fase.....	126
Fig. 9.12 - Espectro de frequência do sinal após a remoção dos saltos.....	126
Fig. 9.13 - Erro presente no sinal.....	127
Fig. 9.14 - Sinal com ruído e sem saltos de fase. ....	127
Fig. 9.15 - Sinal filtrado.....	128
Fig. 9.16 - Espectro de frequência do sinal filtrado. ....	128
Fig. 9.17 - Erro presente no sinal.....	129
Fig. A1.1 - Elementos que compõem a Estação Holográfica.....	134
Fig. A2.1- Diagrama da estrutura do filtro ponderado.....	142

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Resumo comparativo dos métodos .....	38
Tabela 7.1 - Comparação entre os algoritimos de remoção de saltos de fase .....	97

## RESUMO

Neste trabalho de dissertação é apresentado um panorama do estado-da-arte das técnicas de tratamento de imagens geradas por Holografia Eletrônica (dos conceitos básicos até as técnicas de aquisição e processamento mais difundidas).

Três novos algoritmos são concebidos para tratamento de imagens geradas por Holografia Eletrônica:

- i) o Filtro com Ponderação de Amplitude, que otimiza o processo de filtragem com base no valor do nível de ruído de cada ponto da imagem;
- ii) o Algoritmo de Remoção de Saltos de Fase por Minimização da Energia do Erro de Fase, que remove os saltos de fase considerando, simultaneamente, todos os pontos da imagem;
- iii) o Algoritmo de Filtragem após a Remoção dos Saltos de Fase, que permite a aplicação de filtros passa-baixas de banda estreita no processo de atenuação do ruído presente no mapa de fase.

Para a obtenção do Filtro com Ponderação de Amplitude é proposta uma nova estrutura de filtro passa-baixas. Dada a sua generalidade, esta estrutura de filtro pode também ser aplicada no processamento de qualquer tipo de sinal contaminado por ruído ponderado. É apresentada ainda, neste trabalho, uma nova modelagem matemática do ruído presente nos sinais gerados por meio da Holografia Eletrônica.

Estes algoritmos apresentam melhorias significativas quando comparados com os algoritmos atualmente empregados e podem ser considerados inéditos. Os mesmos foram desenvolvidos de forma analítica e foram testados e avaliados através de simulação em computador, como também, experimentalmente, através dos resultados obtidos em uma Estação Holográfica.



## ABSTRACT

In this work the Electronic Holography Image Processing state-of-the-art are presented from the basic concepts to the acquisition and processing techniques.

Three new algorithms for Electronic Holography image processing are presented:

- i) an Amplitude Weighting Filter, that optimizes the filtering process, based on the noise level of each pixel;
- ii) an Unwrapping by Phase Error Energy Minimization Algorithm, that removes the phase jumps using the information of all pixels at the same time;
- iii) a Filtering After Unwrapping Algorithm, which uses a narrow-band low-pass filter to eliminate the phase noise.

In the Amplitude Weighting Filter a new low-pass filter structure is proposed. This structure is generic and can be applied to processing signals with weighting noise. A new mathematical model for the noise in Electronic Holography is also presented.

These algorithms are considered original and present better results than the conventional algorithms. The algorithms were developed analytically and evaluated by computing simulation and also experimentally on a holographic station.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Dentro do campo da metrologia óptica, em que se utiliza propriedades da luz coerente para determinação de grandezas diversas, existem muitas técnicas de medição que produzem resultados na forma de imagens de interferogramas ou padrões de franjas, que são denominadas Técnicas Interferométricas.

Dentre as Técnicas Interferométricas, destacam-se as Técnicas Holográficas, através das quais determinam-se deslocamentos micrométricos, vibrações e características mecânicas dos materiais em níveis microscópicos [1].

As Técnicas Holográficas, dão apoio a diversos campos de pesquisas, como é o caso do desenvolvimento de novos materiais, particularmente materiais compostos, em que a determinação de comportamentos sob carga, tais como deformações, tensões são de grande importância.

Algumas das Técnicas Holográficas demandam o processamento de um grande volume de dados, como é o caso da Holografia Eletrônica. A evolução dos sistemas computacionais ocorrida na última década, está permitindo a popularização destas técnicas, através da implantação de estações holográficas, baseadas em microcomputadores.

Apesar da evolução crescente da Holografia Eletrônica, a maior parte dos trabalhos publicados nesta área, utilizam a Holografia como ferramenta de apoio para obtenção de resultados específicos. Desta forma, um menor espaço é dedicado ao aprimoramento dos métodos e técnicas de processamento digital atualmente empregados.

Os trabalhos que contemplam a modelagem matemática dos processos holográficos, incluindo as não-linearidades inerentes aos mesmos, ainda estão no início. Assim sendo, o campo da Holografia Eletrônica ainda encontra-se relativamente inexplorado e aberto a novas pesquisas, como as que são apresentadas nesta dissertação.

As imagens geradas por meio da Holografia Eletrônica, são denominadas mapas de fase. Cada ponto do mapa de fase, representa o valor de um ângulo (deslocamento de fase) proporcional ao deslocamento de uma região pontual da superfície sob teste.

Os mapas de fase apresentam um elevado nível de ruído e também saltos de fase. O salto de fase ocorre quando o valor do ângulo de fase torna-se menor do que 0 ou maior que  $2\pi$  radianos, nestes casos é gerado uma variação (salto) de  $2\pi$  radianos no valor da fase.

O processamento do mapa de fase visa basicamente a atenuação do ruído e a remoção dos saltos de fase. Este processamento é dificultado pelo fato de que os saltos de fase não são facilmente removidos na presença de ruído. Como os saltos de fase possuem componentes de alta frequência, os mesmos são distorcidos pelo processo de filtragem passa-baixas. Desta forma, o ruído não pode diretamente ser filtrado na presença dos saltos de fase .

### **1.1 - Objetivos do Trabalho**

O primeiro objetivo, deste trabalho de dissertação, é apresentar um panorama do estado-da-arte das técnicas de tratamento de imagens geradas por holografia eletrônica que servirá também como referência introdutória para este tema. Desta forma, são abordados vários aspectos relacionados com a Holografia Interferométrica Convencional e a Holografia Eletrônica, desde os conceitos básicos até as técnicas de aquisição e processamento mais difundidas atualmente. Sempre que possível, são apresentados os modelos matemáticos que dão embasamento teórico às técnicas descritas.

O segundo objetivo deste trabalho é o aprimoramento de algumas técnicas de processamento dos mapas de fase atualmente utilizadas. Três novos algoritmos foram concebidos para tratamento de imagens geradas por Holografia Eletrônica:

- i) o Filtro com Ponderação de Amplitude, que leva em conta parâmetros de modulação do ruído presente no mapa de fase a fim de otimizar o processo de filtragem. O algoritmo de filtragem está baseado no fato de que alguns dos pontos da superfície medida não geram informações e devem ser desconsiderados no processo de obtenção do sinal filtrado. A estrutura de filtro passa-baixas proposta para o Filtro com Ponderação de

Amplitude é genérica e pode ser aplicada no processamento de qualquer tipo de sinal contaminado por ruído ponderado;

- ii) o Algoritmo de Remoção de Saltos de Fase por Minimização da Energia do Erro de Fase, que remove os saltos de fase levando em conta, simultaneamente, todos os pontos do mapa de fase;
- iii) o Algoritmo de Filtragem após a Remoção dos Saltos de Fase, que permite a aplicação de filtros passa-baixas de banda estreita no processo de atenuação do ruído presente no mapa de fase.

É apresentada ainda, neste trabalho, uma nova modelagem matemática do ruído presente nos sinais gerados por meio da Holografia Eletrônica, que leva em conta as não-linearidades, presentes na determinação do mapa de fase, pelo método de Deslocamento de Fase.

Os três algoritmos apresentam melhorias significativas quando comparados com os algoritmos atualmente utilizados e podem ser considerados inéditos. Os mesmos foram desenvolvidos de forma analítica e foram testados e avaliados através de simulação em computador, como também, experimentalmente, através dos resultados obtidos na Estação Holográfica desenvolvida pela Fundação CERTI e pelo LABMETRO/UFSC.

## **1.2 - Organização do Trabalho**

No Capítulo 2, apresenta-se a título introdutório, os conceitos básicos e os modelos matemáticos da Holografia Interferométrica Convencional e da Holografia Eletrônica. No Capítulo 3, realiza-se uma análise comparativa dos quatro principais métodos utilizados no de tratamento dos mapas de franja.

Um dos maiores problemas no tratamento das imagens geradas por meio da Holografia Eletrônica é o alto nível de ruído presente nas mesmas. Desta forma, no Capítulo 4, apresenta-se as principais fontes de ruído e erros de medição presentes no processo de Holografia Eletrônica. É apresentada ainda neste Capítulo uma nova abordagem para a modelagem do ruído presente no mapa de fase.

No Capítulo 5, são descritas as principais técnicas de filtragem passa-baixas que permitem a remoção do ruído na presença de saltos de fase.

Um novo algoritmo de filtragem, denominado "Filtragem Ponderada do Mapa de Fase" é proposto no Capítulo 6, sendo apresentados resultados obtidos por simulação em computador e em uma Estação Holográfica.

No Capítulo 7, são descritos e comparados os principais algoritmos de remoção de saltos de fase.

No Capítulo 8, é apresentado e um novo algoritmo para remoção de saltos de fase denominado "Algoritmo de Remoção de Saltos de Fase por Minimização da Energia do Erro de Fase". Para validação do algoritmo, são analisados resultados obtidos através de simulações em computador e em uma Estação Holográfica.

No Capítulo 9, é apresentado um novo algoritmo, denominado "Algoritmo de Filtragem após a Remoção dos Saltos de Fase", que permite a utilização de filtros passa-baixas de banda estreita no processo de atenuação do ruído presente no mapa de fase.

No Capítulo 10, são apresentadas as conclusões finais deste trabalho de dissertação.

## CAPÍTULO 2

### CONCEITOS BÁSICOS DA HOLOGRAFIA

#### 2.1 - Introdução

Neste capítulo são apresentados os princípios fundamentais nos quais as técnicas de Holografia Convencional e Holografia Eletrônica estão baseadas. Desta forma, serão abordados os vários aspectos relacionados com a Holografia desde os modelos matemáticos até os aspectos referentes a terminologia adotada.

#### 2.2 - Interferência Entre Duas Ondas

O fenômeno da interferência entre ondas é o princípio fundamental no qual estão baseadas as técnicas interferométricas de medição.

O princípio da superposição de ondas, que é válido para a óptica linear, estabelece que quando duas ou mais ondas se interceptam em um ponto a amplitude resultante naquele ponto será dada pela soma vetorial das amplitudes das ondas originais.

Por simplicidade de equacionamento, considera-se ondas com a mesma frequência e polarizadas na mesma direção. Neste caso, a notação vetorial pode ser dispensada e as duas ondas podem ser definidas por:

$$O = A e^{j(\omega t + \phi)} \quad (2.1)$$

$$R = B e^{j(\omega t + \phi)} \quad (2.2)$$

onde:

$O$  e  $R \Rightarrow$  frentes de onda;

$\omega \Rightarrow$  frequência angular da onda luminosa;

$\phi$  e  $\psi \Rightarrow$  fases arbitrárias das frentes de onda;

$A$  e  $B \Rightarrow$  amplitudes das frentes de onda.

Sendo  $A$ ,  $B$ ,  $\phi$  e  $\psi$  função da posição espacial. Como a frente de onda é o lugar geométrico onde o valor da fase é constante, a posição espacial não precisa ser explicitada na equação (2.2).

Pelo princípio da superposição de ondas, a amplitude no ponto de intersecção das duas ondas será dada por:

$$T = O + R \quad (2.3)$$

onde  $T$  representa a amplitude total da onda resultante.

Substituindo as expressões de  $O$  e  $R$  na equação (2.3), obtém-se:

$$T = A e^{j(\omega t + \phi)} + B e^{j(\omega t + \psi)} \quad (2.4)$$

$$T = (A e^{j\phi} + B e^{j\psi}) e^{j\omega t} \quad (2.5)$$

A equação (2.5) expressa a amplitude total resultante da superposição de duas ondas que se interceptam. Quando, em um dado ponto, é efetuada a medida da intensidade luminosa ( $I$ ), esta será proporcional ao quadrado da amplitude de  $T$ .

Tem-se portanto :

$$I = T T^* = A^2 + B^2 + AB [ e^{j(\phi - \psi)} + e^{-j(\phi - \psi)} ] \quad (2.6)$$

onde  $T^*$  é complexo conjugado de  $T$ .

Desenvolvendo a equação (2.6), obtém-se:

$$I = A^2 + B^2 + 2 AB \cos (\phi - \psi) \quad (2.7)$$

definindo:

$$I_0 = A^2 + B^2 \quad e \quad I_1 = 2 AB \quad (2.8)$$

Substituindo (2.8) em (2.7), tem-se :

$$I = I_0 + I_1 \cos (\phi - \psi) \quad (2.9)$$

Nota-se aqui que a intensidade resultante depende da diferença de fase entre as ondas incidentes, e pode variar entre um valor máximo ( $I_0 + I_1$ ) quando a diferença de fase for de  $2n\pi$  radianos e um valor mínimo ( $I_0 - I_1$ ), quando a diferença de fase for múltipla de  $(2n+1)\pi$  radianos, sendo  $n$  um número inteiro. Este fenômeno é conhecido como interferência entre ondas luminosas.

### 2.3 - Holografia

Em 1948, Dennis Gabor [2,3] publicou um artigo no qual apresentava os princípios de uma nova técnica que permitia a reconstrução de frentes de ondas complexas. Devido à inexistência de uma fonte monocromática com as características necessárias para a aplicação prática desta técnica, a mesma permaneceu como uma curiosidade da física por mais de uma dezena de anos. Dada a possibilidade de reconstrução de toda a frente de onda, Gabor batizou esta técnica de Holografia (do grego holos = todo).

A Holografia é uma técnica através da qual é possível gravar e reconstruir uma frente de onda monocromática que apresente uma complexidade muito



elevada. Como resultado, a frente de onda reconstruída pode exibir uma notável fidelidade em relação à onda original, podendo ser mesmo considerada indistinguível desta última.

Somente no início da década de 1960, com o advento do laser, começaram a aparecer os primeiros trabalhos práticos sobre Holografia. Desde então, a Holografia Interferométrica tem sido usada como uma importante ferramenta em vários campos da mecânica experimental, podendo-se citar:

- a) medição de microdeslocamentos;
- b) medição de deformações mecânicas;
- c) análise experimental de tensões;
- d) determinação do fator de intensificação de tensões;
- e) determinação de propriedades dos materiais;
- f) determinação de modos e amplitudes de vibrações.

#### **2.4 - Holograma**

O holograma é composto por um filme fotográfico exposto por meio de uma técnica apropriada. Quando o holograma é iluminado por um feixe de laser, é gerada uma frente de onda com as mesmas características da frente de onda do objeto que gerou o holograma. Um observador ao captar a frente de onda gerada através do holograma visualizará o objeto original com uma perfeita noção de tridimensionalidade.

A Figura 2.1 ilustra o processo de gravação de um holograma. O raio emitido pela fonte de luz monocromática, normalmente um laser, é dividido em duas partes por um divisor de feixe. Um dos raios é expandido e direcionado para o objeto que reflete a luz, formando uma frente de onda de elevada complexidade que se propaga na direção do filme fotossensível. A outra parte do laser é expandida e direcionada diretamente para o mesmo filme. A interferência entre as ondas gera um padrão estacionário que impressiona fotograficamente o filme.

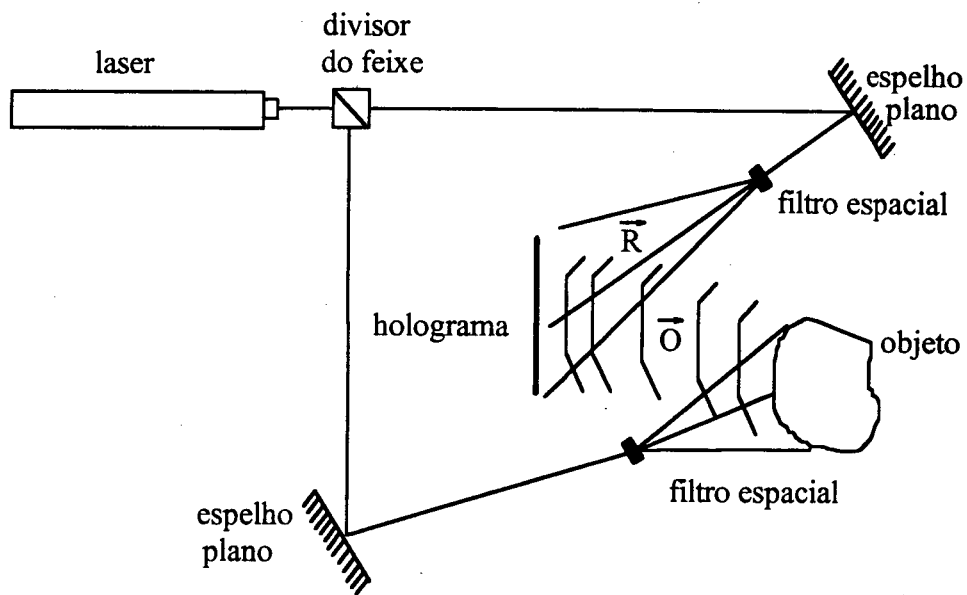


Fig. 2.1 - Gravação de um holograma.

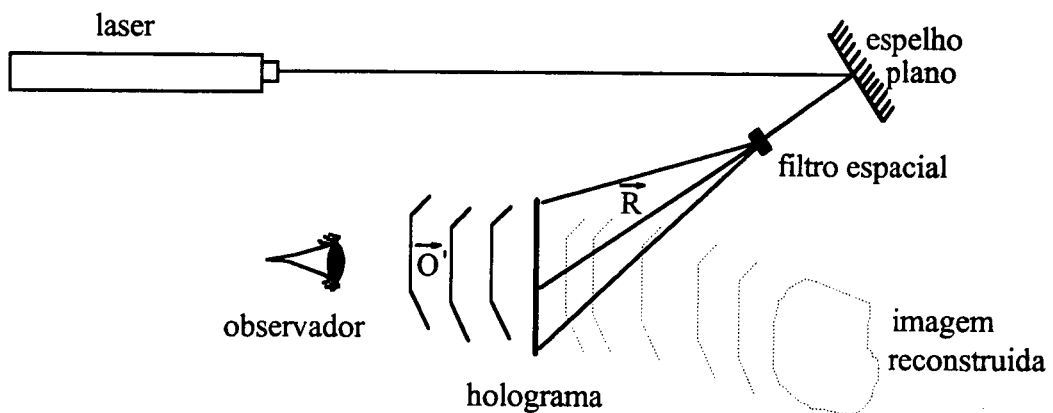


Fig. 2.2 - Reconstrução de um holograma.

Para demonstrar analiticamente que qualquer frente de onda pode ser reconstruída por meio da holografia, utilizaremos a equação de onda caracterizada pela notação complexa.

A equação de onda que se propaga em um meio homogêneo no sentido positivo do eixo Z é dada por :

$$\vec{O} = A e^{j(\alpha z - \omega t + \phi)} \vec{k} \quad (2.10)$$

onde:

$\phi = \phi(x,y) \Rightarrow$  fases arbitrárias da frente de onda;

$A = A(x,y) \Rightarrow$  amplitudes das frentes de onda;

$\omega = 2\pi c / \lambda \Rightarrow$  frequência angular da onda luminosa;

$\alpha = 2\pi / \lambda \Rightarrow$  frequência espacial da onda luminosa;

$\vec{k} \Rightarrow$  vetor unitário na direção do eixo Z;

$c \Rightarrow$  velocidade da luz;

$\lambda \Rightarrow$  comprimento de onda.

Considerando que a onda será analisada no plano  $z=0$  e é utilizada uma única fonte de radiação ( $\omega$  é constante e o fator  $e^{-j\omega t}$  aparecerá como fator multiplicativo para todas as ondas), toda a informação estará contida na amplitude e na fase da onda. Assim sendo, a equação (2.10) pode ser reduzida para :

$$\vec{O} = A e^{j\phi} \vec{k} \quad (2.11)$$

Para a geração do holograma, uma onda de referência R é adicionada à onda O, gerando uma onda resultante T :

$$\vec{R} = B e^{j\psi} \vec{k} \quad (2.12)$$

$$\vec{T} = \vec{O} + \vec{R} = A e^{j\phi} \vec{k} + B e^{j\psi} \vec{k} \quad (2.13)$$

Supondo que um filme fotográfico seja colocado no plano  $z=0$ , a intensidade luminosa (I) atuante neste filme será dada por :

$$I = \vec{T} \vec{T}^* \quad (2.14)$$

pela equação de interferência de onda (2.7), têm-se :

$$I = A^2 + B^2 + 2 AB \cos (\phi - \psi) \quad (2.15)$$

Demonstra-se a seguir que utilizando um onda de referência R, para iluminar o holograma, a onda O é reconstruída. Quando a onda de referência atravessa o holograma a amplitude da onda transmitida é proporcional a intensidade luminosa registrada no holograma.

Escrevendo:

$$\vec{O}_1 = (\beta + \alpha I) \vec{R} \quad (2.16)$$

onde:  $\beta$  e  $\alpha$  são fatores constantes.

Aplicando (2.15) em (2.16), tem-se:

$$\vec{O}_1 = \beta B e^{j\psi} \vec{k} + \alpha [A^2 + B^2 + AB e^{j(\phi-\psi)} + AB e^{-j(\phi-\psi)}] B e^{j\psi} \vec{k}$$

$$\vec{O}_1 = [ \beta + \alpha B(A^2 + B^2) e^{j\psi} + \alpha B^2 A e^{j\phi} + \alpha B^2 A e^{-j(\phi - 2\psi)} ] \vec{k} \quad (2.17)$$

A equação (2.17) pode ser separada, para efeito de análise, em três componentes. A interpretação de cada uma destas componentes é dada a seguir :

$\beta + \alpha B(A^2 + B^2) e^{j\psi} \vec{k} \Rightarrow$  parcela da onda de referência que não sofreu difração;

$\alpha B^2 A e^{-j\phi} \vec{k} \Rightarrow$  imagem verdadeira composta pela onda reconstruída, que está multiplicada por um fator constante ( $\alpha B^2$ );

$\alpha B^2 A e^{-j(\phi - 2\psi)} \vec{k} \Rightarrow$  imagem conjugada composta pela interação das fases e amplitudes de ambas as ondas.

A análise acima é generica, não havendo restrição quanto à forma de onda de referência e do objeto, nem sobre a natureza da radiação utilizada (desde que a mesma seja monocromática).

## 2.5 - Holografia Interferométrica

A holografia permite a reconstrução da frente de onda com um grau de fidelidade tão elevado, que a mesma pode ser comparada interferometricamente com a frente de onda original do objeto[4]. As ondas superpostas interferem entre si, e ao ocorrerem deslocamentos no objeto que mudem a frente de onda original, padrões de interferências, denominados mapas de franja serão gerados.

A interferência pode ser obtida tanto por dupla exposição, na qual duas ondas são registradas no mesmo holograma ou por exposição em tempo real, na qual o holograma é revelado e reposicionado. Neste último caso, a frente de onda gerada pelo holograma é comparada diretamente com a frente de onda gerada pelo objeto, gerando padrões de interferência em tempo real.

Considerando que as ondas geradas tanto pelo holograma quanto pelo objeto têm a mesma fase e amplitudes proporcionais, quando estas ondas são somadas no ponto de observação ocorre uma interferência construtiva com a intensificação de todos os pontos da imagem.

Ao serem realizados deslocamentos microscópicos no objeto, as fases da onda serão diferentes da fase do holograma, como ilustrado na Figura 2.3:

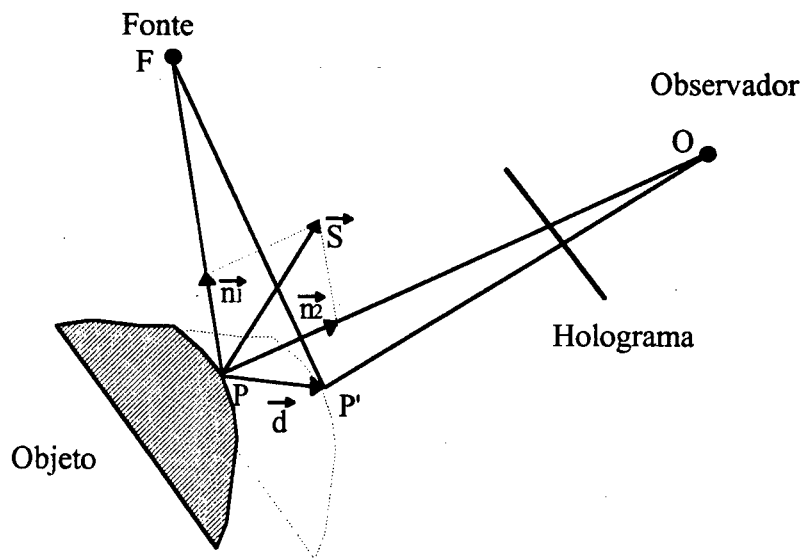


Fig. 2.3 - Variação do caminho óptico devido ao deslocamento do objeto.

Inicialmente o feixe luminoso percorre o caminho óptico  $\overline{FP} + \overline{PO}$ . Com o deslocamento do objeto o feixe passa a percorrer o caminho óptico  $\overline{FP}' + \overline{PO}$ . A diferença  $\Delta d$  entre os caminhos é dada por :

$$\Delta d = (\overline{FP}' + \overline{PO}) - (\overline{FP} + \overline{PO}) \quad (2.18)$$

Como o deslocamento  $\vec{d}$  é muito pequeno se comparado aos caminhos ópticos envolvidos, pode-se considerar que os segmentos  $\overline{FP}$  e  $\overline{FP}'$  são praticamente paralelos. Desta forma, a diferença de comprimento dos segmentos  $\overline{FP}'$  e  $\overline{FP}$  será causada somente pela componente do vetor  $\vec{d}$ , na direção do vetor unitário  $\vec{n}_1$ .

O módulo deste deslocamento pode ser facilmente calculado através do produto vetorial :

$$\overline{FP}' - \overline{FP} = -\vec{d} \cdot \vec{n}_1 \quad (2.19)$$

pelo mesmo princípio, através do vetor unitário  $\vec{n}_2$ , calcula-se:

$$\overline{P'O} - \overline{PO} = \vec{d} \cdot \vec{n}_2 \quad (2.20)$$

substituindo (2.19) e (2.20) em (2.18), tem-se :

$$\Delta d = \vec{d} \cdot \vec{n}_2 + \vec{d} \cdot \vec{n}_1 = \vec{d} (\vec{n}_2 + \vec{n}_1) \quad (2.21)$$

$$\Delta d = \vec{d} \cdot \vec{S} \quad (2.22)$$

onde  $\vec{S}$  é denominado vetor de sensibilidade.

O vetor de sensibilidade é portanto um parâmetro geométrico que define o quanto a fase da frente de onda irá variar em consequência do deslocamento sofrido pela superfície iluminada.

O valor do vetor de sensibilidade pode ser calculado a partir das coordenadas da peça e do sistema óptico associado (pontos de iluminação e observação), em relação a um dado sistema de referência.

Desta forma, para uma variação de caminho óptico  $\Delta d$ , a variação de fase entre as frentes de ondas será dada por :

$$\Delta\phi = 2 \pi \Delta d / \lambda \quad (2.23)$$

onde :

$$\Delta\phi = \Delta\phi(x,y) \quad \Rightarrow \text{defasagem entre as duas frentes de onda;}$$

$$\Delta d = \Delta d(x,y) \quad \Rightarrow \text{variação do caminho óptico de cada ponto.}$$

Pela equação da interferometria (2.9), um plano de gravação de imagem perpendicular ao ponto de observação irá registrar a seguinte intensidade luminosa:

$$I(x,y) = I_0(x,y) + I_1(x,y) \cos(\Delta\phi(x,y)) \quad (2.24)$$

onde  $I_0$  representa a intensidade média de iluminação e  $I_1$  representa o fator de modulação das franjas.

Caso o deslocamento dos pontos do objeto não seja uniforme (deslocamentos devido à aplicação de esforços mecânicos) o valor  $\Delta\phi(x,y)$  não será o mesmo para todos os pontos da imagem, desta forma, será obtida uma imagem com regiões mais claras e mais escuras que são denominadas Franjas Interferométricas. Esta imagem recebe a denominação de Mapa de Franjas, sendo que a Figura 2.4 mostra um típico Mapa de Franjas.

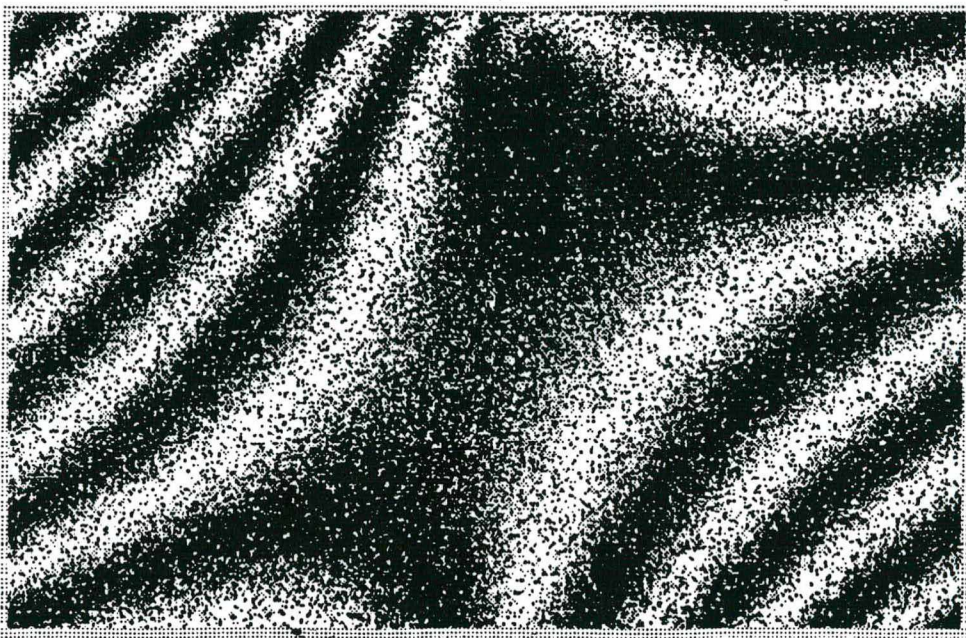


Fig. 2.4 - Mapa de franjas.

## 2.6 - O Speckle

A imagem de uma peça iluminada pela luz do laser aparenta ter uma textura granular, composta por pontos claros e escuros. Estes "grãos" são denominados speckles, que significa "mancha" em inglês. O speckle pode ser observado tanto a olho nú quanto por instrumentos ópticos.

O processo de formação do speckle pode ser descrito com o auxílio da Figura 2.5. A luz do laser ao incidir em uma superfície rugosa é refletida em várias direções.

Um observador que capte esta luz irá verificar a interferência entre os raios provenientes dos diversos pontos da superfície iluminada, pontos escuros serão gerados pela interferência destrutiva e os pontos claros pela interferência construtiva dos raios.

O observador irá perceber portanto um padrão granular aleatório denominado padrão de speckle (Figura 2.6). A natureza aleatória deste padrão é uma consequência da rugosidade da superfície iluminada.

O fenômeno de formação de speckle em imagens de objetos iluminados com laser normalmente prejudica o processo holográfico pois os mesmos se comportam como um "ruído óptico" que perturba a visualização das imagens.



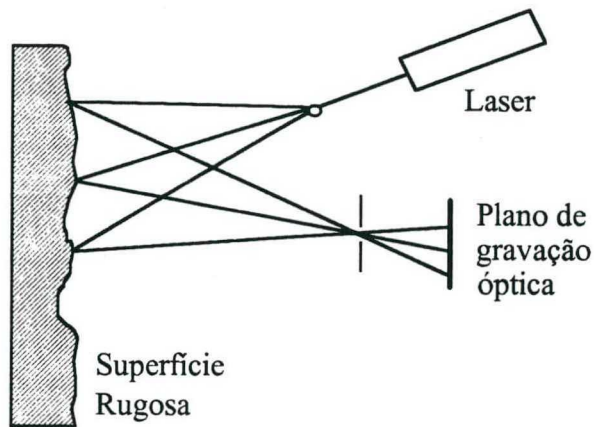


Fig. 2.5 - Processo de formação do speckle.

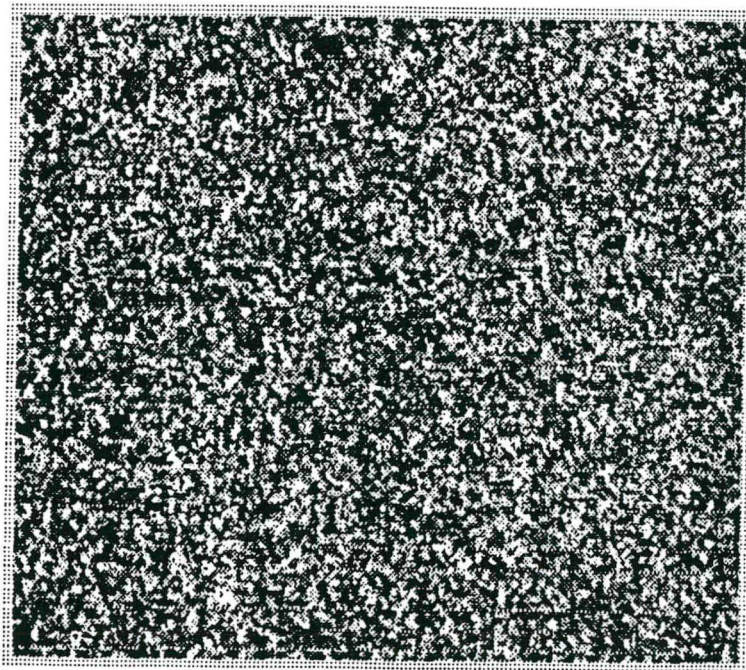


Fig. 2.6 - Padrão de speckle.

Wykes [5] demonstra que cada speckle será formado pela interferência dos raios difundidos por uma pequena região da superfície denominada região de influência. Desta forma, aplicando-se uma carga na superfície, as deformações geradas sobre uma dada região de influência irão gerar variações na intensidade do speckle associado à mesma.

As dimensões de cada speckle e das regiões de influência associadas aos mesmos são dependentes das características do sistema óptico utilizado. Quando não há um sistema óptico para a visualização da superfície, os speckles se formam devido à interferência generalizada que ocorre entre os raios luminosos

provenientes dos inúmeros pontos da referida superfície. Um estudo mais detalhado da teoria do speckle pode ser encontrado em [6].

## 2.7 - A Variação da Fase do Speckle

O fenômeno de formação do speckle permite a geração de mapas de fase muito semelhantes aos gerados através da holografia. A medição de deslocamentos e deformações na superfície de uma peça pode também ser explicada, graças à mudança na fase de cada speckle desta superfície, em consequência do deslocamento sofrido pela peça. Este processo pode ser descrito mais facilmente com o auxílio da Figura 2.7.

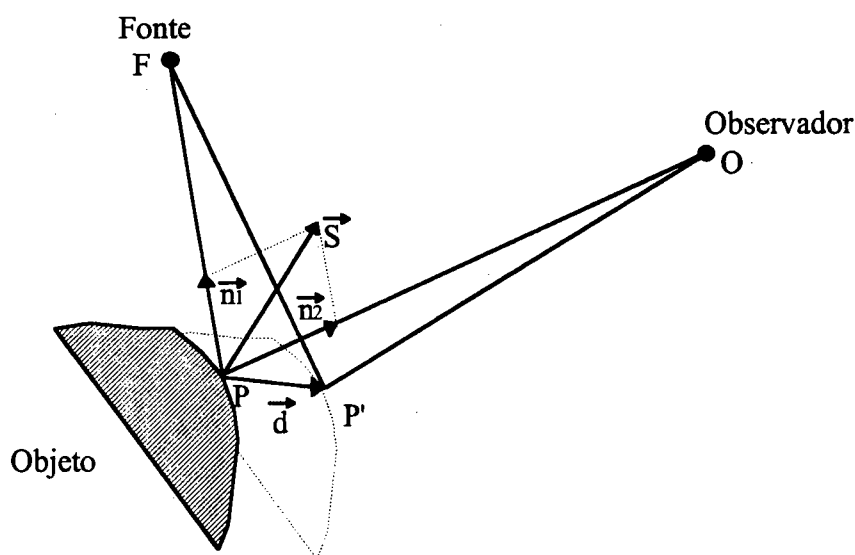


Fig. 2.7 - Variação da fase do speckle devido à mudança do caminho óptico decorrente do deslocamento do objeto.

Um feixe de luz coerente partindo de uma fonte  $F$ , incidindo na superfície no ponto  $P$  e dirigindo-se ao observador  $O$ , descreve o caminho óptico dado por  $(\overline{FP} + \overline{PO})$ .

Quando o objeto é deslocado e o ponto  $P$  passa para a posição  $P'$ , o feixe passa a descrever o caminho  $(\overline{FP'} + \overline{P'O})$ . De forma análoga à holografia interferométrica, a equação da variação de fase do speckle é dada por :

$$\Delta\phi = 2\pi (\vec{d} \cdot \vec{S}) / \lambda \quad (2.25)$$

A equação (2.25) mostra que a variação de fase do speckle está diretamente relacionada com a componente do deslocamento na direção do vetor de sensibilidade.

Para que o observador possa visualizar esta variação de fase é necessário que ao feixe de luz proveniente do objeto seja adicionado um feixe de referência. A interferência entre os dois feixes irá gerar uma variação na intensidade dos speckles que será função da variação de fase dos mesmos.

Para que as franjas sejam geradas é necessário que as intensidades resultantes da interferência do feixe de referência com os padrões de speckles, relativas ao objeto antes e depois do deslocamento, sejam subtraídas. Como a subtração de intensidades não pode ser realizada diretamente sobre um filme fotográfico, é necessário que seja utilizado um sistema de aquisição de imagens.

## 2.8 - Holografia Eletrônica

Por ser bastante recente não existe ainda, a nível internacional, uma unanimidade quanto à denominação da técnica que utiliza a variação de fase dos speckles como princípio de determinação de deslocamentos.

Alguns autores [7] utilizam a denominação *Electronic Speckle Pattern Interferometry* (ESPI), outros [8] utilizam o termo *TV Holography*. Há ainda autores que usam a denominação de *Digital Speckle Pattern Interferometry* (DSPI). Neste trabalho adotaremos a denominação de *Electronic Holography* [9] ou Holografia Eletrônica [10], por considerarmos esta denominação mais representativa, haja vista que os resultados obtidos com esta técnica (que dependem da aquisição de imagens através de sistemas eletrônicos) são equivalentes aos obtidos por meio da Holografia convencional.

A Holografia Eletrônica é, portanto, uma técnica onde os padrões de speckle da superfície a ser medida interferem com um padrão de referência e são captados por uma câmera de vídeo.

Duas ou mais imagens deste padrão de interferência são obtidas em instantes diferentes e referentes à configuração original e a configuração com

deformação da superfície a ser medida. O padrão das franjas é obtido através do processamento digital destas imagens.

A intensidade para imagem da superfície original (sem formação) é dada por:

$$I_i(x,y) = I_0(x,y) + I_1(x,y) \cos(\phi_i(x,y)) \quad (2.26)$$

onde  $I_0(x,y)$  representa a intensidade de iluminação média e  $I_1(x,y)$  representa o fator de modulação dos speckles.

Considerando que a intensidade média  $I_0(x,y)$  e o fator de modulação  $I_1(x,y)$  permanecem constantes após a superfície ser deformada, a intensidade da imagem obtida após o deslocamento é dada por :

$$I_f(x,y) = I_0(x,y) + I_1(x,y) \cos(\phi_f(x,y)) \quad (2.27)$$

onde a variação da fase é dada por:

$$\Delta\phi(x,y) = \phi_f(x,y) - \phi_i(x,y) \quad (2.28)$$

subtraindo as imagens  $I_f(x,y)$  e  $I_i(x,y)$ , obtém-se:

$$I(x,y) = I_f(x,y) - I_i(x,y) \quad (2.29)$$

Aplicando as equações (2.26), (2.27) e (2.28) em (2.29), tem-se :

$$I(x,y) = I_1(x,y) [ \cos(\phi_f(x,y)) - \cos(\phi_i(x,y)) ]$$

$$I(x,y) = I_1(x,y) \{ -2 \sin([\phi_f(x,y) + \phi_i(x,y)]/2) \sin(\Delta\phi(x,y)/2) \} \quad (2.30)$$

Observa-se da equação (2.30) que :

$$\begin{aligned} I(x,y) &= 0 & , \Delta\phi(x,y) &= 2n\pi & , n &= 0,1,2,\dots \\ I(x,y) &= -2 I_1(x,y) & , \Delta\phi(x,y) &= (2n+1)\pi & , n &= 0,1,2,\dots \end{aligned}$$

Desta forma será obtido um mapa de franjas semelhante ao obtido por meio de Holografia Interferométrica convencional mostrado na Figura 2.4.

## 2.9 - O Mapa de Fase

Uma imagem contendo uma variação de fase é denominada mapa de fase e pode ser representada por:

$$\Delta\phi(x,y) = \Delta\varphi(x,y) - 2\pi N(x,y) \quad (2.31)$$

onde:

$\Delta\phi(x,y) \Rightarrow$  módulo  $2\pi$  da variação da fase causada pelo deslocamento do objeto;

$N(x,y) \Rightarrow$  número de voltas inteiras associadas ao ângulo de fase;

$\Delta\varphi(x,y) \Rightarrow$  variação completa da fase.

O número de voltas  $N(x,y)$  deve ser determinado pela aplicação de algoritmos de remoção de saltos de fase (*unwrapping*). O problema de remoção de salto de fase será abordado, com mais detalhes, no Capítulo 7 desta dissertação.

## 2.10 - Vetor de Sensibilidade

O vetor de sensibilidade  $\vec{S}$  é de fundamental importância para a holografia interferométrica, pois somente os módulos das componentes dos deslocamentos na direção de  $\vec{S}$  são medidos [11]. Desta forma, para determinação de

deslocamentos tridimensionais são necessários três mapas de fase obtidos através de três vetores de sensibilidades linearmente independentes. Para variar o vetor de sensibilidade dois tipos de configuração de iluminação podem ser utilizados :

- i) iluminação simples
- ii) iluminação dupla

### 2.11 - Iluminação Simples

Esta configuração possibilita a obtenção de um vetor de sensibilidade normal à superfície iluminada. Somente um feixe de luz ilumina a peça a ser medida, enquanto que outro feixe, denominado de feixe de referência, ilumina um dos braços do interferômetro (espelho parcial) onde ocorre a superposição entre o feixe proveniente da peça com o feixe de referência.

O vetor  $\vec{S}$  será dado pela soma vetorial de dois vetores unitários, um na direção da fonte de iluminação e outro na direção do observador (plano óptico de gravação). Como pode ser observado na Figura 2.8, pode-se obter um vetor resultante aproximadamente normal à superfície do objeto.

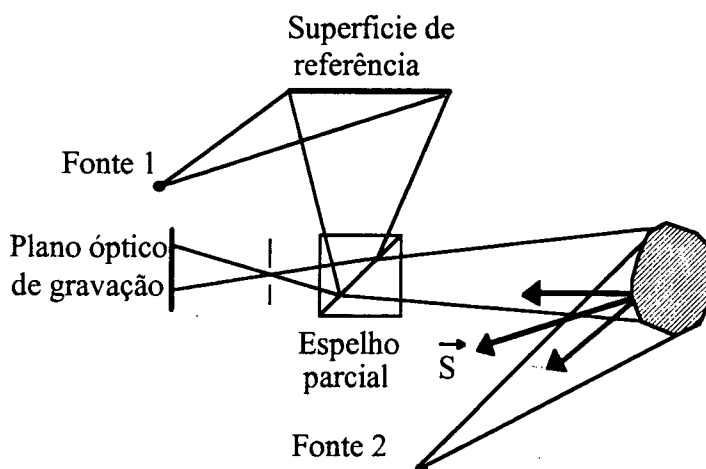


Fig. 2.8 - Iluminação simples.

## 2.12 - Iluminação Dupla

Esta configuração possibilita obtenção de vetores de sensibilidade em um plano (x,y) paralelo à superfície a ser medida, através da utilização de duas fontes de iluminação, como mostra a Figura 2.9.

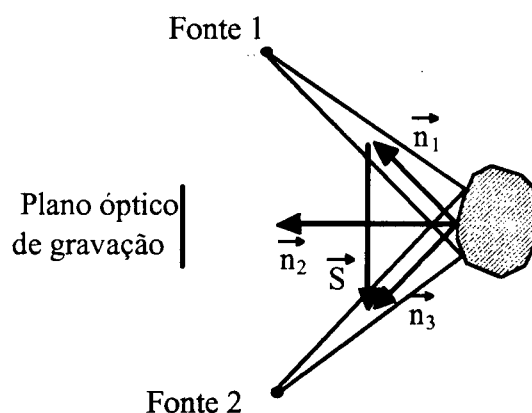


Fig. 2.9 - Iluminação dupla.

Por se tratar de um sistema linear, a influência de cada fonte luminosa pode ser considerada separadamente, sendo que cada caminho óptico terá uma variação distinta em função do deslocamento da superfície:

$$\Delta d_1 = \vec{d} \cdot (\vec{n}_2 - \vec{n}_1) \quad (2.32)$$

$$\Delta d_2 = \vec{d} \cdot (\vec{n}_2 - \vec{n}_3) \quad (2.33)$$

onde:

$\Delta d_1 \Rightarrow$  variação do caminho óptico que vai da fonte 1 ao observador;

$\Delta d_2 \Rightarrow$  variação do caminho óptico que vai da fonte 2 ao observador.

A variação total do caminho óptico será dada por :

$$\Delta d = \bar{d} \cdot \bar{S} = \Delta d_1 - \Delta d_2 \quad (2.33)$$

$$\Delta d = \bar{d} \cdot (\bar{n}_2 - \bar{n}_1 - \bar{n}_2 + \bar{n}_3) \quad (2.34)$$

$$\Delta d = \bar{d} \cdot (\bar{n}_3 - \bar{n}_1) \quad (2.35)$$

Desta forma, o vetor de sensibilidade será dado por:

$$\bar{S} = (\bar{n}_3 - \bar{n}_1) \quad (2.36)$$

É importante salientar que, devido ao problema de ambiguidade da fase, a determinação do sentido do vetor de sensibilidade dado pela equação (2.36) depende do método utilizado na aquisição e tratamento dos mapas de franjas e mapas de fase.

Como será exposto no Capítulo 3, para os métodos que atuam sobre mapas de franjas ( método do Esqueleto e método da Transformada de Fourier), a determinação do sentido do vetor de sensibilidade deve ser realizada com base em parâmetros experimentais. Já para os métodos que atuam sobre os mapas de fase (método do Deslocamento de Fase) o sentido do vetor de sensibilidade pode ser determinado de forma analítica.

Como os vetores  $n_1$  e  $n_3$  são unitários, o valor dos mesmos pode ser facilmente obtido a partir das coordenadas da peça e do sistema óptico associado.



A Figura 2.10 mostra que a orientação do vetor de sensibilidade no plano  $(x,y)$  é dada pelas coordenadas das fontes luminosas projetadas neste plano.

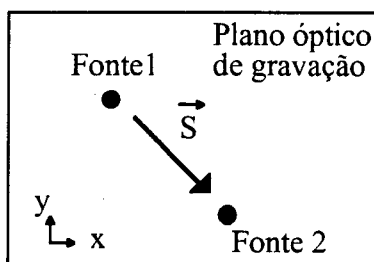


Fig. 2.10 - Vetor de sensibilidade no plano  $(x,y)$ .

### 2.13 - Determinação de Deslocamentos Tridimensionais Através da Holografia

Para um dado objeto, deseja-se obter o valor de deslocamento de uma região da superfície do mesmo devido à aplicação de uma carga. O deslocamento será medido para um conjunto de pontos desta superfície, projetados em um plano óptico de gravação [12] (um filme fotográfico ou um arranjo CCD), que consideraremos como sendo um plano de referência  $(x,y)$ .

O deslocamento do conjunto de pontos da superfície pode ser representado por uma matriz de vetores de deslocamentos  $\vec{d}(x,y)$ , onde a coordenada  $(x,y)$  representa o ponto de projeção da superfície da peça no plano de referência [13].

Com o objeto em repouso são adquiridas três imagens com três formas de iluminação distintas. Cada forma de iluminação gera um vetor de sensibilidade, sendo que através do adequado posicionamento das fontes luminosas são obtidos os seguintes vetores de sensibilidade:

$\vec{S}_x \Rightarrow$  vetor paralelo ao eixo  $x$  do plano de referência  $(x,y)$ ;

$\vec{S}_y \Rightarrow$  vetor paralelo ao eixo  $y$  do plano de referência  $(x,y)$ ;

$\vec{S}_z \Rightarrow$  vetor normal ao plano de referência  $(x,y)$ .

Este conjunto de vetores de sensibilidade forma uma base para o espaço tridimensional. Na prática nem sempre se consegue vetores paralelos aos eixos do sistema de referência, entretanto, sendo os vetores linearmente independentes, uma mudança de base sempre pode ser aplicada.

Aplicando-se uma carga no objeto, os pontos da superfície irão se deslocar e três novas imagens são adquiridas, uma para cada vetor de sensibilidade. Desta forma três mapas de fase serão obtidos:

$$I_x(x,y) = I_{1x}(x,y) [ \cos (\phi_{fx}(x,y)) - \cos (\phi_{ix}(x,y)) ] \quad (2.37)$$

$$I_y(x,y) = I_{1y}(x,y) [ \cos (\phi_{fy}(x,y)) - \cos (\phi_{iy}(x,y)) ] \quad (2.38)$$

$$I_z(x,y) = I_{1z}(x,y) [ \cos (\phi_{fz}(x,y)) - \cos (\phi_{iz}(x,y)) ] \quad (2.39)$$

Através de métodos que serão detalhados no Capítulo 3 os valores dos deslocamentos de fase segundo cada vetor de sensibilidade ( $\Delta\phi_x(x,y)$ ,  $\Delta\phi_y(x,y)$  e  $\Delta\phi_z(x,y)$ ) são determinados, e o deslocamento  $\vec{d}(x,y)$  pode ser calculado com base nas seguintes equações:

$$\Delta\phi_x(x,y) = 2 \pi (\vec{d}(x,y) \cdot \vec{S}_x) / \lambda \quad (2.40)$$

$$\Delta\phi_y(x,y) = 2 \pi (\vec{d}(x,y) \cdot \vec{S}_y) / \lambda \quad (2.41)$$

$$\Delta\phi_z(x,y) = 2 \pi (\vec{d}(x,y) \cdot \vec{S}_z) / \lambda \quad (2.42)$$

Isolando-se os produtos vetoriais, e considerando a ambiguidade da fase:

$$\vec{d}(x,y) \cdot \vec{S}_x = \lambda [\Delta\phi_x(x,y)/2\pi + N_x(x,y)] \quad (2.43)$$

$$\vec{d}(x,y) \cdot \vec{S}_y = \lambda [\Delta\phi_y(x,y)/2\pi + N_y(x,y)] \quad (2.44)$$

$$\vec{d}(x,y) \cdot \vec{S}_z = \lambda [\Delta\phi_z(x,y)/2\pi + N_z(x,y)] \quad (2.45)$$

onde  $N_x$ ,  $N_y$  e  $N_z$  representam o número de voltas inteiras da fase, e são determinados pela utilização de um algoritmo de remoção de saltos de fase.

Os vetores de sensibilidade formam uma base no espaço. Em relação a esta base os mesmos são unitários e ortonormais. Desta forma, pode-se escrever a seguinte expressão:

$$\vec{d}(x,y) = (\vec{d}(x,y) \cdot \vec{S}_x) \vec{S}_x + (\vec{d}(x,y) \cdot \vec{S}_y) \vec{S}_y + (\vec{d}(x,y) \cdot \vec{S}_z) \vec{S}_z \quad (2.46)$$

Com base no valor dos vetores de sensibilidade, obtém-se uma matriz de transformação de base que multiplicada aos vetores de deslocamento converte os valores de deslocamento, obtidos pela equação (2.46), para uma nova base que pode ser a base de referência adotada no experimento.

Da equação (2.46) fica claro que sendo conhecidos os vetores de sensibilidade, o cálculo dos deslocamentos depende somente da determinação da variação da fase em cada ponto com a eliminação das ambigüidades. Assim, no decorrer deste trabalho, teremos por objetivo a determinação de  $\Delta\phi(x,y)$  e  $N(x,y)$  sem nos preocuparmos com a determinação do deslocamento  $\vec{d}(x,y)$ .

Como os vetores de sensibilidade dependem de parâmetros ópticos e mecânicos que variam com cada montagem, as formas de determinação destes vetores e os erros associados aos mesmos não serão abordados neste trabalho.

## **2.14 - Holografia Convencional x Holografia Eletrônica**

Uma das maiores limitações da aplicação da holografia interferométrica convencional é o processo de obtenção do holograma. A sensibilização e revelação do holograma exige um tempo considerável e uma série de cuidados. Além disso, normalmente o holograma não é reutilizado.

Por outro lado, na holografia eletrônica os experimentos são realizados em tempo real, sem consumo de material e com procedimentos mais simples daqueles empregados na holografia convencional.

Por estes motivos e em virtude do baixo custo dos sistemas de aquisição e processamento digital de sinais, atualmente, a holografia eletrônica está sendo cada vez mais empregada na medição de pequenos deslocamentos e vibrações, em detrimento da holografia convencional.

## CAPÍTULO 3

### HOLOGRAFIA ELETRÔNICA

#### 3.1 - Introdução

Neste capítulo será apresentada uma rápida descrição das principais técnicas baseadas em Holografia Eletrônica, como também os principais problemas inerentes a esta técnicas. Os métodos mais importantes serão detalhados e comparados.

#### 3.2 - Métodos Baseados na Holografia Eletrônica

A obtenção dos mapas de franjas e mapas de fase, a partir dos princípios holográficos apresentados no Capítulo 2, pode ser realizada por diversos métodos. Os principais métodos atualmente utilizados são [14]:

- a) Método do Esqueleto (*Fringe Tracking*);
- b) Método da Frequência Portadora Temporal (*Temporal Heterodyning*);
- c) Método da Transformada de Fourier (*Fourier Transform evaluation*);
- d) Método do Deslocamento de Fase (*Phase Shifting*).

#### 3.3 - Método do Esqueleto

O método do esqueleto (*Fringe Tracking*) [15] é baseado na forma manual de contagem de franjas. O mapa de franja é obtido diretamente pela subtração do quadrado da diferença de duas imagens que contém os padrões de speckles da superfície antes e após a deformação. Este método pode ser também empregado

para tratamento de um mapa de franjas obtido por meio da Holografia Convencional.

Os pontos de intensidade máxima, da imagem resultante, são detectados através de algoritmos de pesquisa que varrem toda a imagem. Para estes pontos, a fase corresponde a inteiros múltiplos de  $\pi$  radianos (franjas claras para  $\pm\pi, \pm3\pi, \pm5\pi, \dots$  e franjas escuras para  $0, \pm2\pi, \pm4\pi, \dots$ )

Para evitar o ruído presente na imagem, podem ser utilizadas operações de filtragem através de gradiente ou correlação espacial. Os pontos detectados irão compor um esqueleto formado por curvas de um pixel de largura.

A ordem de franja para cada curva deve ser determinada de forma manual ou por meio de algoritmos que calculem a ordem de franja por meio da contagem das curvas, a partir da curva com ordem de franja zero. A Figura 3.1 ilustra o problema da ambigüidade onde o mesmo esqueleto pode gerar curvas com ordens de franja distintas.

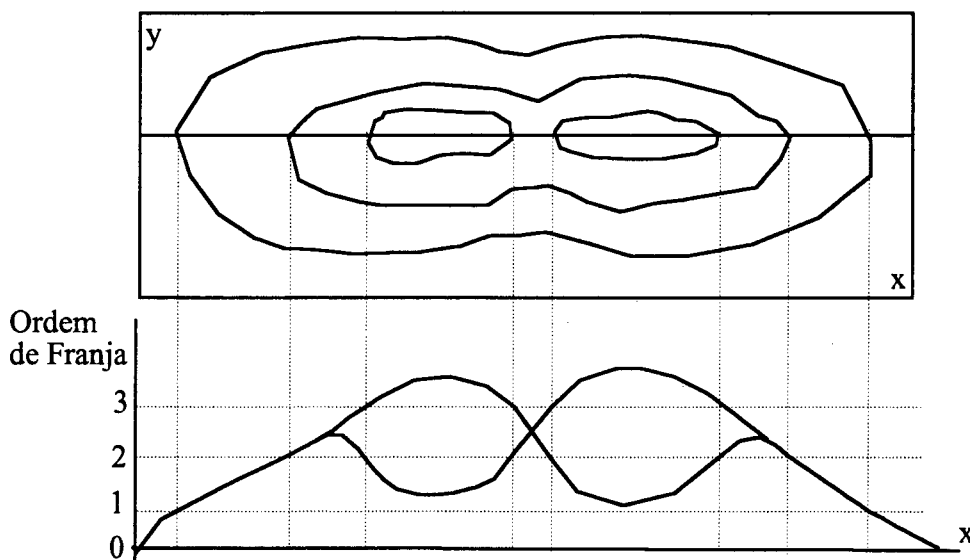


Fig. 3.1 - Determinação da fase e da ordem de franja ao longo de uma linha de um mapa de franjas por interpolação a partir de pontos discretos.

Através de interpolação polinomial, *spline* ou de outras técnicas, as ordens de franja para os demais pontos da imagem podem ser determinadas. Quando o número de franjas é pequeno, as ambigüidades devem ser levantadas através de

outros parâmetros do experimento (curvas teóricas ou medição de deslocamentos pontuais por outros métodos).

O método do esqueleto apresenta incertezas relativamente grandes, pois a maior parte dos valores são interpolados. Além disso, os problemas de ambigüidades podem exigir muitas operações manuais. Apesar destes fatos, este foi um dos métodos mais empregados no passado, pois demanda um volume de processamento relativamente pequeno.

### 3.4 - Método da Frequência Portadora Temporal

O método da frequência portadora temporal (*Temporal Heterodyning*) [16], é muito usado para aplicações estáticas, sendo que os mapas de franjas são normalmente obtidos por meio da Holografia Convencional.

As duas imagens do objeto sob teste (inicial e final) são obtidas por meio de dois hologramas. São utilizadas fontes luminosas com frequências distintas que iluminam cada um dos hologramas. Desta forma, é obtido um mapa de fase dinâmico, no qual as franjas ficam em constante movimento, com uma velocidade de fase constante.

A diferença de frequência  $\Delta f$  é da ordem de kHz e pode ser obtida por laser de duas frequências ou através de espelhos que vibram ou giram variando o comprimento do caminho óptico.

O método da frequência portadora temporal requer sensores de elevada resposta em frequência (compatíveis com o valor de  $\Delta f$ ). Esta resposta em frequência não pode ser obtida com os sensores bidimensionais, normalmente utilizados na aquisição digital de imagens. Desta forma são utilizados fotodetectores pontuais que através de uma varredura mecânica podem captar a intensidade de cada ponto da superfície, no entanto, exigindo um tempo total de varredura muito maior do que aquele usado para os sensores bidimensionais.

A intensidade de um dado ponto pode ser representada por um sinal senoidal de frequência  $\Delta f$  que estará defasada de um ângulo  $\Delta\phi$  em relação a um ponto tomado como referência ou mesmo a um gerador de sinais com frequência  $\Delta f$ . Esta defasagem é medida com muita facilidade, haja vista que o sinal de interesse está numa frequência conhecida e o ruído associado ao mesmo pode ser

eliminado através de uma filtragem passa-faixa. O mapa de fase é obtido pela varredura dos pontos de interesse.

O método pode ser implementado em tempo real com a utilização de apenas um holograma que interfere diretamente com a frente de onda gerada pelo objeto.

Este método também pode ser utilizado para medição de amplitudes e vibrações, sendo que para esta aplicação, a diferença de frequências  $\Delta f$  deve ser ajustada para coincidir com a frequência de vibração do objeto [16].

### 3.5 - Método da Transformada de Fourier

O método transformada de Fourier (*Fourier Transform Evaluation*) [17] possibilita a determinação do valor de deslocamento de fase  $\Delta\phi$  para cada ponto da imagem. Através de um processamento, baseado na transformada de Fourier, o valor da fase para cada ponto do mapa de franjas pode ser determinado pela subtração de duas imagens. Os mapas de franjas podem ser obtidos através da aquisição de um padrão de interferências gerado por meio da Holografia Convencional ou pela subtração de duas imagens que contém os padrões de speckles (Holografia Eletônica).

Dada a equação que representa a intensidade do mapa de franjas:

$$I(x,y) = I_0(x,y) + I_1(x,y) \cos(\Delta\phi(x,y)) \quad (3.2)$$

onde:

$I(x,y)$   $\Rightarrow$  intensidade do mapa de fase;

$I_0(x,y)$   $\Rightarrow$  intensidade média de iluminação;

$I_1(x,y)$   $\Rightarrow$  fator de modulação;

$\Delta\phi(x,y)$   $\Rightarrow$  deslocamento de fase.



Da equação de Euler, tem-se:

$$I(x,y) = I_0(x,y) + (I_1(x,y) e^{j\Delta\phi(x,y)} + I_1(x,y) e^{-j\Delta\phi(x,y)})/2 \quad (3.3)$$

definindo :

$$C(x,y) = \{I_1(x,y) e^{j\Delta\phi(x,y)}\}/2 \quad (3.4)$$

$$C^*(x,y) = \{I_1(x,y) e^{-j\Delta\phi(x,y)}\}/2 \quad (3.5)$$

onde  $C^*(x,y)$  é o complexo conjugado de  $C(x,y)$ .

Aplicando as equações (3.4) e (3.5) em (3.3) :

$$I(x,y) = I_0(x,y) + C(x,y) + C^*(x,y) \quad (3.6)$$

Através da aplicação da transformada de Fourier  $F(\cdot)$  em (3.6), obtém-se:

$$I(u,v) = I_0(u,v) + C(u,v) + C^*(-u,-v) \quad (3.7)$$

onde :

$$I_0(u,v) = F(I_0(x,y)) \quad (3.8)$$

$$C(u,v) = F(C(x,y)) \quad (3.9)$$

$$C^*(-u,-v) = F(C^*(x,y)) \quad (3.10)$$

$$I(u,v) = F(I(x,y)) \quad (3.11)$$

Como  $I_0(x,y)$  representa a intensidade média de iluminação, o seu valor pode ser considerado praticamente constante. Desta forma, podemos considerar que  $I_0(u,v)$  contém o termo contínuo (impulso localizado em  $I(0,0)$ ) e também as baixas freqüências da variação da intensidade de iluminação  $I(x,y)$ . Já os termos  $C(u,v)$  e  $C^*(-u,-v)$  que contém a mesma informação em magnitude, ocupam um espectro de mais alta freqüência.

Como  $I(x,y)$  é uma função real no domínio do espaço,  $I(u,v)$  será uma função Hermitiana no domínio da freqüência espacial, isto significa que a parte real de  $I(u,v)$  é par, e a parte imaginária é ímpar, resultando em um espectro de amplitude simétrico em relação a origem. Através de uma filtragem passa-banda no domínio da freqüência espacial, as componentes  $I_0(u,v)$  e  $C^*(-u,-v)$  podem ser descartados, assim:

$$I'(u,v) = I(u,v) H(u,v) \quad (3.12)$$

$$I'(u,v) \cong C(u,v) \quad (3.13)$$

onde  $H(u,v)$  representa a resposta em freqüência do filtro passa-faixa.

Ao aplicar a transformada inversa, obtemos um sinal complexo:

$$I'(x,y) = C(x,y) \quad (3.14)$$

$$I'(x,y) = \{I_1(x,y) e^{j\Delta\phi(x,y)}\} / 2 \quad (3.15)$$

$$I'(x,y) = \{ I_1(x,y) \cos (\Delta\phi(x,y)) + j I_1(x,y) \text{sen} (\Delta\phi(x,y)) \} / 2 \quad (3.16)$$

Desta forma,  $\Delta\phi(x,y)$  pode ser determinado por :

$$\Delta\phi(x,y) = \text{tg}^{-1}\left(\frac{\text{Im}(I'(x,y))}{\text{Re}(I'(x,y))}\right) \quad (3.17)$$

Para facilitar o processo de filtragem, franjas portadoras podem ser adicionadas ao mapa de franjas inicial, de forma que  $C(u,v)$  ocupe um espectro de freqüências bem distinto do ocupado por  $I_0(u,v)$ .

### 3.6 - Método do Deslocamento de Fase

O método do deslocamento de fase (*Phase Shifting*) [18] determina a ordem de franja a partir da variação de intensidade obtida pela variação da fase relativa entre os feixes do interferômetro. Esta variação pode ser realizada pela modificação do caminho óptico de um dos feixes, através do deslocamento de um espelho montado sobre um atuador piezoelétrico ou eletromagnético. A intensidade do padrão de speckles para o objeto em repouso pode ser representada por:

$$I_i(x,y,\theta) = I_0(x,y) + I_1(x,y) \cos(\phi_i(x,y) + \theta) \quad (3.18)$$

onde  $\theta$  é o ângulo de fase entre os feixes do interferômetro.

Para o objeto sob carga, a intensidade pode ser representada por:

$$I_f(x,y,\theta) = I_0(x,y) + I_1(x,y) \cos(\phi_f(x,y) + \theta) \quad (3.19)$$

Todos os parâmetros da equação (3.19) podem ser facilmente determinados através da variação de  $\theta$ . Para tal basta medir a intensidade  $I_i$  para alguns valores de  $\theta$  e determinar os valores de  $I_0$ ,  $I_1$  e  $\phi_i$  através de alguma técnica de interpolação.

Representando (3.19) por série de Fourier, tem-se :

$$I_i(x,y,\theta) = I_0(x,y) + A_i(x,y) \cos \theta + B_i(x,y) \sen \theta \quad (3.20)$$

onde:

$$A_i(x,y) = \frac{1}{\pi} \int_{\theta=0}^{2\pi} I_i(x,y,\theta) \cos \theta \, d\theta \quad (3.21)$$

$$B_i(x,y) = -\frac{1}{\pi} \int_{\theta=0}^{2\pi} I_i(x,y,\theta) \sen \theta \, d\theta \quad (3.22)$$

Considerando que N imagens são obtidas para valores de  $\theta$  variando com passo de  $2\pi / N$ , as equações (3.21) e (3.22) podem ser representadas pela forma discreta :

$$A_i(x,y) = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} I_i(x,y, 2\pi k / N) \cos (2\pi k / N) \quad (3.23)$$

$$B_i(x,y) = -\frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} I_i(x,y, 2\pi k / N) \sen (2\pi k / N) \quad (3.24)$$

Assim,  $I_1(x,y)$  e  $\phi_i(x,y)$  podem ser determinados por:

$$I_1(x,y) = \sqrt{B_i^2(x,y) + A_i^2(x,y)} \quad (3.25)$$

$$\phi_i(x,y) = \text{tg}^{-1} \left( \frac{B_i(x,y)}{A_i(x,y)} \right) \quad (3.26)$$

O valor mínimo de  $N$  é 3 e o valor máximo é limitado apenas pela capacidade de armazenamento e pelo tempo de processamento. Teoricamente, na presença de ruído, quanto maior for o número de pontos interpolados, melhores serão os resultados obtidos. Na prática, utilização de  $N$  elevado pode levar a um tempo de aquisição muito grande (principalmente quando, por limitações de memória, for necessário armazenar as imagens em meio magnético) durante o qual os parâmetros  $I_1$  e  $I_0$  podem sofrer alterações gerando erros no processo.

Desta forma, normalmente são utilizadas quatro imagens, o que permite a obtenção de bons resultados com um processamento reduzido.

Assim, para  $N=4$ , obtém-se:

$$A_i(x,y) = \frac{1}{2} [I_i(x,y,0) - I_i(x,y,\pi)] \quad (3.27)$$

$$B_i(x,y) = -\frac{1}{2} [I_i(x,y,\pi/2) + I_i(x,y,3\pi/2)] \quad (3.28)$$

$$\phi_i(x,y) = \text{tg}^{-1} \left( \frac{I_i(x,y,3\pi/2) - I_i(x,y,\pi/2)}{I_i(x,y,0) - I_i(x,y,\pi)} \right) \quad (3.29)$$

A fase  $\phi_f(x,y)$  pode ser determinada de forma análoga, sendo o desvio de fase  $\Delta\phi(x,y)$  determinado pela equação :

$$\Delta\phi(x,y) = \phi_f(x,y) - \phi_i(x,y). \quad (3.30)$$

### 3.7 - Comparação Entre os Métodos de Determinação da Fase

Os métodos apresentados são a seguir comparados, sendo que a Tabela 3.1 apresenta um resumo comparativo dos quatro métodos, destacando suas principais características.

### 3.7.1 - Requisitos Experimentais

Os métodos mais simples e com menores requisitos experimentais são os métodos do Esqueleto e da Transformada de Fourier, que operam sobre um único mapa de franjas, no entanto, para estes métodos a remoção de ambigüidade do sinal de fase deve ser resolvida com a utilização de informações externas. Tanto a varredura das franjas como o cálculo das transformadas demandam uma complexidade computacional (tempo de processamento) relativamente alta, porém, com uma quantidade de memória relativamente reduzida.

Para implementação do método de Deslocamento de Fase é necessário o controle preciso do deslocamento da fase e a aquisição e armazenamento de diversas imagens. Para quatro imagens a complexidade computacional não é muito grande. A estabilidade mecânica do experimento deve ser elevada para que durante o tempo de aquisição das imagens não ocorram variações de parâmetros.

O método da Frequência Portadora Temporal necessita do controle preciso do deslocamento em frequência exigindo um sistema de medição muito preciso e estável, pois, o mecanismo de varredura é relativamente lento (é realizada uma aquisição para cada ponto da imagem). Desta forma, variações nas fontes luminosas e no índice de refração do ar devem ser controladas.

### 3.7.2 - Resolução e Incertezas de Medição

A resolução espacial é definida pela distância entre os pontos de detecção. A resolução no método do Esqueleto depende do número de franjas do mapa. Para os métodos do Deslocamento de Fase e da Transformada de Fourier a resolução depende apenas do sistema de aquisição de imagens. No método da Frequência Portadora Temporal a resolução espacial é dada pela área do detector e pelo mecanismo de varredura.

A incerteza de medição normalmente é dada em frações do comprimento de onda. Para um grande número de franjas o método do Esqueleto pode chegar a uma incerteza da ordem de  $\lambda/10$ . A incerteza do método da Transformada de Fourier é da ordem de  $\lambda/20$ , dependendo fortemente do processo de filtragem. No método de Deslocamento de Fase podem ser alcançadas incertezas da ordem de  $\lambda/100$  (para aquisição em 8 bit a incerteza é limitada pelo sistema de aquisição a

um valor mínimo de  $\lambda/256$ ). O método da Frequência Portadora Temporal possibilita a obtenção de precisões muito elevadas, da ordem de  $\lambda/500$ , mas isto só é possível em condições laboratoriais onde todos os parâmetros do processo, especialmente a largura do passo dos detectores e as estabilidades dos sistemas ópticos e mecânicos, forem mantidos durante todo o experimento.

Na Holografia Eletrônica o laser de Hélio-Neônio é normalmente utilizado. Como o comprimento de onda do laser HeNe é de  $0,6328 \mu\text{m}$ , através do método do Deslocamento de Fase podem ser medidos deslocamentos com incertezas de medição de até  $6\text{nm}$  e com o método da Frequência Portadora Temporal incertezas da ordem de  $1\text{nm}$  podem ser obtidas.

Tabela 3.1 - Resumo comparativo dos métodos.

Característica \ método	Esqueleto	Deslocamento de Fase	Transformada de Fourier	Frequência Portadora Temporal
Número de interferogramas	1	3 ou 4 raramente >4	1	1 por ponto de detecção
Precisão (em $\lambda$ )	1 a 1/10	1/10 a 1/100	1/10 a 1/30	1/100 a 1/2000
Permite supressão de ruído inerente ao processo	parcial	sim	sim	parcial
Avaliação em condições de saturação da intensidade luminosa	não	sim	sim	sim
Detecção automática de sinal	não	sim	não	sim
Necessidade de manipulação experimental	não	deslocamento da fase	não	deslocamento da frequência
Requisitos experimentais	baixos	moderados	baixos	elevados
Sensibilidade a influências externas	baixa	moderada	baixa	muito elevada
Complexidade computacional (tempo de processamento)	alta	baixa	alta	muito alta

### 3.7.3 - Erros e Distorções

O ruído é uma das grandes fontes de problemas na Holografia Eletrônica. O ruído é gerado por uma série de fatores que serão analisados com maiores detalhes no Capítulo 4. Os métodos do Esqueleto e da Transformada de Fourier são muito sensíveis a distorções e ruídos, pois, processam poucos mapas de franjas. O método do Deslocamento de Fase é menos sensível, pois os resultados são obtidos pela interpolação de várias imagens, sendo o ruído naturalmente atenuada.

O método da Freqüência Portadora Temporal é altamente sensível a instabilidades e distorções, devido ao longo tempo de aquisição.

### **3.8 - Conclusões**

Pelas considerações dos itens anteriores, fica claro que o método do Deslocamento de Fase destaca-se por apresentar simultaneamente, baixas incertezas de medição, menor sensibilidade a ruído e menor complexidade computacional.

O método da Freqüência Portadora Temporal, apresenta menores incertezas, mas necessita de elevados requisitos experimentais e de um elevado tempo de processamento. Além disso, um holograma deve ser gerado para cada novo experimento.

Desta forma, o método do Deslocamento de Fase é um dos mais difundidos, sendo que a Estação Holográfica, na qual os resultados deste trabalho foram avaliados, está baseada neste método. Desta forma, as análises realizadas nos próximos capítulos serão baseadas no método Deslocamento de Fase.



## CAPÍTULO 4

### ERROS NA HOLOGRAFIA ELETRÔNICA

#### 4.1 - Introdução

Neste capítulo serão descritas as principais fontes de erros presentes na holografia eletrônica [19]. A primeira contribuição deste trabalho de dissertação é apresentada sob a forma de um novo modelo matemático para o erro associado ao método phase shifting que leva em conta a influência do fator de modulação dos speckles. Ainda neste capítulo, também são apresentados alguns resultados experimentais.

#### 4.2 - Fontes de Erros Sistemáticos

Uma série de erros sistemáticos estão presentes na holografia eletrônica, sendo os principais:

- a) erros na determinação dos vetores de sensibilidade;
- b) erros no deslocamento da fase;
- c) deslocamentos e deformações dos suportes e superfícies de referência; quando uma carga é aplicada no objeto sob teste;
- d) problemas de linearidade nos sistemas ópticos (espelhos e lentes);
- e) problemas de linearidades do sistema de aquisição de imagens.

### 4.3 - Fontes de Erros Aleatórios

As principais fontes de erros aleatórios presentes na holografia eletrônica são listadas a seguir:

- a) variação da potência do laser ;
- b) vibrações mecânicas;
- c) variação do índice de refração do ar;
- d) influência de fontes luminosas externas;
- e) variação no fator de modulação dos speckles;
- f) variação da fase dos speckles;
- g) ruído eletrônico no sistema de aquisição de imagens.

### 4.4 - Minimização das Fontes de Erros

A minimização das fontes de erros sistemáticos passa pela escolha de elementos adequados na composição da montagem holográfica. Em ambiente de laboratório, as condições de temperatura, iluminação, vibração e índices de refração podem ser melhor controladas de modo a diminuir as fontes de erros. Além disso, a realização das medições em um curto intervalo de tempo irá diminuir a influência dos parâmetros que variam mais lentamente como é o caso da potência de laser.

A variação da fase dos speckles não pode ser eliminada, pois, os padrões de speckles, nos quais se baseia a holografia eletrônica, são na realidade ruídos ópticos gerados pela irregularidade superficial do objeto que está sendo iluminado.

Os baixos fatores de modulação podem ser um pouco melhorados com um tratamento da superfície a ser medida (pintura branco-fosca, por exemplo).

#### 4.5 - Tratamento dos Erros Gerados na Medição

A influência dos erros aleatórios pode ser reduzida através de médias e filtragens. O fato do método do Deslocamento de Fase utilizar uma série de imagens na determinação dos mapas de fase, já proporciona uma redução dos erros aleatórios.

A influência dos erros sistemáticos pode ser reduzida através da determinação das não linearidades e da medição de parâmetros físicos dos sistemas. Processos de autocalibração baseados na utilização de padrões de deslocamento conhecidos podem ser utilizados na determinação dos erros sistemáticos.

Muitas vezes os erros sistemáticos presentes na medição podem ser considerados desprezíveis em comparação com os erros aleatórios.

#### 4.6 - Modelagem dos Erros no Mapa de Franjas

Levando em conta as fontes de erros, a equação da intensidade luminosa é dada por:

$$I(x,y,\theta,t) = I_0(x,y,t) + I_1(x,y,t) \cos(\phi(x,y,t) + \theta(t)) \quad (4.1)$$

Na equação (4.1) considera-se que todos os parâmetros variam com o tempo devido aos erros aleatórios, mas esta abordagem dificulta a identificação de peculiaridades dos sinais de ruído que facilitem o processo de filtragem.

Na equação a seguir, os parâmetros são considerados constantes, sendo os erros separados em duas parcelas:

$$I(x,y,\theta,t) = I_0(x,y) + I_1(x,y) \cos(\phi(x,y) + \theta + \theta_e(x,y,t)) + I_e(x,y,t) \quad (4.2)$$

onde:

$I_e(x,y,t) \Rightarrow$  erro associado à intensidade luminosa, devido às variações do laser, do fator de modulação e de ruídos no sistema de aquisição de imagens;

$\theta_e(x,y,t) \Rightarrow$  erro associado à fase, devido às variações na fase de referência, na fase dos speckles, vibrações e variações do índice de refração do ar.

No método do Deslocamento de Fase, obtém-se N imagens para valores de  $\theta$  distintos, desta forma, o tempo deixa de ser relevante e a equação (4.2) pode ser modificada para:

$$I(x,y,\theta) = I_0(x,y) + I_1(x,y) \cos(\phi(x,y) + \theta) + I_e(x,y,\theta) \quad (4.3)$$

onde  $I_e(x,y,\theta)$  é o erro de intensidade resultante da soma de todas as fontes de erro do sistema de medição.

Considerando que os erros sistemáticos podem ser desprezados (por serem pequenos ou poderem ser compensados) a distribuição do erro  $I_e(x,y,\theta)$  pode ser considerada normal com média zero.

Uma análise da contribuição de cada fonte de erro na formação de  $I_e(x,y,\theta)$  só pode ser realizada para um sistema específico [20] [21], sendo que a otimização de um dado sistema de medição deve ser realizada através da minimização das principais fontes de erro.

#### 4.7 - Modelagem dos Erros no Método do Deslocamento de Fase

Na obtenção do mapa de fase  $\phi(x,y)$ , através do método do Deslocamento de Fase, as fontes de erros podem ser modeladas por:

$$\phi_1(x,y) = \phi(x,y) + \phi_e(x,y) \quad (4.4)$$

onde:

$\phi_1(x,y) \Rightarrow$  fase obtida pelo método do Deslocamento de Fase;

$\phi(x,y) \Rightarrow$  fase sem erros;

$\phi_e(x,y) \Rightarrow$  erro sobreposto à fase.

O valor de  $\phi_1(x,y)$  é determinado pelo método do Deslocamento de Fase (através de operações não lineares), que processa um sinal que pode ser modelado pela equação (4.3). Desta forma, pode-se obter uma função que relacione o erro de intensidade  $I_e(x,y,t)$  com o erro de fase  $\phi_e(x,y)$ , como será demonstrado a seguir.

A equação (4.3) pode ser escrita como:

$$I(x,y,\theta) = I_0(x,y) + A(x,y) \cos \theta + B(x,y) \sin \theta + I_e(x,y,\theta) \quad (4.5)$$

onde  $\phi(x,y)$  e  $I_1(x,y)$  são dados por :

$$\phi(x,y) = \text{tg}^{-1}\left(\frac{B(x,y)}{A(x,y)}\right) \quad (4.6)$$

$$I_1(x,y) = \sqrt{B^2(x,y) + A^2(x,y)} \quad (4.7)$$

Para o método do Deslocamento de Fase, com 4 passos ( $N=4$ ), o valor de  $\theta$  varia em  $\pi/2$  radianos, sendo obtidas quatro imagens. Devido à presença de ruído o valor de  $A(x,y)$  e  $B(x,y)$  não pode ser determinado de forma exata, mas pode ser estimado através de  $A_1(x,y)$  e  $B_1(x,y)$ , dados por:

$$A_1(x,y) = \frac{I(x,y,0) - I(x,y,\pi)}{2}$$

$$A_1(x,y) = A(x,y) + \frac{I_e(x,y,0) - I_e(x,y,\pi)}{2} \quad (4.8)$$

$$B_1(x,y) = \frac{I(x,y,3\pi/2) - I(x,y,\pi/2)}{2}$$

$$B_1(x,y) = B(x,y) + \frac{I_e(x,y,3\pi/2) - I_e(x,y,\pi/2)}{2} \quad (4.9)$$

definindo:

$$e_a(x,y) = \frac{I_e(x,y,0) - I_e(x,y,\pi)}{2} \quad (4.10)$$

$$e_b(x,y) = \frac{I_e(x,y,3\pi/2) - I_e(x,y,\pi/2)}{2} \quad (4.11)$$

desta forma, obtem-se:

$$A_1(x,y) = A(x,y) + e_a(x,y) \quad (4.12)$$

$$B_1(x,y) = B(x,y) + e_b(x,y) \quad (4.13)$$

Portanto, o ângulo de fase e o fator de modulação podem ser estimados por:

$$\phi_1(x,y) = \text{tg}^{-1}\left(\frac{B_1(x,y)}{A_1(x,y)}\right)$$

$$I_1(x,y) = \sqrt{B_1^2(x,y) + A_1^2(x,y)}$$

$$\phi_1(x,y) = \phi(x,y) + \phi_e(x,y) \quad (4.14)$$

Desta forma, o erro  $\phi_e(x,y)$  pode ser calculado por :

$$\phi_e(x,y) = \phi_1(x,y) - \phi(x,y),$$

$$\phi_e(x,y) = \text{tg}^{-1}\left(\frac{B_1(x,y)}{A_1(x,y)}\right) - \text{tg}^{-1}\left(\frac{B(x,y)}{A(x,y)}\right)$$

ou ainda,

$$\phi_e(x,y) = \text{tg}^{-1}\left(\frac{B(x,y) + e_b(x,y)}{A(x,y) + e_a(x,y)}\right) - \text{tg}^{-1}\left(\frac{B(x,y)}{A(x,y)}\right) \quad (4.15)$$

A análise da equação (4.15) é facilitada pela construção de um diagrama polar sendo que na Figura 4.1 observa-se um erro vetorial cujo módulo  $e(x,y)$  é dado por :

$$e(x,y) = \sqrt{e_a^2(x,y) + e_b^2(x,y)} \quad (4.16)$$

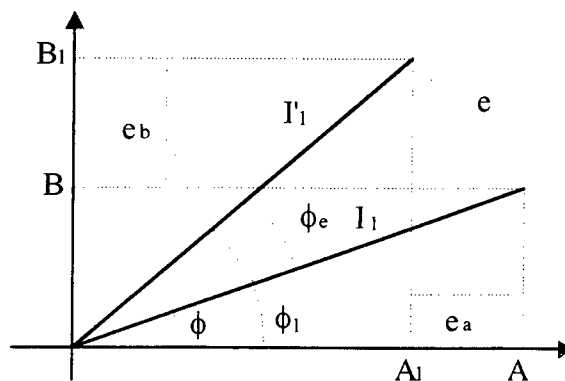


Fig. 4.1 - Representação gráfica do erro  $\phi_e(x,y)$ .

Considerando um elevado fator de modulação ( $I(x,y) \gg e(x,y)$ ), o erro de fase será máximo quando o vetor de erro (cujo módulo é dado por  $e(x,y)$ ) for perpendicular ao vetor do fator de modulação vetorial (cujo módulo é dado por  $I_1(x,y)$ ). Para um baixo fator de modulação ( $I(x,y) \cong e(x,y)$ ) a informação de fase está fortemente prejudicada, podendo o erro de fase assumir qualquer valor.

Na Figura 4.2 é ilustrada a relação entre os erros e o fator de modulação.

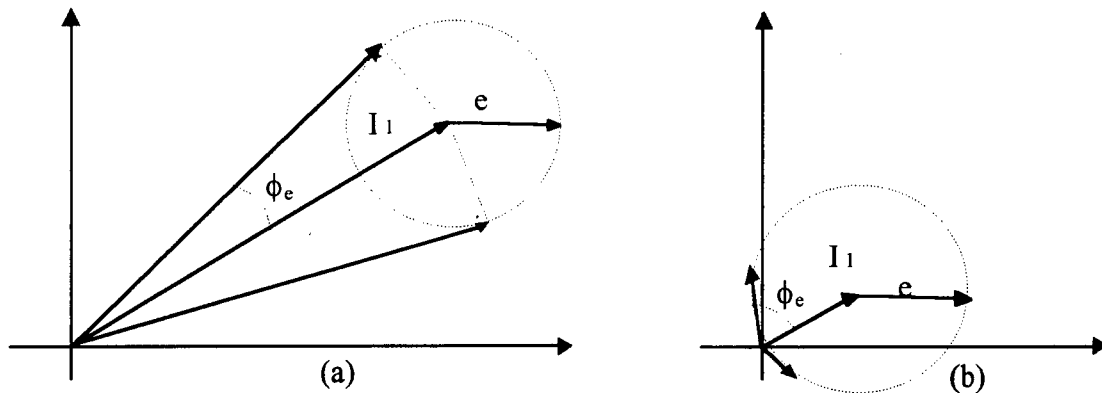


Fig. 4.2 - Variação do erro  $\phi_e$  em função da variação do fator de modulação  $I_1$ . (a) elevado fator de modulação, (b) baixo fator de modulação.

Considerando a variação do fator de modulação, o erro  $\phi_e(x,y)$  pode ser calculado por:

$$\phi_e(x,y) \leq \left| \text{tg}^{-1} \frac{e(x,y)}{I_1(x,y)} \right|, \quad I_1(x,y) \gg e(x,y) \quad (4.17)$$

$$\phi_e(x,y) \leq \pi, \quad I_1(x,y) \leq e(x,y) \quad (4.18)$$

As equações (4.17) e (4.18) podem ser aproximadas para :

$$\phi_e(x,y) \leq 2 \left| \text{tg}^{-1} \frac{e(x,y)}{I_1(x,y)} \right| \quad (4.19)$$



Da análise destas equações fica claro que os erros contidos no mapa de fase são máximos para os pontos em que o fator de modulação é mínimo. De fato, para um fator de modulação nulo um valor de fase aleatório é obtido.

Desta forma, o erro  $\phi_e(x,y)$  pode ser aproximado por:

$$\phi_e(x,y) = \text{tg}^{-1} \frac{e(x,y)}{I_1(x,y)} \quad (4.20)$$

#### 4.8 - Resultados Experimentais

Para a valiação da equação (4.19), realizou-se experimento em uma estação holográfica segundo as seguintes etapas:

- a) obtenção do um mapa de fase e do fator de modulação dos speckles através do método do Deslocamento de Fase;
- b) obtenção do mapa de fase sem ruído através de um processo de filtragem (detalhado no Capítulo 5);
- c) obtenção do ruído removido por filtragem, através da subtração dos dois mapas de fase;
- d) obtenção de um gráfico relacionando o ruído com o fator de modulação;
- e) obtenção da curva teórica (equação (4.20)) relacionando o ruído com o fator de modulação sobre o gráfico obtido na etapa anterior.

As figuras a seguir apresentam resultados obtidos experimentalmente:

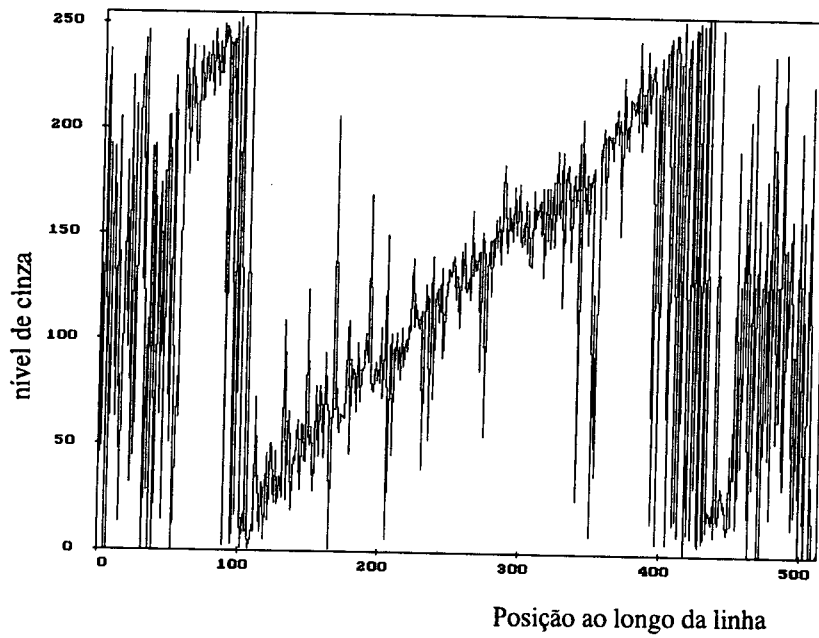


Fig. 4.3 - Uma linha do mapa de fase com ruído.

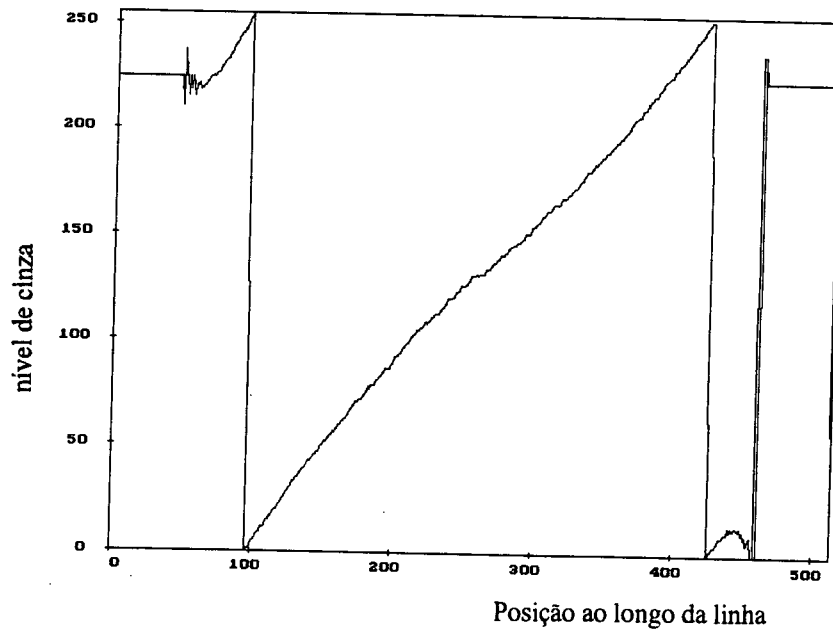


Fig. 4.4 - Uma linha do mapa de fase após o processo de filtragem.

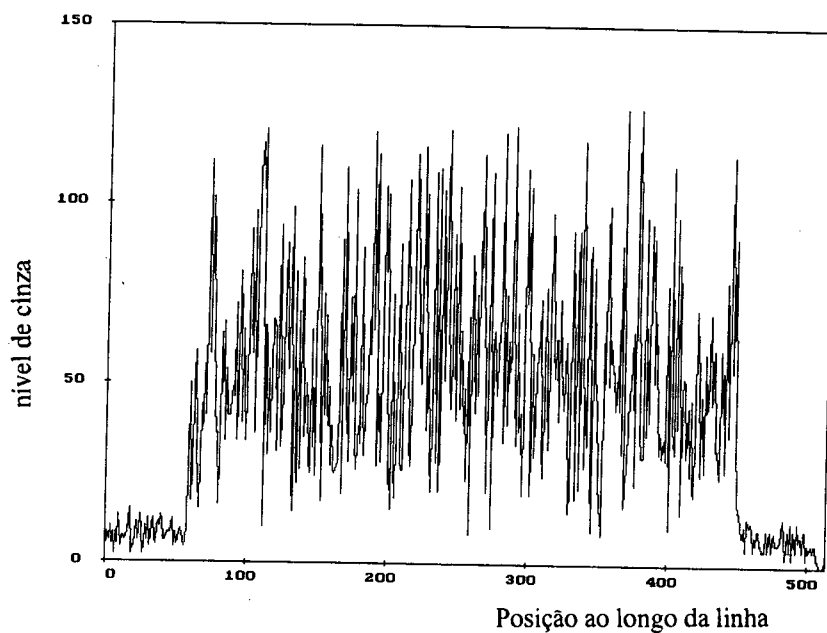


Fig. 4.5 - Uma linha do fator de modulação.

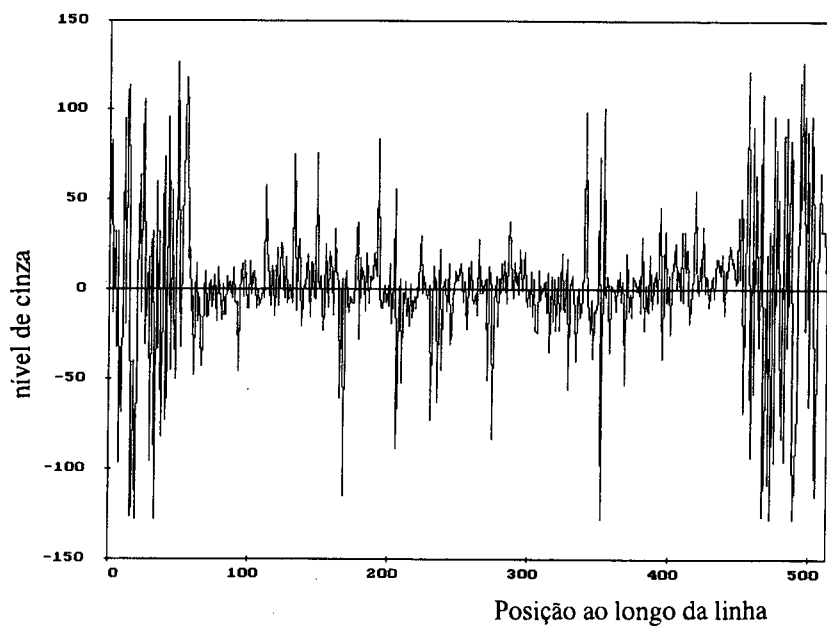


Fig. 4.6 - Ruído sobreposto ao mapa de fase (obtido pela diferença entre os sinais das Figuras 4.3 e 4.4).

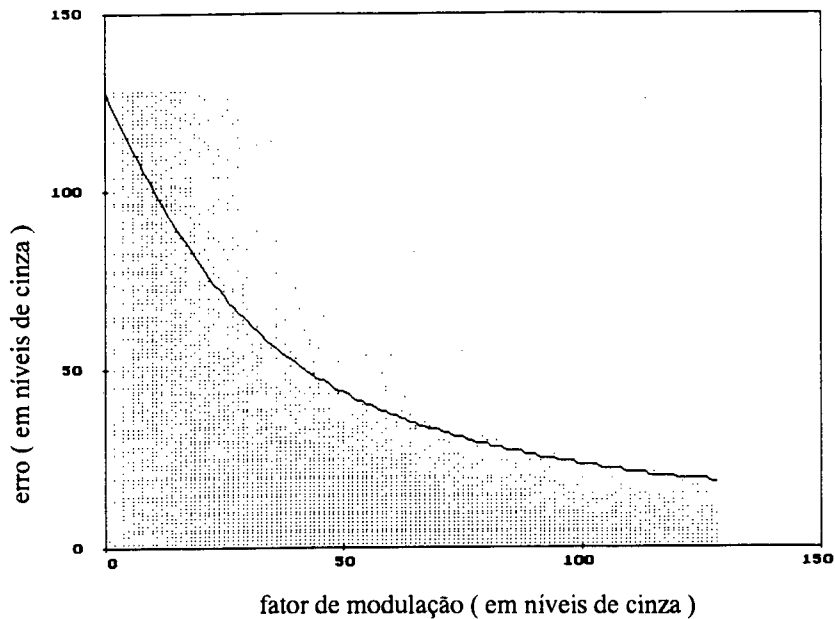


Fig. 4.7 - Gráfico relacionando o erro com o fator de modulação.

#### 4.9 - Conclusões

Dos resultados experimentais verificamos que o modelo matemático apresentado pela equação (4.20) representa muito bem a relação entre o ruído e o fator de modulação dos speckles, sendo que para um baixo fator de modulação o valor de fase obtido é praticamente aleatório. Analisando uma imagem como um todo, observa-se que a informação da fase estará contida somente nos pontos com elevado fator de modulação.

Como pode ser observado pela Figura 4.5, uma grande parte dos speckles possui um baixo fator de modulação. Desta forma, os mapas de fase obtidos por holografia eletrônica apresentam um elevado nível de ruído.

## CAPÍTULO 5

### FILTRAGEM DO MAPA DE FASE

#### 5.1 - Introdução

Neste capítulo, os aspectos relacionados com a remoção de ruído do mapa de fase são apresentados. A presença de saltos de fase no mapa de fase dificulta o processo de filtragem<sup>1</sup> haja vista que os filtros passa-baixas normalmente utilizados na remoção do ruído eliminam as componentes de alta frequência dos saltos de fase. Por outro lado, a presença do ruído dificulta o processo de remoção dos saltos de fase. Dois métodos de filtragem dos mapa de fase que consideram o problema dos saltos de fase são apresentados e comparados.

#### 5.2 - Modelagem do Mapa de Fase

O mapa de fase obtido pelo método do Deslocamento de Fase pode ser modelado pela seguinte expressão:

$$\Delta\phi(x,y) = \Delta\phi(x,y) - 2\pi N(x,y) + \phi_e(x,y) \quad (5.1)$$

---

<sup>1</sup>No decorrer deste capítulo o termo "filtragem" será utilizado, num sentido restrito, para indicar o processo de filtragem passa-baixas visando à atenuação de ruído.

onde:

$\Delta\phi(x,y) \Rightarrow$  módulo  $2\pi$  da variação da fase causada pelo deslocamento do objeto;

$N(x,y) \Rightarrow$  número de voltas inteiras associadas ao ângulo de fase;

$\Delta\phi(x,y) \Rightarrow$  variação completa da fase;

$\phi_e(x,y) \Rightarrow$  erro aleatório (ruído) associado ao mapa de fase.

Todo o processamento realizado sobre o mapa de fase  $\Delta\phi(x,y)$  tem por objetivo determinar o valor de  $\Delta\phi(x,y)$ .

Na presença dos saltos de fase não é possível filtrar a imagem  $\phi(x,y)$ , pois os saltos têm componentes de alta frequência que são eliminados pela filtragem. Por outro lado, os algoritmos de remoção de saltos de fase de fase (*phase unwrapping algorithm*) não são eficientes na presença de ruído e só podem atuar sobre imagens filtradas. Na pesquisa bibliográfica realizada, foram identificados apenas dois métodos que podem ser utilizados de forma eficiente para eliminação do ruído do mapa de fase na presença de saltos de fase:

- i) Método de filtragem com deslocamento de fase (*Phase Shifting Convolution*);
- ii) Método de filtragem com transformação sinusoidal.

Estes métodos estão baseados na realização de deslocamentos e transformações no mapa de fase e são detalhados a seguir.

### 5.3 -Método de Filtragem com Deslocamento de Fase

Este método foi proposto por Vikhagen em 1990 [22] e baseia-se na obtenção de um novo mapa de fase defasado de  $\pi$  radianos do mapa original. Com esta defasagem as posições espaciais dos saltos de fase no novo mapa serão distintas das posições do mapa original. Aplicando-se um filtro passa-baixas para remoção do ruído, as regiões próximas dos saltos de fase serão distorcidas e as informações contidas nas mesmas serão perdidas.

Como para os dois mapas as distorções ocorrem em regiões distintas e complementares, os valores de fase que foram perdidos no processo de filtragem de um dos mapas se mantém no outro. Desta forma através da combinação dos

dois mapas filtrados obtém-se um novo mapa de fase sem distorções e com ruído atenuado.

O método de filtragem com deslocamento de fase pode ser implementado através dos seguintes passos:

- a) Dado o mapa de fase  $\Delta\phi(x,y)$  obtém-se o mapa defasado aplicando a seguinte equação:

$$\Delta\phi_1(x,y) = \Delta\phi(x,y) + \pi \quad (5.2)$$

- b) Aplicando um filtro passa-baixas obtém-se dois mapas filtrados:

$$\Delta\phi_2(x,y) = \Delta\phi(x,y) ** h(x,y) \quad (5.3)$$

$$\Delta\phi_3(x,y) = \Delta\phi_1(x,y) ** h(x,y) \quad (5.4)$$

onde :

$\Delta\phi_2(x,y)$  e  $\Delta\phi_3(x,y) \Rightarrow$  mapas de fase filtrados;

$h(x,y) \Rightarrow$  resposta ao impulso de um filtro passa-baixas bidimensional com fase linear.

O símbolo \*\* indica a operação de convolução bidimensional.

- c) Para poder somar os mapas de fase  $\Delta\phi_2(x,y)$  e  $\Delta\phi_3(x,y)$  é necessário que o deslocamento de fase existente em  $\Delta\phi_3(x,y)$  seja eliminado, o que é realizado aplicando-se a seguinte equação:

$$\Delta\phi_4(x,y) = \Delta\phi_3(x,y) - \pi \quad (5.5)$$

- d) Sabendo que os problemas de filtragem ocorrem nas regiões de  $\Delta\phi(x,y)$  próximas dos saltos de fase, pode-se definir uma matriz de ponderação ( $W(x,y)$ ) que tenha valor zero para os pontos de  $\Delta\phi(x,y)$  próximos do

salto de fase (cuja fase varie de  $\pi/2$  a  $3\pi/2$ ) e valor unitário para os demais pontos. Desta forma,  $W(x,y)$  pode ser definida como:

$$W(x,y) = 0 \quad , \quad \pi/2 < \Delta\phi(x,y) < 3\pi/2 ,$$

$$W(x,y) = 1 \quad , \quad \text{os demais valores de } \Delta\phi(x,y) ; \quad (5.6)$$

e) O mapa com ruído atenuado e sem distorções é obtido pela soma ponderada dos mapas de fase, assim:

$$\Delta\phi_5(x,y) = \Delta\phi_2(x,y) W(x,y) + \Delta\phi_4(x,y)(1-W(x,y)) \quad (5.7)$$

Desta forma, um mapa de fase com menor nível de ruído é obtido, sendo que os saltos de fase podem ser removidos por algoritmos convencionais.

Este método dá bons resultados, somente para baixas frequências espaciais de franjas, pois para um número elevado de franjas as regiões com distorções estarão muito próximas e poderão se sobrepor. Devido ao fato do tamanho das regiões com distorções ser função do filtro aplicado, o bom desempenho do método irá depender da otimização deste filtro.

As figuras a seguir ilustram a aplicação do método de filtragem com deslocamento de fase no tratamento de um sinal de fase com ruído e saltos de fase gerado por simulação.



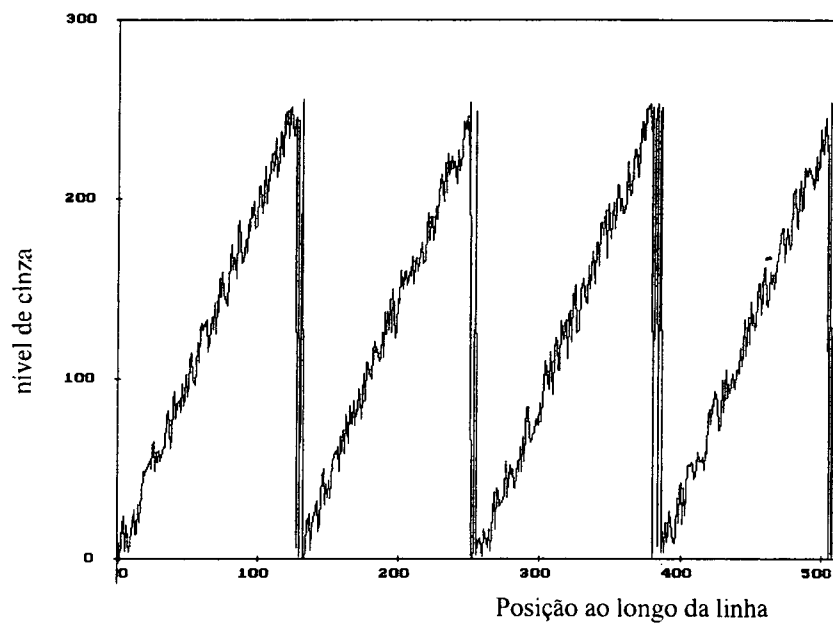


Fig. 5.1 - Uma linha do mapa de fase original ( $\Delta\phi$ ).

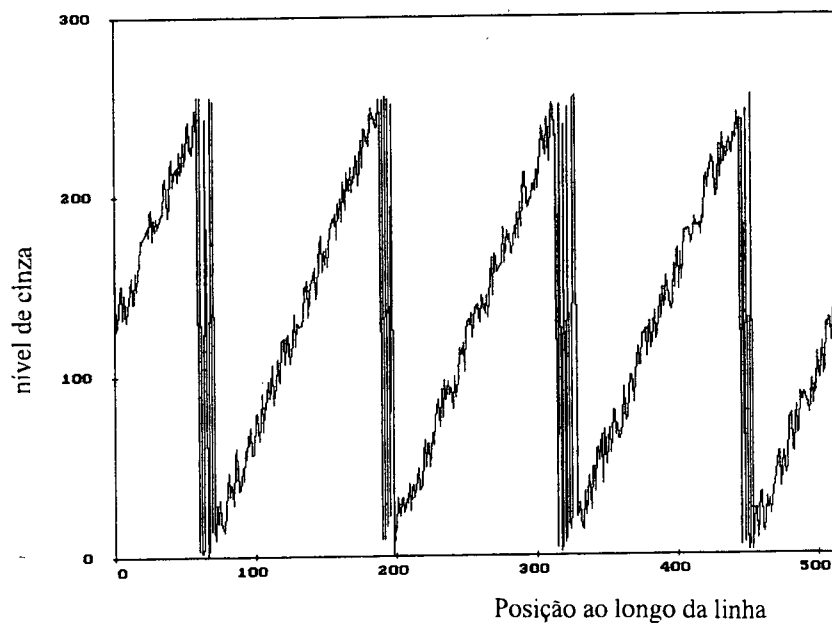


Fig. 5.2 - Uma linha do mapa de fase deslocado ( $\Delta\phi_1$ ).

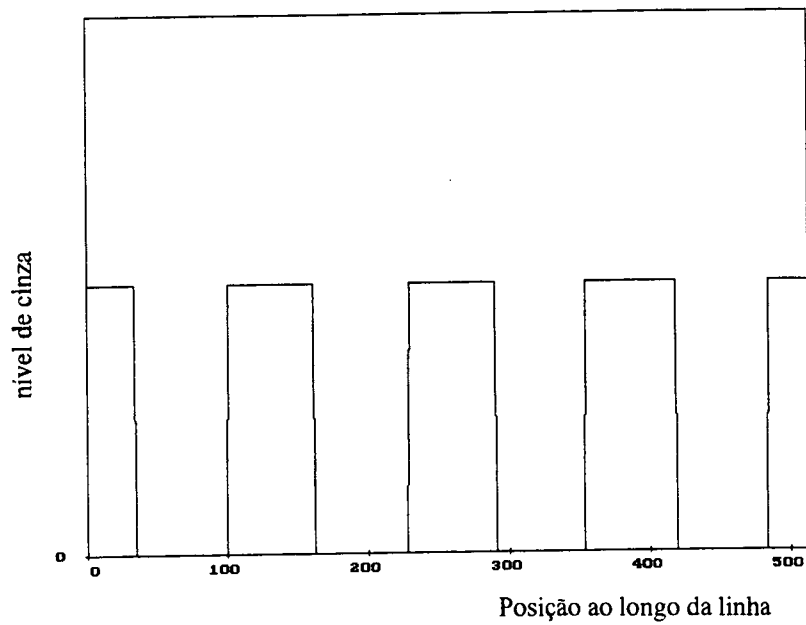


Fig. 5.3 - Uma linha da matriz de ponderação ( $W$ ).

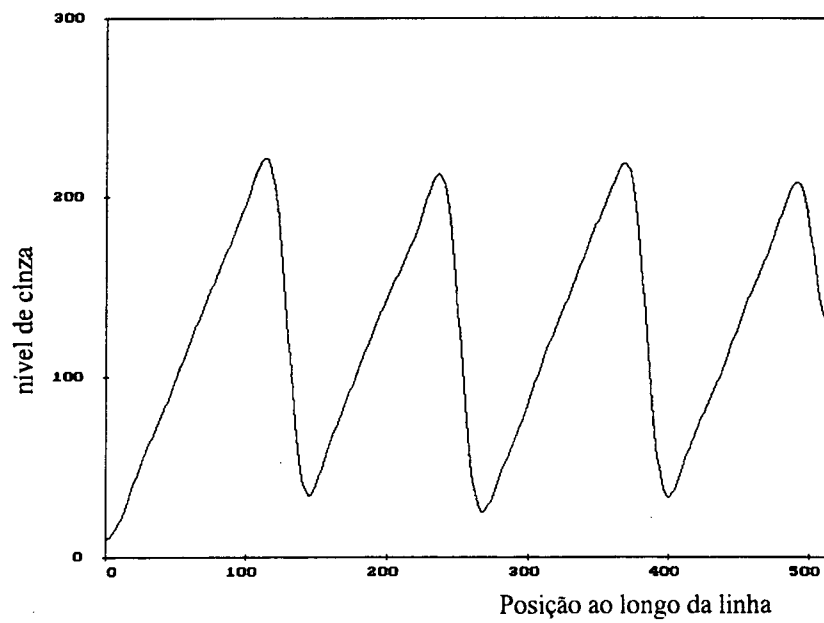


Fig. 5.4 - Uma linha do mapa de fase filtrado ( $\Delta\phi_2$ ).

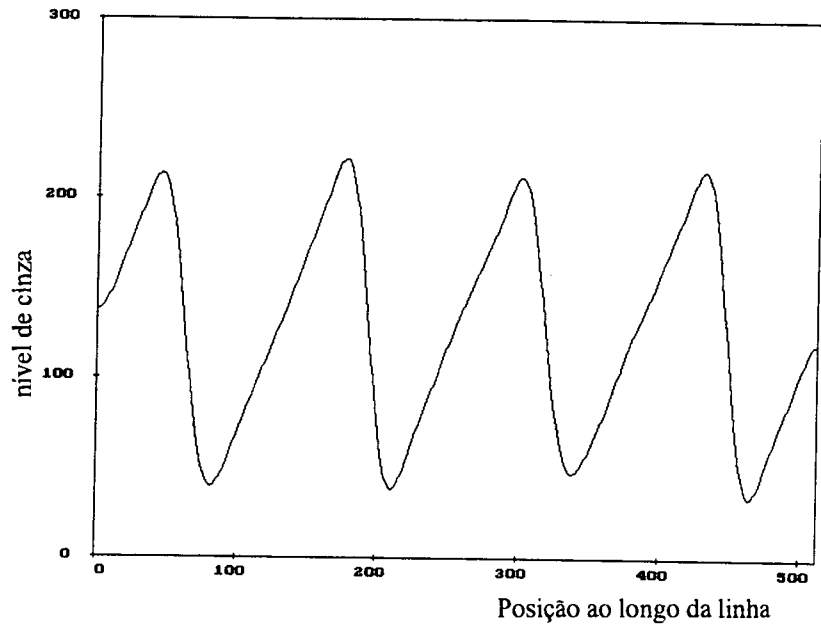


Fig. 5.5 - Uma linha do mapa de fase filtrado ( $\Delta\phi_3$ ).

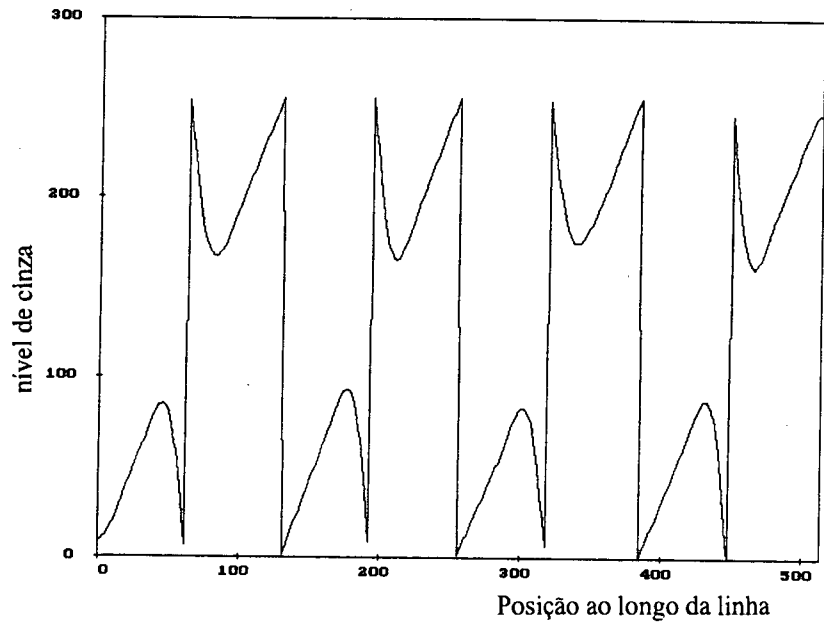


Fig. 5.6 - Uma linha do mapa de fase filtrado e deslocado ( $\Delta\phi_4$ ).

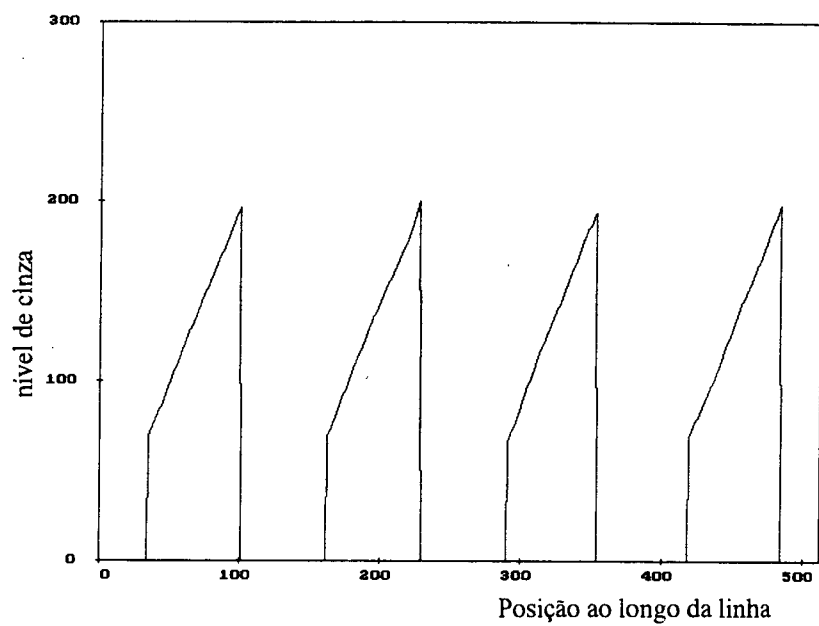


Fig. 5.7 - Uma linha do mapa de fase filtrado e ponderado ( $\Delta\phi_2 W$ ).

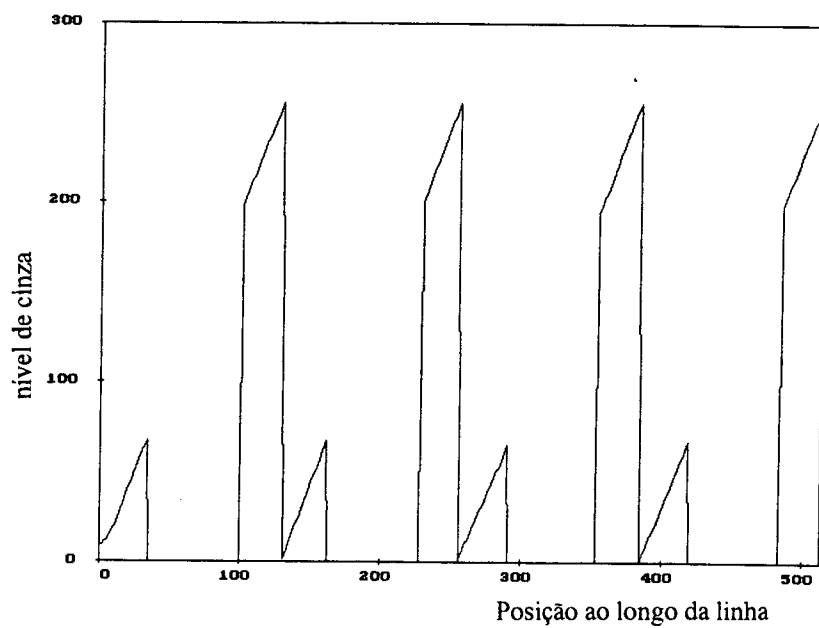


Fig. 5.8 - Uma linha do mapa de fase filtrado, deslocado e ponderado ( $\Delta\phi_4 (1 - W)$ ).

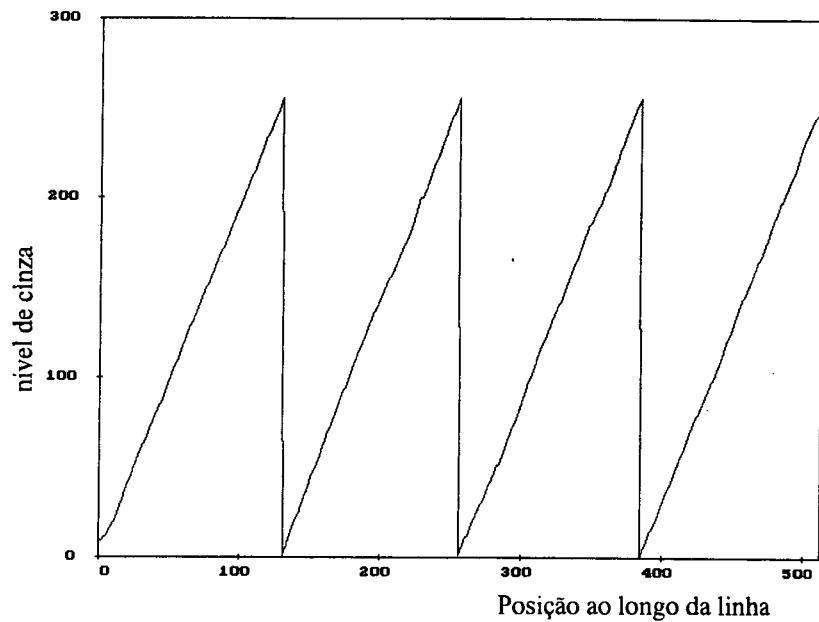


Fig. 5.9 - Uma linha do mapa de fase final ( $\Delta\phi_5$ ).

#### 5.4 -Método de Filtragem com Transformação Sinusoidal

Este método foi proposto por Albertazzi em 1991 [23] e baseia-se na aplicação de uma transformação sinusoidal que elimina os saltos de fase. Para que não ocorra perda de informações duas operações devem ser consideradas:

$$\psi_1(x,y) = \cos(\Delta\phi(x,y)) \quad (5.8)$$

$$\psi_2(x,y) = \text{sen}(\Delta\phi(x,y)) \quad (5.9)$$

Apesar do espectro em frequência do ruído presente no mapa de fase ser alterado pela transformação sinusoidal o mesmo pode ser separado do sinal de fase por meio de uma filtragem passa-baixas. Após a filtragem o sinal de fase pode ser recuperado por meio de uma transformação trigonométrica inversa :

$$\Delta\phi_r(x,y) = \text{tg}^{-1}\left(\frac{\psi_2(x,y)**h(x,y)}{\psi_1(x,y)**h(x,y)}\right) \quad (5.10)$$

onde :

$\Delta\phi_r(x,y)$   $\Rightarrow$  mapa de fase filtrado;

$h(x,y)$   $\Rightarrow$  resposta ao impulso de um filtro passa-baixas  
bidimensional com fase linear.

A aplicação da transformação sinusoidal amplia o espectro de frequência do sinal tratado, o que dificulta o processo de filtragem. Desta forma, o filtro a ser aplicado deverá ser otimizado com base nas características de cada mapa de fase, pois, para uma frequência espacial de franjas elevada, um filtro de maior banda de passagem deve ser utilizado sendo diminuída a eficiência da filtragem.

## 5.5 - Análise Comparativa

A complexidade computacional para a implementação dos dois métodos é equivalente, sendo que enquanto em um método se realizam deslocamentos de fase, no outro se realizam transformações trigonométricas. Estas transformações podem ser realizadas de forma mais eficiente pela utilização de tabelas de conversão.

Ambos os métodos perdem eficiência quando a frequência espacial das franjas é elevada, mas o método de Filtragem com Deslocamento de Fase torna-se totalmente inviável a partir de uma dada frequência, pois as regiões com distorções tendem a sobreposição quando as franjas estão muito próximas. Desta forma, devido à facilidade de implementação e aos bons resultados obtidos através do Método de Filtragem com Transformação Sinusoidal, considera-se que este seja o método mais eficiente. Assim sendo, o Método de Filtragem com Transformação Sinusoidal servirá de base para o presente trabalho, sendo apresentados nesta dissertação alguns aprimoramentos para o mesmo.

## CAPÍTULO 6

### FILTRAGEM PONDERADA DO MAPA DE FASE

#### 6.1 - Introdução

Devido ao elevado nível de ruído presente nos mapas de fase, obtidos por Holografia Eletrônica, a etapa de filtragem é de fundamental importância para a obtenção de bons resultados.

Como foi demonstrado no Capítulo 4, o nível de ruído de cada ponto do mapa de fase está fortemente ligado ao fator de modulação do speckle associado a este ponto. Apesar deste fato, os filtros passa-baixas atualmente empregados não levam em conta este fator de modulação.

Neste capítulo, é apresentada a segunda contribuição desta dissertação. Trata-se de um novo método de filtragem que leva em conta o fator de modulação dos speckles e permite a otimização do processo de filtragem do mapa de fase.

#### 6.2 - Filtragem com Ponderação de Amplitude

O método de filtragem com ponderação de amplitude [24] foi desenvolvido com base na premissa de que, conhecendo-se o fator de modulação do mapa de fase, é possível ponderar a influência de cada ponto na obtenção do mapa filtrado. Esta ponderação visa dar um menor peso para os pontos com baixo fator de modulação (maior nível de ruído) e dar um maior peso aos pontos com alto fator de modulação (menor nível de ruído).

O mapa de fase com ruído sobreposto ( $\Delta\phi_1(x,y)$ ), obtido através do método do Deslocamento de Fase, pode ser modelado como:

$$\Delta\phi_1(x,y) = \Delta\phi(x,y) + \phi_e(x,y) \quad (6.1)$$

No Capítulo 4, ficou demonstrado que o ruído  $\phi_e(x,y)$  é inversamente proporcional ao fator de modulação:

$$\phi_e(x,y) = \text{tg}^{-1} \frac{e(x,y)}{I_1(x,y)} \quad (6.2)$$

Para eliminar os saltos de fase de  $\Delta\phi_1(x,y)$ , aplicando-se uma transformação cossenoidal, obtém-se:

$$\psi_1(x,y) = \cos \Delta\phi_1(x,y) \quad (6.3)$$

aplicando a equação (6.1) em (6.3), tem-se:

$$\psi_1(x,y) = \cos (\Delta\phi(x,y) + \phi_e(x,y)) \quad (6.4)$$

desenvolvendo a equação (6.4), obtém-se :

$$\psi_1(x,y) = \cos \Delta\phi(x,y) \cos \phi_e(x,y) - \text{sen} \Delta\phi(x,y) \text{sen} \phi_e(x,y) \quad (6.5)$$

Considerando que o valor do erro  $\phi_e(x,y)$  é pequeno, com base na equação (6.2), as seguintes aproximações podem ser obtidas:

$$\cos \phi_e(x,y) \cong 1 \quad (6.6)$$

$$\text{sen} \phi_e(x,y) \cong \frac{e(x,y)}{I_1(x,y)} \quad (6.7)$$

Aplicando as equações (6.6) e (6.7) na equação (6.5), tem-se :



$$\psi_1(x,y) = \cos \Delta\phi(x,y) - \frac{e(x,y)}{I_1(x,y)} \sin \Delta\phi(x,y) \quad (6.8)$$

Da mesma forma, aplicando uma transformação senoidal, obtém-se:

$$\psi_2(x,y) = \sin \Delta\phi_1(x,y) \quad (6.9)$$

$$\psi_2(x,y) = \sin \Delta\phi(x,y) + \frac{e(x,y)}{I_1(x,y)} \cos \Delta\phi(x,y) \quad (6.10)$$

Analisando as equações (6.8) e (6.10), verifica-se que o erro aleatório adicionado ao sinal está multiplicado por um fator de ponderação igual ao inverso do fator de modulação.

Conforme está demonstrado no Apêndice 2, dado um sinal  $y(n)$  tal que:

$$y(n) = x(n) + \frac{e(n)}{k(n)} \quad , n = 0, 1, \dots, N \quad (6.11)$$

onde:

$x(n) \Rightarrow$  sinal a ser determinado

$e(n) \Rightarrow$  ruído

$k(n) \Rightarrow$  fator de ponderação

Sendo conhecido o fator de ponderação, a filtragem de  $y(n)$  pode ser otimizada pela utilização de um filtro ponderado, dado por:

$$x(n) = \frac{h(n) * [k(n)y(n)]}{h(n) * k(n)} \quad (6.12)$$

onde  $h(n)$  representa a resposta ao impulso de um filtro passa-baixas e o símbolo  $*$  representa a operação de convolução.

Comparando as equações (6.10) e (6.11) e com base na equação (6.12), um filtro ponderado bidimensional pode ser obtido e aplicado para o tratamento dos sinais  $\psi_1(x,y)$  e  $\psi_2(x,y)$ , assim:

$$\phi_1(x,y) = \frac{h(x,y) ** [\psi_1(x,y) I_1(x,y)]}{h(x,y) ** I_1(x,y)} \quad (6.13)$$

$$\phi_2(x,y) = \frac{h(x,y) ** [\psi_2(x,y) I_1(x,y)]}{h(x,y) ** I_1(x,y)} \quad (6.14)$$

Onde  $h(x,y)$  é um filtro passa-baixas com fase linear e o símbolo  $**$  indica convolução bidimensional.

Para se obter o sinal de fase com ruído minimizado, aplica-se uma transformada tangente inversa:

$$\Delta\phi_2(x,y) = \text{tg}^{-1}\left(\frac{\phi_2(x,y)}{\phi_1(x,y)}\right) \quad (6.15)$$

aplicando as equações (6.3), (6.9), (6.13) e (6.14) em (6.15), tem-se:

$$\Delta\phi_2(x,y) = \text{tg}^{-1}\left(\frac{h(x,y) ** \{\text{sen}(\Delta\phi_1(x,y))I_1(x,y)\}}{h(x,y) ** \{\text{cos}(\Delta\phi_1(x,y))I_1(x,y)\}}\right) \quad (6.16)$$

A equação (6.16) foi denominada de filtro sinusoidal com ponderação de amplitude.

Pode ser mostrado (ver Apêndice 2) que para o modelo dado pela equação (6.2) o erro resultante após a aplicação do filtro ponderado é equivalente ao erro que seria obtido pela filtragem de um mapa de fase, para o qual o fator de modulação fosse constante e igual ao valor médio de  $I_1(x,y)$ . Isto significa que uma relação sinal-ruído mais elevada é obtida através da filtragem ponderada.

### 6.3 - Aplicação do Filtro Ponderado

A validação do algoritmo de filtragem sinusoidal com ponderação de amplitude foi realizada nas seguintes etapas:

- i) processamento de sinais unidimensionais, gerados por simulação;
- ii) aplicação do método para tratamento de sinais bidimensionais obtidos através de experimentos realizados em uma estação holográfica.

### 6.4 - Resultados Obtidos por Simulação

Para facilitar a simulação foram utilizados sinais unidimensionais, o que equivale ao tratamento de apenas uma linha do mapa de fase. A utilização de dados simulados facilita a análise dos resultados obtidos, pois, sendo conhecido o sinal de fase, as relações sinal-ruído são facilmente calculadas.

Como os dados simulados foram gerados com base nos resultados experimentais apresentados no Capítulo 4, os resultados obtidos por simulação são muito próximos dos resultados obtidos no tratamento de sinais reais. A geração e processamento dos dados foram realizadas através dos seguintes passos:

- a) definição de um sinal de deslocamento de fase ( $\Delta\phi(x)$ ) sem ruído e sem saltos de fase;
- b) geração de um fator de modulação aleatório ( $I_1(x)$ );
- c) geração de um erro aleatório ( $e(x)$ ) com distribuição normal e média nula.
- d) cálculo do ruído ponderado ( $e_1(x)$ ), dado por :

$$e_1(x) = \operatorname{tg}^{-1} \frac{e(x,y)}{I_1(x,y)}$$

e) cálculo da fase com ruído ponderado ( $\Delta\phi_1(x)$ ), dada por :

$$\Delta\phi_1(x) = \Delta\phi(x) + e_1(x)$$

f) geração do sinal com saltos de fase :

$$\Delta\phi_2(x) = \Delta\phi_1(x) - \operatorname{Int}(\Delta\phi_1(x)/2\pi) 2\pi$$

g) definição de um filtro com fase linear ( $h(x)$ )

h) aplicação do filtro sinusoidal

$$\Delta\phi_3(x) = \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{h(x) * \operatorname{sen}(\Delta\phi_2(x))}{h(x) * \operatorname{cos}(\Delta\phi_2(x))} \right)$$

i) remoção do salto de fase do sinal  $\Delta\phi_3(x)$ ;

j) cálculo do erro presente no sinal  $\Delta\phi_3(x)$ :

$$e_3(x) = \Delta\phi(x) - \Delta\phi_3(x)$$

k) aplicação do filtro sinusoidal com ponderação de amplitude:

$$\phi_4(x) = \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{h(x) * \{\operatorname{sen}(\Delta\phi_2(x))I_1(x)\}}{h(x) * \{\operatorname{cos}(\Delta\phi_2(x))I_1(x)\}} \right)$$

l) remoção do salto de fase do sinal  $\Delta\phi_4(x)$ ;

m) cálculo do erro presente no sinal  $\Delta\phi_4(x)$  :

$$e_4(x) = \Delta\phi_1(x) - \Delta\phi_4(x)$$

n) determinação das potências dos sinais:

$P\phi_1(x) \Rightarrow$  potência do sinal  $\Delta\phi_1(x)$ ;

$Pe_1(x) \Rightarrow$  potência do sinal  $e_1(x)$ ;

$Pe_3(x) \Rightarrow$  potência do sinal  $e_3(x)$ ;

$Pe_4(x) \Rightarrow$  potência do sinal  $e_4(x)$ ;

o) determinação da relação sinal-ruído do sinal  $\Delta\phi_1(x)$ :

$$RSR_1 = 10 \log (P\phi_1(x) / Pe_1(x))$$

p) determinação da relação sinal-ruído após o filtro sinusoidal:

$$RSR_3 = 10 \log (P\phi_1(x) / Pe_3(x))$$

q) determinação da relação sinal-ruído original após o filtro sinusoidal com ponderação de amplitude:

$$RSR_4 = 10 \log (P\phi_1(x) / Pe_4(x))$$

As figuras a seguir ilustram os resultados obtidos por simulação:

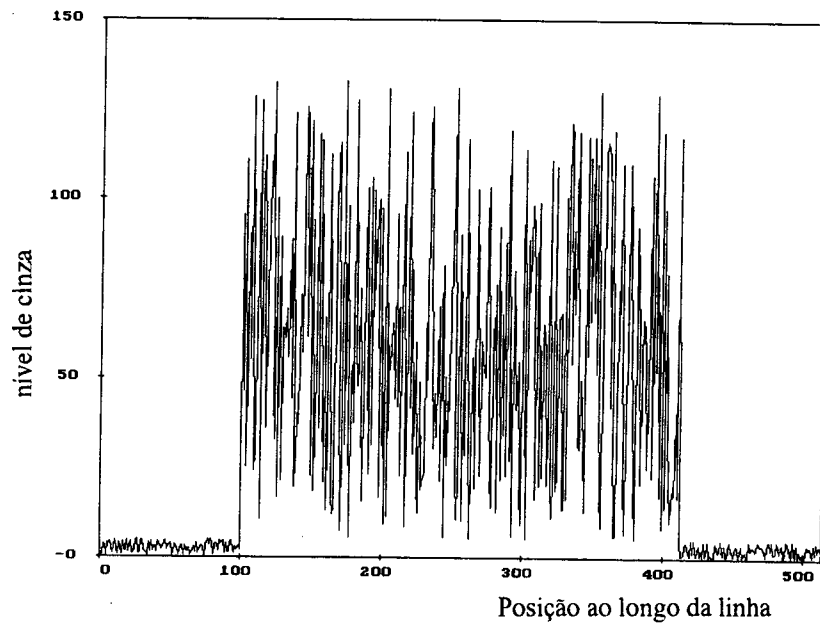


Fig. 6.1 - Fator de modulação  $I_1(x)$ .

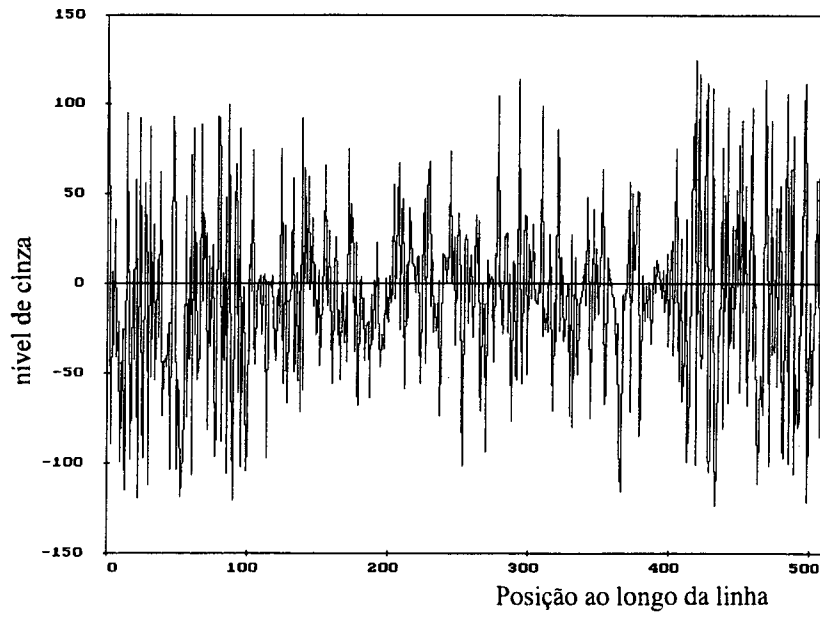


Fig. 6.2 - Ruído ponderado  $e_1(x)$ .

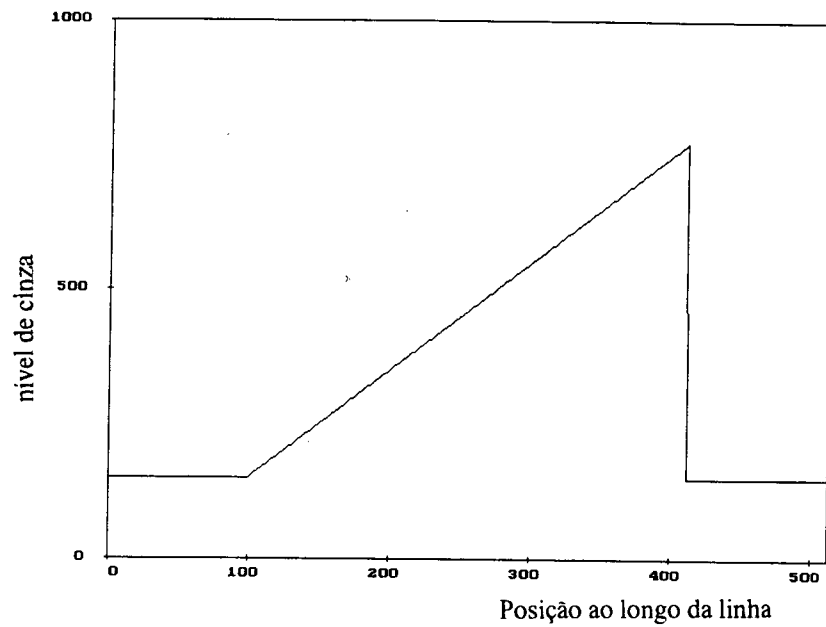


Fig. 6.3 - Sinal original  $\Delta\phi(x)$ .

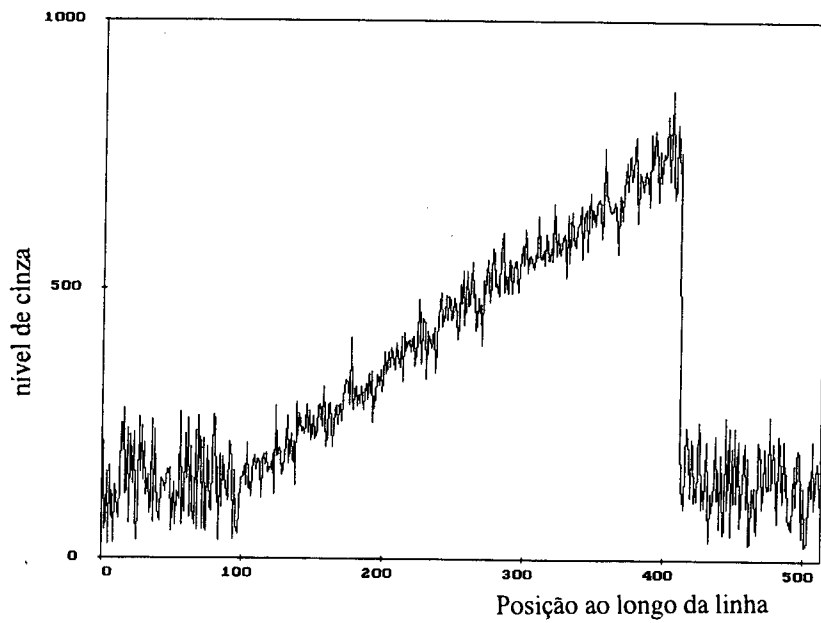


Fig. 6.4 - Sinal com ruído ( $\Delta\phi_1(x)$ ).

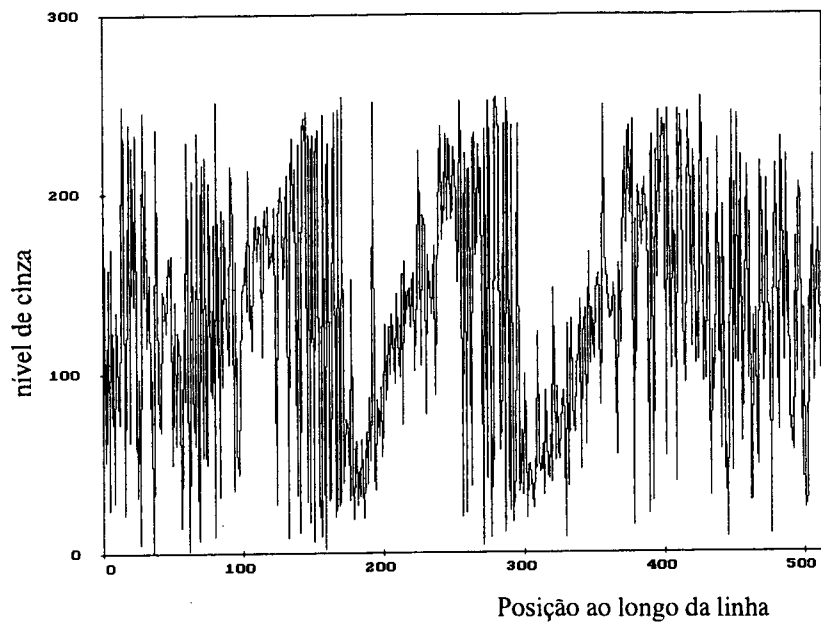


Fig. 6.5 - Sinal com ruído e saltos de fase ( $\Delta\phi_2(x)$ ).

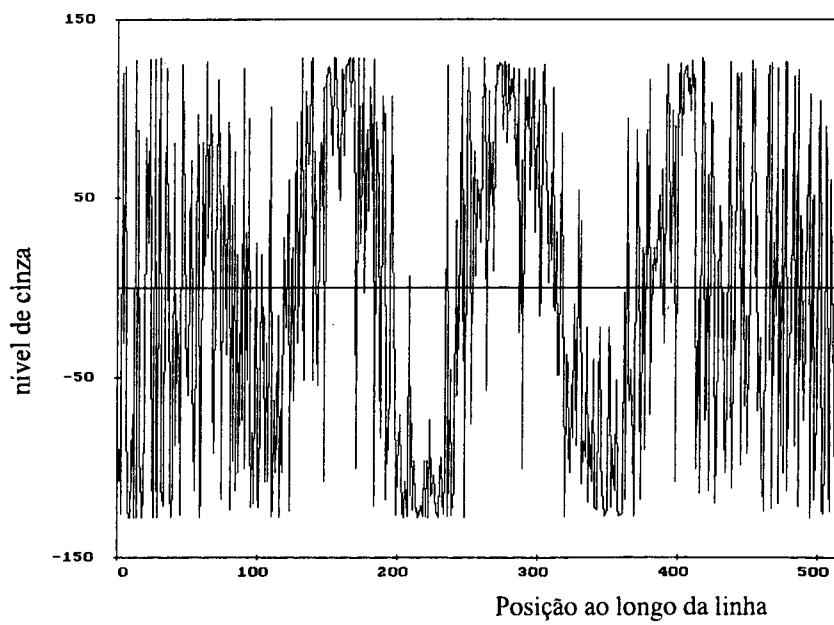


Fig. 6.6 - Sinal após a transformação cossenoidal.



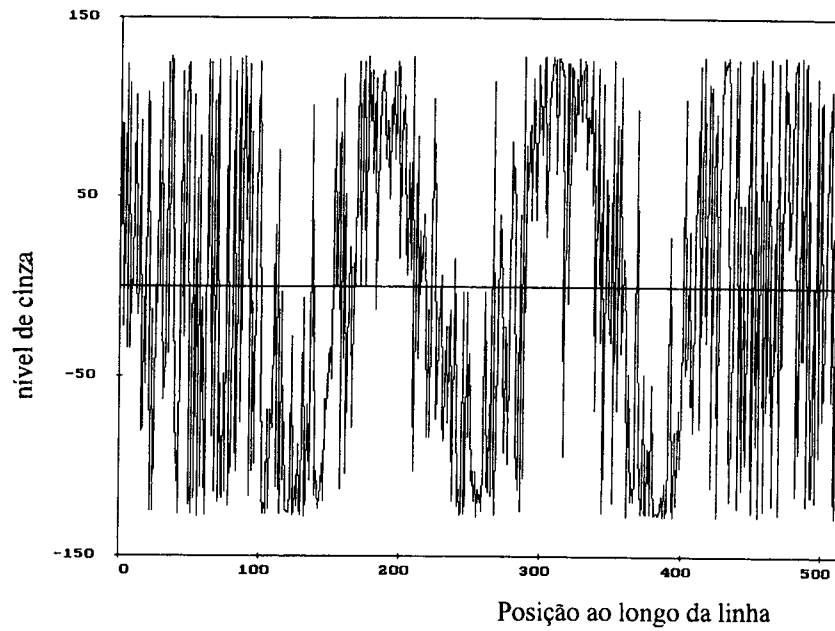


Fig. 6.7 - Sinal após a transformação senoidal.

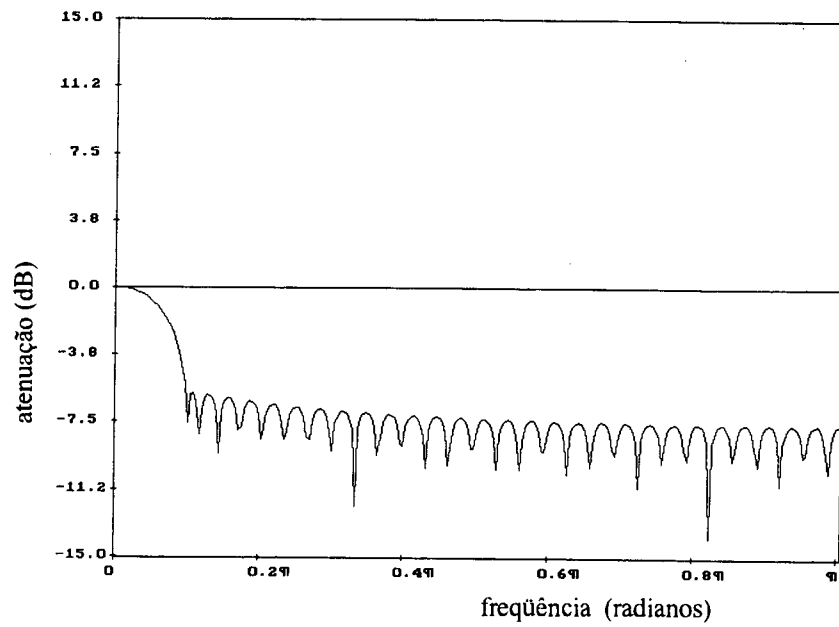


Fig. 6.8 - Magnitude da resposta em frequência do filtro  $h(x)$ .

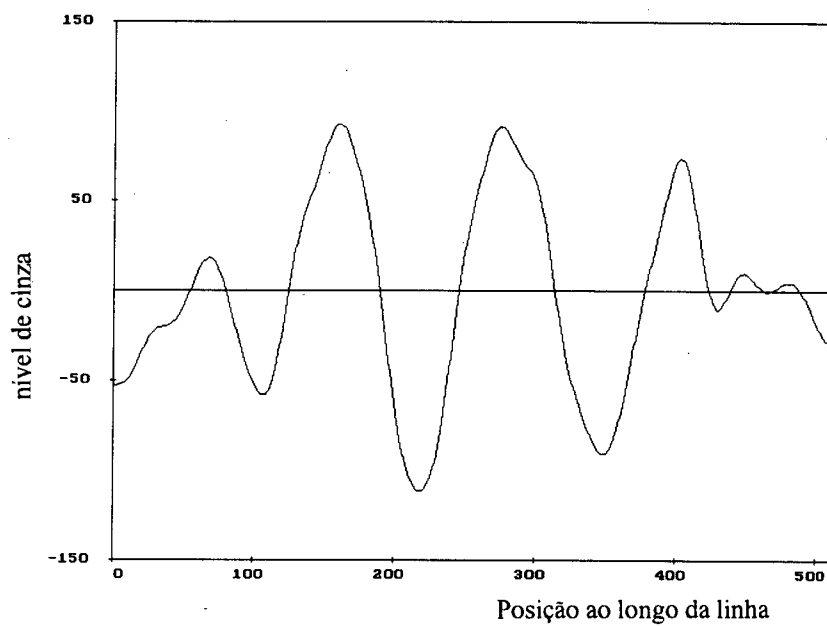


Fig. 6.9 - Filtragem do sinal apresentado na Fig. 6.6.

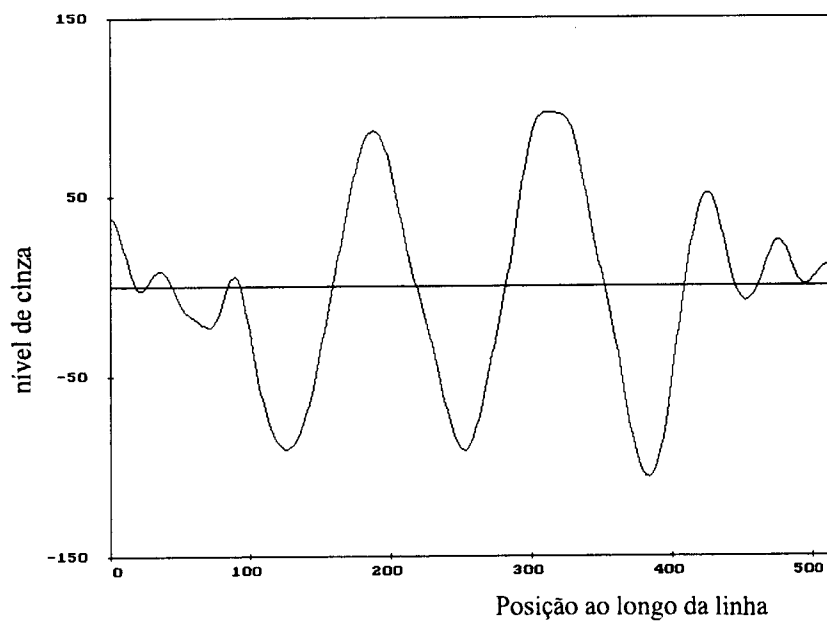


Fig. 6.10 - Filtragem do sinal apresentado na Fig. 6.7.

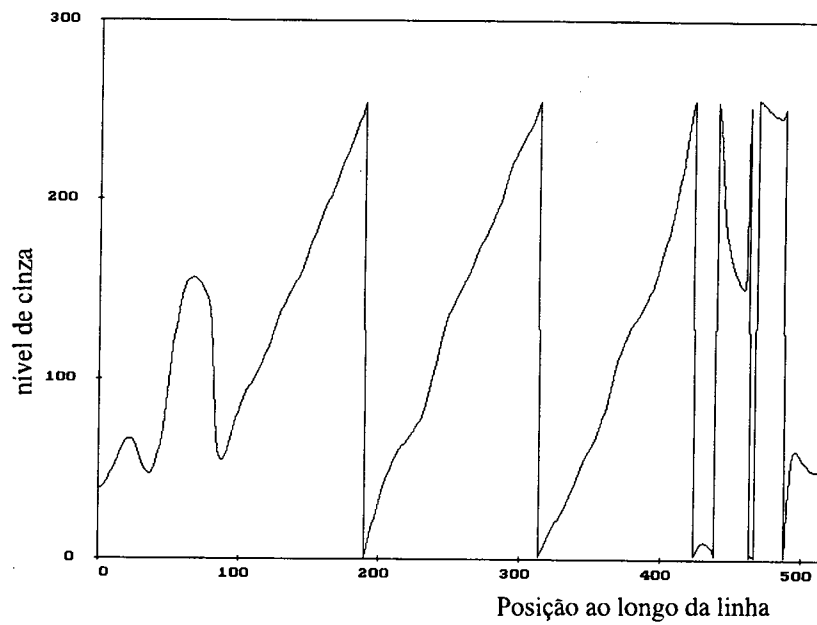


Fig. 6.11 - Sinal filtrado  $\Delta\phi_3(x)$ .

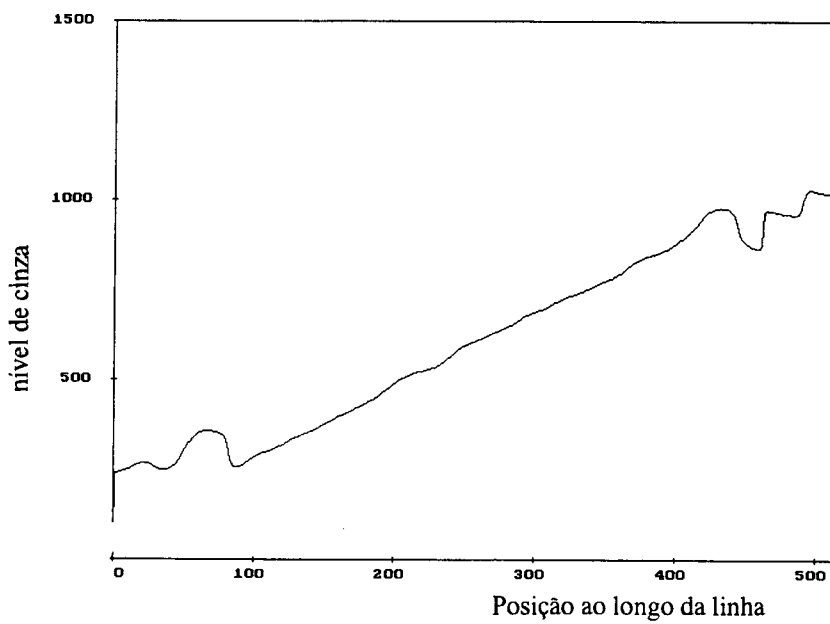


Fig. 6.12 - Sinal  $\Delta\phi_3(x)$  após a remoção dos saltos de fase.

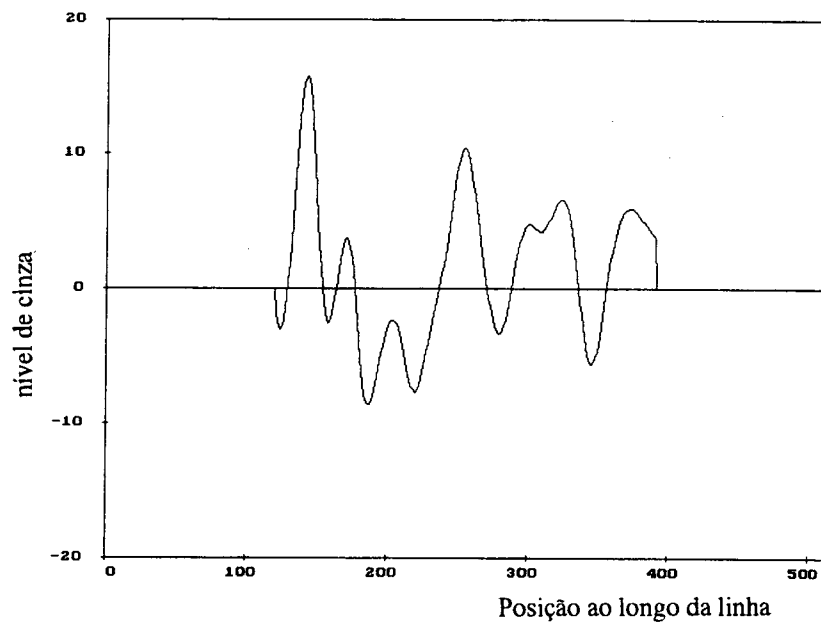


Fig. 6.13 - Ruído  $e_3(x)$  remanescente da filtragem.

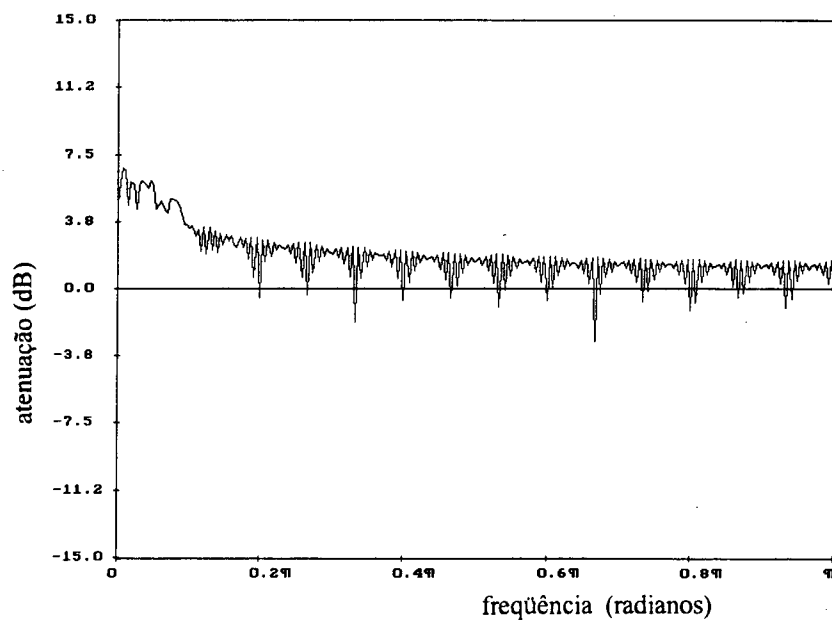


Fig. 6.14 - Espectro de frequências do ruído  $e_3(x)$ .

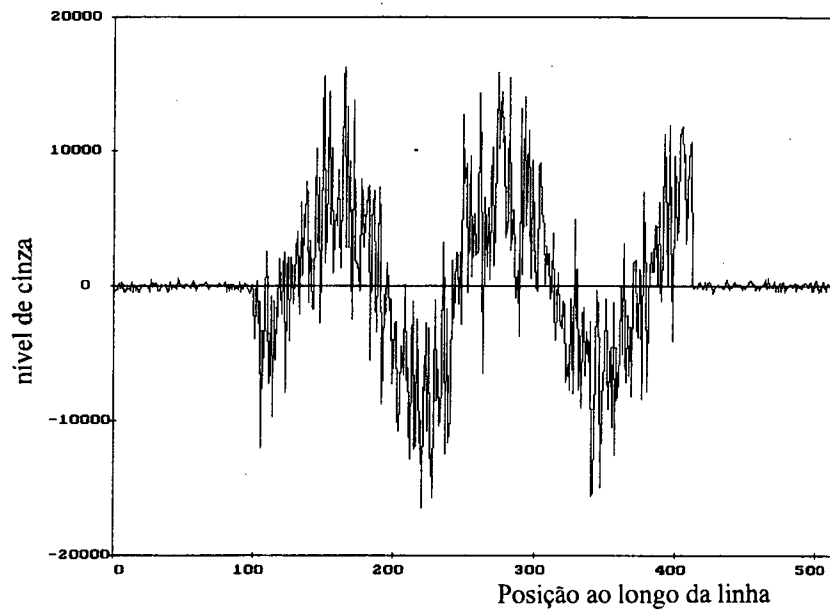


Fig. 6.15 - Sinal após a transformação senoidal multiplicado por  $I_1(x)$ .

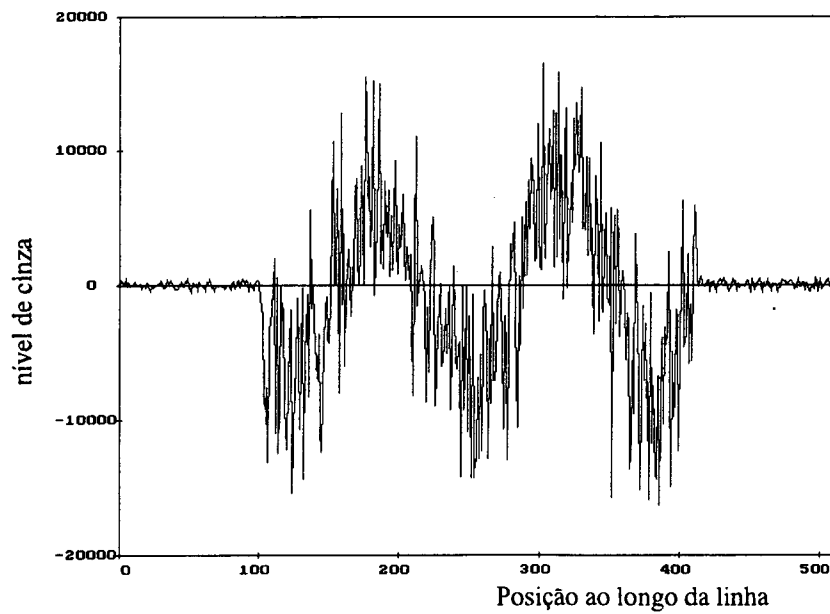


Fig. 6.16 - Sinal após a transformação cossenoidal multiplicado por  $I_1(x)$ .

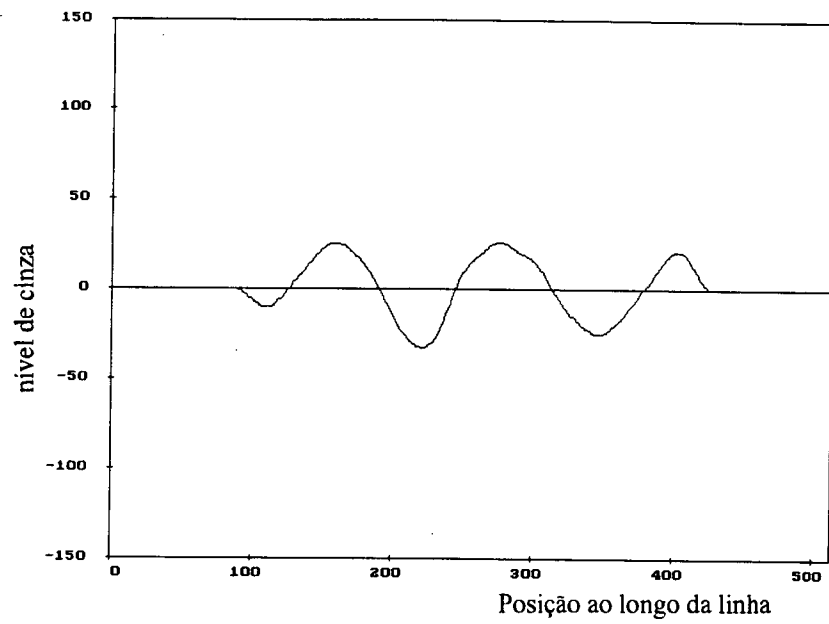


Fig. 6.17 - Filtragem do sinal apresentado na Fig. 6.15.

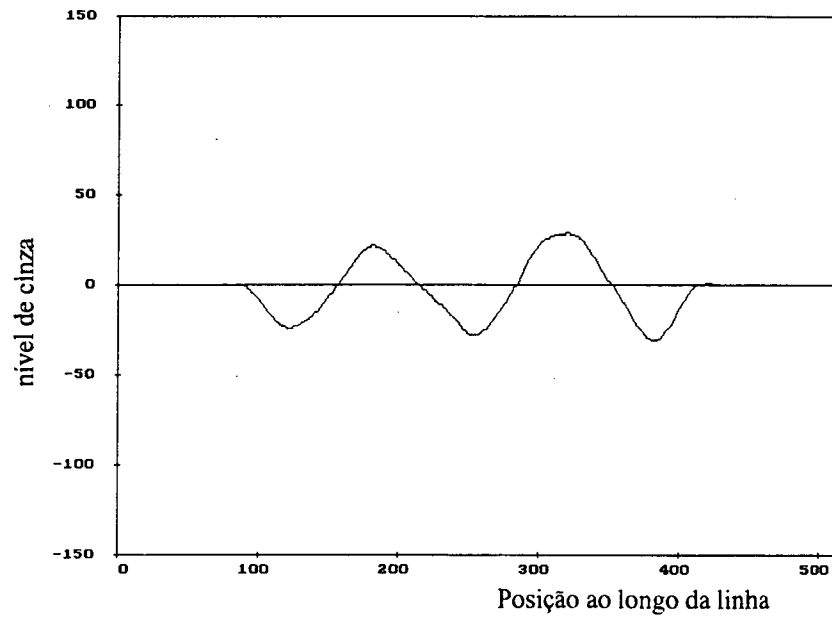


Fig. 6.18 - Filtragem do sinal apresentado na Fig. 6.16.

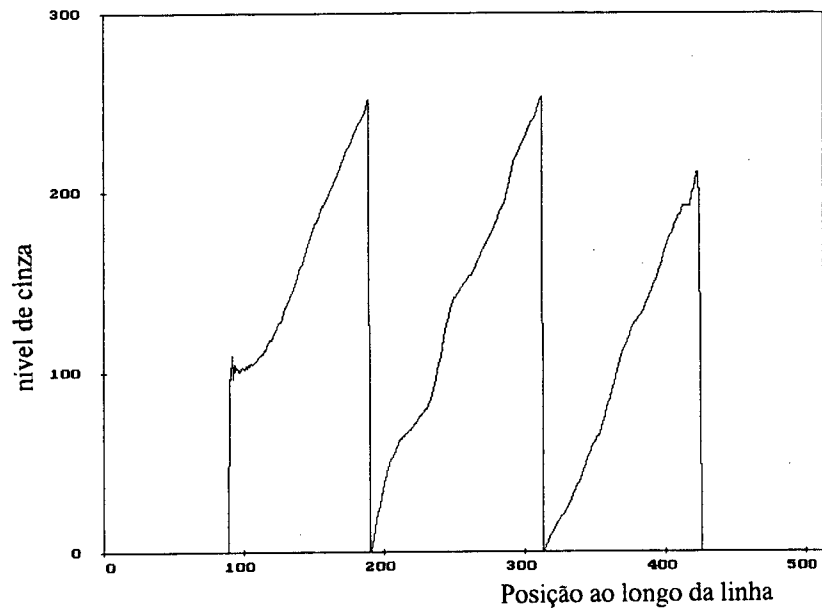


Fig. 6.19 - Sinal filtrado com ponderação de amplitude  $\Delta\phi_4(x)$ .

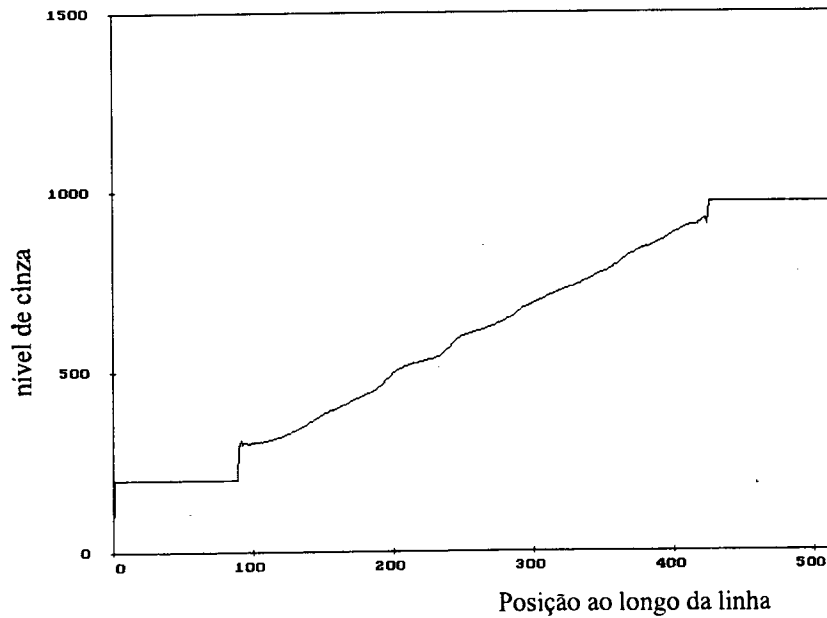


Fig. 6.20 - Sinal  $\Delta\phi_4(x)$  após a remoção dos saltos de fase.

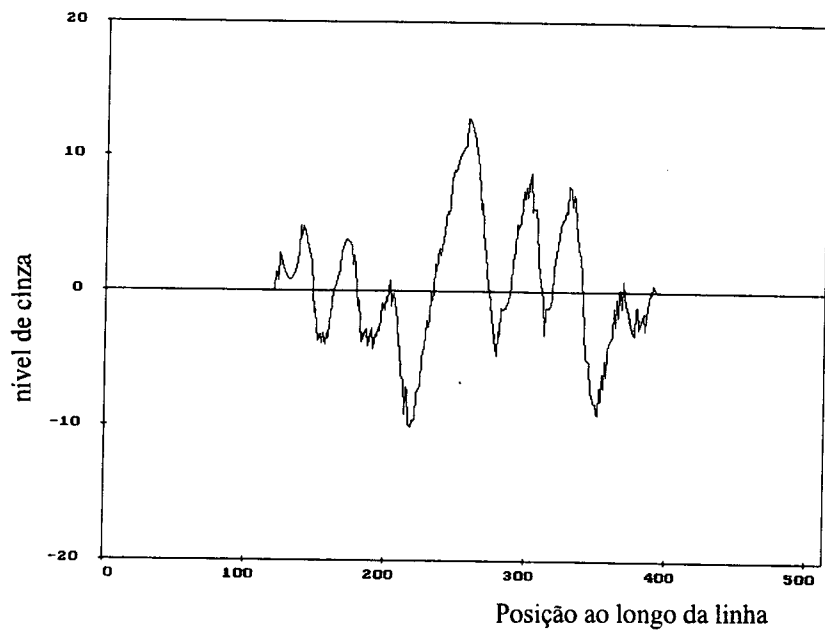


Fig. 6.21 - Ruído  $e_4(x)$  remanescente da filtragem.

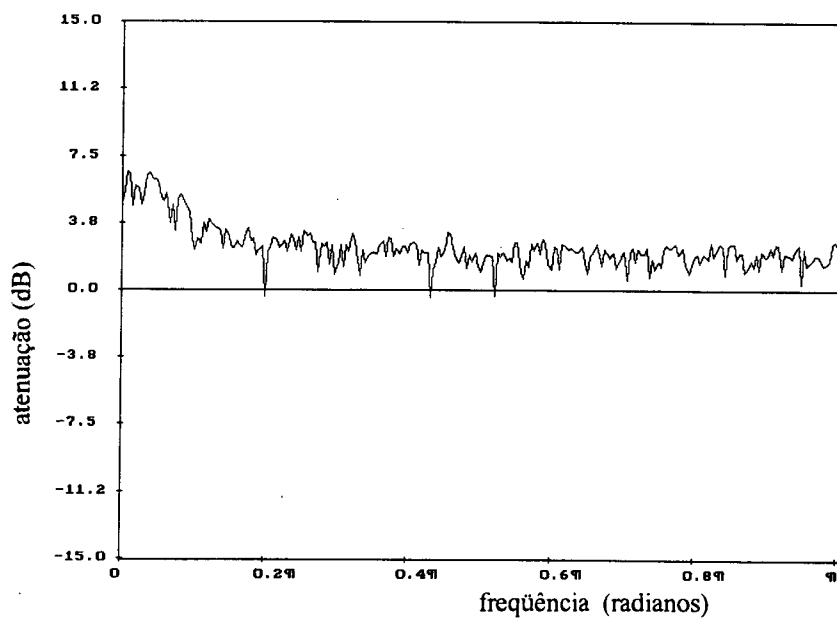


Fig. 6.22 - Espectro de frequências do ruído  $e_4(x)$ .



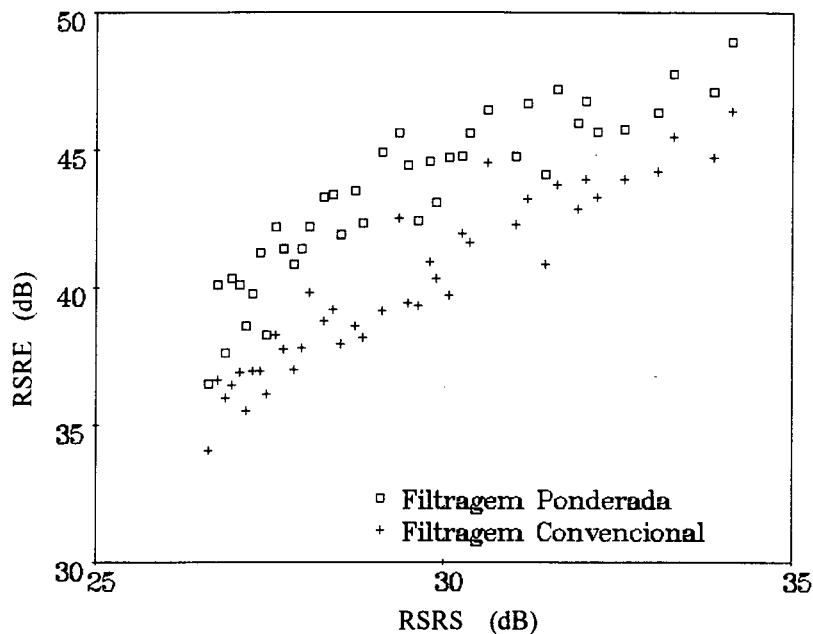


Fig. 6.23 - Análise comparativa das relações sinal-ruído na entrada (RSRE) e na saída (RSRS) dos filtros convencional e ponderado.

Pode ser observado que as relações sinal-ruído obtidas com a filtragem ponderada são sempre maiores do que as obtidas com a filtragem convencional.

Além disso, como para um alto nível de ruído os algoritmos de remoção de saltos de fase não apresentam bons resultados, o número de falhas na remoção dos saltos para os sinais obtidos através da filtragem ponderada é aproximadamente 80% menor do que para os obtidos pela filtragem convencional. Isto se deve ao fato de que para os pontos com fator de modulação muito baixo ( $I_1(x) \cong 0$ ) o erro tende a ser muito elevado, e apesar de ser atenuado pela filtragem pode gerar erros de remoção de saltos. Como para a filtragem ponderada estes pontos são desprezados, a probabilidade de erros de remoção de saltos diminui. Logicamente, em situações extremas (relações sinal-ruído muito altas ou muito baixas) o resultado do remoção de salto de fase será o mesmo independentemente do tipo de filtro.

## 6.5 -Resultados Experimentais

Para validação completa do algoritmo de filtragem ponderada, o mesmo foi aplicado no tratamento de dados experimentais obtidos em uma estação holográfica, que está descrita no Apêndice 1. O processo de aquisição e tratamento dos mapas de fase foi realizado através dos seguintes passos:

- a) armazenamento de 4 imagens, defasando o feixe de referência em passos de 90 graus (método de deslocamento de fase);
- b) cálculo da fase inicial por meio de uma equação tangente inversa;
- c) cálculo do fator de modulação inicial;
- d) aplicação de carga ao objeto;
- e) armazenamento de 4 imagens, defasando o feixe de referência em passos de 90 graus;
- f) cálculo da fase final;
- g) cálculo do fator de modulação final;
- h) cálculo do deslocamento de fase;
- i) aplicação do filtro sinusoidal ao mapa de deslocamento de fase;
- j) aplicação do filtro sinusoidal com ponderação de amplitude ao mapa de deslocamento de fase.

Pode ser observado que dois fatores de modulação são calculados, contudo, devido ao fato do fator de modulação estar ligado a características de rugosidade da superfície, os mesmos sofrem pouca variação após a aplicação de carga no objeto, podendo ser utilizado no filtro ponderado qualquer um dos dois fatores.

As figuras a seguir mostram os resultados obtidos experimentalmente:

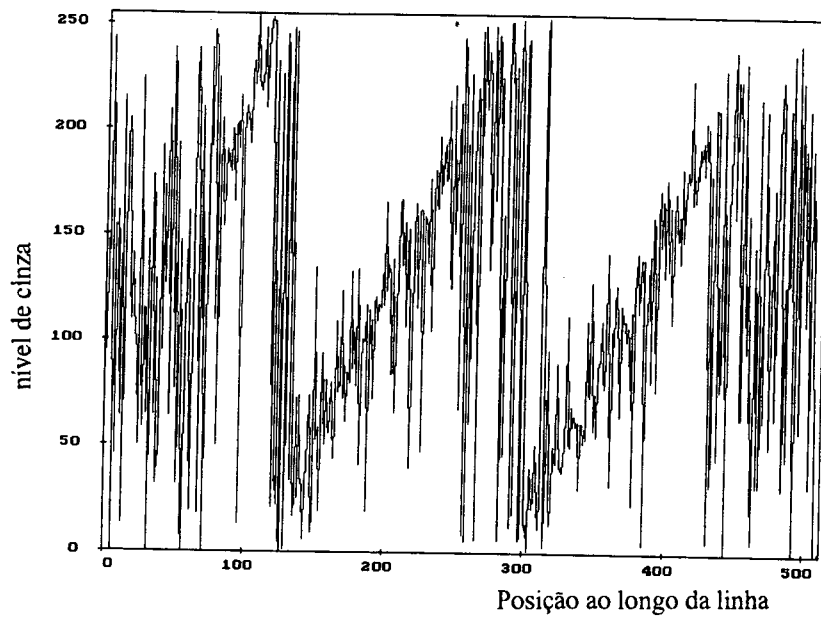


Fig. 6.24 - Uma linha do mapa de fase com ruído e saltos de fase.

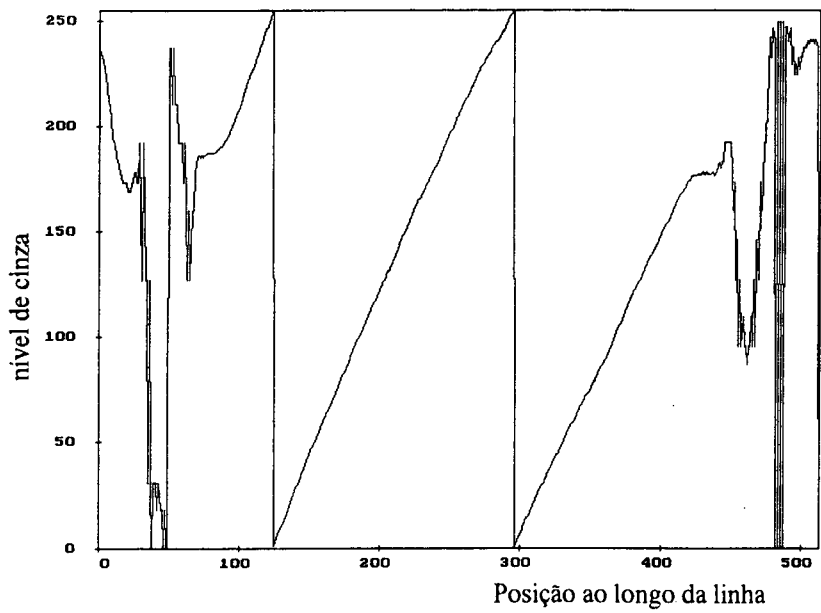


Fig. 6.25 - Uma linha do mapa de fase tratado através de filtragem sinusoidal

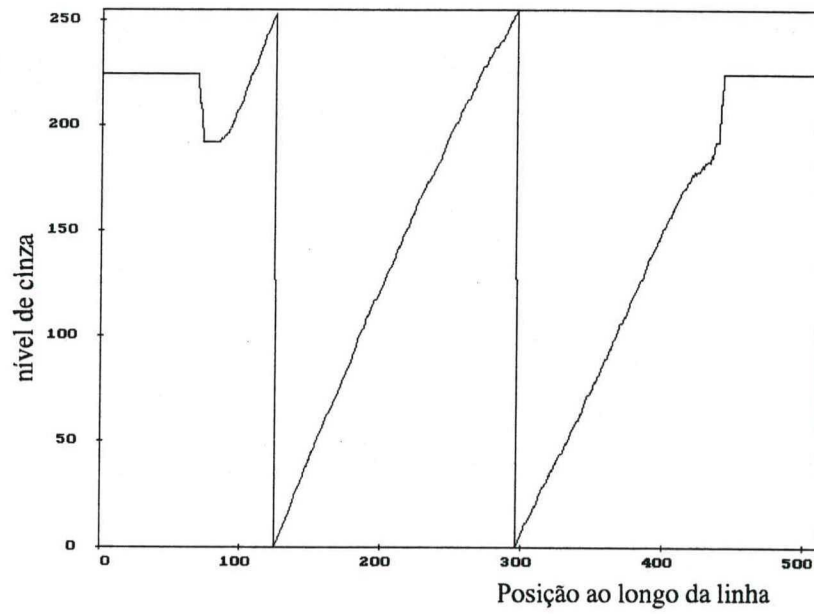


Fig. 6.26 - Uma linha do mapa de fase tratado através de filtragem sinusoidal com ponderação de amplitude.

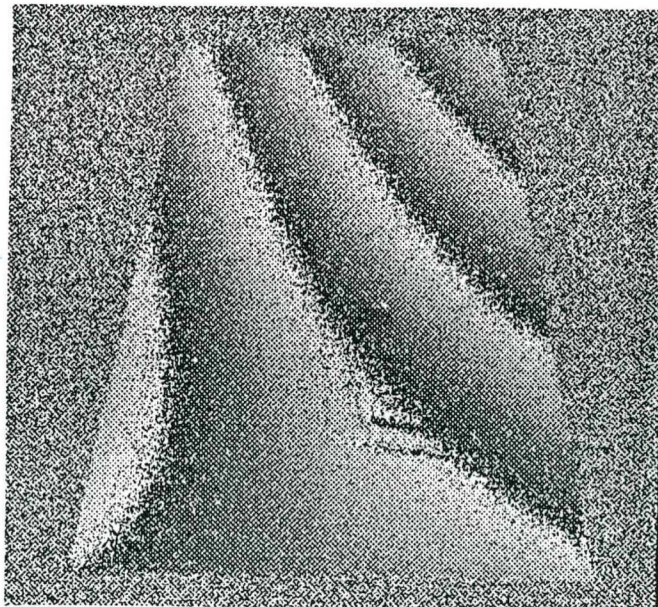


Fig. 6.27 - Mapa de fase com ruído e saltos de fase.

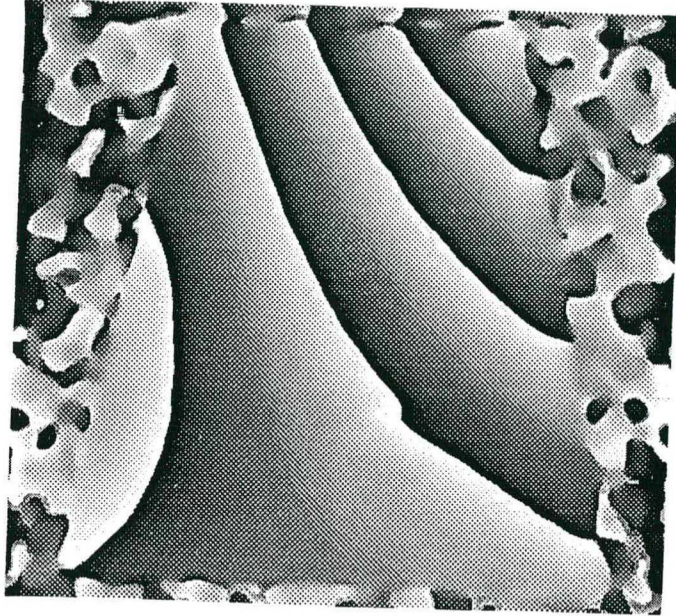


Fig. 6.28 - Mapa de fase tratado através de filtragem sinusoidal.

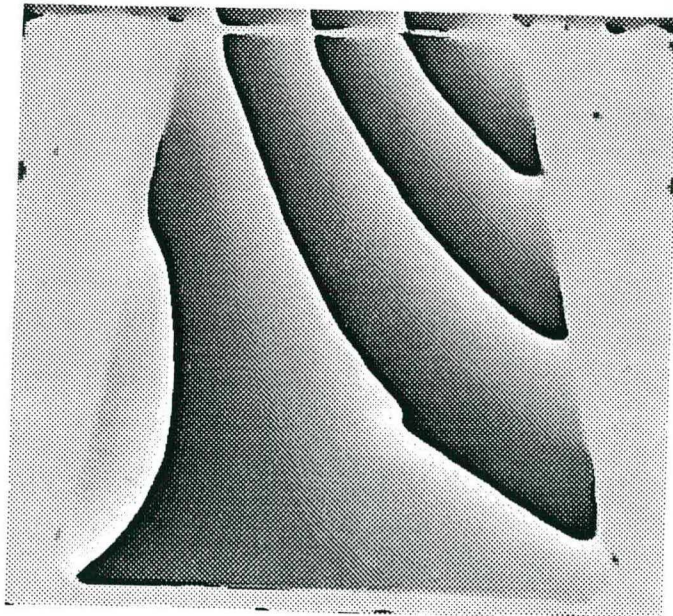


Fig. 6.29 - Mapa de fase tratado através de filtragem sinusoidal com ponderação de amplitude.

Dos resultados obtidos experimentalmente podemos destacar as seguintes observações:

- i) os resultados obtidos experimentalmente são muito próximos dos obtidos por simulação, o que indica uma boa concordância do modelo matemático adotado e o caso real;
- ii) a diferença dos resultados obtidos pelos dois tipos de filtragem é pequena (foi medida uma variação máxima de 20 nanômetros), o que indica que se existe uma melhoria, esta é da ordem de nanômetros;
- iii) para as regiões fora da peça (para as quais o fator de modulação é praticamente zero) a filtragem convencional gera imagens falsas (aparecimento de artefatos) que são eliminadas quando se aplica a filtragem ponderada.

## 6.6 - Conclusões

Pelas simulações realizadas verificou-se que o filtro sinusoidal com ponderação de amplitude apresenta relações sinal-ruído um pouco maiores do que as obtidas com a filtragem sinusoidal convencional. Esta melhoria é função do fator de modulação, sendo que para superfícies com fatores de modulação máximos (poucos pontos que não modulam) os resultados são praticamente idênticos. Já para superfícies com fatores de modulação menores, o filtro ponderado apresenta melhores resultados.

Considerando que para um aumento na relação sinal-ruído da ordem de 4dB, uma incerteza de medição na faixa de 10nm pode passar para a faixa de 6nm. Percebe-se que em termos de resolução das medidas, as melhoras são significativas mas são de difícil comprovação experimental, haja vista que seria necessário utilizar padrões de deslocamento com incertezas na faixa do nanometro. Além disso, os experimentos deveriam ser realizados sob severas condições de estabilidade (sem vibrações e variações de índices de refração e de temperaturas) para que esta validação fosse possível.

Desta forma a análise do algoritmo de filtragem ponderada deve ser realizada com base nos dados de simulação que permitem identificar as vantagens obtidas pelo mesmo, que são:

- i) melhora da relação sinal-ruído (em média 4 dB);
- ii) diminuição dos picos de ruído, facilitando o desempenho dos algoritmos de remoção dos saltos de fase;
- iii) eliminação das imagens falsas (artefatos), permitindo uma definição mais nítida dos contornos da peça.
- iv) diminuição das distorções nas bordas da peça analisada.

Por outro lado o novo algoritmo apresenta as seguintes desvantagens:

- i) maior quantidade de memória necessária (para armazenar o fator de modulação);
- ii) maior tempo de processamento;
- iii) maior complexidade de implementação;
- iv) geração de ruídos de alta frequência que apesar de apresentarem baixas amplitudes (da ordem de dois bits menos significativos) podem degradar o cálculo das derivadas utilizadas para determinação das tensões a partir dos deslocamentos.

Dado o estado atual de evolução dos equipamentos e ambientes de programação, as três primeiras desvantagens não são muito significativas. O ruído de alta frequência gerado pode ser minimizado pela utilização de filtros passa-baixas para tratamento dos sinais após a remoção dos saltos de fase. Desta forma, considera-se que benefícios significativos advêm da aplicação do novo algoritmo.

## CAPÍTULO 7

### REMOÇÃO DE SALTOS DE FASE

#### 7.1 - Introdução

Um dos grandes problemas no tratamento dos mapas de fase obtidos por Holografia Eletrônica é a remoção dos saltos de fase. Os saltos de fase de  $2\pi$  radianos surgem naturalmente devido à indeterminação do número de voltas inteiras associadas ao ângulo de fase.

Os saltos de fase são removidos pela aplicação de algoritmos de remoção de saltos de fase (*unwrapping*), que estão baseados na regra em que a variação de fase entre pontos vizinhos não é maior do que  $\pi$  radianos. Caso contrário, assume-se a ocorrência de um saltos de fase. A presença de pontos com ruído e as descontinuidades da superfície a ser medida podem acarretar problemas na remoção dos saltos de fase.

Como um algoritmo ótimo que resolva todos os problemas de remoção de saltos de fase ainda não foi desenvolvido, algoritmos aplicáveis ao tratamento de problemas específicos vêm sendo propostas. Neste capítulo, os principais algoritmos de remoção de saltos de fase serão descritos e analisados.



## 7.2 - Modelagem Matemática

Após a remoção do ruído, a imagem de um mapa de fase pode ser representada por:

$$\Delta\phi(x,y) = \phi(x,y) - 2\pi N(x,y) \quad (7.1)$$

onde:

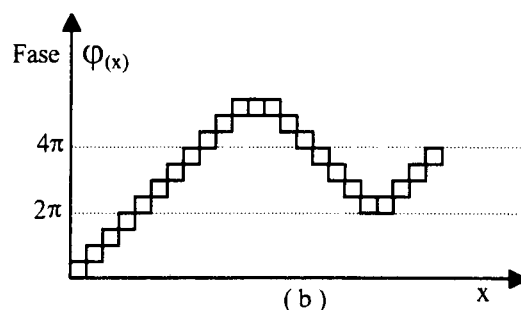
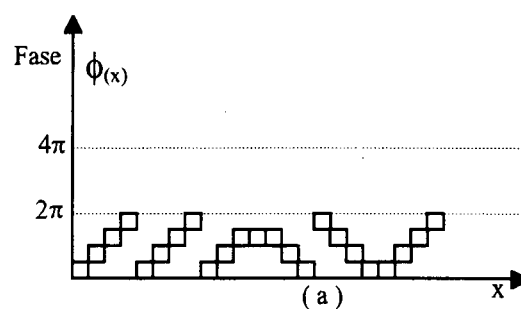
$\phi(x,y) \Rightarrow$  ângulo de fase a ser determinado;

$\Delta\phi(x,y) \Rightarrow$  mapa de fase que contém o módulo  $2\pi$  de  $\phi(x,y)$ ;

$N(x,y) \Rightarrow$  número de voltas inteiras associadas ao ângulo de fase.

Para uma frequência de amostragem maior do que a frequência de Nyquist (frequência espacial maior do que dois pontos por franja), uma diferença entre dois pontos consecutivos da fase  $\phi(x,y)$  é sempre menor ou igual a  $\pi$ . Desta forma, uma diferença maior do que  $\pi$  entre dois pontos consecutivos de  $\Delta\phi(x,y)$ , indica a presença de um salto de fase [25].

A Fig. 7.1 ilustra o processo de remoção de saltos de fase.



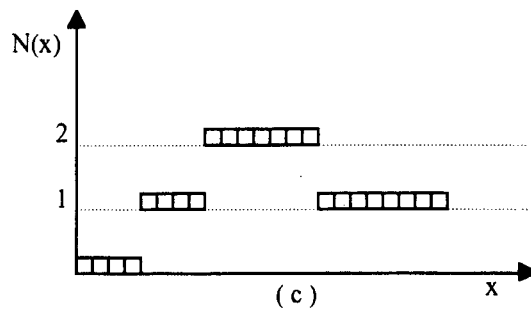


Fig. 7.1 - Representação gráfica da remoção de saltos de fase, (a) sinal com saltos de fase, (b) sinal com saltos removidos, (c) número de voltas inteiras.

Para um ponto  $(x,y)$  vizinho a um ponto  $(a,b)$ , conhecendo-se o valor de  $N(a,b)$ , o valor de  $N(x,y)$  pode ser determinado por:

$$N(x,y) = \text{Int}\left(\frac{\phi(x,y) - \phi(a,b)}{\pi}\right) + N(a,b) \quad (7.2)$$

onde o operador  $\text{Int}(\cdot)$  fornece a parte inteira com arredondamento do argumento.

Definindo-se um caminho formado por pontos vizinhos e que percorra todos os pontos da imagem, o valor de  $N(x,y)$  pode ser determinado pela aplicação sucessiva da equação (7.2). O valor do primeiro ponto (ponto de referência) deve ser previamente conhecido ou indicado de forma manual.

Após a obtenção de  $N(x,y)$  pela equação (7.2),  $\phi(x,y)$  pode então ser determinado, assim:

$$\phi(x,y) = \Delta\phi(x,y) + 2\pi N(x,y) \quad (7.3)$$

### 7.3 - Algoritmo Básico para Remoção de Saltos de Fase

O algoritmo básico para remoção de saltos de fase está baseado na equação (7.2) aplicada nas linhas<sup>1</sup> e colunas da imagem e opera efetuando-se os seguintes passos:

- i) remoção dos saltos de fase em uma linha da imagem a partir de um ponto de referência  $N(i,j)$  conhecido ou arbitrado:

$$N(x,j) = \text{Int}\left(\frac{\phi(x,j) - \phi(x-1,j)}{\pi}\right) + N(x-1,j) \quad , x = i+1, i+2, \dots, n \quad (7.4)$$

$$N(x,j) = \text{Int}\left(\frac{\phi(x,j) - \phi(x+1,j)}{\pi}\right) + N(x+1,j) \quad , x = i-1, i-2, \dots, 0 \quad (7.5)$$

- ii) remoção dos saltos de fase de todas as colunas da imagem a partir de um ponto de referência pertencente a linha  $N(x,j)$ :

$$N(x,y) = \text{Int}\left(\frac{\Delta\phi(x,y) - \Delta\phi(x,y-1)}{\pi}\right) + N(x,y-1) \quad , y = j+1, j+2, \dots, m \quad (7.6)$$

$$, x = 0, 1, \dots, n$$

$$N(x,y) = \text{Int}\left(\frac{\Delta\phi(x,y) - \Delta\phi(x,y+1)}{\pi}\right) + N(x,y+1) \quad , y = j-1, j-2, \dots, 0 \quad (7.7)$$

$$, x = 0, 1, \dots, n$$

---

<sup>1</sup>É importante observar que a descrição da imagem que está sendo utilizada segue a representação cartesiana e não a notação matricial. Portanto a variação do índice  $x$  equivale a "andar" sobre uma linha da imagem.

As Figuras 7.2 e 7.3 ilustram a execução do algoritmo básico:

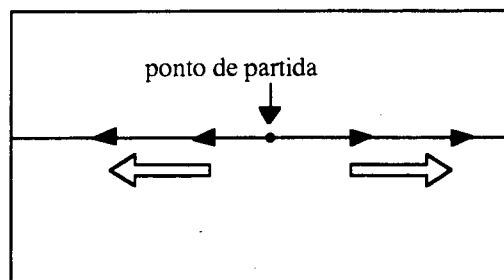


Fig. 7.2 - Remoção dos saltos de fase em uma linha partindo de um ponto de referência.

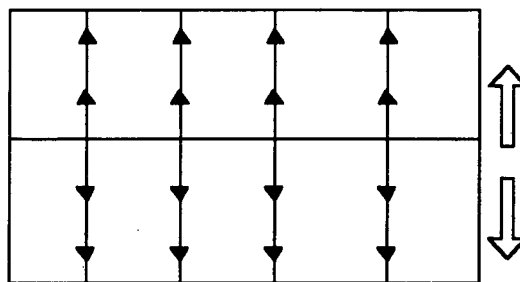


Fig. 7.3 - Remoção dos saltos de fase nas colunas partindo de uma linha de referência.

#### 7.4 - Fontes de Erros na Remoção dos Saltos de Fase

As imagens de mapas de fase podem apresentar problemas que dificultam a remoção dos saltos de fase. W. Osten e R. Höfling [26] agruparam as fontes de erro de remoção em quatro classes: ruído, sub-amostragem, descontinuidade e instabilidade. A seguir, cada uma destas classes será descrita.

**Ruído** - É um dos problemas mais comuns, gerado na aquisição e no processamento digital dos padrões de franjas. As principais causas são: ruído eletrônico, variação da intensidade luminosa e problemas de instabilidade dos sistemas ópticos e mecânicos envolvidos na medição. No método do Deslocamento de Fase os *speckles* com baixo fator de modulação geram pontos com um alto nível de ruído. Normalmente, antes de executar a remoção dos saltos de fase, os mapas de fase obtidos precisam ser filtrados. Assim mesmo, após este

processo de filtragem, alguns pontos podem ainda apresentar um nível de ruído que cause falhas na remoção dos saltos de fase.

**Subamostragem** - Ocorre quando o teorema da amostragem é violado, ou seja, não é garantido um mínimo de dois pixels por franja. Neste caso, a condição básica para operação dos algoritmos de remoção de saltos de fase não é respeitada e os algoritmos não podem operar corretamente. A forma mais fácil de resolver este problema é aumentar a resolução dos sensores ou processar regiões ampliadas da imagem. Greivenkamp [27] propôs uma técnica baseada no conceito de amostragem Sub-Nyquist, que requer um conhecimento prévio dos mapas de franja que compõem o mapa de fase.

**Descontinuidade** - Descontinuidades no objeto tais como furos e o próprio contorno do objeto geram regiões em cujas fronteiras ocorrem mudanças abruptas na fase que irão gerar erros na remoção dos saltos.

**Instabilidade** - Instabilidades no mapa de fase são causadas por deslocamentos do objeto sob carga. Estas variações podem ocorrer em peças com fendas ou rachaduras cujas bordas se movimentam em função da carga aplicada. Nestes casos as franjas obtidas são cortadas e deslocadas umas das outras, o que dificulta a remoção de saltos de fase.

## 7.5 - Algoritmos de Remoção de Saltos de Fase mais Aprimorados

Na seção anterior, as principais fontes de erros foram apresentados isoladamente, mas na prática estes fatores aparecem combinados. O ruído é a principal fonte de erro, sendo que normalmente os pontos com ruído estão distribuídos uniformemente por toda a imagem. Ao cruzar um ponto em uma região com alto nível de ruído o algoritmo de remoção de saltos de fase poderá falhar. Assim sendo, uma boa estratégia para evitar estas falhas consiste na definição de caminhos de remoção de saltos de fase que contornem os pontos com problemas. Por facilidade de notação, os caminhos que não contêm pontos com problemas serão denominados por "caminhos certos".

A seguir é apresentada uma breve descrição dos principais algoritmos de remoção de saltos de fase encontrados na literatura.

**Algoritmo baseado na definição de regiões [28]** - Consiste na determinação de regiões que não contêm problemas e que auxiliam na definição dos "caminhos certos" de remoção de saltos de fase. Estas regiões podem ser definidas manualmente ou automaticamente através da análise dos mapas de fase, da imagem do objeto ou mesmo do fator de modulação dos speckles. A maior parte dos algoritmos de remoção de saltos de fase demanda no mínimo a definição da região de interesse para a qual a fase deverá ser determinada. Normalmente o valor da fase fora das regiões definidas é ignorado, pois a maior parte destas não fazem parte do objeto sob teste.

**Algoritmo baseado em listas de pontos [26]** - Consiste na determinação dos "caminhos certos" a partir de uma lista de pontos que são priorizados levando em conta a diferença de cada ponto da imagem com seus vizinhos. Os pontos que apresentam as menores diferenças são colocados no topo da lista partindo do princípio de que os pontos com problemas possuem grandes diferenças. Desta forma, os pontos com maior possibilidade de problemas são processados por último, de forma, a reduzir a propagação dos erros que forem causados por estes pontos.

**Algoritmo baseado em linhas de corte [29]** - Consiste na definição de linhas de corte que limitam os caminhos que serão percorridos na remoção dos saltos de fase. As linhas de corte são retas que ligam duas regiões da imagem que foram identificadas como problemáticas. A determinação destas regiões está baseada no fato de que a soma das fases num caminho fechado deve ser nula. Partindo de cada ponto da imagem, são identificadas todas as regiões formadas por quatro pontos que compõem um caminho, cuja soma das fases diferem de zero.

**Algoritmo baseado na pesquisa exaustiva [26]** - Consiste na determinação dos "caminhos certos" através de uma busca exaustiva. Está baseado no fato de que para dois pontos quaisquer da imagem o valor da fase é independente do caminho seguido. Calculando-se a fase do segundo ponto por um número elevado

de caminhos distintos, o valor de maior frequência obtido pode ser considerado correto, pois, os "caminhos certos" tenderão a apresentar uma maior ocorrência de um determinado valor. A possibilidade de um caminho com problemas levar a um valor correto, devido à anulação de erros, pode ser considerada pequena. Desta forma, o conjunto de caminhos que levam ao valor de maior ocorrência serve como base para definição dos "caminhos certos".

**Algoritmo baseado em máscara de exclusão [26]** - Consiste em montar uma máscara na qual são marcados os pontos que apresentam problemas de remoção. A identificação destes pontos está baseada na definição de caminhos fechados para os quais o valor da fase computado deve ser nula. Se o valor obtido for diferente de zero todos os pontos deste caminho são marcados na máscara. São definidos uma série de caminhos fechados que serão percorridos a partir de cada ponto da imagem. São considerados "caminhos corretos" os pontos que não estão marcados. Alternativamente, o número de vezes que cada ponto foi considerado não correto problema pode ser armazenado. Desta forma, quando os pontos sem problemas não estiverem disponíveis, poderão ser seguidos os caminhos dos pontos que apresentarem a menor frequência de ocorrência na máscara.

**Algoritmo baseado em autômato celular [30]** - Alternativamente aos algoritmos que buscam "caminhos corretos", o algoritmo baseado em autômato celular parte do cálculo de todos os pontos de forma independente e simultânea. Cada ponto é considerado um autômato que modifica seu valor com base em regras pré-fixadas que levam em conta o valor dos pontos vizinhos. Após um grande número de iterações são obtidos padrões estáveis que podem representar a remoção de saltos de fase de toda a imagem.

**Algoritmo baseado em múltiplos mapas de fase [31]** - Consiste na geração de dois ou mais mapas de fase que representam um mesmo deslocamento. O ruído, aleatório presente em cada mapa, irá gerar pontos com problemas em posições que irão variar de um mapa para outro. Desta forma, além de poder percorrer as duas dimensões do mapa o algoritmo pode percorrer uma terceira dimensão (utilizando o mesmo ponto nos demais mapas de fase). Devido à redundância das informações, os pontos com ruído podem ser mais facilmente identificados e eliminados.

**Algoritmo baseado em interpolação polinomial [32]** - Este algoritmo está baseado no fato de que o valor de fase para cada ponto do mapa representa uma superfície suave (exceto para o caso de descontinuidades). Interpolando uma superfície polinomial (através de técnicas de minimização) para um conjunto de pontos cuja fase é conhecida, pode-se estimar o valor dos pontos vizinhos deste conjunto e, desta forma, determinar o valor dos saltos de fase para estes pontos, mesmo na presença de ruído. Desta forma, para a determinação da fase de cada ponto, realiza-se uma interpolação dos pontos de sua vizinhança cuja fase já tenha sido calculada.

## 7.6 - Critérios para Avaliação dos Algoritmos de Remoção de Saltos de Fase

Os algoritmos de remoção de saltos de fase podem ser avaliados com base nos seguintes parâmetros:

**Eficiência** - Uma das formas de quantificar a eficácia do algoritmo é aplicá-los em uma série de imagens contendo problemas em vários níveis (o nível de problemas pode ser dado pelo valor percentual de pontos com erros). A eficiência é medida calculando-se o valor percentual de pontos com problemas na imagem obtida pelo algoritmo. Como o valor obtido irá variar com o tipo de imagem, a mesma pode ser indicada de forma qualitativa (baixa, média ou elevada). A definição de eficiência não pode ser utilizada para algoritmos operando de forma iterativa, pois neste caso, o processo de tratamento pode ser repetido até que todos os pontos com problemas sejam removidos.

**Complexidade computacional** - O tempo de execução do algoritmo será proporcional à sua complexidade computacional. Apesar da evolução crescente dos sistemas computacionais, a realização de um número elevado de operações em todos os pontos da imagem pode demandar um tempo que inviabilize a aplicação prática do algoritmo. Para padronização considera-se como referência a complexidade computacional do algoritmo básico. Está incluída também na medida da complexidade computacional a quantidade de memória necessária, esta pode ser determinada teoricamente pelo número de imagens que precisam ser



armazenadas na execução do algoritmo. Para os sistemas de processamento de imagem mais modernos, normalmente, a quantidade de memória não será um fator limitante.

**Grau de automação** - dependendo da interação com o operador, os algoritmos podem ser classificados como:

**Manuais** - São algoritmos que necessitam de um grande número de interferências do operador;

**Semi-automáticos** - São algoritmos que necessitam de algumas inicializações;

**Automáticos** - São algoritmos que não necessitam de quais que definições;

**Iterativos** - São aqueles em que o operador utiliza o algoritmo em iterações sucessivas. Normalmente o operador realiza algumas inicializações (definição das regiões de interesse) e o algoritmo é executado. O operador pode interagir com o sistema decidindo em função dos resultados obtidos.

A maior parte dos algoritmos manuais e semi-automáticos pode ser executadas de forma iterativa e interativa. Para imagens com muitos problemas, um número muito elevado de iterações pode ser necessário.

## 7.7 - Avaliação dos Algoritmos de Remoção de Saltos de Fase

Os algoritmos de remoção de saltos de fase apresentam diferentes níveis de eficácia para as diversas fontes de problemas. Os algoritmos baseados na definição de regiões são eficientes para problemas de descontinuidades mas não para problemas causado pelo ruído. Já os algoritmos baseados na definição de "caminhos certos", podem contornar facilmente os pontos com ruído mas são ineficientes para pontos localizados dentro de regiões com descontinuidades. Desta forma, todos os algoritmos apresentados estão sujeitos a falhas, principalmente para mapas de fase que apresentem problemas combinados de descontinuidade e alto nível de ruído.

A aplicação prática de alguns dos algoritmos apresentados pode ser inviabilizada pela elevada complexidade computacional necessária, como é o caso do algoritmo baseado em autômato celular que demanda alguns milhões de iterações.

No caso de algoritmos manuais e semi-automáticos, a eficiência irá depender da habilidade e experiência do operador. Assim, na concepção de novos algoritmos, um crescente grau de automação está constantemente sendo buscado.

A Tabela 7.1 contém uma análise comparativa entre os algoritmos apresentados.

Tabela 7.1 - Comparação entre os algoritmos de remoção de saltos de fase.

Algoritmo	Eficiência para o tratamento		Complexidade computacional	Grau de automação
	Ruído	Descontinuidade		
Definição de regiões	baixa	elevada	baixa	manual
Listas de pontos	média	baixa	média	semi-automático
Linhas de corte	média	baixa	média	semi-automático
Pesquisa exaustiva	elevada	média	elevada	semi-automático
Máscara de exclusão	média	media	elevada	semi-automático
Autômato celular	elevada	média	muito elevada	automático
Múltiplos mapas de fase	elevada	baixa	elevada	semi-automático
Interpolação polinomial	elevada	baixa	muito elevada	semi-automático

## CAPÍTULO 8

### ALGORITMO DE REMOÇÃO DE SALTOS DE FASE POR MINIMIZAÇÃO DA ENERGIA DO ERRO DE FASE

#### 8.1 - Introdução

Como foi exposto no Capítulo 7, os algoritmos atualmente utilizados apresentam baixa eficiência no tratamento de mapas de fase com elevado nível de ruído e problemas de descontinuidade. Com exceção do algoritmo baseado em autômato celular, os algoritmos normalmente tratam a imagem ponto a ponto, sendo que um erro no processo é propagado para todos os pontos subsequentes. Neste capítulo um novo algoritmo de remoção de saltos de fase é desenvolvido. Este algoritmo leva em conta simultaneamente o valor de fase para todos os pontos da imagem, operando com base na minimização quadrática dos erros de fase na remoção dos saltos de fase em todos os pontos da imagem. Este algoritmo foi denominado "Algoritmo de Remoção de Saltos de Fase por Minimização da Energia do Erro de Fase".

#### 8.2 - Desenvolvimento do Algoritmo

O desenvolvimento deste algoritmo está baseado no seguinte princípio: a partir de um dado mapa de fase,  $\Delta\phi(x,y)$ , pode-se calcular duas imagens:

a) imagem  $N_1(x,y)$  que é obtida pela remoção dos saltos de fase das linhas de  $\Delta\phi(x,y)$ , considerando que a fase inicial do primeiro ponto de cada linha está na primeira volta;

b) imagem  $N_c(x,y)$  que é obtida pela remoção dos saltos de fase das colunas de  $\Delta\phi(x,y)$ , considerando que a fase inicial do primeiro ponto de cada coluna está na primeira volta;

Assim, aplicando a equação básica de remoção de saltos de fase apresentada no Capítulo 7 (equação 7.2), determina-se  $N_1(x,y)$ :

Para  $y = 0, 1, \dots, m$  e  $N_1(0,y) = 0$ , tem-se:

$$N_1(x,y) = \text{Int}\left(\frac{\Delta\phi(x,y) - \Delta\phi(x-1,y)}{\pi}\right) + N(x-1,y) \quad , x = 1, \dots, n \quad (8.1)$$

De forma análoga, determina-se  $N_c(x,y)$ :

Para  $x = 0, 1, \dots, n$  e  $N_c(x,0) = 0$ , tem-se:

$$N_c(x,y) = \text{Int}\left(\frac{\Delta\phi(x,y) - \Delta\phi(x,y-1)}{\pi}\right) + N(x,y-1) \quad , y = 1, \dots, m \quad (8.2)$$

Como conseqüência de ter sido arbitrado um valor inicialmente igual a zero para o valor de  $N$  do primeiro ponto de cada linha de  $N_1(x,y)$  e de cada coluna de  $N_c(x,y)$ , o valor correto de  $N(x,y)$  é determinado a menos de uma constante aditiva para cada linha e cada coluna. Desta forma, o valor de  $N(x,y)$  pode ser obtido pela adição de um valor constante  $L(y)$  a cada linha da imagem  $N_1(x,y)$ :

$$N(x,y) = N_1(x,y) + L(y) + K \quad (8.3)$$

o parâmetro  $K$  (constante de ajuste de *offset*) é definido a partir do valor do ponto de referência.

Da mesma forma, pode-se obter  $N(x,y)$  adicionando-se a constante  $C(x)$  à cada coluna da imagem  $N_c(x,y)$ :

$$N(x,y) = N_c(x,y) + C(x) + K \quad (8.4)$$

Igualando as expressões (8.3) e (8.4), tem-se:

$$N_1(x,y) + L(y) - N_c(x,y) - C(x) = 0 \quad (8.5)$$

A expressão (8.5) é válida somente para um conjunto particular de constantes  $L(y)$  e  $C(x)$  o qual satisfaz as equações (8.3) e (8.4). Para valores arbitrários de  $L(y)$  e  $C(x)$  a expressão (8.5) pode ser modificada para :

$$E(x,y) = N_1(x,y) + L'(y) - N_c(x,y) - C'(x) \quad (8.6)$$

onde  $E(x,y)$  é o erro obtido considerando-se quaisquer valores para  $C'(x)$  e  $L'(y)$ .

Uma forma de obtenção dos valores ótimos para as constantes  $C'(x)$  e  $L'(y)$  é através da minimização do erro  $E(x,y)$ .

Assim, definindo  $S$  como a energia do erro  $E(x,y)$ , tem-se:

$$S = \sum_{y=0}^m \sum_{x=0}^n [ E(x,y) ]^2$$

ou

$$S = \sum_{y=0}^m \sum_{x=0}^n [ N_1(x,y) + L'(y) - N_c(x,y) - C'(x) ]^2 \quad (8.7)$$

A determinação do ponto de mínimo de  $S$ , em relação a  $L'(i)$ , pode ser obtida derivando-se a expressão (8.7) em relação a um parâmetro  $L'(i)$  e igualando-se a derivada a zero:

$$\frac{\partial S}{\partial L'(i)} = 0 \quad (8.8)$$

$$\frac{\partial S}{\partial L'(i)} = 2 \sum_{x=0}^n \sum_{y=0}^m E(x,y) \frac{\partial L'(y)}{\partial L'(i)} \quad (8.9)$$

como:

$$\frac{\partial L'(y)}{\partial L'(i)} = 1 \quad , y = i$$

$$\frac{\partial L'(y)}{\partial L'(i)} = 0 \quad , y \neq i$$

da expressão (8.9), tem-se:

$$\frac{\partial S}{\partial L'(i)} = 2 \sum_{x=0}^n [N_1(x,i) + L'(i) - N_c(x,i) - C'(x)] \quad (8.10)$$

ou ainda:

$$\sum_{x=0}^n [N_1(x,i) + L'(i) - N_c(x,i) - C'(x)] = 0 \quad (8.11)$$

Portanto, desenvolvendo (8.11) de forma a explicitar  $L'(i)$ , obtém-se :

$$L'(i) = \frac{1}{(n+1)} \sum_{x=0}^n [N_c(x,i) - N_1(x,i) + C'(x)] \quad (8.12)$$

Assim, para  $i = y$ , com  $y = 0, 1, \dots, m$ , tem-se:

$$L'(y) = \frac{1}{(n+1)} \sum_{x=0}^n [N_c(x,y) - N_1(x,y) + C'(x)] \quad (8.13)$$

Aplicando a equação (8.13) na equação (8.3), obtém-se:

$$N(x,y) = N_1(x,y) + K + \frac{1}{(n+1)} \sum_{x=0}^n [C'(x) + N_c(x,i) - N_1(x,i)] \quad (8.14)$$

definindo-se :

$$K1 \equiv K + \frac{1}{(n+1)} \sum_{x=0}^n C'(x) \quad (8.15)$$

tem-se :

$$N(x,y) = N_1(x,y) + K1 + \frac{1}{(n+1)} \sum_{x=0}^n [N_c(x,i) - N_1(x,i)] \quad (8.16)$$

O grau de liberdade decorrente da constante K presente na expressão (8.3) permite que  $L'(y)$  seja independente de  $C(x)$ . Assim, a equação (8.13) pode ser redefinida por:

$$L'(y) = \frac{1}{n+1} \sum_{x=0}^n [N_c(x,y) - N_1(x,y)] \quad , y = 0, \dots, m \quad (8.17)$$

Para determinação de  $C'(x)$  aplica-se um procedimento análogo à obtenção de  $L'(y)$ , assim:

$$\frac{\partial S}{\partial C'(i)} = 0 \quad (8.18)$$

De forma semelhante à obtenção de (8.13), determina-se a expressão (8.19), a fim de obter  $C'(x)$

$$C'(x) = \frac{1}{(m+1)} \sum_{y=0}^m [N_1(x,y) - N_c$$

Obtendo-se os vetores  $L'(y)$  e  $C'(x)$  pelas expressões (8.17) e (8.19) o valor de  $N(x,y)$  pode ser determinado através da equação (8.3) ou da equação (8.4).

Para uma imagem com problemas na remoção dos saltos de fase,  $E(x,y)$  não será nulo para todos os pontos. Considerando inicialmente que um ponto  $(i,j)$  de  $\Delta\phi(x,y)$  apresenta um nível de ruído tal, que cause um erro de remoção na linha e na coluna que contém este ponto, calculando  $E(x,y)$  verifica-se que o erro de remoção será propagado nos demais pontos da linha e da coluna.

A Figura 8.1 ilustra duas possibilidades de propagação do erro devido a um ponto com problema em uma linha de  $E(x,y)$ . A propagação do erro em uma linha ou coluna dar-se-a no sentido da borda mais próxima deste ponto, pois, a técnica de minimização empregada garante que o número de pontos não nulos de  $E(x,y)$  é mínimo, e desta forma, as retas que os contêm têm sempre o menor comprimento possível.

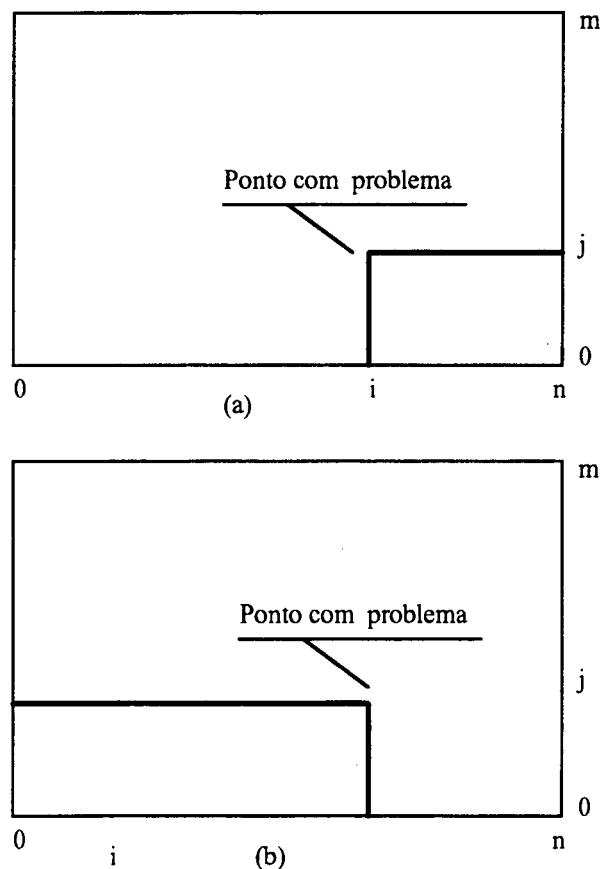


Fig. 8.1 - Imagens que ilustram duas possibilidades de propagação do erro de remoção de saltos em uma linha. Como para o caso mostrado em (b) a energia do ruído é maior, somente o caso mostrado em (a) será obtido.



O erro  $E(x,y)$  é portanto a soma de dois erros, um gerado na remoção dos saltos nas linhas de  $\Delta\phi(x,y)$  e outro gerado na remoção dos saltos nas colunas.

Considerando que :

$$N_1(x,y) = N_1'(x,y) + E_1(x,y) \quad (8.20)$$

e

$$N_c(x,y) = N_c'(x,y) + E_c(x,y) \quad (8.21)$$

onde:

$N_1'(x,y) \Rightarrow$  número de voltas da fase nas linhas, sem erro de remoção;

$E_1(x,y) \Rightarrow$  erro de remoção sobreposto a  $N_1'(x,y)$  ;

$N_c'(x,y) \Rightarrow$  número de voltas da fase nas colunas, sem erro de remoção;

$E_c(x,y) \Rightarrow$  erro de remoção sobreposto a  $N_c'(x,y)$ .

Aplicando (8.20) e (8.21) na equação (8.6), o erro  $E(x,y)$  é então dado por:

$$E(x,y) = N_1'(x,y) + L'(y) + E_1(x,y) - N_c'(x,y) - C'(x) - E_c(x,y), \quad (8.22)$$

Para os valores de  $L'(y)$  e  $C'(x)$ , determinados pela minimização da energia de  $E(x,y)$ , demonstra-se que:

$$N(x,y) = N_1'(x,y) + L'(y) + K \quad (8.23)$$

$$N(x,y) = N_c'(x,y) + C(x) + K \quad (8.24)$$

Aplicando as equações (8.23) e (8.24) na equação (8.22), tem-se :

$$E(x,y) = E_c(x,y) - E_1(x,y) \quad (8.25)$$

A equação (8.25) mostra que após a minimização, o erro resultante é aquele causado por problemas de remoção de saltos nas linhas e nas colunas.

Aplicando a equação (8.20) na equação (8.23),  $N(x,y)$  pode ser obtido por:

$$N(x,y) = N_1(x,y) + L'(y) + K - E_1(x,y) \quad (8.26)$$

Da mesma forma, aplicando a equação (8.21) na equação (8.24),  $N(x,y)$  também pode ser determinado por :

$$N(x,y) = N_c(x,y) + C'(x) + K - E_c(x,y) \quad (8.27)$$

Assim, para obter  $N(x,y)$  é necessário que se determine o erro  $E_c(x,y)$  ou o erro  $E_1(x,y)$  a partir do erro  $E(x,y)$  calculado. Apesar de existirem infinitas combinações de erros  $E_c(x,y)$  e  $E_1(x,y)$  que atendem a equação (8.25), são conhecidas certas características destes erros que na maioria das vezes permitem separá-los corretamente. São elas:

- a) os erros  $E_c(x,y)$  e  $E_1(x,y)$  são ortogonais e linearmente independentes;
- b) o erro  $E_c(x,y)$  forma uma imagem que é composta por um conjunto de retas verticais que iniciam em um ponto da imagem e terminam na borda superior ou inferior da mesma;
- c) o erro  $E_1(x,y)$  forma uma imagem composta por um conjunto de retas horizontais que iniciam em um ponto da imagem e terminam na borda esquerda ou direita da mesma.

Um dos algoritmos mais simples de determinação de  $E_1(x,y)$ , consiste em varrer todos os pontos não nulos de  $E(x,y)$ . Selecionam-se assim, todos os pontos

que compõem segmentos de reta no sentido das linhas. Para determinar  $E_c(x,y)$  selecionam-se todos os pontos que compõem segmentos de reta no sentido das colunas.

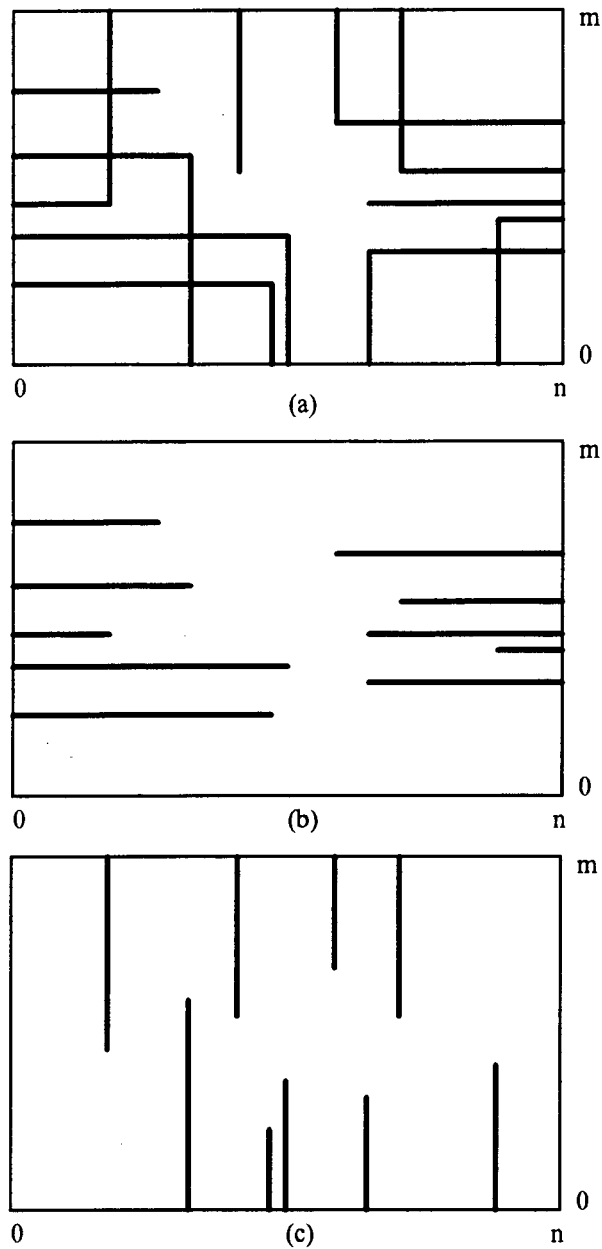


Fig. 8.2 - Imagens que ilustram o processo de separação dos erros. Em (a) tem-se o erro  $E(x,y)$  obtido por simulação para uma imagem com ruído. Em (b) o erro  $E_1(x,y)$ , obtido a partir das linhas de  $E(x,y)$ . Em (c) o erro  $E_c(x,y)$ , obtido a partir das colunas de  $E(x,y)$ .

### 8.3 - Aplicação do Algoritmo em Imagens Geradas por Simulação

Este algoritmo de remoção de saltos de fase foi implementado no tratamento de imagens obtidas por simulação de mapas de fase sobre os quais foram sobrepostos ruídos e regiões com distorções na forma de buracos e descontinuidades. A seguir são apresentadas as imagens que ilustram tal procedimento:

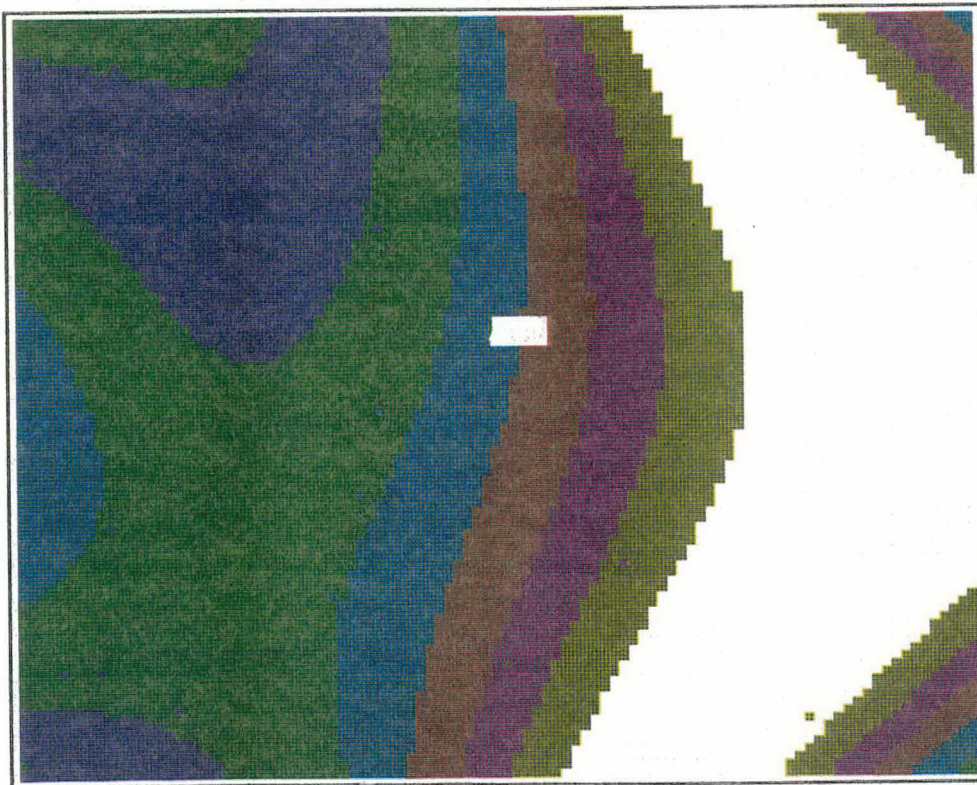


Fig. 8.3 - Simulação do mapa de fase com uma região descontinua.

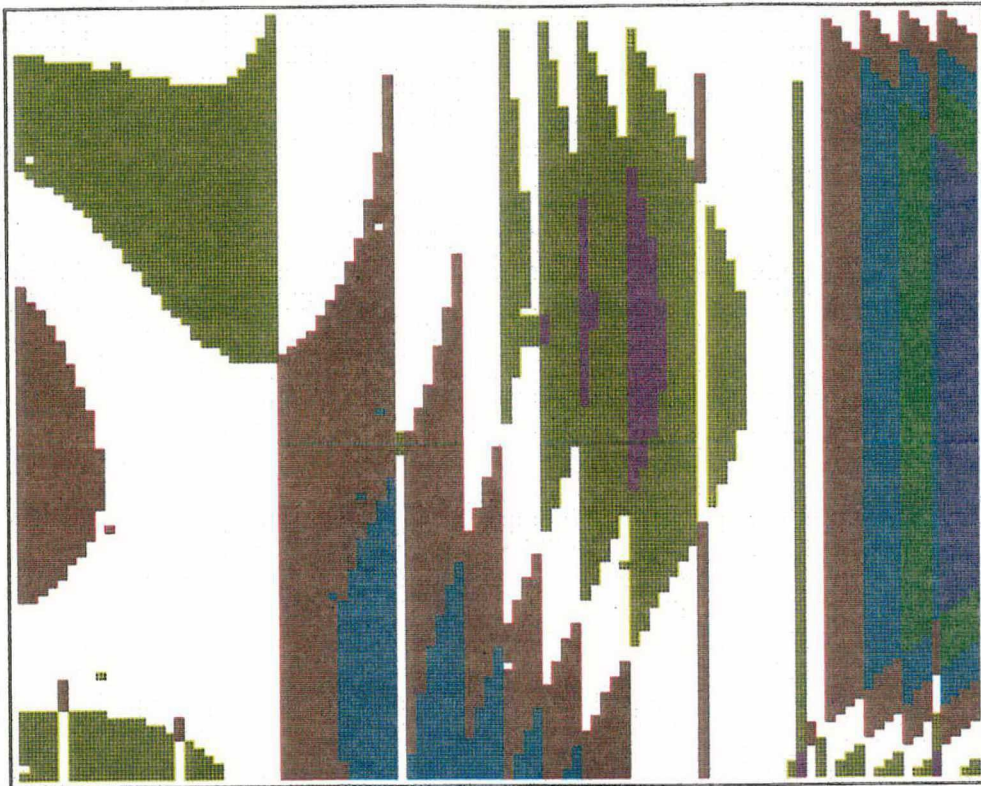


Fig. 8.4 - Remoção dos saltos de fase nas colunas.

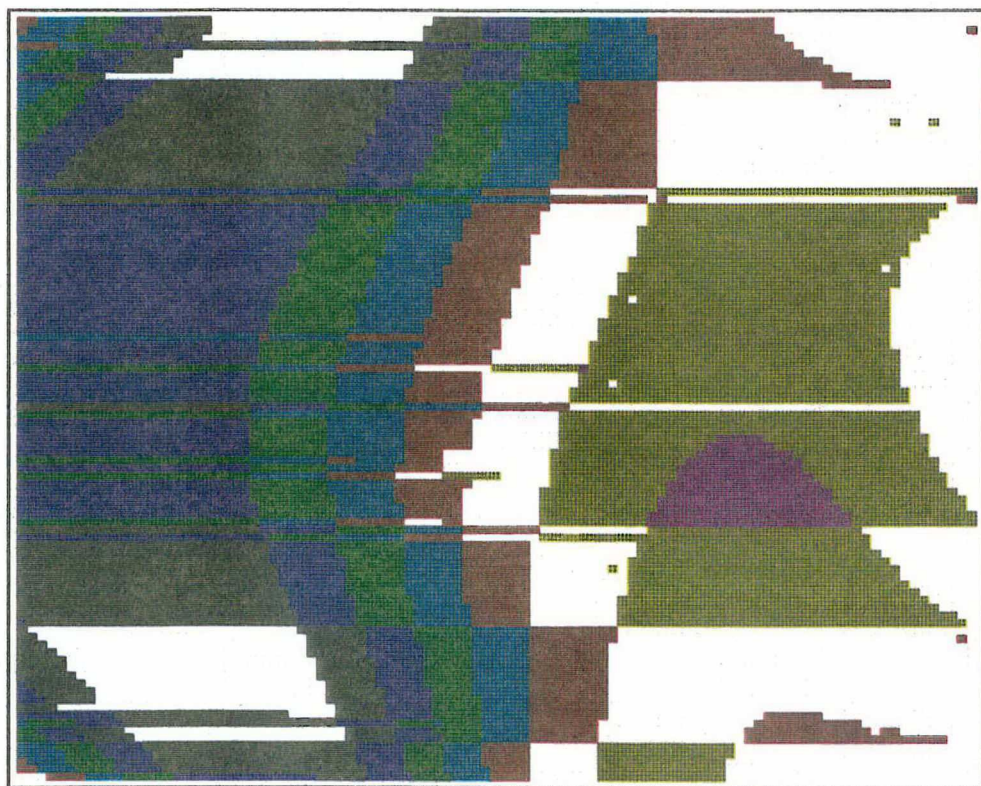


Fig. 8.5 - Remoção dos saltos de fase nas linhas.

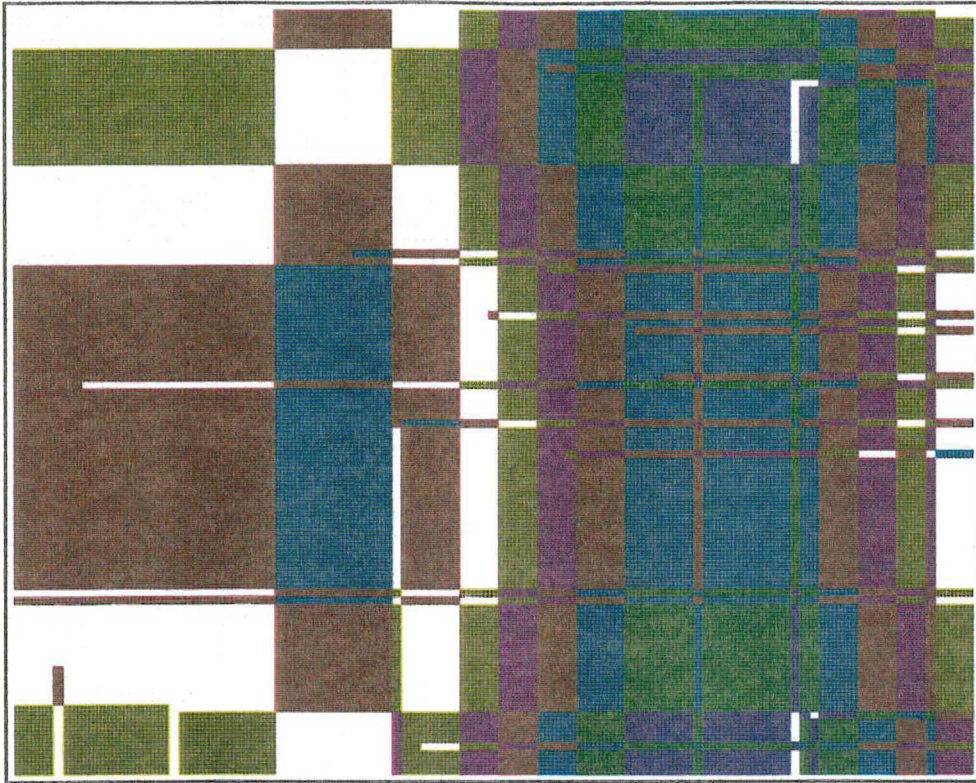


Fig. 8.6 - Erro cuja energia deve ser minimizada.



Fig. 8.7 - Erro após a minimização.

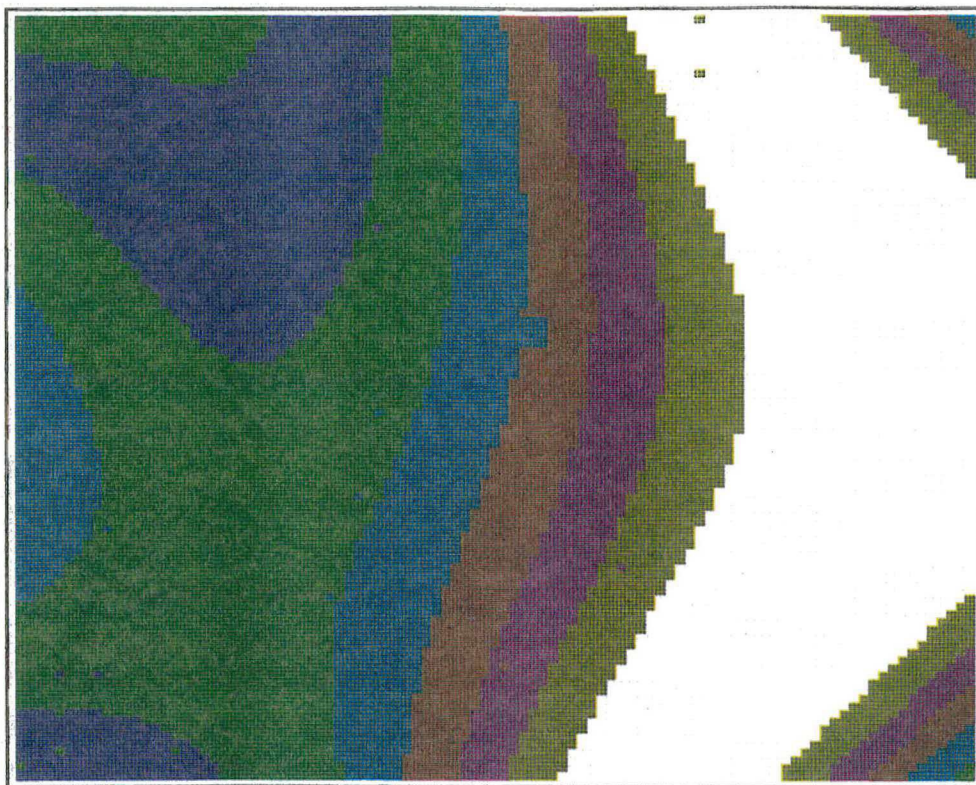


Fig. 8.8 - Fase obtida com o novo algoritmo.

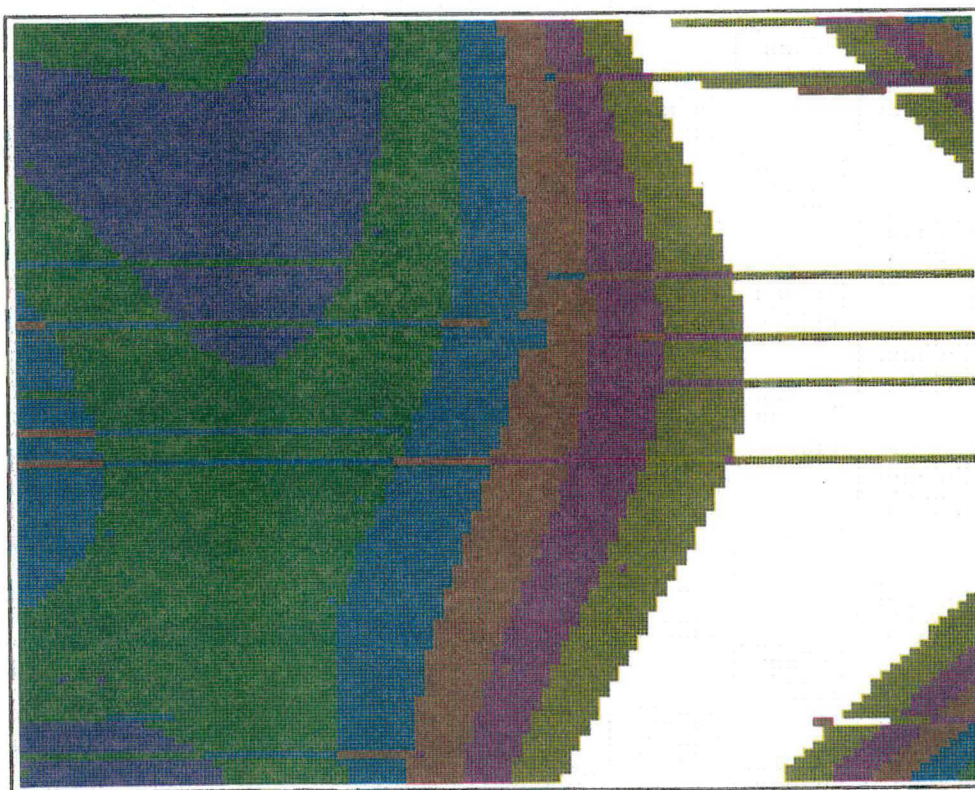


Fig. 8.9 - Fase obtida com o algoritmo básico.

## 8.4 - Avaliação do Novo Algoritmo

Resultados muito bons foram obtidos com a aplicação do novo algoritmo no tratamento de mapas com diversos níveis de ruído e descontinuidade. Em comparação com os algoritmos convencionais, a seguinte avaliação pode ser destacada:

**Eficiência** - Como o novo algoritmo está baseado na minimização da energia do erro de fase para toda a imagem, o mesmo se destaca por apresentar um elevado grau de eficiência para imagens com problemas de ruído e descontinuidade (furos e ranhuras na peça). A eficiência do algoritmo está ligada à separação do erro nas linhas e colunas, se esta separação for realizada de forma correta, o erro será totalmente removido.

Para tipos de erros específicos, como os que estão ilustrados na Figura 8.10, podem ocorrer problemas no processo de separação dos erros de remoção nas linhas e colunas. A ocorrência de muitos pontos com problemas de remoção de saltos de fase em uma mesma linha (ou coluna) também pode inviabilizar a separação dos erros. Assim sendo, para imagens com um grande número de pontos com ruído ou muitas regiões com descontinuidade, a separação do erro em linhas e colunas não é eficiente. Este problema pode ser contornado pela divisão da imagem em sub-imagens que podem ser definidas de forma manual ou automática.

**Complexidade computacional** - O algoritmo requer um volume de processamento que equivale a aproximadamente seis vezes o do algoritmo básico. Apesar da elevada capacidade de processamento dos sistemas de aquisição atualmente disponíveis, devido ao grande número de pontos tratados (aproximadamente 250KBytes para uma imagem com 512 linhas e 512 colunas), o tempo de execução do novo algoritmo é da ordem de minutos, enquanto o tempo de execução do algoritmo básico é da ordem de dezenas de segundos.

O novo algoritmo opera sobre 4 imagens armazenadas, podendo ser facilmente implementado nos sistemas de aquisição e tratamento de imagens disponíveis.



**Grau de automação** - O novo algoritmo pode ser classificado como sendo semi-automático, pois apesar, da elevada eficiência que apresenta, os mapas de fase tratados pelo mesmo podem apresentar problemas de remoção, principalmente para imagens com muito ruído, que devem ser detectados por um operador. Como normalmente na primeira execução do algoritmo já são obtidos bons resultados, poucas iterações são necessárias.

Para os algoritmos convencionais o operador deve definir regiões que contornem os pontos com problemas. Para o novo algoritmo o operador deve definir regiões retangulares que conttenham os pontos com problemas, este fato facilita grandemente o trabalho do operador.

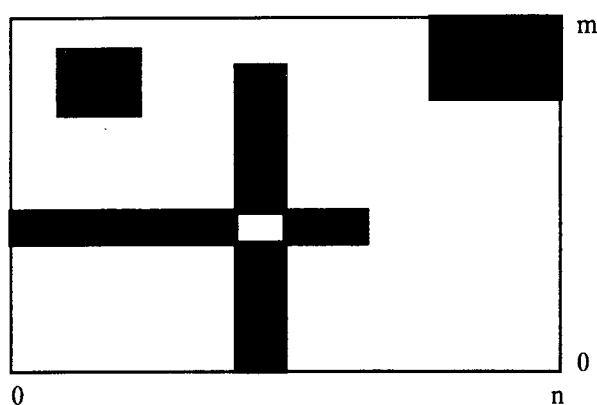


Fig. 8.10 - Erro  $E(x,y)$  com regiões que dificultam a operação do algoritmo de separação dos erros em linhas e colunas.

### 8.5 - Aplicação do Algoritmo a Imagens Reais

O Algoritmo de Remoção de saltos de Fase por Minimização da Energia do Erro de Fase foi aplicado no tratamento de imagens reais obtidas em uma estação holográfica, sendo que os resultados obtidos para imagens reais foram muito próximos dos obtidos por simulação.

Devido ao problema da eficiência do novo algoritmo diminuir com o aumento do tamanho da imagem, a seguinte metodologia apresentou bons resultados:

- a) aplicação do algoritmo básico para remoção dos saltos em todo o mapa de fase;

- b) um operador detecta visualmente os problemas de remoção e define regiões retangulares que os contenham;
- c) aplicação do novo algoritmo nas regiões definidas pelo operador;
- d) caso seja necessário, as etapas (b) e (d) podem ser repetidas.

Com esta metodologia são obtidos mapas de fase parcialmente isentos de problemas de remoção de saltos de fase. A primeira iteração é realizada rapidamente, dado que as operações manuais são de fácil execução. Devido à elevada eficiência do novo algoritmo, poucas iterações são necessárias. As Figuras 8.11, 8.12, ilustram um caso real de aplicação da metodologia acima descrita, onde os erros de remoção gerados na execução do algoritmo básico foram removidos com uma única execução do novo algoritmo.

A etapa (a) pode ser implementada através de uma estratégia mais aprimorada, que consiste na divisão dos mapas de fase (que normalmente contém 512x512 pontos) em 25 regiões (de 110x110 pontos), a serem tratadas independentemente pelo novo algoritmo. O mapa final é obtido pela união dos resultados de cada região (as 25 constantes referentes ao *offset* de cada região são facilmente determinadas através dos pontos de intersecção entre as regiões). Esta estratégia demanda um tempo de processamento sensivelmente maior, mas devido à grande eficiência do algoritmo, a intervenção manual muitas vezes poderá ser dispensada.



Fig. 8.11- Remoção de saltos de fase obtida com o algoritmo básico.

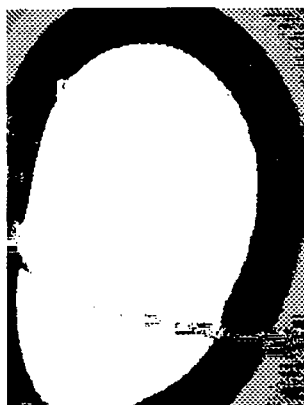


Fig. 8.12 - Remoção de saltos de fase obtida com o novo algoritmo.

### **8.6 - Futuros Aprimoramentos**

O princípio de remoção de saltos de fase pela aplicação da minimização da energia do erro de fase foi desenvolvido com base na remoção dos saltos de fase nas linhas e colunas do mapa de fase. Como os saltos de fase podem ser também removidos nas linhas diagonais, teoricamente esta informação adicional pode ser utilizada para o aprimoramento do algoritmo apresentado.

O método de separação do ruído nas linhas e colunas pode ser aprimorado a fim de que problemas mais complexos (como os apresentados na Figura 8.10) possam ser tratados. Convém salientar que na ocorrência deste tipo de problema o mapa de fase pode ser dividido em regiões que poderão ser tratadas por métodos de separação mais simples.

### **8.7 - Conclusões**

O Algoritmo de Remoção de Saltos de Fase por Minimização da Energia do Erro de Fase, desenvolvido nesta dissertação apresentou excelentes resultados conseguindo remover corretamente os saltos de fase para imagens em que os algoritmos convencionais falham completamente. Além disso, o novo algoritmo é

eficiente tanto para o tratamento de ruído como de descontinuidades, característica esta que o distingue quando comparado com os demais algoritmos.

Na maior parte dos casos o algoritmo remove corretamente os saltos de fase em uma única iteração, diminuindo sensivelmente o trabalho do operador, que ao invés de definir regiões de geometria complexa que contornem os pontos com problemas (o que normalmente ocorre nos demais algoritmos), define apenas regiões retangulares que contenham os pontos com problemas

## CAPÍTULO 9

### ALGORITMO DE FILTRAGEM APÓS A REMOÇÃO DE SALTOS DE FASE

#### 9.1 - Introdução

Como foi apresentado nos capítulos anteriores, os mapas de fase contêm dois grandes problemas: o ruído e os saltos de fase. As estratégias atualmente utilizadas primeiramente atenuam o nível do ruído, através de filtragens bastante complexas, e a seguir removem os saltos de fase. Esta ordem não é a ideal pois se os saltos de fase forem removidos primeiro, o mapa resultante poderá ser filtrado de forma muito mais eficiente. Como as frequências presentes no sinal de fase são baixas, na ausência dos saltos de fase, filtros passa-baixas podem ser diretamente aplicados para atenuação do ruído. Neste capítulo, um novo algoritmo que primeiramente remove os saltos de fase e a seguir atenua o ruído é apresentado.

#### 9.2 - Análise do Algoritmo Convencional

Para facilitar a apresentação do novo método, é conveniente realizar uma análise do procedimento convencional de tratamento do mapa, onde são seguidos os seguintes passos:

- a) aplicação de uma transformação sinusoidal com geração de duas novas imagens;
- b) filtragem de cada uma das imagens;
- c) aplicação de uma transformada tangente inversa, sendo obtido um mapa de fase com ruído atenuado e saltos de fase;
- d) utilização de um algoritmo de remoção de saltos de fase.

A utilização de uma transformação não linear viabiliza o processo de filtragem na presença de saltos de fase, mas traz os seguintes inconvenientes:

- i) o espectro de frequência do sinal é alterado, passando a ocupar uma maior faixa de frequências e ficando dependente da amplitude do sinal original;
- ii) o espectro de frequências do ruído é alterado, sobrepondo-se ao do sinal;
- iii) deve ser aplicado um filtro com maior banda passante para evitar distorções no sinal;
- iv) a transformação tangente inversa também altera o espectro de frequências do sinal filtrado.

Desta forma, fica claro que um método que remova inicialmente os saltos de fase e viabilize a aplicação direta de um filtro passa-baixas irá gerar resultados com uma melhor relação sinal-ruído.

### **9.3 - Apresentação do Novo Algoritmo**

Como os saltos de fase não podem ser removidos na presença de ruído, o novo algoritmo é implementado com base nos resultados gerados pelo processo convencional, no qual primeiramente o sinal é filtrado e logo após os saltos de fase são removidos. Entretanto, o mapa de fase gerado é utilizado apenas como informação adicional no processo de remoção dos saltos de fase do sinal original. Desta forma, um sinal com ruído e sem saltos de fase é obtido. Ao implementar o novo algoritmo, seguem-se os seguintes passos:

- a) aplicação do método convencional seguindo os passos de (a) a (d) descritos em 9.2.
- b) remoção dos saltos de fase do sinal original (que contém ruído e saltos de fase), utilizando o mapa de fase obtido no passo anterior como referência.

- c) filtragem do sinal obtido no passo anterior, através de um filtro-passa baixas.

#### 9.4 - Modelagem Matemática do Novo Algoritmo

Dado o sinal com saltos de fase e ruído:

$$\Delta\phi(x,y) = \varphi(x,y) - 2\pi N(x,y) + \phi_e(x,y) \quad (9.1)$$

onde:

$\Delta\phi(x,y) \Rightarrow$  módulo  $2\pi$  da variação da fase causada pelo deslocamento do objeto;

$N(x,y) \Rightarrow$  número de voltas inteiras associadas ao ângulo de fase;

$\varphi(x,y) \Rightarrow$  variação completa da fase;

$\phi_e(x,y) \Rightarrow$  erro aleatório associado ao mapa de fase.

Aplicando-se o processo de filtragem por transformação sinusoidal:

$$\psi_1(x,y) = \cos(\Delta\phi(x,y)) \quad (9.2)$$

$$\psi_2(x,y) = \sen(\Delta\phi(x,y)) \quad (9.3)$$

$$\Delta\phi_r(x,y) = \text{tg}^{-1}\left(\frac{\psi_2(x,y)**h(x,y)}{\psi_1(x,y)**h(x,y)}\right) \quad (9.4)$$

onde:

$\Delta\phi_r(x,y) \Rightarrow$  mapa de fase filtrado;

$h(x,y) \Rightarrow$  resposta ao impulso de um filtro passa-baixas com fase linear.

Apos a filtragem o salto de  $\phi$  é removido, mas a posição dos saltos obtida não é a mesma que a obtida pela equação (9.1). Isto se deve ao fato da filtragem alterar o valor da componente contínua sobreposta ao mapa de fase, o que provoca o deslocamento dos saltos de fase do mapa filtrado em relação ao mapa original. Desta forma, tem-se:

$$\Delta\phi_r(x,y) = \phi(x,y) - 2\pi N'(x,y) + \phi_e'(x,y) \quad (9.5)$$

onde:

$N'(x,y) \Rightarrow$  novo número de voltas inteiras associadas ao ângulo de fase;

$\phi_e'(x,y) \Rightarrow$  erro não removido na filtragem.

Aplicando-se um algoritmo de remoção de saltos de fase no sinal  $\Delta\phi_r(x,y)$ , o valor de  $N'(x,y)$  é determinado. Desta forma, um sinal sem saltos de fase é obtido:

$$\Delta\phi_1(x,y) = \Delta\phi_r(x,y) + 2\pi N(x,y) \quad (9.6)$$

o mapa de fase obtido conterá apenas uma pequena parcela de ruído :

$$\Delta\phi_1(x,y) = \phi(x,y) + \phi_e'(x,y) \quad (9.7)$$

A fim de remover os saltos de fase de  $\Delta\phi(x,y)$ , com base em (9.1) determina-se  $N(x,y)$  através da seguinte equação :

$$N(x,y) = \text{Int}([\Delta\phi_1(x,y) - \phi(x,y)] / 2\pi) \quad (9.8)$$

como  $\Delta\phi_1(x,y)$  é aproximadamente igual a  $\phi(x,y)$ , tem-se:

$$N(x,y) = \text{Int}([\Delta\phi(x,y) - \Delta\phi_1(x,y)] / 2\pi) \quad (9.9)$$



Após o cálculo de  $N(x,y)$  um mapa de fase sem saltos de fase é obtido:

$$\Delta\phi_2(x,y) = \Delta\phi(x,y) + 2\pi N(x,y) \quad (9.10)$$

aplicando (9.10) em (9.1), tem-se:

$$\Delta\phi_2(x,y) = \varphi(x,y) + \phi_e(x,y) \quad (9.11)$$

Da equação (9.11), conclui-se que os saltos de fase foram removidos, sendo mantido o ruído original, que pode ser reduzido facilmente por filtragem passa-baixas, assim:

$$\Delta\phi_3(x,y) = \Delta\phi_2(x,y) ** h_1(x,y) \quad (9.12)$$

onde  $h_1(x,y)$  representa a resposta ao impulso de um filtro passa-baixas de fase linear.

Como a frequência de corte do filtro representado por  $h_1(x,y)$  é bem menor do que a do filtro  $h(x,y)$  o ruído não removido pelo filtro  $h_1(x,y)$  pode ser considerado desprezível, podendo ser realizada a seguinte aproximação:

$$\Delta\phi_3(x,y) = \varphi(x,y) \quad (9.13)$$

## 9.5 - Análise Realizada por Simulação

Foram realizadas simulações que serviram para validar o modelo utilizado e a viabilidade do método. As figuras a seguir mostram os resultados de simulação. Para um sinal de referência foram adicionados ruído e saltos de fase.

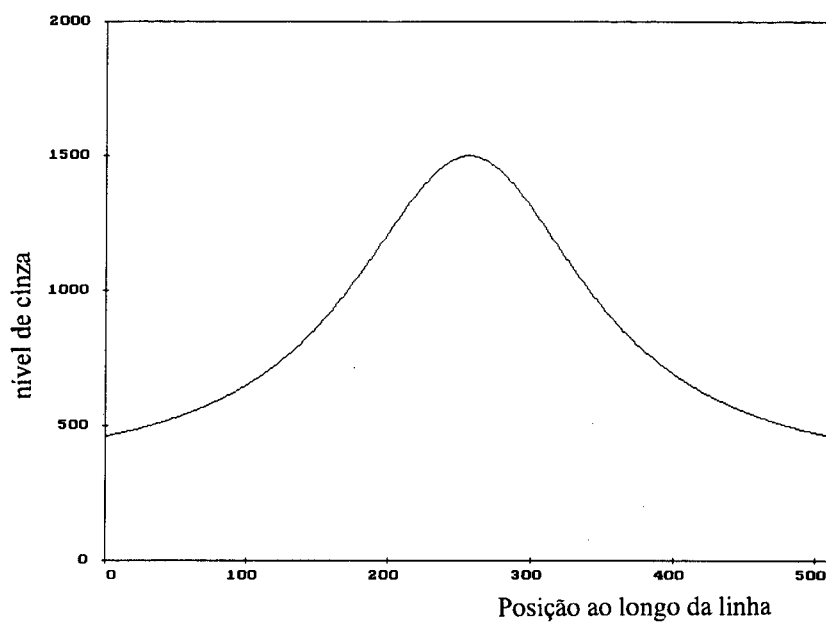
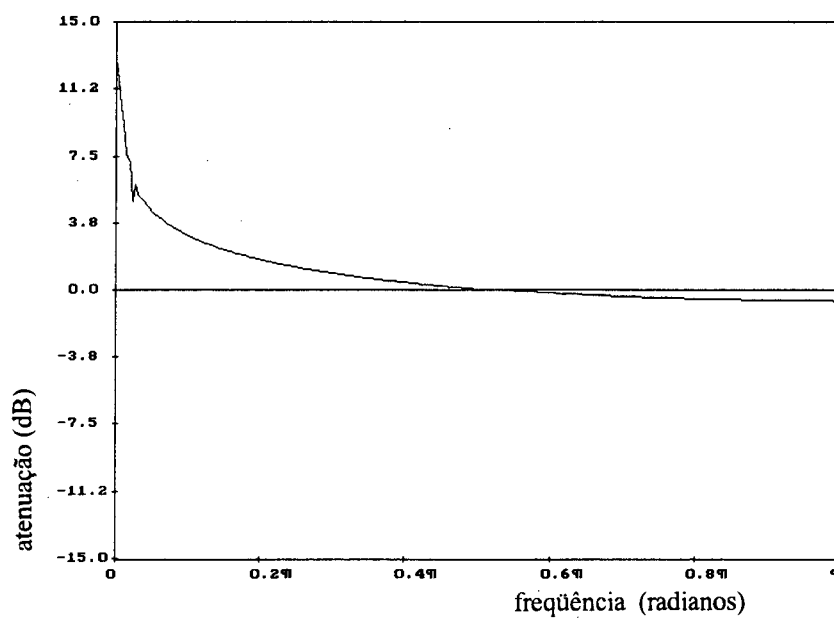
Fig. 9.1 - Sinal de referência ( $\varphi(x,y)$ ).

Fig. 9.2 - Espectro de frequência do sinal de referência.

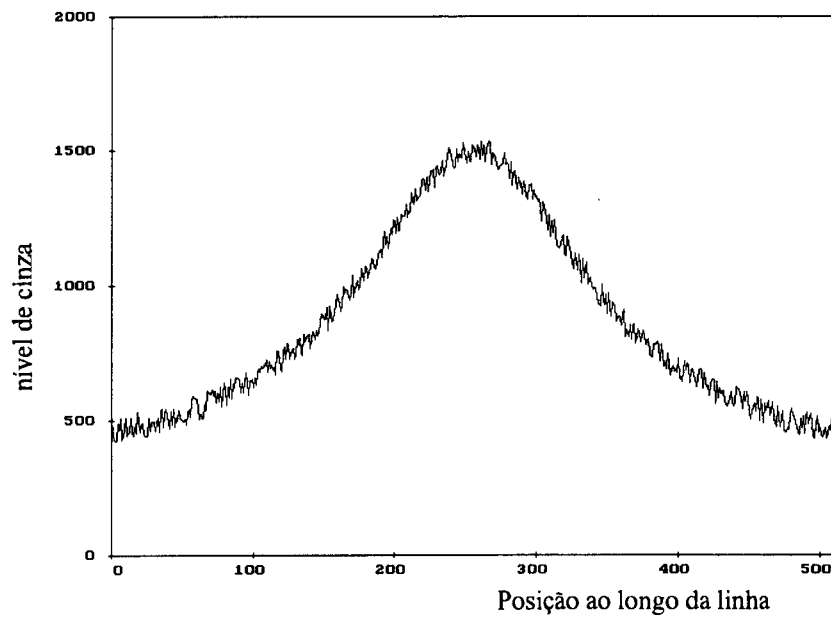


Fig. 9.3 - Sinal de referência adicionando-se ruído.

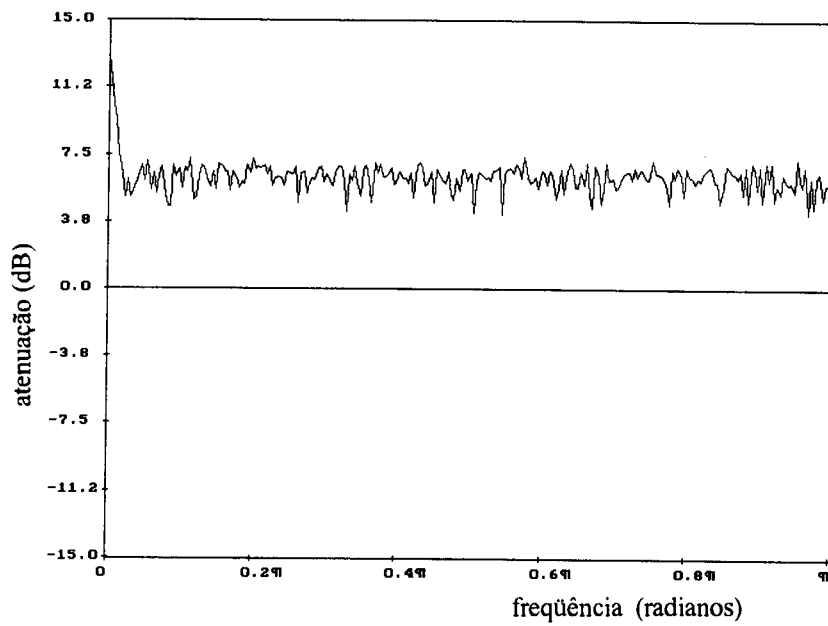


Fig. 9.4 - Espectro de frequência do sinal com ruído.

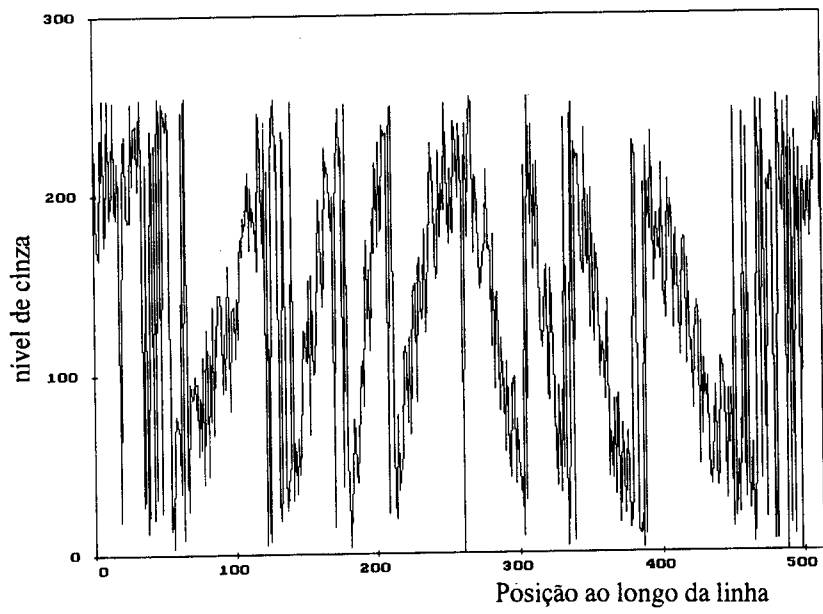


Fig. 9.5 - Sinal com ruído e saltos de fase  $\Delta\phi(x,y)$ .

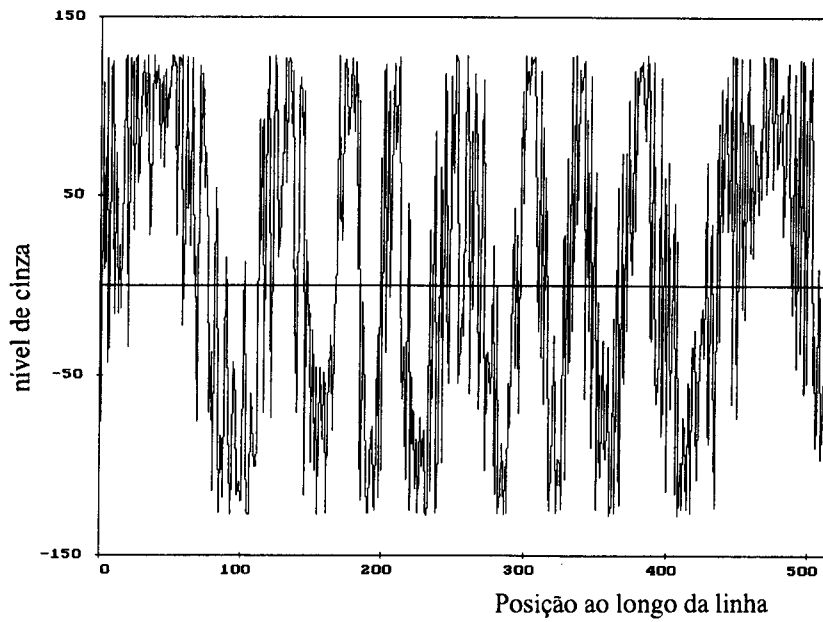


Fig. 9.6 - Cosseno do sinal com ruído.

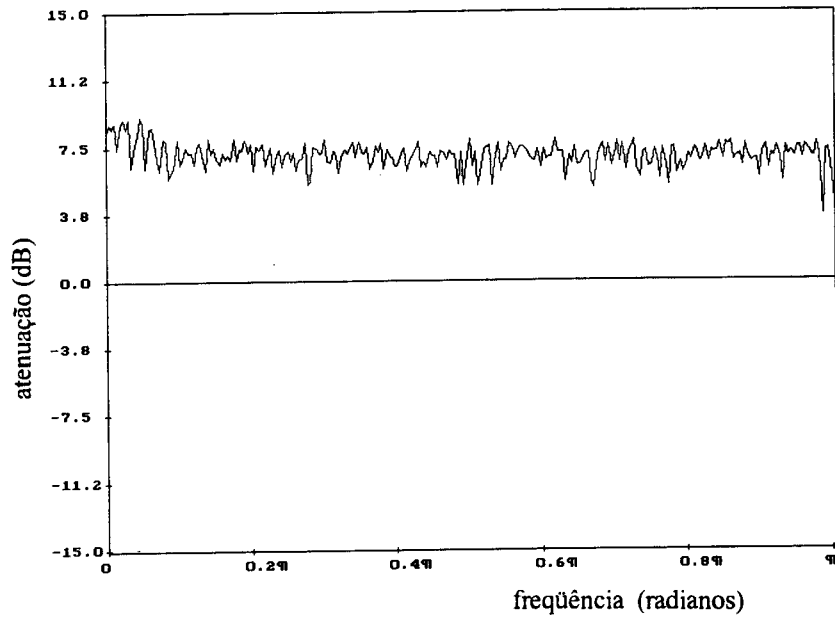


Fig. 9.7 - Espectro de frequência do cosseno do sinal com ruído.

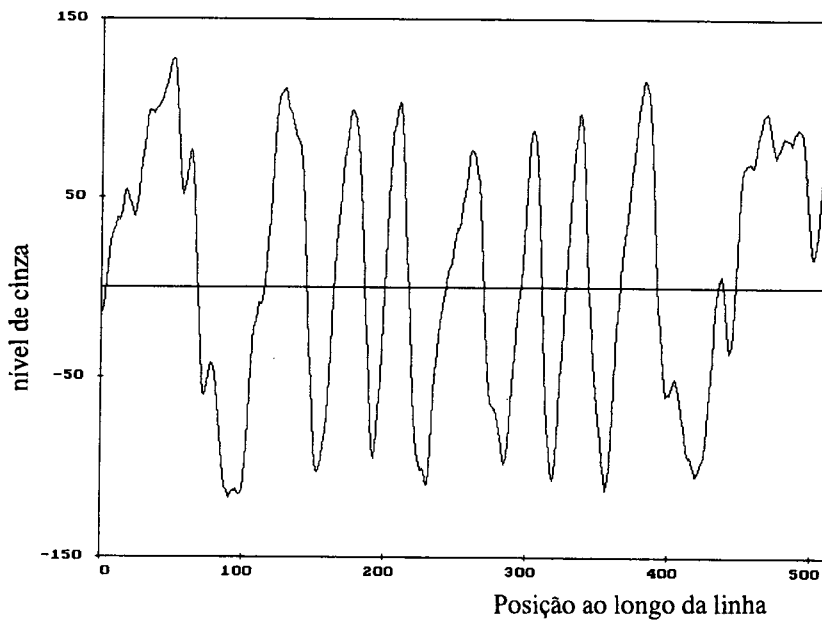


Fig. 9.8 - Cosseno do sinal com ruído filtrado.

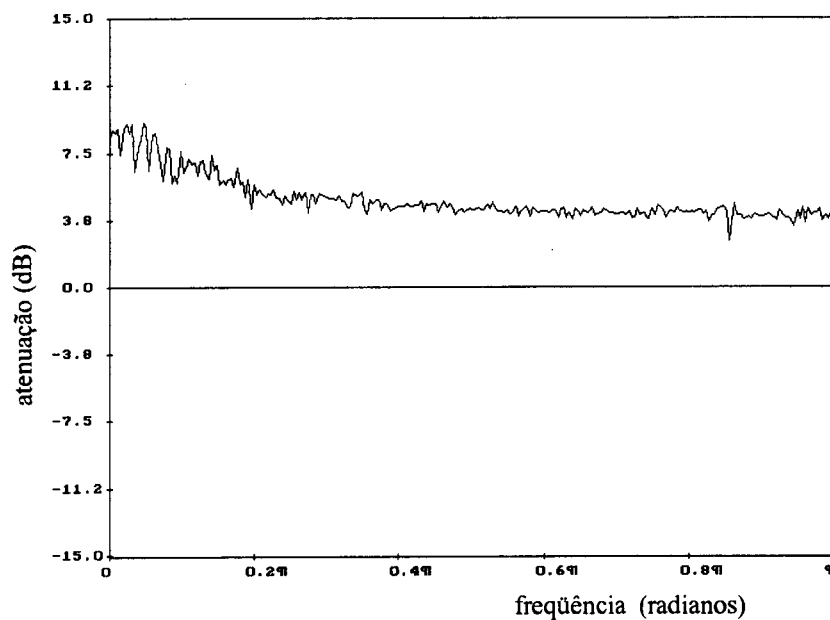


Fig. 9.9 - Espectro de frequência do cosseno do sinal com ruído filtrado.

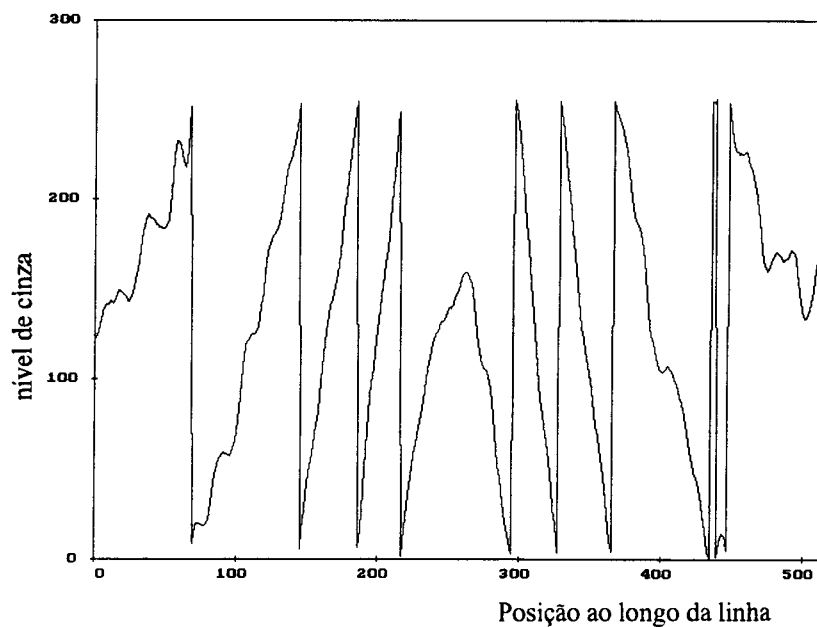


Fig. 9.10 - Sinal após a transformação tangente inversa.

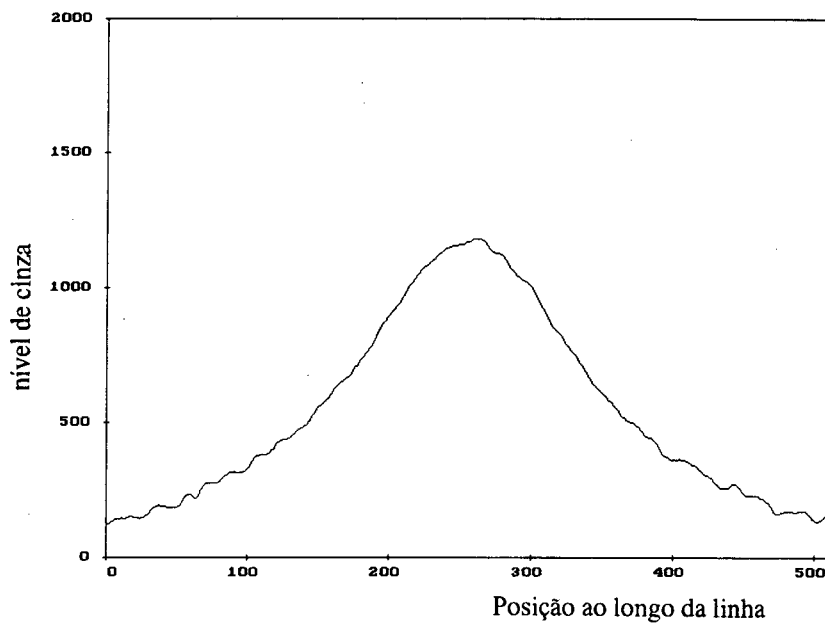


Fig. 9.11 - Sinal após a remoção dos saltos de fase ( $\Delta\phi_1(x,y)$ ).

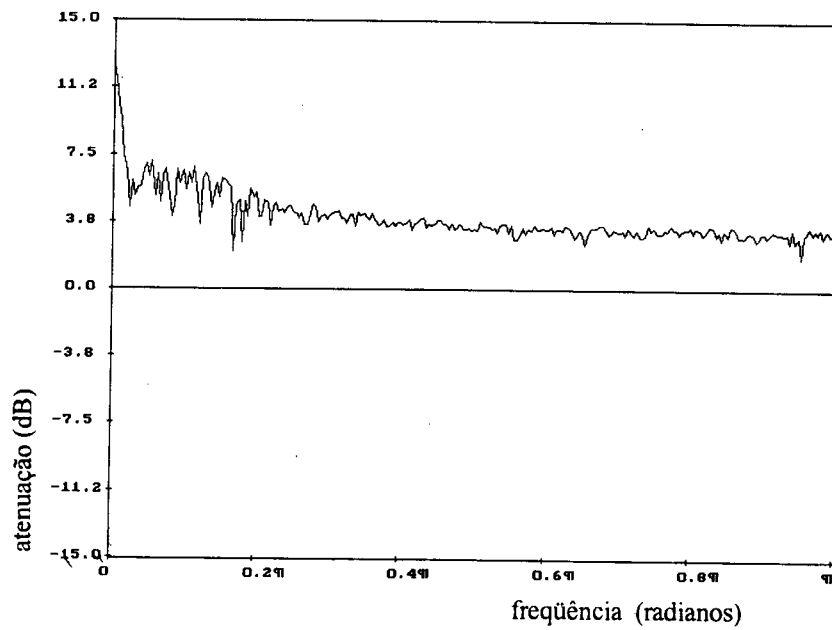


Fig. 9.12 - Espectro de frequência do sinal após a remoção dos saltos de fase.

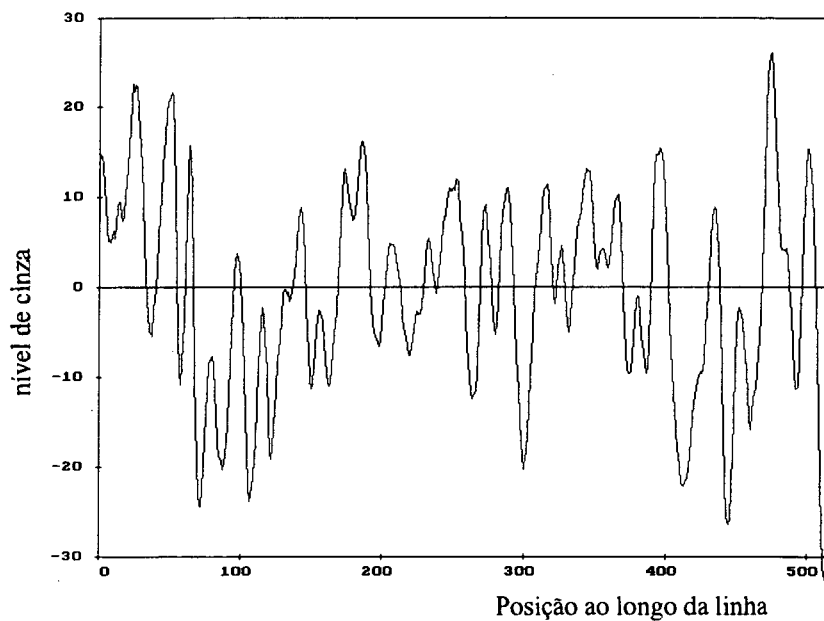


Fig. 9.13 - Erro presente no sinal  $\Delta\phi_1(x,y)$ .

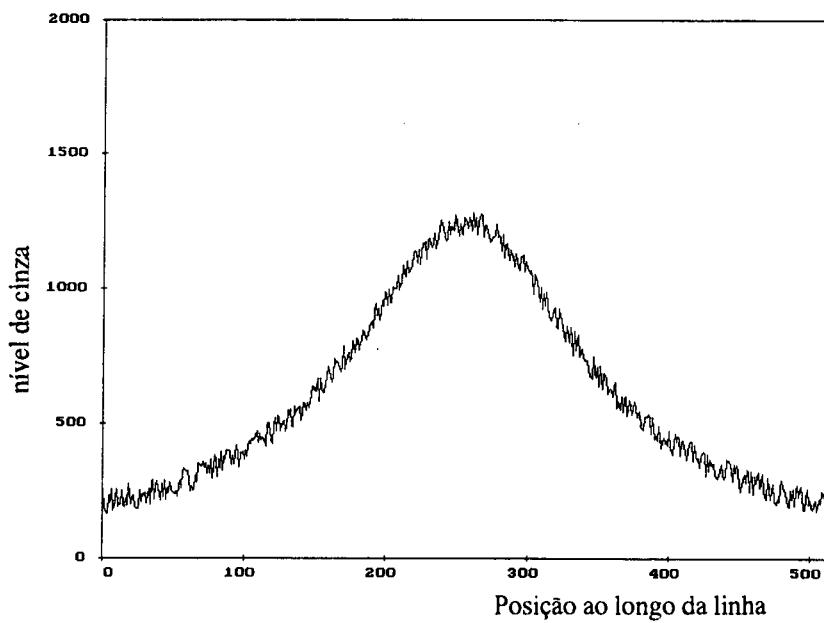


Fig. 9.14 - Sinal com ruído e sem saltos de fase.



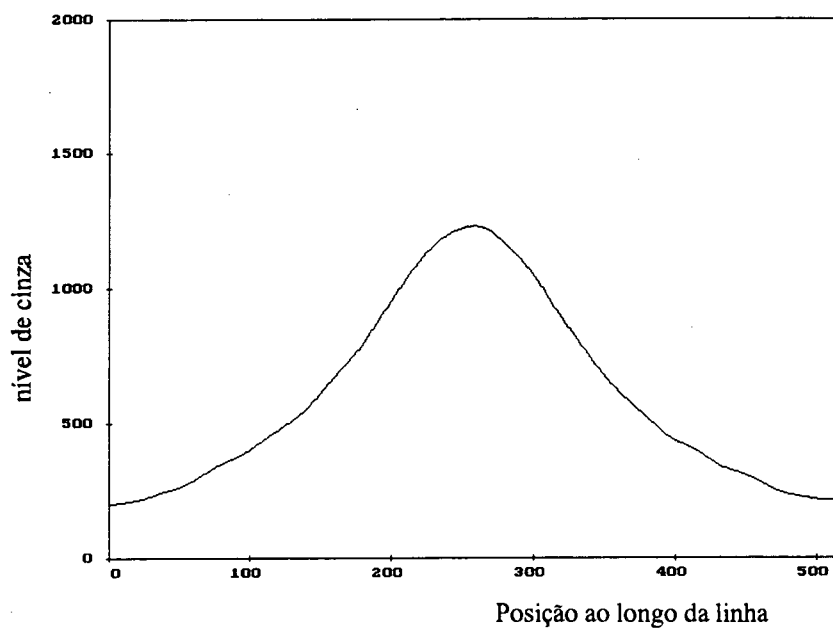
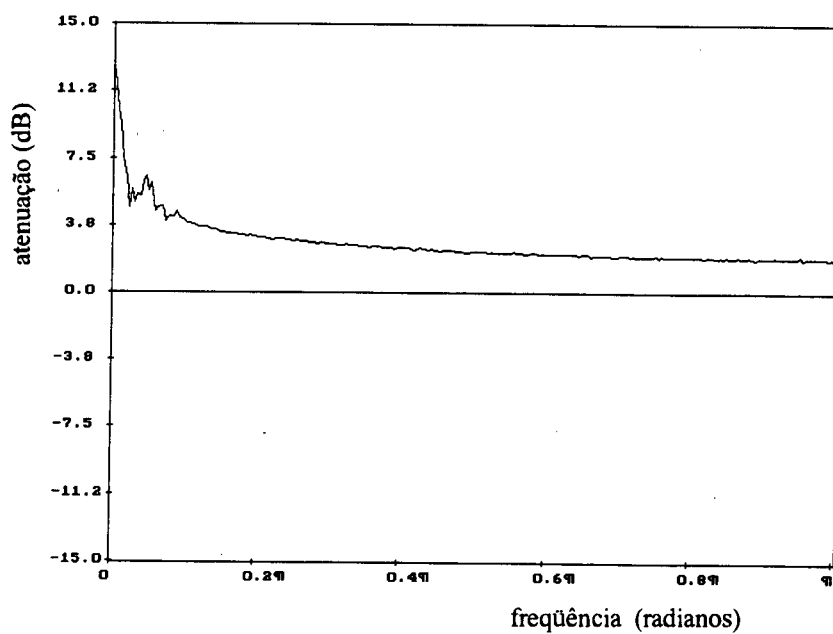
Fig. 9.15 - Sinal filtrado  $\Delta\phi_3(x,y)$ .

Fig. 9.16 - Espectro de frequência do sinal filtrado.

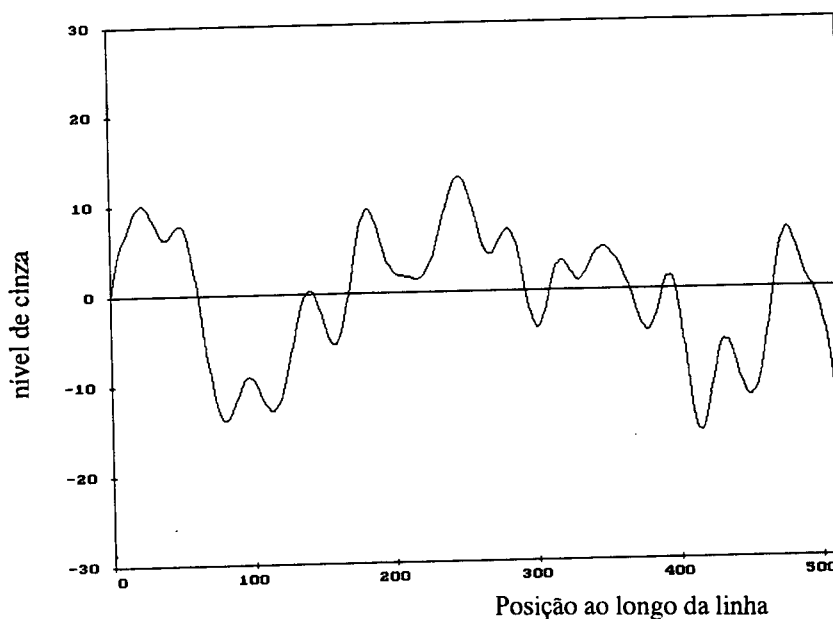


Fig. 9.17 - Erro presente no sinal  $\Delta\phi_3(x,y)$ .

## 9.6 - Conclusões

A avaliação dos ganhos do novo algoritmo é dificultada, pois, como são utilizados dois filtros distintos, o resultado obtido será fortemente dependente da especificação de cada filtro, cuja otimização irá depender do espectro do sinal a ser processado.

Entretanto, fica claro que o sinal obtido após a remoção dos saltos de fase varia de forma suave, podendo ser tratado através de um filtro passa-baixas com uma frequência de corte muito inferior à do filtro aplicado ao sinal obtido via transformação sinusoidal. Além disso, os resultados obtidos com o novo método de filtragem são mais previsíveis do que os obtidos pelo método convencional, haja vista que estes passam por uma transformação não linear que irá alterar o espectro de frequência obtido após a filtragem.

É interessante observar que em alguns casos o resultado da aplicação de transformação não linear são benéficos e melhoram a performance do filtro, entretanto devido às não linearidades, não é possível se ter um controle que indique quando esta melhoria está se processando.

## CAPÍTULO 10

### CONCLUSÕES

Neste trabalho três novos algoritmos para tratamento dos mapas de fases foram apresentados:

- i) Filtro com Ponderação de Amplitude ;
- ii) Algoritmo de Remoção de Saltos de Fase por Minimização da Energia do Erro de Fase;
- iii) Algoritmo de Filtragem após a Remoção de Saltos de Fase.

Estes algoritmos apresentam melhorias significativas quando comparados com os algoritmos atualmente empregados e podem ser considerados inéditos. Os mesmos foram desenvolvidos de forma analítica e foram testados e avaliados através de simulações em computador, como também, experimentalmente através dos resultados obtidos na Estação Holográfica desenvolvida pela fundação CERTI e pelo LABMETRO/UFSC.

A nova modelagem matemática do ruído presente nos mapas de fase, obtidos pelo método do Deslocamento de Fase, foi comprovada experimentalmente. Esta modelagem foi de fundamental importância para o desenvolvimento do Filtro com Ponderação de Amplitude.

A nova estrutura de filtro passa-baixas, proposta para o Filtro com Ponderação de Amplitude é genérica e pode também ser aplicada no processamento de qualquer tipo de sinal contaminado por ruído ponderado.

A implementação do Filtro com Ponderação de Amplitude leva a um maior esforço computacional (duas multiplicações a mais para cada ponto da imagem) e na obtenção do mapa de fase (método do Deslocamento de Fase) o fator de ponderação deve ser calculado e armazenado. Para os sistemas computacionais atualmente disponíveis este aumento de complexidade é praticamente desprezível. A melhor razão sinal-ruído proporcionada pelo novo filtro só pôde ser avaliada

por meio de simulações, haja vista que as incertezas envolvidas são muito pequenas e de difícil quantificação. Os ganhos mais significativos do Filtro com Ponderação de Amplitude são a eliminação das imagens falsas (artefatos) geradas pelos demais filtros nas regiões fora da peça e a diminuição das distorções nas proximidades das bordas da peça.

O Algoritmo de Remoção de Saltos de Fase por Minimização da Energia do Erro de Fase mostrou-se ineficiente no tratamento de grandes regiões da imagem, pois, para um grande número de pontos com problemas de remoção o erro não pode ser facilmente separado nas linhas e colunas. Desta forma em aplicações práticas optou-se pela realização das seguintes etapas:

- a) aplicação do algoritmo básico de remoção (que remove os saltos primeiro em uma coluna e depois em todas as linhas);
- b) definição manual das regiões (com no máximo 100x100 pontos) que contém problemas de remoção;
- c) aplicação do algoritmo de Remoção de Saltos de Fase por Minimização da Energia do Erro de Fase nas regiões definidas em (b).

Assim, o algoritmo pode ser aplicado de uma forma eficiente e o trabalho do operador foi facilitado, pois ele deve definir regiões retangulares que contenham problemas. Para o algoritmo anteriormente utilizado, o operador definia regiões que contornassem os pontos com problemas, o que é praticamente inviável para mapas de fase com grande quantidade de pontos com defeito.

A implantação do método foi dificultada pelo fato de que para o sistema de aquisição utilizado o tempo de leitura de uma coluna é 16 vezes maior do que o de uma linha (são lidos blocos de 16 colunas, sendo 15 descartadas e uma utilizada). Desta forma, a remoção dos saltos em colunas ficou sensivelmente mais lenta. Este problema pode ser contornado pela implementação de um *buffer* de otimização da leitura, o que está além do escopo deste trabalho.

O algoritmo de Remoção de Saltos de Fase por Minimização da Energia do Erro de Fase pode ser aplicado de forma automática pela divisão do mapa em regiões (por exemplo 25 regiões de 100x100 pontos). Devido ao tempo de processamento demandado, esta opção não foi implantada na Estação Holográfica. A rotina de separação dos erros em linhas e colunas, que é o ponto "chave" do novo algoritmo, foi implementada de uma forma trivial a qual pode vir a ser otimizada em futuros trabalhos.

O Algoritmo de Filtragem após a Remoção de Saltos de Fase foi avaliado apenas através de simulações em computador. As vantagens do novo algoritmo são bastante evidentes, haja vista que é muito mais fácil filtrar um mapa de fase que não contenha saltos de fase. A constatação destas vantagens é dificultada pelo fato das mesmas dependerem dos filtros passa-baixas empregados. A aplicação do algoritmo entretanto exige uma complexidade computacional duas vezes maior do que a do algoritmo convencional, o que é amplamente compensado pelos ganhos obtidos. Em alguns casos, os saltos de fase não são removidos corretamente e geram um erro de largura de um ponto. Para mapas com um elevado nível de ruído, foi constatada uma ocorrência média de um erro para cada 500 pontos. Este erro é facilmente eliminado pelo processo de filtragem.

Nesta dissertação foram abertas algumas possibilidades para novos trabalhos, podendo ser citado:

- a) Aplicação do Filtro com Ponderação de Amplitude a outros tipos de sinais;
- b) Otimização das rotinas de separação de erro do algoritmo de Remoção de Saltos de Fase por Minimização da Energia do Erro de Fase;
- c) Aplicação automática do algoritmo de Remoção de Saltos de Fase por Minimização da Energia do Erro de Fase;
- d) Aplicação experimental do algoritmo de Filtragem após a Remoção de Saltos de Fase e aprimoramento do mesmo, de forma a eliminar os pontos com erros.

Além disso a otimização dos filtros passa-baixas empregados no tratamento dos mapas de fase (com base nos parâmetros desse mapa), é um ponto crucial do processo, que pode ser abordado em futuros trabalhos.

## APÊNDICE 1

### A ESTAÇÃO HOLOGRÁFICA

#### **A1.1 - Introdução**

Os testes experimentais realizados no contexto deste trabalho foram obtidos através do sistema "Estação Holográfica". Desenvolvida pela Fundação CERTI e pelo LABMETRO, a Estação Holográfica foi idealizada para facilitar a aplicação da técnica de medição Holografia Eletrônica, permitindo inclusive o seu uso por parte da indústria. Neste apêndice, estão descritos os elementos que compõem a Estação Holográfica e os procedimentos para utilização da mesma.

#### **A1.2 - Composição da Estação Holográfica**

Os principais elementos da estação holográfica [33], baseada no método de deslocamento de fase (*phase shifting*), são apresentados na Figura A1.1.

##### **A1.2.1- Mesa para Montagem e Suportes de Fixação**

A mesa utilizada para montagem da estação holográfica deve ser fixada sobre amortecedores que minimizem os problemas de vibração. A superfície da mesa serve de plano de referência para as montagens.

É importante que a mesa possua furos onde possam ser atarraxados suportes para fixação das fibras ópticas e os demais componentes da estação holográfica.

A posição espacial dos furos e suportes deve ser conhecida com precisão, pois da distribuição espacial dos pontos de observação e iluminação serão determinados os vetores de sensibilidade ao deslocamento.

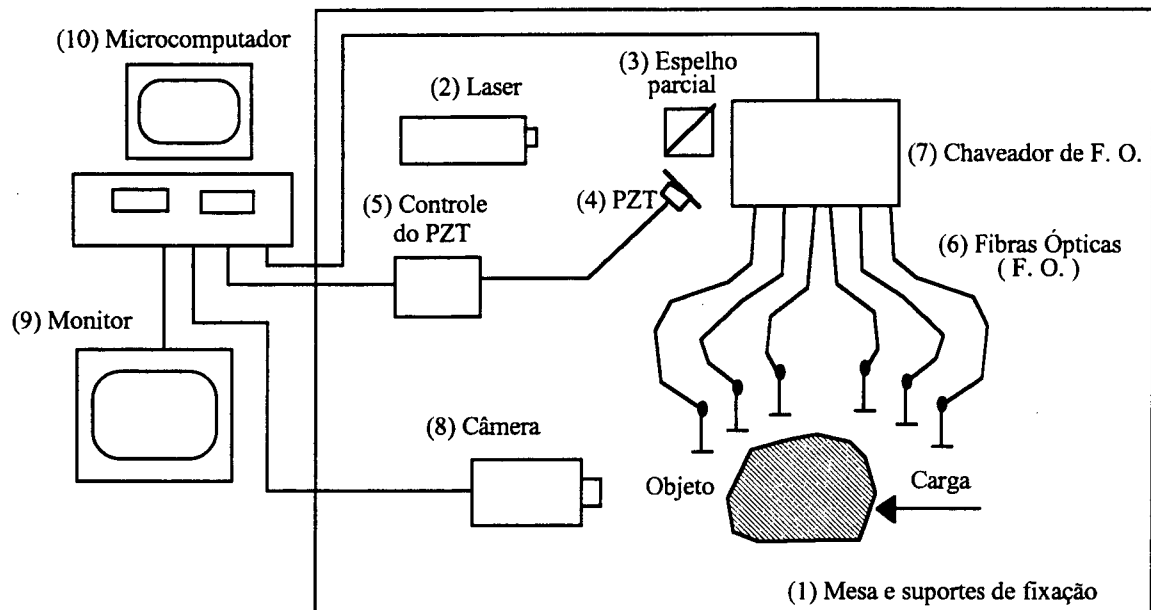


Fig. A1.1 - Elementos que compõem a Estação Holográfica

### A1.2.2 - Laser

O laser normalmente utilizado na holografia é o Hélio-Neônio (HeNe) que emite luz vermelha com comprimento de onda de  $0,6328 \mu\text{m}$  e potência da ordem de 35mW. Para esta potência do laser não ocorrem problemas de queimaduras, mas devem ser tomados cuidados para que o feixe não atinja os olhos do operador através da utilização de óculos especiais que bloqueiam a radiação vermelha.

### A1.2.3 - Espelho Parcial

O espelho parcial é utilizado para dividir o feixe de laser em dois. Um dos feixes ilumina diretamente a peça e o outro passa pelo espelho de deslocamento de fase antes de iluminar a peça.

#### **A1.2.4 - Espelho de Deslocamento de Fase**

O espelho de deslocamento de fase é montado sobre um microdeslocador piezoelétrico (PZT) que ao se deslocar varia o comprimento do caminho óptico. Com esta variação, a fase relativa entre os dois feixes de laser é alterada. O PZT (Microdeslocador Piezoelétrico) pode ser utilizado pois o deslocamento máximo necessário é menor do que 1  $\mu\text{m}$ .

#### **A1.2.5 - Controle do Microdeslocador Piezoelétrico (PZT)**

O módulo de controle do PZT é um circuito eletrônico que determina o deslocamento do PZT com base em um sinal de referência, proveniente de uma placa de conversão digital analógica instalada no microcomputador.

#### **A1.2.6 - Fibras Ópticas**

As fibras ópticas são utilizadas para conduzir os feixes de laser até a peça a ser medida. A utilização de fibras ópticas permite o posicionamento preciso dos vários pontos de iluminação necessários para geração dos vetores de sensibilidade.

#### **A1.2.7 - Chaveador de Fibras Ópticas**

O chaveador de fibras ópticas é um dispositivo que possui uma entrada para o feixe de laser e várias saídas aonde estão montadas uma série de fibras ópticas. O chaveador é composto de uma série de espelhos que ao serem deslocados direcionam o feixe de laser para qualquer uma das fibras. O movimento dos espelhos é realizado por meio de dispositivos eletro-magnéticos, comandados por uma placa que suporta saídas digitais instalada no microcomputador.

O chaveador permite que os 6 pontos de iluminação necessários para medição de deslocamentos tridimensionais (são necessários 3 vetores de sensibilidade e cada vetor é obtido por dois pontos de iluminação) sejam comutados automaticamente. A realização manual desta comutação iria implicar



em um incremento considerável de tempo acarretando, assim, em aumento dos erros sistemáticos.

#### **A1.2.8 - Câmera de Vídeo**

O principal componente da câmera de vídeo é o CCD (*Charge Coupled Device*) que é formado por um conjunto de elementos fotossensíveis que captam a intensidade luminosa e geram sinais elétricos proporcionais a esta intensidade. Os sinais elétricos gerados são codificados em um padrão de vídeo, (normalmente o RS-170) que pode ser enviado diretamente a um monitor de vídeo. O sistema óptico e mecânico da câmera normalmente permite o ajuste de foco, de ampliação e de abertura que possibilita o ajuste das imagens obtidas.

#### **A1.2.9 - Monitor de Vídeo**

O monitor de vídeo possui uma entrada RGB que recebe imagens da câmera de vídeo ou da placa de aquisição. O monitor permite a visualização em tempo real das imagens processadas que normalmente são monocromáticas com 256 níveis de cinza. Imagens coloridas podem ser geradas através da configuração de três "*Look-up tables*" da placa de aquisição. Cada "*Look-up table*" gera um dos componentes RGB e, através da programação das mesmas, o sinal monocromático pode ser utilizado na geração de imagens com cores falsas, o que facilita a visualização dos dados (como por exemplo, os pontos de saturação da imagem).

#### **A1.2.10 - Microcomputador**

O microcomputador irá realizar todo o controle da estação holográfica através das seguintes interfaces:

- a) placa de conversão D/A que gera o sinal de referência para o circuito de controle do PZT que varia a fase dos feixes de laser;
- b) placa de saídas digitais que gera os sinais para controlar o chaveador de fibras ópticas.

- c) placa de aquisição e processamento de imagens que recebe e processa os sinais de vídeo provenientes da câmera e gera os sinais para o monitor de vídeo.

Apesar do maior volume de processamento ser realizado diretamente pela placa, uma parte do tratamento das imagens e as operações de leitura e gravação em meio magnético devem ser realizadas pelo microcomputador. Desta forma, é recomendável o emprego de um microcomputador com alta capacidade de processamento e de armazenamento. Um microcomputador tipo IBM-PC 486 com 8 Mbytes de RAM e *Winchester* de 200 Mbytes atende de forma satisfatória estes requisitos.

Normalmente o valor do módulo da fase, que varia de  $-\pi$  a  $+\pi$  é escalonado para ocupar uma faixa compatível com a resolução dos sistemas de armazenamento de imagens. Para uma imagem armazenada com 8 bits de resolução (256 níveis) o valor -128 representa  $-\pi$  e o valor 127 representa  $+\pi$ . Para esta representação, o valor total da fase pode ser considerado como um número inteiro de 16 bits, dividido em 2 bytes do qual se conhece apenas o byte menos significativo. O valor da ordem de franja obtido por um algoritmo de remoção de saltos de fase pode ser tratado diretamente como sendo o byte mais significativo do valor da fase.

#### **A1.2.11 - Placa de Aquisição e Processamento de Imagens**

A placa de aquisição e processamento de imagens é instalada no barramento do microcomputador e recebe o sinal de vídeo proveniente da câmera de vídeo. O sinal de vídeo é digitalizado e armazenado em uma matriz retangular (normalmente de 512 linhas e 512 colunas, com resolução de 8 bits, ocupando 250 kbytes de memória) onde cada elemento da matriz representa a intensidade captada por um ponto do CCD. As placas atualmente disponíveis no mercado permitem o armazenamento de mais de uma imagem (normalmente de 4 a 16 imagens) e possibilitam a manipulação das imagens em formatos inteiros (16 bits) ou em ponto flutuante (32 bits).

A placa de aquisição possui uma Unidade Lógico Aritmética (ULA) dedicada ao processamento de imagens em tempo real. Outra forma de manipulação das imagens em tempo real é a utilização das tabelas de conversão (*Look-up table*) disponíveis na placa de aquisição.

O microcomputador pode manipular diretamente as imagens obtidas utilizando funções de leitura via DMA (*Direct Memory Access*), ou indiretamente enviando comandos que serão executados através da ULA da placa.

#### **A1.2.12 - Software de Aquisição e Controle**

O *software* de aquisição e controle da estação holográfica é bastante complexo e realiza uma série de funções, a saber:

- a) determina os vetores de sensibilidade e demais parâmetros de medição com base em dados alimentados de forma manual;
- b) auxilia no processo de ajuste da câmera e dos parâmetros ópticos e de iluminação através de histogramas e da identificação dos pontos de saturação;
- c) controla a Estação Holográfica variando o ângulo de fase e os vetores de sensibilidade;
- d) realiza a aquisição das imagens;
- e) armazena e lê imagens no *winchester*;
- f) processa as imagens adquiridas para obtenção dos mapas de fase;
- g) aplica o algoritmo de remoção de saltos de fase;
- h) determina os deslocamentos com base nos vetores de sensibilidade e mapas de fase;
- i) determina as cargas, tensões e deformações com base nos deslocamentos tridimensionais;
- j) gera relatórios sob a forma de gráficos e tabelas.

Devido a esta complexidade, normalmente são utilizados vários programas que controlam etapas distintas do processo. Os *softwares* utilizados na Estação Holográfica, referenciada neste trabalho, foram desenvolvidos em linguagem "C". Esta linguagem permite o desenvolvimento de programas rápidos e flexíveis, além disso, muitas rotinas disponíveis para controle da placa de aquisição de imagens e demais periféricos estão escritas nesta linguagem.

### **A1.3 - Manipulação da Estação Holográfica**

Podemos dividir o processo de manipulação da estação holográfica em 4 etapas distintas:

- a) operações de ajuste da estação;
- b) operações de medição;
- c) operações de processamento;
- d) operações de análise dos dados gerados.

A seguir estas operações são detalhadas:

#### **A1.3.1 - Operações de Ajuste da Estação**

As operações de ajuste da estação holográfica seguem as seguintes etapas:

- a) fixação do objeto sob teste;
- b) posicionamento das fibras ópticas e determinação dos pontos de iluminação;
- c) posicionamento e ajuste da câmera de vídeo;
- d) fornecimento de parâmetros para o *software* de controle da estação;

#### **A1.3.2 - Operações de Medição**

As operações de medição seguem as seguintes etapas:

- a) execução do *software* de controle da estação para aquisição das imagens do objeto sem deformação;
- b) aplicação de carga mecânica que cause alguma deformação no objeto sob teste;
- c) execução do *software* de controle que irá adquirir as imagens do objeto deformado e realizar o processamento das mesmas.

### **A1.3.3 - Operações de Processamento**

As operações de processamento seguem as seguintes etapas:

- a) seleção dos parâmetros dos filtros a serem aplicados no processamento das imagens;
- b) seleção das regiões da imagem a serem tratadas pelo algoritmo de remoção de saltos de fase;
- c) armazenamento dos dados processados.

### **A1.3.4 - Operações de Análise**

As operações de análise irão depender do tipo de experimento e dos resultados esperados, sendo que estão disponíveis várias formas de tratamento para os dados obtidos através da holografia eletrônica. As técnicas de análise que vão desde a determinação de parâmetros de funções analíticas até a utilização de elementos finitos, estão além do escopo desta dissertação, sendo que, estão disponíveis, atualmente, vários artigos que tratam especificamente do processamento de dados obtidos por holografia eletrônica.

## APÊNDICE 2

### FILTRO PONDERADO - MODELAGEM E DESENVOLVIMENTO

#### A2.1 - Introdução

Como foi exposto no Capítulo 4, o ruído presente no mapa de fase é inversamente proporcional ao fator de modulação dos *speckles*. O filtro ponderado foi desenvolvido com base na premissa de que é possível otimizar o processo de filtragem dando uma maior importância à informação contida nos pontos com elevado fator de modulação. Neste apêndice, uma nova configuração de filtro passa-baixas, que leva em conta um fator de ponderação associado ao ruído foi desenvolvido.

#### A2.2 - Modelagem

Por simplicidade apresentamos a dedução do filtro ponderado para sinais unidimensionais, sem perda de generalidade.

Dado o sinal a ser filtrado  $y(n)$ , que pode ser modelado por:

$$y(n) = x(n) + \frac{\varepsilon(n)}{k(n)}, \quad n = 0, \dots, N \quad (\text{A2.1})$$

onde:

$x(n) \Rightarrow$  sinal original;

$\varepsilon(n) \Rightarrow$  ruído aleatório;

$k(n) \Rightarrow$  sinal aleatório de ponderação do ruído,  $0 < k(n) < 1$ , para qualquer  $n$  ;

$y(n) \Rightarrow$  sinal com ruído.

Os sinais  $k(n)$  e  $y(n)$  são conhecidos e o sinal  $x(n)$  deve ser recuperado através de um filtro ponderado, como está ilustrado na Figura A2.1 .

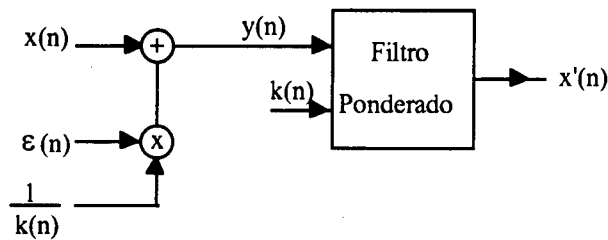


Fig. A2.1- Diagrama da estrutura do filtro ponderado

### A2.3 - Análise

O sinal de ponderação de amplitude ( $k(n)$ ) pode ser decomposto em duas componentes:

$$k(n) = k_0 + k_1(n) \quad (\text{A2.2})$$

onde  $k_0$  que é a componente contínua do sinal de ponderação é dado por:

$$k_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N k(n) \quad (\text{A2.3})$$

Obtido  $k_0$ , da equação (A2.2) calcula-se  $k_1(n)$ , que é a componente alternada do sinal de ponderação:

$$k_1(n) = k(n) - k_0 \quad (\text{A2.4})$$

Dado que  $x(n)$  é limitado em frequência é sempre possível definir um filtro passa-baixas cuja resposta ao impulso,  $h(n)$ , satisfaça a seguinte equação:

$$x(n) * h(n) = x(n) \quad (\text{A2.5})$$

Utilizando  $h(n)$  para filtragem de  $y(n)$ , um novo sinal é obtido:

$$x_1(n) = y(n) * h(n) \quad (\text{A2.6})$$

aplicando a equação (A2.1) em (A2.6), obtém-se :

$$x_1(n) = h(n) * \left( x(n) + \frac{\varepsilon(n)}{k(n)} \right)$$

$$x_1(n) = h(n) * x(n) + h(n) * \frac{\varepsilon(n)}{k(n)} \quad (\text{A2.7})$$

Utilizando a condição apresentada na equação (A2.5) em (A2.7), tem-se:

$$x_1(n) = x(n) + h(n) * \frac{\varepsilon(n)}{k(n)} \quad (\text{A2.8})$$

onde um erro  $\varepsilon_1(n)$ , não removido pela filtragem, é dado por:

$$\varepsilon_1(n) = x_1(n) - x(n) = h(n) * \frac{\varepsilon(n)}{k(n)} \quad (\text{A2.9})$$

Aplicando a equação (A2.2) em (A2.9), tem-se:

$$\varepsilon_1(n) = h(n) * \frac{\varepsilon(n)}{k_0 + k_1(n)} \quad (\text{A2.10})$$



Analisando a equação (A2.10) verifica-se que quando o fator  $k_1(n)$  assumir valores próximos de  $-k_0$  o erro será elevado. Desta forma, fica claro que se a influência  $k_1(n)$  for minimizada o erro resultante será menor.

Dada a hipótese de que sendo conhecidos os sinais  $k(n)$  e  $y(n)$ , é possível obter, a partir de uma função  $F(\cdot)$ , um novo sinal  $x'(n)$  que contém um erro  $\varepsilon'(n)$  cuja a influência do sinal  $k_1(n)$  é mínima. Assim, por hipótese, as seguintes equações podem ser escritas:

$$x'(n) = F(y(n), k(n), h(n)) \quad (\text{A2.11})$$

$$x'(n) = x(n) + \varepsilon'(n) \quad (\text{A2.12})$$

onde  $\varepsilon'(n)$  é dado por:

$$\varepsilon'(n) = h(n) * \frac{\varepsilon(n)}{k_0}$$

$$\varepsilon'(n) = \frac{1}{k_0} h(n) * \varepsilon(n) \quad (\text{A2.13})$$

Aplicando a equação (A2.13) em (A2.12), vem:

$$x'(n) = x(n) + \frac{1}{k_0} h(n) * \varepsilon(n) \quad (\text{A2.14})$$

O valor de  $k_0$  pode ser aproximado pela filtragem do sinal  $k(n)$ , sendo válida a seguinte equação:

$$k_0 = k(n) * h(n) \quad (A2.15)$$

aplicando a equação (A2.15) em (A2.14), tem-se :

$$x'(n) = x(n) + \frac{\varepsilon(n) * h(n)}{h(n) * k(n)}$$

$$x'(n) = \frac{x(n)[h(n) * k(n)] + \varepsilon(n) * h(n)}{h(n) * k(n)} \quad (A2.16)$$

Assumindo que o sinal  $x(n)$  é suave [34] se comparado com  $k(n)$ , a seguinte aproximação pode ser escrita:

$$x(n)[h(n) * k(n)] \cong h(n) * [x(n) k(n)] \quad (A2.17)$$

aplicando a equação (A2.17) em (A2.16):

$$x'(n) = \frac{h(n)[x(n) * k(n)] + \varepsilon(n) * h(n)}{h(n) * k(n)}$$

$$x'(n) = \frac{h(n) * [k(n)(x(n) + \frac{\varepsilon(n)}{k(n)})]}{h(n) * k(n)} \quad (A2.18)$$

Substituindo a equação (A2.1) em (A2.18), vem:

$$x'(n) = \frac{h(n) * [k(n)y(n)]}{h(n) * k(n)} \quad (A2.19)$$

Assim, obtém-se a expressão (A2.11), reescrita aqui:

$$x'(n) = F(y(n), k(n), h(n)).$$

Por hipótese, da aplicação de (A2.19), obtém-se as equações (A2.12) e (A2.14), rescritas abaixo:

$$x'(n) = x(n) + \varepsilon'(n)$$

$$x'(n) = x(n) + \frac{1}{k_0} h(n) * \varepsilon(n)$$

Como queríamos demonstrar, através da equação (A2.19), um sinal  $x'(n)$ , que não é influenciado pela componente alternada de  $k(n)$ , pode ser obtido a partir dos sinais  $k(n)$  e  $y(n)$ . O sistema obtido, pela aplicação da equação (A2.19), é demoninado por "Filtro com Ponderação de Amplitude".

Utilizando a condição apresentada na equação (A2.5) em (A2.14), tem-se:

$$x'(n) = h(n) * [ x(n) + \frac{1}{k_0} \varepsilon(n) ]. \quad (A2.20)$$

A equação (A2.20) mostra que o sinal resultante da filtragem com ponderação de amplitude é o mesmo que seria obtido da filtragem de um sinal com ruído multiplicado pelo fator  $\frac{1}{k_0}$ . Desta forma, podemos considerar que o filtro com ponderação de amplitude elimina o efeito da componente alternada do fator de modulação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]C. A. SCIAMMARELA; G. BHAT; N. LONGINOW; M. ZHAO. "A High Accuracy Micromechanics Displacement Measure Optical Technique". *The winter Annual Meeting of the American Society of Mechanical Engineers*, San Francisco - CA - USA, 1988, pp. 121-132.
- [2]D. GABOR. "A New Microscopic Principle". *Nature* 161, maio 1948, pp. 177-178.
- [3]D. GABOR. " Microscopy by Reconstructed Wave-fronts", *Proc. Roy. Soc.* 197A, julho 1949, pp. 9454-9487.
- [4]T. MATSUMOTO; K. IWATA; R NAGATA. "Mesuring Accuracy of Three-dimensional Displacement in Holographic Interferometry". *Appl. Optics*, Vol.12 (5), 1973, pp. 961-967.
- [5]C. WYKES; R. JONES. "Holographic and Speckle Interferometry". *Cambride University Press*, Segunda edição, 1989.
- [6]C. M. VEST. "Holographic Interferometry ". *John Wiley and Sons*, 1979.
- [7]K. CREATH. "Phase-shifting Speckle Interferometry". *Appl. Optics*, Vol. 24 (18), 1985, pp.3035-3038.
- [8]E. VIKHAGEN. "Nondestructive testing by use of TV holography and deformation phase gradient calculation". *Appl. Optics*, Vol. 29 (1), 1990, pp. 137-144.

- [9]K. A. STETSON. "Theory and Applications of Eletronic Holography". *Proceedings of the International Conference on Interferometry and Speckle Metrology*, 1990, pp. 294.
- [10]A. A. GONÇALVES; A. W. KAPP; A. MANZOLLI. "Um Sistema Pratico para Aplicação da Holografia Eletrônica na Análise Experimental de Tensões". *Anais COBEM*, 1991.
- [11]G. S. COUTINHO. "Técnicas Híbridas para Análise de Tensões Combinando Elementos Finitos e Holografia Eletrônia - Uma Contribuição". *Dissertação de mestrado, Engenharia Mecânica - UFSC*, 1993.
- [12]A. A. GONÇALVES. "Medição de microdeslocamentos tridimensionais e deformação pela holografia interferométrica autocalibrada". *Tese de doutorado, Engenharia Mecânica - UFSC*, abril 1989.
- [13]P. CHIANG; A. A. BEATTY. "Subjective laser speckle method and its application on solid mechanics problems". *Optical Engineering*, Vol. 21 (3), 1982, pp. 379-390.
- [14]T. M. KREIS; J. GELDMACHER. "Evaluation of Interference Patterns a comparison of methods". *Proceedings of the International Conference on Interferometry and Speckle Metrology, Moiré Technics, Holographic Interferometry, Optical NDT and aplications to Fluid Mechanics*, Vol. 1554B, 1991, pp. 718-724.
- [15]T. YATAGAI; S. NAKADATE; H. SAITO. "Automatic Fringe Analysis Using Digital Image Processing Techniques". *Optical Engineering*, Vol. 21 (3), Maio 1982, pp. 432-435.

- [16]K. CREATH. "Phase-measurement Techniques for Nondestructive Testing". *Proceedings of the International Conference on Interferometry and Speckle Metrology, Moiré Technics, Holographic Interferometry, Optical NDT and applications to Fluid Mechanics*, Vol. 1554B, 1991, pp. 701-707.
- [17]T. KREIS; W. JÜPTNER. "Digital processing of holographic interference patterns using Fourier-Transform methods". *Measurement*, Vol 6 (1), janeiro 1998, pp. 37-40.
- [18]K. KINNSTAETTER; A. LOHMANN; J. SCHWIDER; N. STREIBL; "Accuracy of Phase Shifting Interferometry". *Appl. Optics* , Vol. 27, 1988, pp. 5082-5089.
- [19]J. SCHWIDER; R. BUROW; K. ELSSNER; J. GRZANNA; R. SPOLACZYK; K. MERKEL. "Digital Wave-front Measuring Interferometry : Some Systematic Error Sources". *Appl. Optics* , Vol. 22, 1983, pp. 3421-3432.
- [20]K. KINNSTAETTER; A. W. LOHMANN; J. SCHWIDER; N. STREIBL. "Acuracy of Phase Shifting Interferometry". *Appl. Optics*, Vol. 27 (24), Dezembro 1988, pp 5082-5089.
- [21]C. JOENATHAN; B. M. KHORANA. "Phase Measuring Fiber Optic ESPI System: Phase Step Calibration and Error Sources". *Proceedings of the International Conference on Interferometry and Speckle Metrology, Moiré Technics, Holographic Interferometry, Optical NDT and applications to Fluid Mechanics* , Vol. 1554B, 1991, pp. 56-63.
- [22]E. VIKHAGEN. "Nondestructive testing by use of TV holography and deformation phase gradient calculation". *Appl. Optics*, Vol. 29 (1), 1990, pp. 137-144.

- [23]A. ALBERTAZI. "Determination Of Displacements , Strain And Rotations From Holographic Interferometry Data Using 2-D Fringe Order Function". *Proceedings of the International Conference on Interferometry and Speckle Metrology, Moiré Technics, Holographic Interferometry, Optical NDT and applications to Fluid Mechanics* , Vol. 1554B, 1991, pp. 64-70.
- [24]A. ALBERTAZI; R. SEARA; P. B. ULIANA. "A New Amplitude Weighted Filtering Technique for Noise Reduction in Images with  $2\pi$  Phase Jumps ". *Proceedings of the International Conference on Interferometry and Speckle Metrology, Interferometry VI: Techniques and Analysis*, San Diego - California - USA, Julho 1993, pp. 312-323.
- [25]K. ITOH. " Analysis of the Phase Unwrapping Algorithm". *Appl. Optics*, Vol. 21, 1982, pp. 2470.
- [26]W. OSTEN; R. HÖFLING. " The Inverse Modulo Process in Automatic Fringe Analysis - Problems and Approaches". *Proceedings of the International Conference on Interferometry and Speckle Metrology*, 1992, pp. 301-309.
- [27]J. E. GREIVENKAMP; " Sub-Nyquist Interferometry ". *Appl. Optics*, Vol. 26 (24) , Dezembro 1987, pp. 5245-5258.
- [28]J. J. GIERLOFF. "Phase Unwrapping by regions". *Proceedings of the International Conference on Interferometry and Speckle Metrology*, Vol. 818, 1987, pp. 2-9.
- [29]J. M. HUNTLEY. "Noise-immune Phase Unwrapping Algorithm". *Appl. Optics* , Vol. 28 (15), Agosto 1989, pp. 3268-3270.
- [30]D. C. GHIGLIA; G. A. MASTIN; L. A. ROMERO. "Cellular-automata Method for Phase Unwrapping". *J. Optical Society of America (A)*, Vol. 4, janeiro 1987, pp. 267-280.

- [31]J. M. HUNTLEY; H. SALDNER. " Temporal Phase-unwrapping Algorithm for Automated Interferogram Analysis". *Appl. Optics*, Vol. 32 (17), Junho 1993 , pp. 3047-3052.
- [32]T. W. BUSHMAN; M. A. GENNERT; R. J. PRYPUTNIEWICZ. "Phase Unwrapping by Least Squares Error Minimization of Phase Curvature". *Proceedings of the International Conference on Interferometry and Speckle Metrology, Interferometry VI*, Vol. 2003, 1993, pp. 334-348.
- [33]A. A. GONÇALVES, "Estação Automática de medição de deslocamentos, deformações e tensões por princípios holográficos". *Relatório final Fundação CERTI*, maio 1992.
- [34]A. V. OPPENHEIM; R. W. SCHAFER. "Homomorphic Analysis of Speech". *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, Vol. AU-16 (2), 1968, pp. 221-226.