

JOSÉ LUIS VALIN RIVERA

**ANÁLISE DE HOLOGRAFIA INTERFEROMÉTRICA
DE OBJETOS SOB CONDIÇÕES SUBMERSAS**

Dissertação apresentada á Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia.

São Paulo 1997

Universidade de São Paulo
Escola Politécnica

FD-2007

OK

JOSÉ LUIS VALIN RIVERA

**ANÁLISE DE HOLOGRAFIA INTERFEROMÉTRICA
DE OBJETOS SOB CONDIÇÕES SUBMERSAS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia.

Área de Concentração:
Projeto e Fabricação

Orientador:

Prof. Dr. Edison Gonçalves

São Paulo 1997

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Edison Gonçalves pelo incentivo e sugestões, colaboração e amizade brindada durante toda a execução do meu trabalho.

A meu amigo Regino Gonzalez que tanto lutou para conseguir realizar estes estudos de pós-graduação; a meus companheiros Gilberto, Miguel, Vladimir e outros dos que tanta força recebi.

A Maria Helena, por sua contínua ajuda.

Aos Professores Roberto Forneris e Eduardo Barbosa da FATEC; ao Professor Dr. Mikiya Muramatsu do Instituto de Física da USP.

Aos Professores Dr. Gilberto F. Martha de Sousa, Dr. Oswaldo Horikawa e demais professores e funcionários da Escola politécnica por sua ajuda sempre oferecida.

Finalmente à CNPq, no Brasil, e o ISPJAE de Cuba, por terem me dado as possibilidades de realizar estes estudos.

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600010117

A Mary e minhas
filhas Eleymi e Meyly

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	iii
DEDICATÓRIA	iv
ÍNDICE	v
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xii
RESUMO	xiii
“ABSTRACT”	xiv
CAPÍTULO I. INTRODUÇÃO	1
1. 1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1. 2. ESCOPO DO TRABALHO	7
CAPÍTULO II. CONCEITOS BÁSICOS DA HOLOGRAFIA E DA INTERFEROMETRIA HOLOGRÁFICA	9
2. 1. INTRODUÇÃO	9
2. 2. FENÔMENOS DE INTERFERÊNCIA, DIFRAÇÃO E FILTRAGEM ESPACIAL	10
2. 2. 1. INTERFERÊNCIA	10
2. 2. 2. DIFRAÇÃO E FILTRAGEM ESPACIAL	13
2. 3. O PROCESSO HOLOGRÁFICO	15
2. 4. TÉCNICAS HOLOGRÁFICAS	22

2. 5. TÉCNICAS DA INTERFEROMETRIA HOLOGRÁFICA	28
2. 6. INTERFEROMETRIA HOLOGRÁFICA EMBAIXO DA ÁGUA	31
CAPÍTULO III. HOLOGRAFIA SUBMERSA	33
3. 1. SELEÇÃO DO LASER	33
3. 2. VISIBILIDADE EMBAIXO DA ÁGUA	34
3. 3. ARQUIVO PARA REGISTRO	35
3. 4. HOLOGRAFIA ELETRÔNICA	36
3. 5. HOLOGRAMETRIA EM INSPEÇÃO VISUAL	37
3. 6. FIDELIDADE DA IMAGEM EM HOLOGRAMETRIA SUBMERSA	46
3. 7. HOLOGRAMETRIA SUBMERSA, ABERRAÇÕES NA IMAGEM REAL DE UM OBJETO SUBMERSO QUANDO É RECOLHIDO NO AR	44
3. 8. CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS EM ÁGUA	46
CAPÍTULO IV. ENSAIOS EXPERIMENTAIS	49
4.1. INTRODUÇÃO	49
4.2. SELEÇÃO DO MEIO PARA A EXECUÇÃO DOS ENSAIOS	50
4.2.1. COMPOSIÇÃO DA ÁGUA POTÁVEL	51
4.2.2. COMPOSIÇÃO DA ÁGUA DE MAR	53
4.3. DESCRIÇÃO DO ARRANJO HOLOGRÁFICO PARA RECOLHER OS HOLOGRAMAS NO AR E EMBAIXO DA ÁGUA	56
4.3.1. PLACAS HOLOGRÁFICAS	65
4.3.2. REGISTRO DOS HOLOGRAMAS	66
4.3.3. REVELAÇÃO DOS HOLOGRAMAS	67
4.3.4. ALINHAMENTO DA MONTAGEM HOLOGRÁFICA	67
4.4. DESCRIÇÃO DO ARRANJO HOLOGRÁFICO PARA A RECONSTRUÇÃO DOS HOLOGRAMAS	69
4.5. INTERPRETAÇÃO DAS FRANJAS DE INTERFERÊNCIA	75

4.6. ANÁLISES EXPERIMENTAIS	79
4.7. ANÁLISE DA RESOLUÇÃO DOS HOLOGRAMAS RECOLHIDOS NO AR E NA ÁGUA	85
4.7.1. PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS INTERFEROGRAMAS RECOLHIDOS NO AR E EMBAIXO DA ÁGUA	87
4.8. CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS	120
CAPÍTULO V. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	125
5.1. CONCLUSÕES	125
5.2. RECOMENDAÇÕES	127
ANEXO I. CONJUNTO DE DADOS PARA O CÁLCULO DA COMPOSIÇÃO DA ÁGUA POTÁVEL	128
ANEXO II. CONJUNTO DE DADOS PARA O CÁLCULO DA COMPOSIÇÃO DA ÁGUA POTÁVEL	133
ANEXO III. INSTRUÇÕES DO PROGRAMA ELABORADO EM QBASIC PARA A OBTENÇÃO DOS VALORES DE $\Delta'y_0$	138
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	142

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1- Representação esquemática da sequência do trabalho	8
FIGURA 2.1- Representação Esquemática do Holograma de Fresnel fora do eixo	20
FIGURA 2.2- Representação Esquemática do Sistema Holográfico de Gabor	24
FIGURA 2.3- Representação Esquemática do Sistema holográfico de Leith e Upatnieks	25
FIGURA 3.1- Holograma registrado a distância do eixo	38
FIGURA 3.2- Reconstrução da imagem virtual	39
FIGURA 3.3- Uso de reconstrução da imagem Real em Hologrametria	41
FIGURA 3.4- Origens de aberração esférica em Holografia embaixo da água	4.8
FIGURA 4.1- Arranjo holográfico utilizado para recolher os hologramas no ar e embaixo da água	57
FIGURA 4.2- Placa de aço ABNT 1045	58
FIGURA 4.3- Representação esquemática do dispositivo empregado para realizar a experiência de flexão da chapa de aço	59
FIGURA 4.4- Foto que mostra o dispositivo utilizado para-se realizar o estudo de flexão, aplicando-se uma carga de 0.29 N	60
FIGURA 4.5- Mostra-se a localização da regua graduada, usada durante todos os ensaios	62
FIGURA 4.6- Foto do arranjo holográfico	63
FIGURA 4.7- Foto onde aparecem representados os feixes, Rerência (FR) e Objeto (FO), com suas respectivas trajetórias	64

FIGURA 4.8- Arranjo holográfico utilizado para reconstruir os hologramas	70
FIGURA 4.9- Foto onde se mostra a localização do laser de Argônio embaixo da mesa holográfica e o sistema de isoladores desta	71
FIGURA 4.10- Foto demonstrativa da mesa holográfica utilizada na reconstrução dos hologramas. Distíngui-se parte do sistema de isoladores pneumáticos	72
FIGURA 4.11- Mostra-se o sistema de aquisição da imagem holográfica, formado por uma objetiva e a câmera CCD	73
FIGURA 4.12- Foto do monitor de Tv e o microcomputador Pentium, utilizados no processamento dos interferogramas	74
FIGURA 4.13- Gráfico 1, valores dos deslocamentos	84
FIGURA 4.14- Foto, onde se localiza a chapa de aço no interior do aquário, para os testes embaixo da água	86
FIGURA 4.15- a) Interferograma recolhido no ar, b) Distribuição das franjas em todo seu comprimento	89
FIGURA 4.16- a) Interferograma recolhido na água destilada, b) Distribuição das franjas em todo seu comprimento	90
FIGURA 4.17- a) Interferograma recolhido na água corrente, b) Distribuição das franjas em todo seu comprimento	91
FIGURA 4.18- a) Interferograma recolhido na água potável, b) Distribuição das franjas em todo seu comprimento	92
FIGURA 4.19- a) Interferograma recolhido na água de mar, b) Distribuição das franjas em todo seu comprimento	93
FIGURA 4.20- Em a) e b), mostra-se a separação entre pares de franjas, obtida no interferograma recolhido no ar	95
FIGURA 4.21- Em c) e d), mostra-se a separação entre pares de franjas, obtida no interferograma recolhido no ar	96

FIGURA 4.22- Em a) e b), mostra-se a separação entre pares de franjas, obtida no interferograma recolhido na água destilada	97
FIGURA 4.23- Em c) e d), mostra-se a separação entre pares de franjas, obtida no interferograma recolhido na água destilada	98
FIGURA 4.24- Em a) e b), mostra-se a separação entre pares de franjas, obtida no interferograma recolhido na água corrente	99
FIGURA 4.25- Em c) e d), mostra-se a separação entre pares de franjas, obtida no interferograma recolhido na água corrente	100
FIGURA 4.26- Em a) e b), mostra-se a separação entre pares de franjas, obtida no interferograma recolhido na água potável	101
FIGURA 4.27- Em c) e d), mostra-se a separação entre pares de franjas, obtida no interferograma recolhido na água potável	102
FIGURA 4.28- Em a) e b), mostra-se a separação entre pares de franjas, obtida no interferograma recolhido na água de mar	103
FIGURA 4.29- Em c) e d), mostra-se a separação entre pares de franjas, obtida no interferograma recolhido na água de mar	104
FIGURA 4.30- Gráfico 2, representação da separação média entre as franjas	105
FIGURA 4.31- Gráfico 3, representação da largura média das franjas	109
FIGURA 4.32- Em a) e b), mostra-se a distribuição de intensidade do padrão, no perfil da franja, no interferograma recolhido no ar	110

FIGURA 4.33- Em c) e d), mostra-se a distribuição de intensidade do padrão, no perfil da franja, no interferograma recolhido no ar	111
FIGURA 4.34- Em a) e b), mostra-se a distribuição de intensidade do padrão, no perfil da franja, no interferograma recolhido na água destilada	112
FIGURA 4.35- Em c) e d), mostra-se a distribuição de intensidade do padrão, no perfil da franja, no interferograma recolhido na água destilada	113
FIGURA 4.36- Em a) e b), mostra-se a distribuição de intensidade do padrão, no perfil da franja, no interferograma recolhido na água corrente	114
FIGURA 4.37- Em c) e d), mostra-se a distribuição de intensidade do padrão, no perfil da franja, no interferograma recolhido na água corrente	115
FIGURA 4.38 Em a) e b), mostra-se a distribuição de intensidade do padrão, no perfil da franja, no interferograma recolhido na água potável	116
FIGURA 4.39- Em c) e d), mostra-se a distribuição de intensidade do padrão, no perfil da franja na água potável	117
FIGURA 4.40- Em a) e b), mostra-se a distribuição de intensidade do padrão, no perfil da franja, no interferograma recolhido na água de mar	118
FIGURA 4.41- Em c) e d), mostra-se a distribuição de intensidade do padrão, no perfil da franja, no interferograma recolhido na água de mar	119
FIGURA 4.42- Distorção da imagem na água	121

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1- Composição proposta para a água potável	52
TABELA 4.2- Composição obtida para a água potável	52
TABELA 4.3- Composição standart da água de mar	54
TABELA 4.4- Composição obtida para a água de mar	55
TABELA 4.5- Características principais de algumas emulsões fotográficas para holografia	66
TABELA 4.6- Valores dos deslocamentos obtidos pela teoria de resistência dos materiais e pela interpretação das franjas nos hologramas recolhidos no ar e embaixo da água	81
TABELA 4.7- Valores de Δy_0	83
TABELA 4.8- Valores em mm de cada pixel obtido	87
TABELA 4.9- Quantidade de franjas obtidas para cada interferograma	88
TABELA 4.10- Valores da separação entre as franjas a partir do interferograma registrado em cada meio	94
TABELA 4.11.a- Holograma recolhido no Ar	107
TABELA 4.11.b- Holograma recolhido na Água destilada	107
TABELA 4.11.c- Holograma recolhido na Água corrente	107
TABELA 4.11.d- Holograma recolhido na Água potável	107
TABELA 4.11.e- Holograma recolhido na Água de mar	108

RESUMO

O trabalho trata da captação e registro no ar de hologramas de uma placa de aço submergida na água. Os aspectos teóricos fundamentais da holografia e questões básicas sobre a aplicação desta técnica são enfocados para as condições submersas.

Com a finalidade de comparar e examinar o poder de resolução dos interferogramas registrados da placa de aço embaixo da água, com o interferograma equivalente tomado no ar, foram selecionados cinco meios, a saber: ar, água destilada, água corrente, água potável e água de mar.

Para a obtenção das franjas de interferência, produzidas pelo carregamento aplicado, foi usada a técnica de dupla exposição.

São controlados os valores dos deslocamentos, obtidos no ar e embaixo da água, sendo em seguida, estes resultados comparados.

As imagens foram processadas com o software Global Lab, obtendo-se informações sobre: a resolução das franjas por mm, resolução média para toda a amplitude, distribuição destas em todo o comprimento do interferograma, a separação entre as franjas, o registro gráfico da intensidade do padrão, a largura e o registro do padrão de perfil das franjas.

ABSTRACT

In this work the recording of holograms of a steel plate, submerged into water and recording of the image in air is included. The fundamental theoretical aspects of holography and the basic items about the application of this technic under-water, are analyzed.

In order to compare and investigate the resolution power of the interferogram recorded underwater, with the equivalent ones taken in air distilled water, sea water, drinking water and tap water were chosen.

For obtaining the interference bands produced by the applied load, a double exposure technic was used.

The value of displacements obtained in air and underwater are controlled and compared.

The images were processed by using the Global Lab. Software getting information about band resolution per mm, average resolution for the full amplitude, the distribution of the bands along the interferogram, the separation between bands and the graphical recording of the intensity, the width of bands and the pattern recording in its profile.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1. 1. Considerações Iniciais

A holografia foi inventada tendo em vista uma aplicação particular. Na década de 1940, a resolução dos microscópios eletrônicos era limitada pela qualidade de suas lentes eletrônicas, cerca de 5 angstroms. Foi então que Gabor, em 1948, num curto artigo intitulado "A new microscopic principle", [1], propôs um método que permitia sobrepujar essa limitação. Esse artigo foi seguido mais tarde por outros dois, [2], 1949, [3], 1951, onde Gabor apresentava uma discussão mais detalhada. O método abordava, em duas etapas, o processo de formação de imagem coerente, no qual era feito um registro de uma figura produzido pela onda difratada de um objeto e por uma onda de referência. A distribuição de intensidade de energia relativa e projeção do objeto era registrada, constituindo o holograma. Este holograma, quando iluminado por uma onda coerente de referência, reconstitui a frente de onda original, formando, assim, uma imagem do objeto original.

A aplicação então pretendida era a de obter hologramas com feixes de elétrons e, em seguida, utilizar este holograma, iluminado pela luz, para formar uma imagem visível, sem aberrações e aumentada.

Embora inúmeros pesquisadores fizessem na época esforços notáveis, [4], [5], 1958 e 1952, esta aplicação nunca foi completamente desenvolvida, e a resolução de 1 angstrom desejada, nunca obtida, [6], 1968. Na época, a dificuldade principal era o da geração de imagem dupla. A resolução do filme holográfico e a estabilidade vibracional do conjunto experimental eram outros problemas que dificultavam a utilização da técnica holográfica.

Esses estudos de Gabor, aplicados ao problema de microscopia eletrônica, provavelmente foram inspirados por dois eventos científicos. Em 1927, Michelson conseguiu formar a imagem de uma fenda, a partir do registro da figura de difração de Fraunhofer acrescentando, como um elemento óptico adicional, a componente fase, [7]. E em 1942, Bragg foi capaz de reproduzir a imagem da rede da estrutura cristalina de um metal pela difração obtida a partir do registro fotográfico da figura. A idéia básica, utilizada pelo método de Bragg, é a do processo de dupla difração, que é o núcleo do processo holográfico. A principal limitação do método de Bragg é a impossibilidade do registro da fase fazendo com que o seu método ficasse restrito a uma pequena classe de objetos, tais como as redes cristalinas.

Gabor em 1949, [2], estabeleceu que a fase da onda difratada podia ser determinada através da comparação com uma onda de referência padrão. Para fazer isso, Gabor sobrepunha uma radiação uniforme à onda difratada. A radiação tinha sua amplitude modulada pela onda difratada, com a condição de que as duas fossem coerentes, uma em relação à outra. Uma fotografia do

padrão de interferência resultante constitui o que Gabor chamou de holograma. Uma radiação uniforme chegando ao holograma é difratada por ele, dando-se a segunda difração, e realizando assim a reconstrução da frente de onda original. A imagem do objeto original é assim criada.

Buerger em 1950, [8], foi capaz de expandir o método de Bragg para cristais que não apresentam centro de simetria, mas com mudanças de fase aproximadamente conhecidas.

Os estudos de Rogers, [9], El Sum e Kirpatrick, [10], e Baez, [11], desenvolvimentos em 1952 e o de Lohmann, [12], em 1956 apresentaram estudos em ponto de vista puramente da holografia óptica. No entanto, a imagem obtida pela holografia ainda era deficiente principalmente ocasionada pelo fenômeno da imagem dupla nos hologramas de Gabor, ruído no sistema por causa das poeiras, e por problemas ocasionados pela não linearidade do processo de gravação. Todos os ensaios experimentais foram, em geral, executados, utilizando-se como fontes lâmpadas de vapor de mercúrio. Em 1956, na Nova Zelândia, Rogers, [13], aplicou a holografia às vibrações em auto falantes quando de emissão de ondas sonoras.

Em 1960, a holografia óptica de Gabor foi utilizada por Leith e Upatnieks na Universidade de Michigan, nos Estados Unidos, inicialmente, para reproduzir a experiência original. Em 1962, compreenderam que o problema da imagem dupla era o problema básico, e a solução era projetar o

sinal holográfico sobre um suporte espacial. O método consiste em separar a frente de onda coerente, que serve de referência, da frente de onda que ilumina o objeto, [14], [15], [16]. Esse procedimento é denominado desde então de holografia fora do eixo.

No período de 1962 e 1965, na União Soviética, Denisyuk, [17], [18], combinava o processo de holografia com uma forma de fotografia colorida inventada em 1891 pelo físico francês G. Lippmann; Denisyuk realizou então os primeiros hologramas observáveis com apenas uma fonte de luz branca. Os hologramas deste tipo foram recebidos como um grande avanço para a holografia. Estes estudos, praticamente encerraram um longo período de estagnação, iniciando um surpreendente período de expansão, caracterizado pela multiplicação dos pesquisadores, dos centros de pesquisas, dos seminários, dos colóquios e pelo surgimento de novas idéias, [19], 1970.

Em 1969, a representação holográfica tridimensional apresentou um extraordinário progresso com os estudos de Benton, [20]. Sistemas de memória para computador, com capacidade cada vez maior, foram desenvolvidos. Paralelamente, o aperfeiçoamento dos sistemas computacionais, com capacidade de memória cada vez maiores, métodos de medição dos diferentes parâmetros de interferência, da interferometria holográfica e das técnicas de speckle foram altamente significativos fazendo com que se abrissem novas oportunidades de utilização prática. Além disso, as pesquisas na área do tratamento óptico se multiplicaram, fazendo com que

o filtro de reconhecimento de padrões proposto em 1963, por Vander Lugt, [21], fosse aperfeiçoado e extensivamente utilizado em holografia. Todavia, apesar de todo esse grande avanço científico, as dificuldades técnicas ainda eram significativas em praticamente todos aspectos da utilização dos princípios da holografia.

A holografia muito se beneficiou com o surgimento de novas técnicas em outros setores de atividades, fazendo com que se tornasse mais operacional. O surgimento e aperfeiçoamento de câmeras CCD, novos materiais de gravação, novos meios de processamento dados, com alta capacidade e alta velocidade, e o grande número de novas fontes laser que permitiram o desenvolvimento de técnicas que ampliaram e agilizaram a utilização da holografia, [22], 1977.

Sistemas de digitalização da imagem holográfica, conhecidos como Holografia Eletrônica, já demonstraram serem capazes de avaliar baixos níveis de vibrações e de deformações que eram inviáveis de serem avaliados através das técnicas holográficas tradicionais. A Holografia Eletrônica viabilizou a realização de medições em situações de difícil acesso assim como em situações submersas. Os problemas práticos advindos de utilização da holografia submersa só são enfocados em poucos trabalhos da bibliografia específica, [23], [24], 1983. A grande potencialidade da utilização da Holografia em situações submersas situa-se nas áreas das inspeções e medições de estruturas e equipamentos oceânicos.

No transporte de gás e óleo perto da costa, a inspeção da qualidade das instalações submersas, muitas vezes são realizadas com pouca visibilidade e em condições potencialmente arriscadas. Quando as profundidades aumentam, as dificuldades também aumentam. Nesse caso, coloca-se mais ênfase na inspeção remota, ao invés de utilização de mergulhadores. Os métodos ópticos tradicionalmente utilizados, tais como a fotografia convencional, estéreo-fotografia e videografia, sofrem os inconvenientes de possuírem uma resolução moderada, falta de tridimensionalidade, perda de informações devido ao efeito de paralaxe, distorção da perspectiva e profundidade de campo limitada.

A simulação em laboratório das condições submersas que ocorrem no oceano é a melhor forma de resolver os problemas que impedem a plena utilização da holografia submarina.

1.2. Escopo do Trabalho

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento da técnica holográfica em condições submersas. Os efeitos da mudança do índice de refração devido à alteração da composição do meio sobre a resolução da imagem obtida é avaliado. Os aspectos teóricos da holografia são enfocados considerando-se também os problemas advindos da sua aplicação submersa.

Neste sentido, afim de cumprir estes objetivos previstos, foram utilizados dois arranjos holográficos, um convencional para registrar os interferogramas e outro com câmera CCD, monitor de TV e microcomputador para aquisição e processamento de imagens.

A Figura 1.1, apresenta de forma esquemática, a seqüência das diversas etapas desenvolvidas neste trabalho. Após a introdução do trabalho, no capítulo II, tratam-se os conceitos básicos da holografia e da interferometria holográfica. Em seguida, no capítulo III, se apresenta a holografia submersa com os requerimentos para sua aplicação. No capítulo IV, é apresentada de forma detalhada a descrição dos ensaios experimentais, assim como avaliam-se os resultados obtidos. Por último, no capítulo V, são apresentadas as conclusões, assim como as recomendações para estudos futuros.

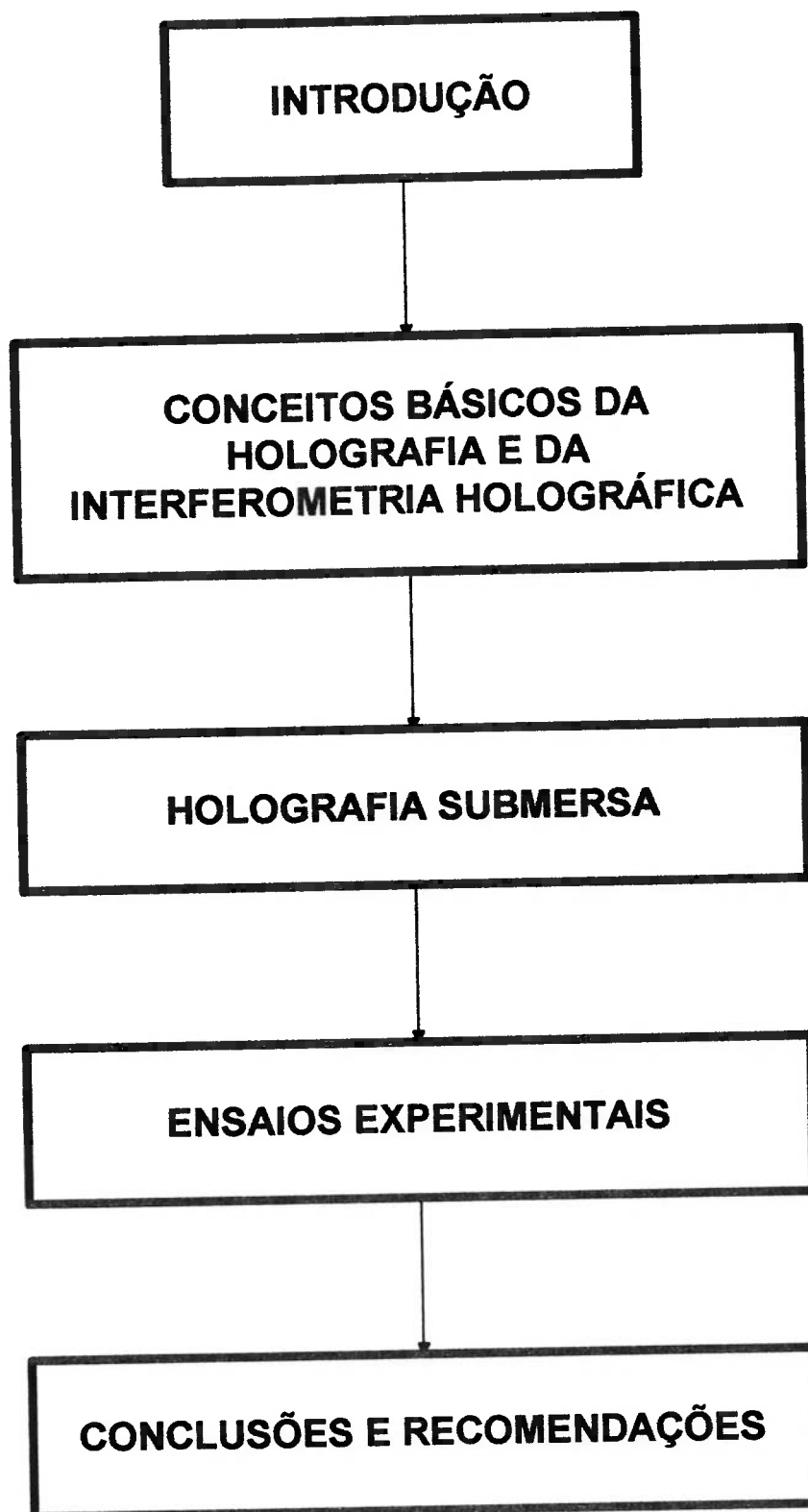


Figura 1.1- Representação esquemática da seqüência do trabalho.

CAPÍTULO II

CONCEITOS BÁSICOS DA HOLOGRAFIA E DA INTERFEROMETRIA HOLOGRÁFICA

2. 1. Introdução

A holografia e a interferometria holográfica têm muitas aplicações nas diversas áreas de Engenharia . A técnica da interferometria holográfica tem um grande potencial de utilização na realização de ensaios experimentais, voltados à área do comportamento mecânico dos materiais.

A interferometria holográfica é uma técnica que permite a avaliação de pequenos deslocamentos que ocorrem na superfície do corpo. A medição desses deslocamentos, da ordem de 0.07 micron, permite a obtenção do estado de deformação e tensão com grande precisão. A grande vantagem desta técnica em relação a outras técnicas usadas para medir pequenos deslocamentos, é que peças mecânicas ou qualquer outro objeto, podem ser testados em condições de trabalho de forma não destrutiva. Por exemplo; um defeito interno numa peça mecânica tal como uma trinca, um vazio ou uma falta de homogeneidade podem ser facilmente detectados através da observação de holograma, isto porque, quando tensionado, o objeto produz regiões de micro-deformações que são sensíveis ao processo. A técnica, portanto, possibilita a realização de análises qualitativas e quantitativas de grandezas relacionadas com deslocamentos do corpo, como por exemplo,

deformações, frequências, modos de ressonância, tensões e mecanismos de fratura e fadiga.

A principal característica da holografia, ou seja, a capacidade para gerar uma imagem tridimensional finamente detalhada que mantém o paralaxe, a perspectiva e o contraste do objeto original, tem feito da técnica uma ferramenta poderosa para a avaliação dimensional de corpos. O aumento da exploração de petróleo no mar, muitas vezes em profundidades superiores a 1000 m, tem ocasionado um interesse crescente na utilização da holografia como técnica de inspeção submarina.

2. 2. Fenômenos de Interferência, Difração e Filtragem Espacial

2. 2. 1. Interferência

Os preceitos básicos de interferência da luz já foram amplamente estudados, [2], e alguns conceitos essenciais são expostos em diferentes trabalhos como introdução ao progresso da teoria da holografia, [25], [26], [27], 1979, 1980.

A luz é uma forma de radiação eletromagnética e é qualificada por sua amplitude, comprimento de onda, velocidade de propagação, direção de propagação, fase e polarização. A reflexão da luz por um objeto pode alterar todas, ou algumas dessas características da luz. Com a avaliação destas

mudanças, podem ser adquiridas informações sobre o objeto, como por exemplo, temperatura, tamanho, etc.

Apesar de um grande número de fenômenos de interação da luz ser interpretado pela óptica quântica, na holografia e na interferometria holográfica manifestações de natureza quântica da luz são desprezíveis, podendo-se fazer uso da teoria electromagnética clássica da luz. De acordo com a teoria clássica, uma onda de luz monocromática pode ser representada na seguinte forma:

$$\vec{E}(x, y, z) = \vec{a}(x, y, z) \cos [wt + \phi(x, y, z)] \quad (2.1)$$

onde:

$\vec{E}(x, y, z)$	vetor intensidade.
$\vec{a}(x, y, z)$	vetor amplitude em um dado ponto (x, y, z) no espaço.
$\phi(x, y, z)$	fase das oscilações em um ponto (x, y, z) no espaço.
x, y, z	coordenadas do ponto no espaço.
t	tempo.
w	freqüência angular das oscilações.

Uma onda de luz é também caracterizada por um vector de onda \vec{k} , cuja direcção coincide com a direcção de propagação da onda. O módulo do vector \vec{k} é dado por:

$$k = 2\pi/\lambda = \omega/v, \quad (2.2)$$

onde:

λ comprimento de onda.

v velocidade de propagação da onda.

Uma onda é chamada plana se em qualquer instante de tempo as superfícies de igual fase estão contidas num mesmo plano. Sendo \vec{r} o vector posição de qualquer ponto no espaço, a equação (2.1) pode ser escrita neste caso como:

$$\vec{E}(x,y,z) = \vec{a}(x,y,z) \cos(\omega t + f - \vec{k} \cdot \vec{r}), \quad (2.3)$$

onde:

f fase inicial das oscilações.

Sabe-se que a frequência da luz é da ordem de 10^{15} Hz. Detetores, tais como, filmes fotográficos, fotodiodos ou a retina do olho não são capazes de responder a estas variações de frequência extremamente rápidas.

Duas ondas de luz que são capazes de interferir uma com a outra são chamadas *coerentes*. A coerência pode ser dividida em coerência espacial e coerência temporal. Diz-se que uma onda tem coerência espacial perfeita se a diferença de fase entre dois pontos fixados num plano perpendicular à direção de propagação, for independente do tempo. A coerência temporal, por sua vez, é devida à largura finita da linha espectral; diz-se que uma onda tem coerência temporal perfeita se a diferença de fase entre dois pontos fixados ao longo de sua direção de propagação for independente do tempo.

Pela necessidade de coerência, a maioria dos arranjos de interferência holográfica utilizam dois feixes de luz da mesma fonte. As imagens são produzidas por um dispositivo chamado interferômetro.

2. 2 .2. Difração e Filtragem Espacial

A formação de um holograma é um processo interferométrico. Na prática da holografia, utiliza-se a luz de um Laser por ser a mesma altamente coerente. O fenômeno de difração é tratado adequadamente (devido às propriedades praticamente ideais da luz) em termos da teoria elementar da difração.

Para o desenvolvimento da teoria da difração escalar, o vetor \vec{E} será substituído pela grandeza $u(x,y,z)$, que se refere simplesmente à perturbação

óptica. A expressão para uma onda monocromática pode ser escrita conforme, [2], [25], [26]:

$$u(x,y,z) = a(x,y,z) \cos[\omega t - \phi(x,y,z)], \quad (2.4)$$

onde:

$u(x,y,z)$ amplitude real da onda de luz.

$\phi(x,y,z)$ fase da onda.

A equação (2.4) pode também ser escrita na forma:

$$u(x,y,z,t) = \text{Re} \{ U(x,y,z) \exp(-i\omega t) \}, \quad (2.5)$$

onde:

$$U(x,y,z) = a(x,y,z) \exp\{-i\phi(x,y,z)\}, \quad (2.6)$$

A função $U(x,y,z)$ é chamada de *amplitude complexa da luz* e contém todas as informações sobre a estrutura espacial das ondas de luz, o que é suficiente para o estudo da difração em holografia.

A filtragem espacial é uma técnica importante em muitas aplicações de holografia interferométrica, [25], [26], [28]. Um caso fundamental de operação da filtragem espacial é o isolamento dos componentes individuais de uma onda plana de luz que foi difratada por um objeto.

Para se fazer uso da holografia o feixe de um laser necessita ser expandido. Por causa desta expansão pequenas partículas de sujeira ou imperfeições dos componentes ópticos gerarão grandes padrões de difração. Estes ruídos ópticos prejudicam seriamente a formação de interferogramas, sendo, portanto, necessária uma filtragem espacial.

2.3. O Processo Holográfico

A holografia óptica, é uma técnica constituída de três etapas principais: formação, processamento fotográfico e reconstrução. Na fase de formação do holograma o fenômeno físico básico envolvido é a interferência entre ondas luminosas; uma onda luminosa é completamente descrita através de dados sobre sua amplitude e fase, as quais, ao serem registradas em material fotográfico de excelente resolução, representam um objeto em sua totalidade, significado do termo holograma - vindo da palavra grega "holos". A amplitude corresponde a um valor de intensidade luminosa e, sem os dados da diferença de fase dos raios componentes, contém informação suficiente apenas para produzir imagens de duas dimensões. Essas duas informações sobre o objeto iluminado, podem ser obtidas através do particionamento da luz vinda da fonte em dois raios: o *raio objeto*, o qual ilumina o objeto, sendo por ele difratada, e o *raio referência*, que provém diretamente da fonte preservando as informações de fase e que, por isso, permite a recuperação volumétrica. A interceptação desses raios constitui um padrão de interferência que contém toda a informação do objeto holografado; tal padrão produz franjas de

interferência ao incidir no material de registro: uma área de franjas claras e escuras, correspondendo a codificação das características do objeto iluminado.

Após o processamento fotográfico do resultado da primeira etapa, o material é submetido a fase de reconstrução holográfica. Nesse momento o registro das franjas de interferência é iluminado com uma onda similar a que foi usada na obtenção do holograma e a imagem do objeto é restaurada, mantendo todas as características da cena inicial. Isso é possível devido ao principal fenômeno físico embutido nesta etapa: a difração da luz. Denomina-se *difração* o desvio sofrido pela luz ao passar por um obstáculo pequeno, da ordem de poucos micrometros, tal como as bordas de uma fenda. Pode-se ver este fenômeno na prática diária em objetos que apresentam cores iridescentes como as matizes luminosas refletidas de um CD ou a cauda de de um pavão.

Portanto, pode-se dizer que a holografia é um congelamento (*"freezing"*) da onda procedente do objeto e não um registro da imagem, como é feito na fotografia. Em outras palavras, na fotografia, o que, se registra ponto-a-ponto no filme é a função "brilho"; na holografia, registra-se a função "interferência" (amplitude da soma de duas ondas mais informação sobre o desvio de fase). Em conseqüência, não se perde o caráter tridimensional é interessante notar que não existe correspondência ponto-a-ponto entre o objeto e imagem, como ocorre em fotografia: a cada ponto do holograma é em parte danificado, ainda

assim é possível observar o objeto em sua totalidade, embora com um número menor de perspectivas.

Um holograma gerado pela holografia óptica possui todos os indicadores de profundidade exibidos pelo objeto original, incluindo paralaxe contínua (vertical e horizontal) e acomodação, apresentando resoluções de imagem e paralaxe virtualmente ilimitadas.

A descrição fenomenológica da holografia pode ser expressa por funções complexas, representativas das frentes de ondas. Representando a frente de onda do objeto por U_o e a frente de onda de referência U_R , onde U_o e U_R definem a amplitude e fase das respectivas frentes de ondas, a frente de onda resultante pode ser expressa como:

$$U = U_o + U_R \quad (2.7)$$

A distribuição de intensidade no filme é obtida multiplicando U pelo seu conjugado U^* , isto é;

$$I = UU^* \quad (2.8)$$

$$I = (U_o + U_R)(U_o + U_R)^* \quad (2.9)$$

$$I = (|U_o|^2 + |U_R|^2) + U_o U_R^* + U_o^* U_R \quad (2.10)$$

O primeiro termo da relação (2.10) representa a soma das intensidades dos raios de referência e o objeto, enquanto que os outros dois termos (que envolvem a multiplicação cruzada das frentes de ondas com seu complexo conjugados) representam o padrão interferência requerido.

Iluminado o holograma com a frente de onda de referência original, obtêm-se a seguinte distribuição de intensidades da luz:

$$I_H = U_R I \quad (2.11)$$

$$I_H = U_R (|U_0|^2 + |U_R|^2) + U_0 |U_R|^2 + U_0^* U_R^2 \quad (2.12)$$

Assim as três frentes de ondas são reconstruídas. O primeiro termo da relação (2.12) representa a intensidade combinada das ondas objeto e as de referência. O segundo termo representa a reconstrução da onda objeto original. Esta frente de onda parece proceder da localização do objeto original e é visto pelos olhos na maneira mostrada na figura 2.1 (parte superior), uma imagem virtual do objeto é vista na posição original. O terceiro termo da relação (2.12) representa a conjugada complexo da onda objeto original: porque inverte-se a curvatura da onda de referência como mostra-se na Figura 2.1 (parte inferior), uma imagem do objeto está formada no espaço sem necessidade de lentes para formar a imagem. Uma imagem real de um objeto é produzida e pode-se ver que está suspensa no espaço à frente do holograma.

Existem basicamente, três condições práticas que têm que ser satisfeitas para a obtenção de hologramas de alta qualidade no laboratório ou no campo. Essas condições são:

- ◆ Os raios objeto e de referência devem manter uma relação de fase constante (devem ser coerentes),
- ◆ O sistema completo deve ser mecânica e termicamente estável,
- ◆ Devem ser usados materiais de registro de alta resolução.

Com relação à estabilidade mecânica, uma vez que um holograma é o registro de franjas de interferência com espaçamento de $\lambda/2$ (onde λ , é o comprimento de onda do laser), qualquer movimento no sistema holográfico da ordem de $\lambda/2$, desloca o padrão de interferência e movimentos da ordem de $\lambda/10$ degrada seriamente o contraste dos anéis e a qualidade da imagem holográfica. Gradientes de temperatura ou correntes de ar que afetem os índices de refração podem produzir mudanças do comprimento do caminho óptico e por conseguinte reduzir o contraste da imagem.

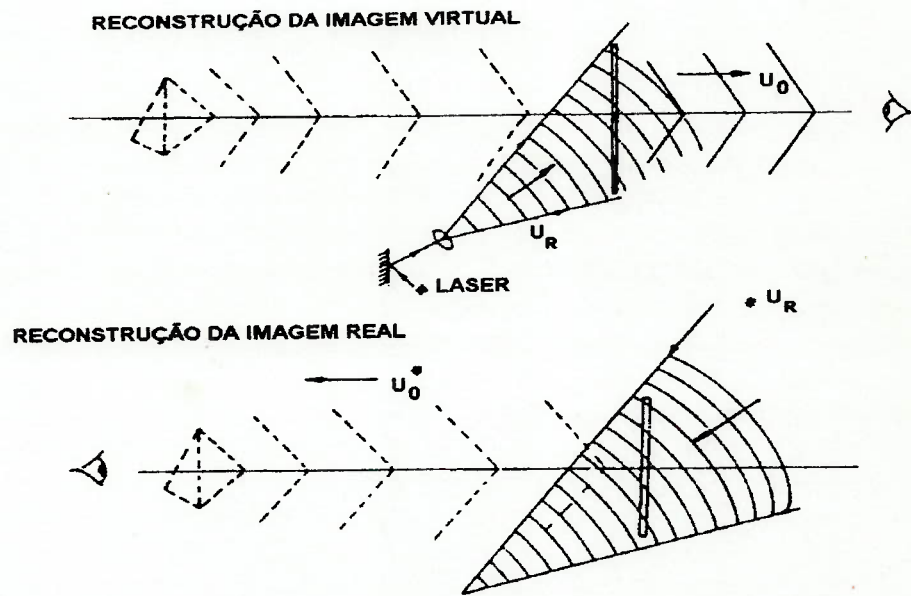


Figura 2.1- Representação Esquemática do Holograma de Fresnel fora do eixo

No modo convencional de construção holográfica, com raios de referência fora do eixo, o ângulo que forma o raio de referência com o raio objeto governa o espaçamento das franjas do padrão de interferência. Este, em resumo, dita a resolução requerida para o meio de registro. O espaçamento entre franjas consecutivas (brilhante e escuro) P , é oferecido por:

$$P = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (2.13)$$

onde θ é o ângulo entre os raios de referência e objetos, e λ , é o comprimento de onda do laser. Assim, por exemplo, para comprimentos de onda do laser He-Ne, $\lambda = 632\text{nm}$, e $\theta = 30^\circ$; o espaçamento entre as franjas é perto de $0,63\mu\text{m}$; o qual requer uma capacidade de resolução do filme de 2200 linhas/mm.

Além da resolução para o registro, a eficiência de difração é outra propriedade importante nos meios de registro. Define-se a eficiência de difração como o quociente da intensidade do raio difratado e a intensidade do raio incidente, e se relacionam com a intensidade da imagem reconstruída.

A eficiência de difração do holograma depende do quadrado da modulação das franjas (e portanto da relação da intensidade do raio de referência e a intensidade do raio objeto), além do inverso da frequência espacial do filme (resolução). Pelo que na prática terá que existir um

compromisso entre a intensidade da imagem holográfica e a resolução dos detalhes. Normalmente um quociente de intensidade raio referência ao objeto perto de 3:1 em um filme plano é um compromisso satisfatório.

2. 4. Técnicas Holográficas

A partir dos princípios básicos da holografia, diferentes teorias foram propostas: equação de onda, conceito de frente de onda, óptica geométrica, etc. Todas essas teorias fazem com que os hologramas possam ser classificados de modos diferentes. Destacam-se as classificações relacionadas com a ação sobre a onda luminosa, a espessura, o método de registro, o método de restituição e o meio de registro. Independentemente, contudo, dessas classificações aqui serão descritas três dessas técnicas holográficas.

A holografia sem separação de feixes, que resultam nos Hologramas de Gabor é esquematicamente apresentada na Figura 2.2. Neste sistema a onda de referência é plana e usualmente paralela à chapa de registro. Num certo sentido, pode-se dizer que o próprio objeto fornece a onda de referência necessária. Na restituição, observa-se a formação de duas imagens posicionadas simetricamente em relação à chapa de registro. Esse sistema holográfico apresenta duas deficiências básicas.

A primeira é que as variações de transparência introduzidas pela presença do objeto no feixe incidente devem ser pequenas em comparação

com a transparência do fundo contínuo. Um exemplo desta limitação é o de que se pode registrar o holograma de letras opacas sobre fundo transparente, mas não aquele de letras transparentes sobre fundo opaco. A segunda deficiência é que a presença simultânea de imagens gêmeas (imagem real e imagem virtual) torna-se um transtorno para o observador.

Uma evolução dessa técnica holográfica foi proposta por Leith e Upatnieks, que foram os primeiros a imaginar um método para resolver o problema das imagens gêmeas. Esse método consistia em inclinar a onda de referência em relação à direção média da onda objeto de um ângulo qualquer θ , [13], [14], [15]. Como está ilustrado na Figura 2.3, a imagem virtual aparece a $-\theta$ relativamente à direção média (0), a imagem real a $+\theta$. O aumento do ângulo θ faz com que, as franjas de interferência se comprimam. Tipicamente, para um ângulo θ de 60° , o espaçamento das franjas é de $0,6 \mu\text{m}$ (caso do holograma de um ponto, o que indica a resolução necessária do material de registro).

Introduzido por Gabor (1948, 1949, 1951) e resgatados por Leith e Upatnieks (1962, 1963, 1964), os hologramas de Fresnel são obtidos com a mesma montagem do sistema apresentado na Figura 2.3. Se o objeto for uma transparência bidimensional, a onda objeto que chega ao plano do holograma será a figura de difração do objeto. Na restituição, iluminando-se o holograma com a mesma onda como aquela que serviu ao registro, obtém-se a imagem do objeto.

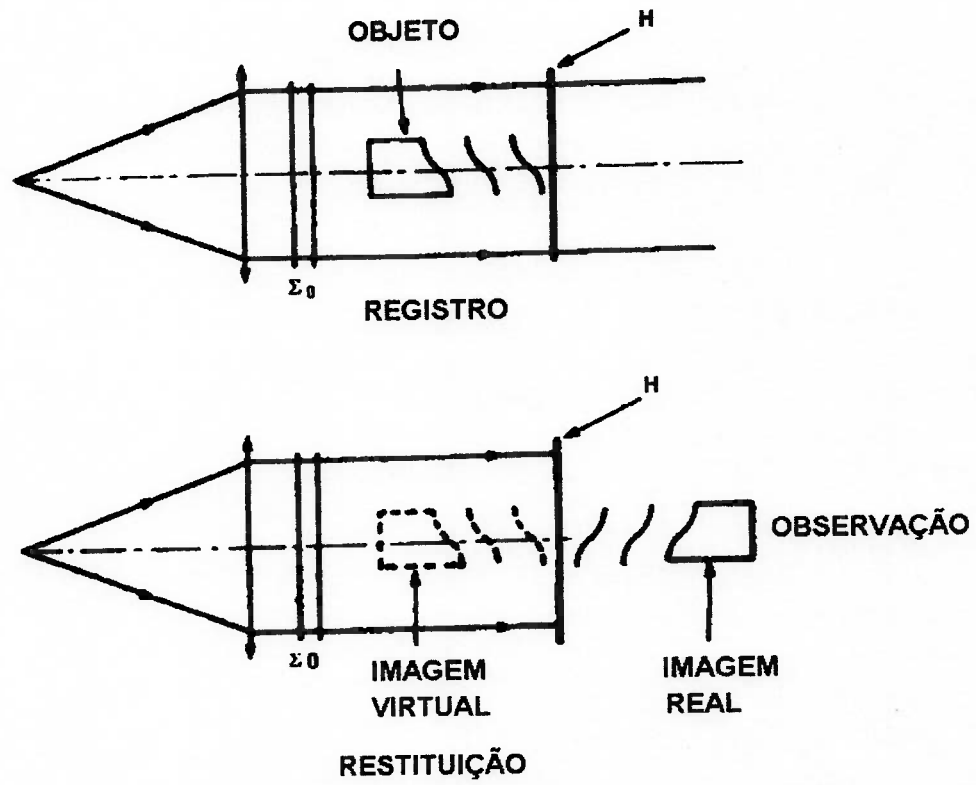


Figura 2.2- Representação Esquemática do Sistema Holográfico de Gabor.

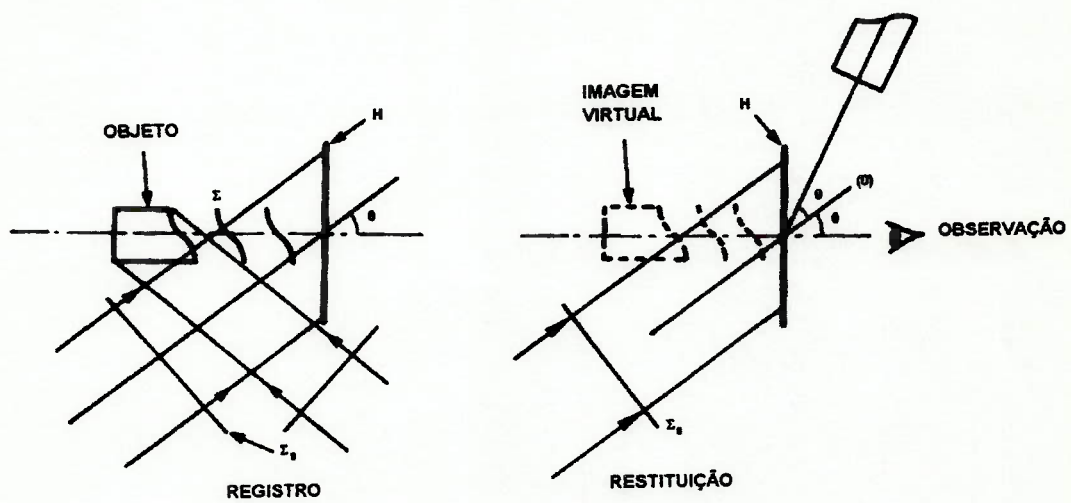


Figura 2.3- Representação Esquemática do Sistema holográfico de Leith e Upatnieks.

É preciso notar que a qualidade da imagem assim obtida depende do ângulo, entre a onda de referência e aquela difratada pelo objeto, por ocasião do registro. Gabor trabalhava com ondas referência e objeto coaxiais para as quais este ângulo era nulo, onde a deterioração da imagem restituída, é devida à interferência entre a imagem focalizada desejada e o ruído de fundo da imagem desfocalizada. Leith e Upatnieks introduziram experimentalmente uma referência fora do eixo, a qual se comportava como uma onda portadora modulada pela informação objeto. Na restituição, esses hologramas reproduzem também duas imagens conjugadas e um ruído de fundo, porém essas duas imagens são separadas, uma da outra, angularmente no espaço, e separadas do ruído de fundo que, por sua vez, está no eixo, daí uma boa qualidade das imagens obtidas. Ademais, deve-se notar que a imagem focalizada é muito mais intensa do que as outras distribuições de energias geradas pelo processo holográfico.

Uma técnica muito usada em engenharia é a Holografia de Dupla-Exposição. A comparação contínua do deslocamento de uma superfície em relação à sua posição original pode ser desnecessária. Nos casos em que apenas interessa analisar comparativamente o registro após um certo tempo com o inicial, faz-se uma tomada do estado inicial e outra do estado final com a mesma onda de referência. Após estas tomadas o objeto e os elementos requeridos para iluminá-lo não são mais necessários, sendo, prescindidos na reconstrução. A onda de comparação, característica do estado inicial, e a que representa um estado alterado, são reconstruídos

iluminando-se o holograma com uma onda semelhante à de referência. Não há necessidade de ajustar a iluminação, e o encolhimento da emulsão, afeta igualmente as ondas reconstruídas não modificando o espaçamento das franjas. A reconstrução do holograma por dupla-exposição é simultânea para as duas ondas registradas em momentos diferentes. Quando se faz a tomada o holograma registra em tempos diferentes as informações dadas. As ondas têm a mesma eficiência de difração e suas intensidades são iguais, provocando o máximo contraste das franjas obtidas.

Uma diferença que surge com respeito a holografia em tempo real, é que ambas as ondas reconstruídas são negativas em relação ao objeto, pelo qual formam uma imagem brilhante do mesmo, quando este permanece inalterado. Isto se deve ao fato de que em ambas as tomadas os máximos coincidem, e as ondas na reconstrução, têm as mesmas fases, porém acrescidas de 180° . A holografia por dupla-exposição elimina os problemas surgidos em tempo real. Tem a desvantagem de registrar dois únicos instantes do fenômeno e de não permitir analisar a figura de interferência por modificação da posição relativa de ambas as ondas.

Os ensaios experimentais desenvolvidos neste estudo utilizarão a técnica holográfica por dupla-exposição.

2. 5. Técnicas da Interferometria Holográfica

Esta técnica possui um potencial muito grande na engenharia e na indústria em geral. A sua maior potencialidade é no controle de qualidade que juntamente com as técnicas de metrologia e digitalização de imagens permite diminuir o tempo e o custo do controle de qualidade.

Entre as aplicações da interferometria holográfica destacam-se:

- ◇ controle de estruturas vibrantes para freqüências compreendidas entre alguns hertz e vários megahertz, e para amplitudes de $0,5 \mu\text{m}$ a uma centena de μm ,
- ◇ controle de microdeslocamentos,
- ◇ visualização de deformação de estruturas complexas,
- ◇ estudo de fenômenos rapidamente evolutivos,
- ◇ controle de formas, com possibilidade de visualizar linhas de nível cuja amplitude está compreendida entre alguns microns e vários milímetros.

A holografia permite registrar, em momentos diferentes, várias ondas, restituindo-as simultaneamente. Se as ondas forem provenientes de estados ligeiramente diferentes do mesmo objeto, o interferograma obtido é característico de solicitações externas às quais foi submetido o objeto entre as diferentes exposições.

A holografia interferométrica em tempo real é realizada através do registro do holograma de um objeto e a revelação em seguida. Na restituição, o holograma é recolocado na mesma posição, com a tolerância dimensional inferior ao do comprimento de onda do laser usado. O objeto, submetido a carregamentos externos, e o holograma, são iluminados nas mesmas condições que quando de registro do holograma. Observa-se então as interferências entre a onda armazenada e a onda difundida pelo objeto submetido ao carregamento.

Desta forma é possível observar, em tempo real, através do interferograma holográfico a evolução do objeto enquanto muda a solicitação. A exploração é feita in situ.

A holografia interferométrica em tempo retardado ou de dupla exposição é realizada através do registro de um primeiro holograma do objeto em seu estado inicial. Em seguida, com a chapa não revelada, o objeto é submetido a um carregamento e efetuar-se um segundo registro holográfico na mesma chapa, e assim quantas vezes se desejar, para no final revelar-se a chapa e ter-se o interferograma. Desta forma o interferograma é fixo e limitado aos estados registrados, com a sua análise feita posteriormente. Via de regra, este método apenas para dupla exposição.

A interpretação dos Interferogramas, de um modo geral, caracteriza-se pelo fato de que um sistema de franjas de interferência superpõe-se à imagem

restituída do objeto. Essas franjas, características das modificações que ocorreram no objeto, apresentam um máximo no lugar onde o desvio entre o objeto inicial e o objeto deformado é um múltiplo do comprimento de onda. Basicamente, a interpretação dos interferogramas requer a análise da localização e da contagem das franjas.

A análise da localização das franjas foi primeiramente feita por Haines e Hildebrand, [29], em 1966. Esta análise utiliza o fato de que as franjas, devido a uma translação do objeto, estão localizadas a uma certa distância atrás de sua imagem restituída pelo holograma. Este "plano" de localização é identificado e sua distância até o objeto é medida. A localização das franjas é tanto mais apurada quanto a pupila de observação estiver mais aberta. De fato, mostra-se que sempre é possível "deslocalizar" as franjas reduzindo-se a pupila de observação. Esta análise é aplicável somente no caso em que as franjas estão localizadas num plano diferente daquele do objeto; Haines e Hildebrand interpretam as franjas como sendo devidas a uma rotação cujo eixo está no plano da superfície do objeto. Este ângulo de rotação foi formulado por diferentes autores, [29], [30], 1970, [31], [32], 1969. A utilização de uma fenda como pupila, permitindo definir um plano de melhor contraste, [33], 1969, e a utilização de uma imagem real do objeto, [32], aumentam os desempenhos deste método, mas a análise de localização das franjas continua, em geral, muito difícil de ser aplicada.

Um método de Contagem das Franjas foi proposto no ano 1967, por Alexandrov e Bonch-Bruevich, [34], e retomado por Gates, [35], em 1969. Consiste em medir a paralaxe das franjas em vez de sua localização. Um sistema óptico de observação é focalizado num ponto da imagem reconstruída, e ajustado até que as franjas tenham um contraste satisfatório. A direção de observação é então mudada progressivamente dentro dos limites da janela do holograma. O número de franjas que passam pelo ponto em questão, para uma dada mudança de direção de observação, é uma medida do componente do deslocamento numa direção perpendicular à direção de observação média. A execução deste método é mais simples do que a do anterior, mas também necessita da utilização do próprio holograma.

2. 6. Interferometria Holográfica Embaixo da água

A interferometria holográfica é uma técnica com grande potencial, podendo ser utilizada para a análise de dimensões, inspeções e análise de tensões de estruturas e componentes. Aplicações similares podem ser realizadas embaixo da água. Para condições submersas só a interferometria holográfica de dupla exposição pode ser utilizada.

Se duas exposições de um objeto separadas por um curto intervalo de tempo, são realizadas sobre um mesmo filme holográfico, qualquer movimento relativo do objeto entre as duas exposições produzirá mudanças no comprimento do caminho óptico da fonte do laser ao filme. As possíveis

pequenas diferenças no comprimento do caminho óptico conduzem a um padrão de referência secundário, o qual se manifesta como uma série de largas linhas escuras brilhantes, superpostas sobre a imagem do objeto. Estas franjas de interferência se concentram ao redor das áreas onde se produziram o maior movimento relativo entre as duas imagens. Portanto qualquer mudança dimensional produzida por pressão ou defeitos na estrutura pode ser visualizada pela concentração de franjas ao redor da área analisada. Nas referências, [36], [37], 1978, se oferecem discussões excelentes da teoria e aplicação da interferometria holográfica.

Na situação submersa, contudo, uma séria dificuldade é encontrada para a interferometria holográfica. O movimento das ondas e os gradientes de temperatura na região de interesse leva ao aumento dessas pequenas flutuações do comprimento do caminho óptico da luz. Em um holograma de dupla exposição, estas mudanças do comprimento do caminho óptico aparecem como franjas de interferência sobre a cena de interesse, e podem escurecer os detalhes da superfície ou podem ser indistinguíveis das franjas sobre o objeto.

CAPÍTULO III

HOLOGRAFIA SUBMERSA

Após a breve discussão, no Capítulo anterior, sobre os aspectos relevantes da holografia e da interferometria holográfica e estabelecidas, suas condições práticas satisfatórias, neste capítulo procurar-se-á relacionar estas informações aos requerimentos e aplicações da holografia submersa.

3. 1. Seleção do Laser

É preciso escolher um laser com boa estabilidade dinâmica. Para o desenvolvimento dos ensaios propostos, estabelecem-se a utilização do laser He-Ne, [38], 1987.

Quanto à estrutura, o laser He-Ne é uma combinação de peças de micromecânica e de óptica de precisão. Em sua maioria, utilizam tubos selados, ou seja, o tubo exterior de vidro é selado em alta temperatura aos eletrodos da extremidade. Os espelhos também são soldados em armações usinadas para garantir um alinhamento ótimo. As potências dos lasers He-Ne, situam-se entre 1 mw e 50 mw, sendo que o utilizado nos experimentos possui 20 mw.

3. 2. Visibilidade embaixo da Água

A visibilidade embaixo da água é um problema comum a todas as técnicas de inspeção visual submersa e os sistemas baseados em laser não são uma exceção. Wall, [39], 1969, discutiu a dispersão e absorção da luz laser embaixo da água e estabeleceu que a visibilidade (na porção verde-azul do espectro) pode mudar de 0 a perto de 70 m, com uma figura típica em torno de 5-10 m.

O fator dominante na atenuação da luz embaixo da água é a dispersão de partículas. Qualquer concentração baixa de partículas submarinas que se mexa através da zona de interesse se registrará no holograma. Para altas concentrações de partículas, a dispersão se incrementará e menos luz atingirá o objeto e retornará à chapa holográfica. A intensidade da onda objeto será reduzida, portanto, diminuirá a modulação das franjas e o contraste do objeto. No pior dos casos, nenhuma luz será recebida de regresso do objeto e só as partículas aparecerão no holograma. A holografia só é aplicável, portanto, sob as mesmas condições de visibilidade que as necessárias para produzir fotografias de qualidade.

3. 3. Arquivo para Registro

A capacidade para reproduzir o tamanho completo da imagem tridimensional de um objeto que mantém o paralaxe completo e a perspectiva da cena de interesse original, é uma característica atrativa da holografia. Se agrega-se a isto sua alta resolução e alta capacidade para armazenar informação, a holografia converte-se em uma técnica potencialmente poderosa e muito desejável para o registro de arquivos embaixo da água. A potência de resolução de um holograma pode ser representada simplesmente em termos do diâmetro do menor ponto a resolver sobre a imagem, o qual está dado por:

$$d \approx 1,22 Z \lambda / D,$$

onde Z é a distância do objeto à chapa, λ é o comprimento de onda da fonte de luz e D é o diâmetro da chapa fotográfica. Assim, para o caso típico adotado neste estudo; $Z=200$ mm, $D=70$ mm e $\lambda = 632.8$ nm (para um laser de He-Ne), tem-se $d \sim 2\mu\text{m}$. Assim, imagens com alto grau de detalhamento, mesmo que de estruturas e componentes tridimensionais em baixo d'água, podem ser registradas para posteriores exames e medições. Esta resolução permite que pequenos defeitos superficiais sejam detectados por técnicas ópticas convencionais.

Em adição à potência que gera uma imagem holográfica, a capacidade de armazenamento de um holograma é também digno de menção. O cálculo aproximado da magnitude dessa capacidade, [40], 1979, apresenta que uma imagem holográfica pode conter 10^{15} bits de informação por metro quadrado, comparado com os 10^{10} bits/m² possíveis para fotografia de alta qualidade. Um simples holograma pode oferecer a mesma quantidade de informação que milhares de fotografias.

3. 4. Holografia Eletrônica

O sistema holográfico conhecido como Holografia Eletrônica, vem tendo pela sua versatilidade uma grande aceitação, [41], 1989. A parte ótica é essencialmente um interferômetro holográfico, onde uma câmera de vídeo substitui o filme da chapa holográfica. A luz refletida do objeto testado é processada para a câmera de vídeo onde combina-se com a onda de referência. Devido à baixa resolução espacial da câmera de vídeo, a luz e as ondas de referência são combinadas em linhas da mesma forma que seriam as franjas de um sistema convencional. O holograma que resulta da imagem é convertido em um sinal temporal para a câmera. A reconstrução holográfica por passos é simulada eletronicamente por subsequente retificação e filtragem dos níveis para geração do sinal de vídeo. Antes do registro, o resultado é exibido no vídeo do monitor.

3. 5. Hologrametria em Inspeção Visual

Os princípios fundamentais de hologrametria, como um meio de alta resolução visual para inspeção, baseiam-se no fato que uma imagem fica permanente e holograficamente registrada como um padrão que pode ser reconstruída sobre a imagem real para comparação, [40], [41], 1979 e 1989. Além disto, este processo de holografia tem a vantagem de documentar convenientemente a imagem real, e não apenas a de referência.

As Figuras 3.1 e 3.2 mostram, respectivamente, as etapas essenciais necessárias para registrar e reproduzir um holograma de um objeto opaco tridimensional. Essencialmente, o holograma é registrado pela superposição de duas frentes de ondas coerentes sobre um filme fotográfico plano. Uma frente de onda, raio objeto, é gerada por iluminação do objeto mediante luz monocromática. A segunda frente de onda, do raio de referência, é uma posição subordinada da onda, coerente com a primeira, incidente sobre o filme plano, para a distribuição da luz recebida do objeto o qual produz um campo de interferência complexa.

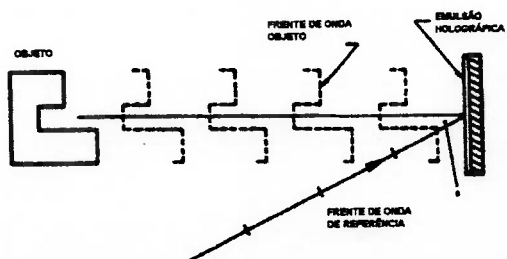


Figura 3.1- Holograma registrado a distância do eixo.

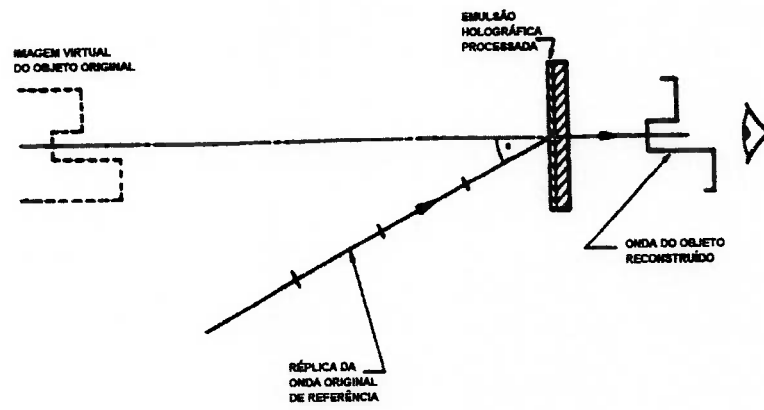


Figura 3.2- Reconstrução da imagem virtual.

O holograma é obtido através do campo de interferência, permanentemente sobre um filme fotográfico de grão fino. Iluminando este holograma, com uma réplica da onda de referência original, é gerado uma onda a qual é propagada em linha com a direção aparente do objeto original, a onda gerada é uma réplica do objeto. Quando o observador percebe esta onda, este não distingue entre esta e aquela da imagem original. Além de haver um lapso de tempo entre a história das duas ondas. Uma imagem de tamanho natural ao objeto original surge localizada por trás da placa fotográfica. Formando, assim, a imagem "virtual" do objeto original.

Em hologrametria, a base da técnica de inspeção é conjugar a imagem real, em lugar da reconstrução da imagem virtual. A conjugação se dá através da iluminação do filme, formando uma imagem em espaço real diante do filme conforme esquematicamente apresenta-se na Figura 3.3. A imagem criada é opticamente idêntica à original, preservando todas as características e aparecendo invertida esquerda-à-direita e inverso-à-frente, quando é observado no espaço na frente do holograma. Devido a sua localização em espaço real na frente do observador, a inspeção visual pode ser executada diretamente sobre esta imagem, usando as técnicas mais convencionais de ótica; como: microscópica de medição, fotografia e videografia.

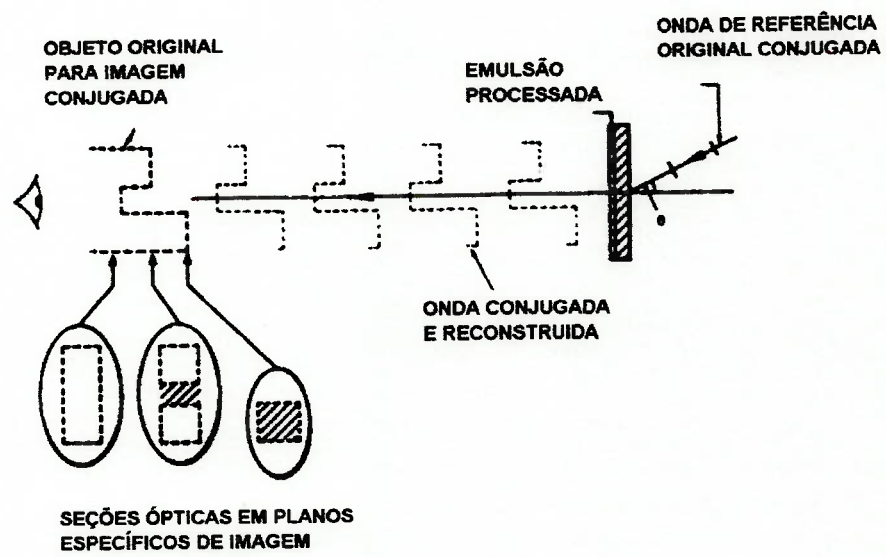


Figura 3.3- Uso de reconstrução da imagem Real em Hologrametria.

3. 6. Fidelidade da Imagem em Hologrametria Submersa

Para permitir medições de precisão dimensional, uma vez produzido o holograma, é necessário que a imagem real reconstruída possua baixos níveis de aberrações, [41], [42]. As aberrações ópticas por hipótese, estão presentes em qualquer sistema de imagem, neste sentido, a holografia, assim como a holografia submersa, não são exceções, [43], 1987. As aberrações reduzem a fidelidade da imagem, mostrando uma imagem de aparência difusa, pouco nítida. Algumas das causas de perda de resolução, são inerentes na óptica utilizada para registro e reconstrução destes processos.

Apesar do mencionado, imagens de alta fidelidade podem ser produzidas. O fator dominante para manter a alta resolução é garantir a qualidade da reconstrução do raio de referência. Para minimizar as aberrações na imagem reproduzida, a reconstrução do raio de referência precisa possuir o mesmo comprimento de onda, que o usado ao registrar a imagem, [44], [45], 1965 e 1967.

Hologramas registrados embaixo da água introduzem efeitos adicionais que afetam a fidelidade da imagem, [46], [47], 1981 e 1991. Alguns destes efeitos estão relacionados com as características e qualidades físicas da água na qual o objeto está situado. Fontes potenciais de degradação da imagem inclui os fatores que podem afetar o índice refletivo local, tais como, gradientes térmicos e turbulências na água. Inevitavelmente estes fatores combinados,

podem reduzir o poder de resolução da imagem, comparativamente com uma situação equivalente no ar.

Grandes variações do índice refletivo local, pode ocorrer na água do mar devido à presença de correntes térmicas e turbulências, [45], [46], [47]. Tais variações através do campo de propagação da luz têm influência sobre o comprimento de onda e direção de propagação da luz na água, devido a esses fatores surgem franjas de interferência sobrepostas sobre o holograma.

A atenuação da luz ao passar pela água ocorre como o resultado de dois processos principais: espalhamento e absorção, [48] 1983. O espalhamento na água de mar aumenta pela interação com partículas suspensas ou microorganismos transparentes que causam desvio da luz do seu trajeto original.

A hologrametria é uma área nascente da holografia na qual a análise dimensional e o mapa de coordenadas da cena original, pode ser realizado interceptando diretamente a imagem real com uma câmera de TV ou um microscópio para medir. As aplicações da técnica tem incluído análises de tamanhos de partículas, [49], 1974, holografia de câmeras de borbulhas, [50], 1989, e exame depois da irradiação de elementos combustíveis do reator, [51], 1986.

Os esforços para desenvolver a hologrametria para inspeções embaixo do mar, de instalações marinhas, tem estado relacionados com os problemas associados à formação de imagens debaixo da água, [52], [53], 1985 e 1987. Além da influência de dispersão e de polarização sobre a relação sinal - ruído, as aberrações são encontradas quando a imagem de uma cena submersa é recolhida no ar. Como resultado do câmbio no índice de refração entre o registro e a recolhida, a imagem apresenta aberrações, [54], 1989.

A implementação prática de um esquema para a reconstrução de hologramas submersos sem aberração requer de considerações mais detalhadas. A correção da aberração será só exata se o registro é realizado na água, isto é, com o filme holográfico, fonte de referência e o objeto na água, desde o ponto de vista prático desejamos evitar tal arranjo, preferindo fixar a posição da chapa holográfica no ar detrás de uma janela de observação de vidro.

3. 7. Hologrametria Submersa, Aberrações na Imagem Real de um Objeto Submerso quando é Recolhido no Ar

As Indústrias de exploração de gás e óleo do mar, confiam fortemente na inspeção visual remota, de componentes e estruturas submersas, executadas no presente por fotografia estéreo ou convencional e televisão de circuito fechado.

Em marcado contraste a uma imagem produzida pela óptica convencional, a imagem holográfica reconstruída, combina alta resolução com uma grande profundidade de campo e pode ser vista desde uma faixa angular larga. É a singular combinação destas propriedades a que sustenta o potencial da holografia na metrologia de estruturas tridimensionais complexas.

Tal como na óptica convencional, o desenho de um sistema bem corrigido é um pré-requisito para a alta qualidade da execução, já que a resolução e fidelidade da imagem dependerá do grau em que as tolerâncias práticas permitam liberdade para as aberrações, [55], 1965. As fontes mais comuns de aberração na imagem reconstruídas incluem:

- I. Efeitos de emulsão, particularmente não uniformidade na espessura e contração, [56], 1971.
- II. Trocas do comprimento de onda entre o registro e repetição, [57], 1971.
- III. Não uniformidades do feixe, especialmente à conjugação em aplicações de imagem real.
- IV. A qualidade óptica de todos os componentes incluindo o substrato de vidro das placas holográficas, [58], 1969.
- V. Geometria no registro e reconstrução, especificamente trocas na posição e o alinhamento do holograma com respeito ao feixe de iluminação, [59], 1984.

3. 8. Condições Experimentais em Água

Quando aplica-se uma técnica interferométrica semelhante à Holografia Eletrônica em condições submersas, encontram-se situações e problemas novos. Podem listar-se por ordem de criticidade, os seguintes problemas fundamentais: atenuação da luz, turbulência, variações térmicas, índice de refração na água.

A absorção e o espaçamento causadas por partículas, bactéria e moléculas de água, atenuam fortemente a propagação da luz na água, [60], 1976. Estes efeitos dependem do comprimento de onda da luz e o grau de contaminação da água. A potência do laser necessária para registrar uma certa área em um objeto em água, é mais alta que a necessária para a mesma área no ar. Para distâncias maiores, o efeito da atenuação chega a ser tão severo que podem inviabilizar os registros holográficos.

A turbulência e gradientes térmicos causam flutuações ao longo da trajetória ótica do raio objeto devido a mudanças no índice refrativo da água, fazendo com que hajam flutuações nas franjas observadas no monitor. Este problema é especialmente grave para estudos de deformação onde é necessário um período prolongado de observação, podendo mesmo se tornar impossível nos casos de forte turbulência. Análises de vibrações só é possível sob condições muito pouco turbulentas e com um tempo médio de exposição que permita construir várias franjas padrões de boa qualidade.

Para um laser He-Ne, com $\lambda_{\text{v\u00e1cuo}} = 632.8$ nm, o comprimento de onda na \u00e1gua \u00e9 $\lambda_{\text{\u00e1gua}} = 475,4$ nm (\u00edndice refrativo $n_v = 1,331$). De acordo com o n\u00famero de franjas correspondentes para um certo deslocamento (deforma\u00e7\u00e3o ou vibra\u00e7\u00e3o), este \u00e9 mais alto na \u00e1gua que no ar ou do que no v\u00e1cuo. Quando o holograma \u00e9 registrado embaixo da \u00e1gua e reconstru\u00eddo no ar, a imagem reconstru\u00edda poder\u00e1 sofrer aberrat\u00e7\u00e3o entre os dois meios, [53], [61], 1988. As aberrat\u00e7\u00f5es ocorrem em intensidade maior nas holografias submersas do que nas realizadas no ar, apesar de fundamentalmente n\u00e3o serem diferentes. A causa destas aberrat\u00f5es est\u00e1 fundamentalmente relacionada trajet\u00f3rias percorridas pela luz no ar e na \u00e1gua.

Na reconstru\u00e7\u00e3o da imagem - real, a resolu\u00e7\u00e3o da imagem \u00e9 limitada pela qualidade do holograma constru\u00eddo. Na pr\u00e1tica, muitos efeitos, semelhantes aos antes descritos, combinam-se para reduzir a fidelidade total da imagem.

Ainda n\u00e3o citado, \u00e9 o problema da imagem deslocada que \u00e9 observado na repeti\u00e7\u00e3o de hologramas embaixo da \u00e1gua. Em particular, devido ao fato que ocorre refra\u00e7\u00e3o da luz sobre a interface ar/\u00e1gua durante os registros, e o mesmo n\u00e3o ocorre na reprodu\u00e7\u00e3o do holograma, os raios reprojatados n\u00e3o convergem para o mesmo ponto do qual ele foi emitido. Na reprodu\u00e7\u00e3o no ar, os raios retrocedem para a sua origem aparente, mostrando um desenvolvimento na imagem com rela\u00e7\u00e3o ao ponto de refer\u00eancia, Figura 3.4.

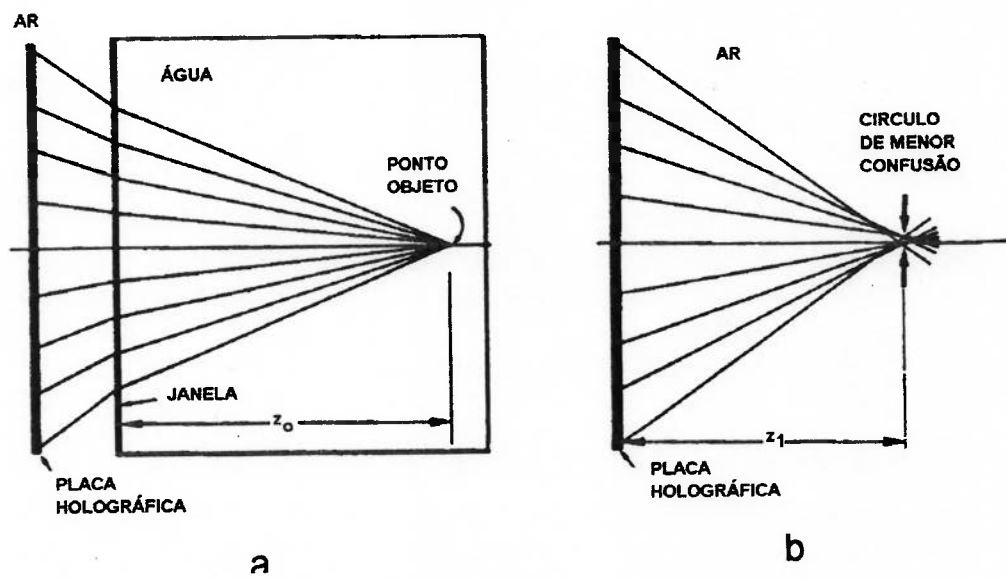


Figura 3.4- Origens de aberração esférica em Holografia embaixo da água.

a - Registro

b - Reprodução

CAPÍTULO IV

ENSAIOS EXPERIMENTAIS

4.1. Introdução

Têm-se um crescente número de aplicações Industriais da holografia, onde o produto final requerido é um holograma de alta resolução de uma cena de interesse. A partir deste holograma pode-se realizar uma análise dimensional diretamente sobre uma imagem reconstruída no espaço real, [41]. Este campo da holografia se conhece como Hologrametria e é particularmente útil quando a inspeção realiza-se em um ambiente agressivo ou onde o acesso é difícil.

Nosso interesse no Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP, tem sido a aplicação da Hologrametria em medições de Engenharia. Este trabalho inclui o registro de hologramas de um objeto submerso na água com a subsequente recolhida da imagem real no ar. Inevitavelmente provoca uma imagem que tem um poder de resolução por baixo à de uma situação equivalente no ar. A imagem terá além disso, aberrações ópticas induzidas pelo registro em um meio com um índice de refração e sua recolhida é em outro.

4.2. Seleção do meio para a execução dos ensaios

Para comparar e examinar o poder de resolução dos hologramas embaixo da água, com o holograma equivalente tomado no ar, foram escolhidos os seguintes meios para os ensaios.

- Ar,
- Água Destilada,
- Água Corrente,
- Água Potável,
- Água de Mar.

No caso da água destilada, esta foi obtida pela compra em estabelecimento que garantisse a mesma.

A água comum, foi tomada diretamente da torneira no Laboratório de Interferometria da FATEC.

Em particular, as águas potáveis e de mar, foram elaboradas a partir da compra de seus componentes e conforme as recomendações da bibliografia consultada.

4.2.1. Composição da Água Potável

É interessante observar a distinção que se faz entre poluição e contaminação, [62], 1969. Para os ecólogos em geral, a poluição decorre de qualquer alteração de natureza física, química, biológica ou mesmo de regime hidrológico que produza desequilíbrios no ciclo biológico normal, contribuindo para alterar a composição da fauna ou flora do meio. A poluição de um meio aquático pode causar alterações das características físicas-turbidez, cor, temperatura, viscosidade, tensão iônica, oxigênio dissolvido, grau de toxicidade, nutrientes, etc., ou biológicas-espécies do fitoplâncton e zooplâncton, que comprometem por poluição, o uso da água para consumo humano.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, baixou a Resolução nº 20, de 15 de Junho de 1986, que classificou as águas no Brasil, estabelecendo o tipo de tratamento requerido para as águas destinadas ao abastecimento público, [63], 1993.

Tendo em consideração os limites dos parâmetros de qualidade das águas destinadas ao consumo público estabelecidos pelo CONAMA, e considerando o resumo anual dos dados de qualidade de um manancial - 1990, propõe-se a seguinte composição para a água potável; Tabela 4.1.

Característica	Valores (mg/l)		
	mínimo	médio	máximo
pH	6,5		7,2
Alcalinidade (mg/l - CaCO ₃)	22	34	50
Cloretos (mg/L - CL)	3,44	12,23	27,88
Cálcio (mg/L - Ca)	3,94	6,74	25,11
Potássio (mg/L)	2,0	3,99	5,71
Magnésio (mg/L)	1,25	1,82	3,83
Sódio (mg/L)	6,01	18,7	65,34

Tabela 4.1- Composição proposta para a água potável.

Em todas as análises, foi considerado o valor médio de cada componente. No Anexo I são apresentados os conjuntos de dados correspondentes aos cálculos da composição da água potável, segundo esta análise obtém-se a composição mostrada na Tabela 4.2.

Tipo de Substância	Conteúdo (mg/L)
NaHCO ₃	57,12
NaNO ₃	11,05
CaCl ₂	18,87
KCL	7,45
MgCl ₂	7,12

Tabela 4.2. Composição obtida para a água potável.

4.2.2. Composição da Água de Mar

Neste caso, a análise foi realizada tomando em consideração os elementos abortados em, [64], 1979. Partindo da composição standart da água de mar, definida pelo Laboratório Hidrográfico de Copenhague, Dinamarca, Tabela 4.3.

Procurando trabalhar com componentes de fácil acesso, temos que:

- NaHCO_3 2,5 meq.g/L - 2,5 meq.g/L Na^+ - 2,5 meq.g/ HCO_3^-
- NaBr 0,9 meq.g/L - 0,9 meq.g/L Na^+ - 0,9 meq.g/L Br^-
- NaCl 477 meq.g/L - 477 meq.g/L Na^+ - 477 meq.g/L Cl^-
- SrCl_2 20,9 meq.g/L - 20,9 meq.g/L Ca^{2+} - 20,9 meq.g/L Cl^-
- KCl 10,2 meq.g/L - 10,2 meq.g/L K^+ - 10,2 meq.g/L Cl^-
- MgCl_2 51,6 meq.g/L - 51,6 meq.g/L Mg^{2+} - 51,6 meq.g/L Cl^-
- MgSO_4 57,8 meq.g/L - 57,8 meq.g/L Mg^{2+} - 57,8 meq.g/L SO_4^{2-}

Cátions			Anions	
	mg/L	meq./L	mg/L	meq./L
Na ⁺	11035	479,8	CL ⁻ 19841	559,6
Mg ²⁺	1330	109,4	SO ₄ ²⁻ 2769	57,6
Ca ²⁺	418	20,9	HCO ₃ ⁻ 146	2,5
K ⁺	397	10,2	Br ⁻ 68	0,9
Sr ²⁺	13,9	0,3		
Salinidade total	36047 mg/L			
Alcalinidade total	119,8 mg/L			

Tabela 4.3. Composição standart da água de mar.

No Anexo II são apresentados os conjuntos de dados correspondentes aos cálculos da composição da água de mar, segundo esta análise obtém-se a composição mostrada na Tabela 4.4.

Tipo de Substância	Conteúdo (mg/L)
NaHCO ₃	210
NaBr	92,7
CaCl ₂	1159,9
KCL	759
MgCL ₂	2451
NaCL	279
SrCL ₂	23,7
MgSO ₄	3468

Tabela 4.4. Composição obtida para a água de mar.

As quantidades calculadas das substâncias para a água potável assim como para a água de mar, foram aumentadas em duas vezes devido à capacidade do aquário utilizado para os ensaios (2 litros). A água base foi destilada.

4.3. Descrição do Arranjo Holográfico para recolher os hologramas no ar e embaixo da água

Na realização dos hologramas registrados no ar e embaixo da água, foi usado o arranjo óptico mostrado na Figura 4.1. Neste, se trabalha com o tanque de observação com as seguintes dimensões: Comprimento 400mm, altura 200mm e largura 200mm; para os testes embaixo da água, colocou-se uma divisão no tanque, que permitiu diminuir a quantidade de água até 2 litros. No teste realizado no ar o tanque não foi utilizado.

O objeto para todas as medições foi uma placa engastada de aço ABNT 1045, Figura 4.2; cujas dimensões são: comprimento 230mm, largura 40mm e espessura 6mm.

O dispositivo para se realizar a experiência de flexão, da placa com o carregamento unidirecional é mostrado esquematicamente na Figura 4.3 e na Figura 4.4 (foto). Aplica-se uma carga de 0,29N na extremidade oposta ao esgastamento.

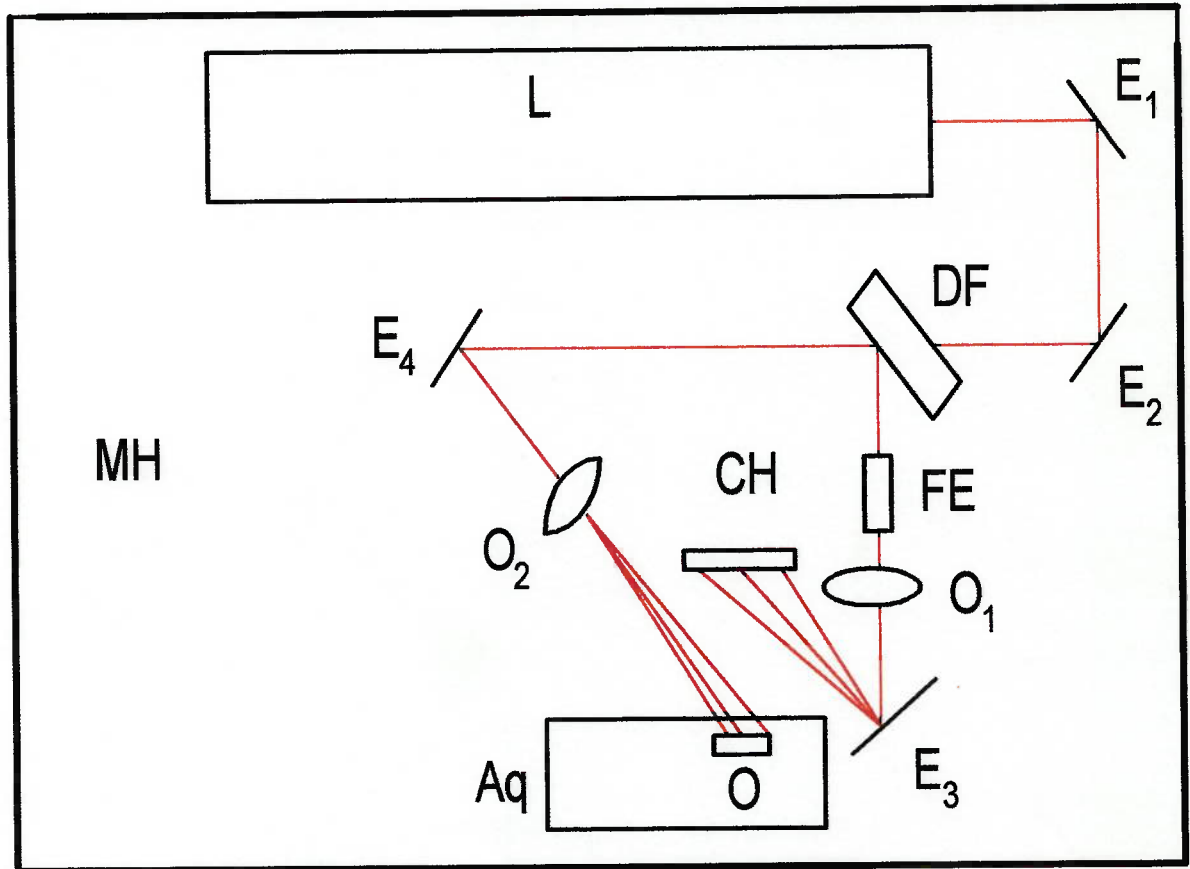


Figura 4.1. Arranjo holográfico utilizado para recolher os hologramas no ar e embaixo da água.

Da Figura: (L), Laser; (E_1 , E_2 , E_3 e E_4) espelhos; (DF), divisor de feixe; (FR), feixe de referência; (FO), feixe objeto; (FE), filtro espacial; (CH), chapa holográfica; (O_1 e O_2 , objetivas e (Aq), aquário.

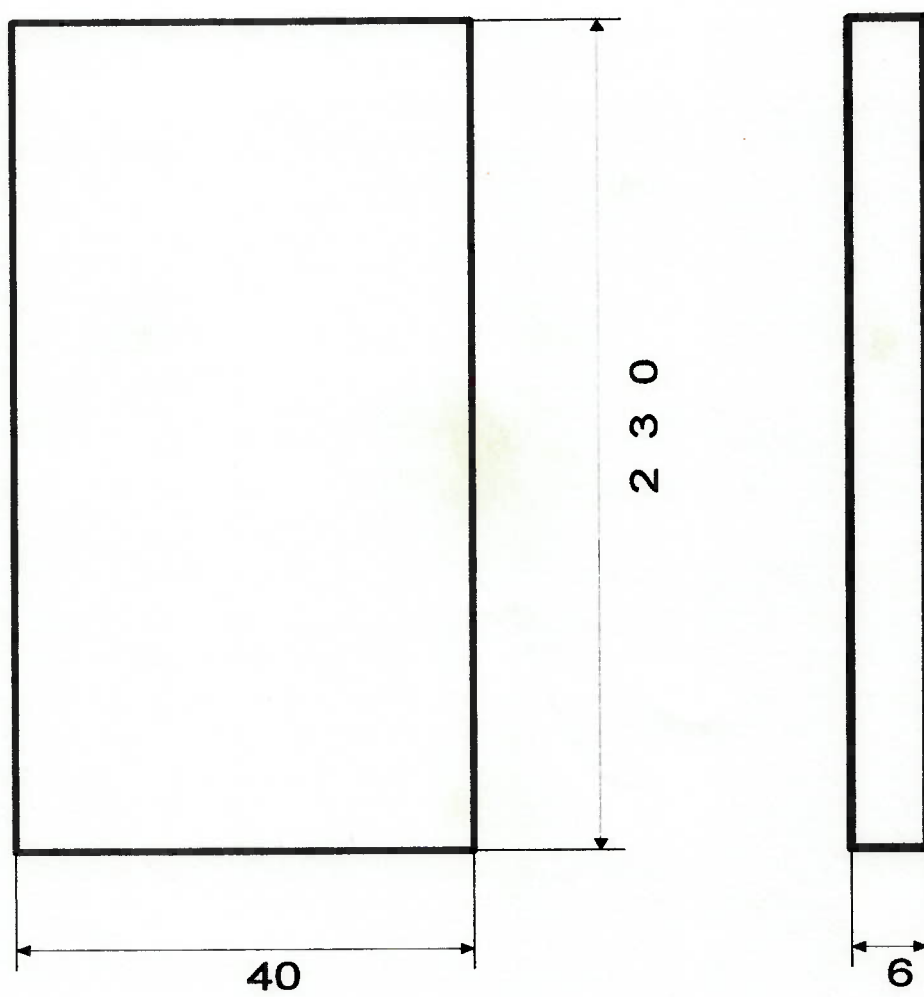


Figura 4.2- Placa de aço ABNT 1045.

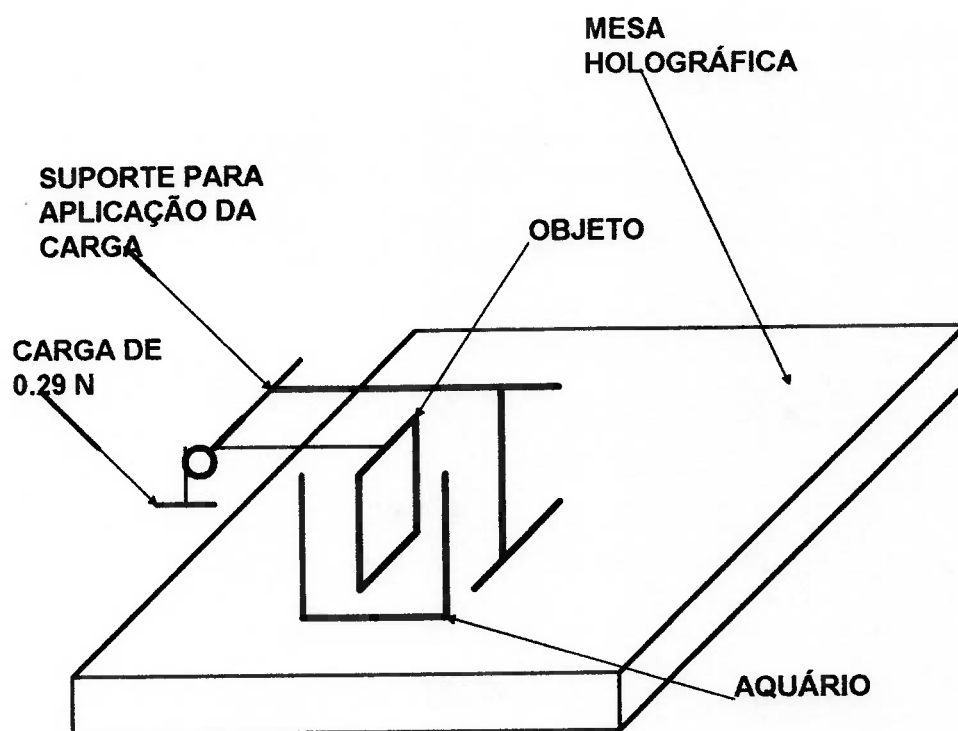


Figura 4.3-Representação esquemática do dispositivo empregado para realizar a experiência de flexão da chapa de aço.

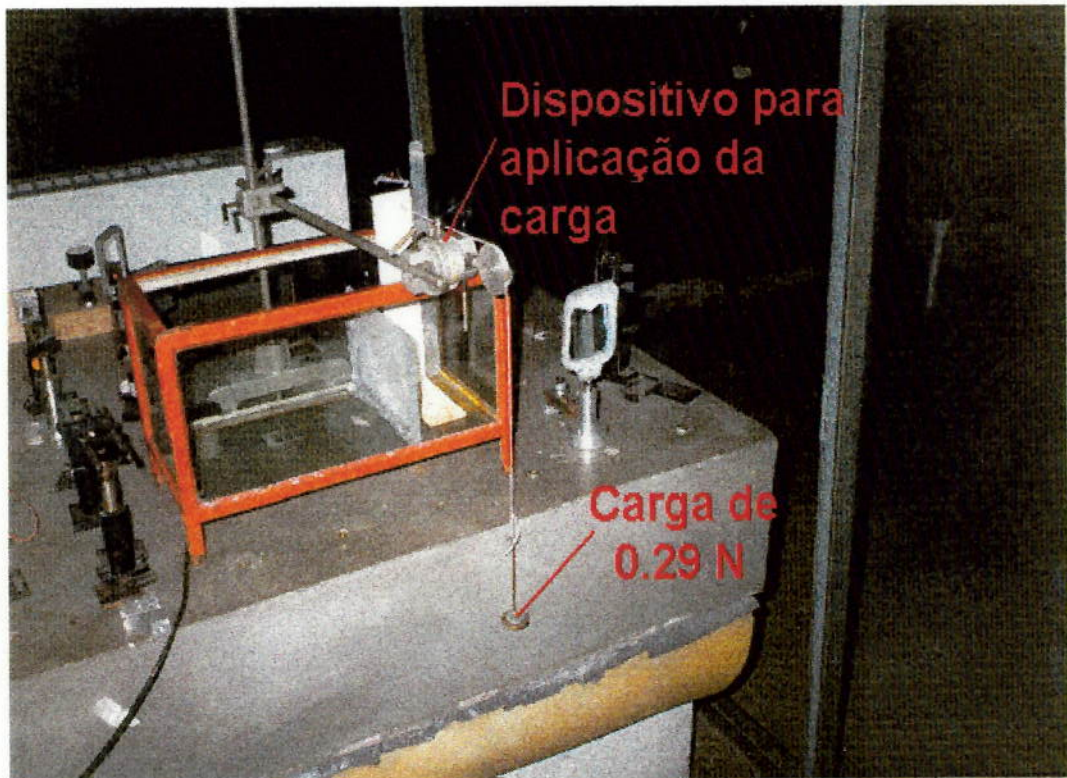


Figura 4.4- Foto que mostra o dispositivo utilizado para-se realizar o estudo de flexão, aplicando-se uma carga de 0.29 N.

Tal e como se mostra na Figura 4.5 foi colocada ao lado da placa de aço, uma régua graduada com linhas horizontais espaçadas entre si a 5mm. O objetivo desta nos ensaios, é garantir um ponto de referência conhecido e que não seja deformada durante os deslocamentos produzidos na obtenção dos hologramas.

O complemento do arranjo holográfico o constitui: O Laser de He-Ne, da Zeiss Alemanha, modelo HNA 188 que emite um feixe com comprimento de onda de 632,8nm; linearmente polarizado no plano vertical com aproximadamente 2mm de diâmetro e potência de 20mw. Foram utilizados também; quatro espelhos, um divisor de feixe, duas objetivas para expandir o feixe, um filtro espacial e o suporte para a chapa holográfica.

O arranjo mostrado na Figura 4.6, funciona assim; O Laser (L) emite o raio de luz em direção ao espelho (E_1) que o reflete ao espelho (E_2), e deste é refletido ao divisor de feixe (DF); neste são obtidos o feixe de referência (FR), e feixe objeto (FO), Figura 4.7. O feixe de referência é filtrado espacialmente e expandido pelo filtro espacial (FE), o feixe expandido é direcionado à chapa holográfica (CH) porém antes de chegar até esta, passa pela objetiva (O_1) e o espelho (E_3). O raio (RO) é direcionado pelo espelho (E_4) e a objetiva (O_2), para o objeto (O) que encontra-se no aquário (Aq).

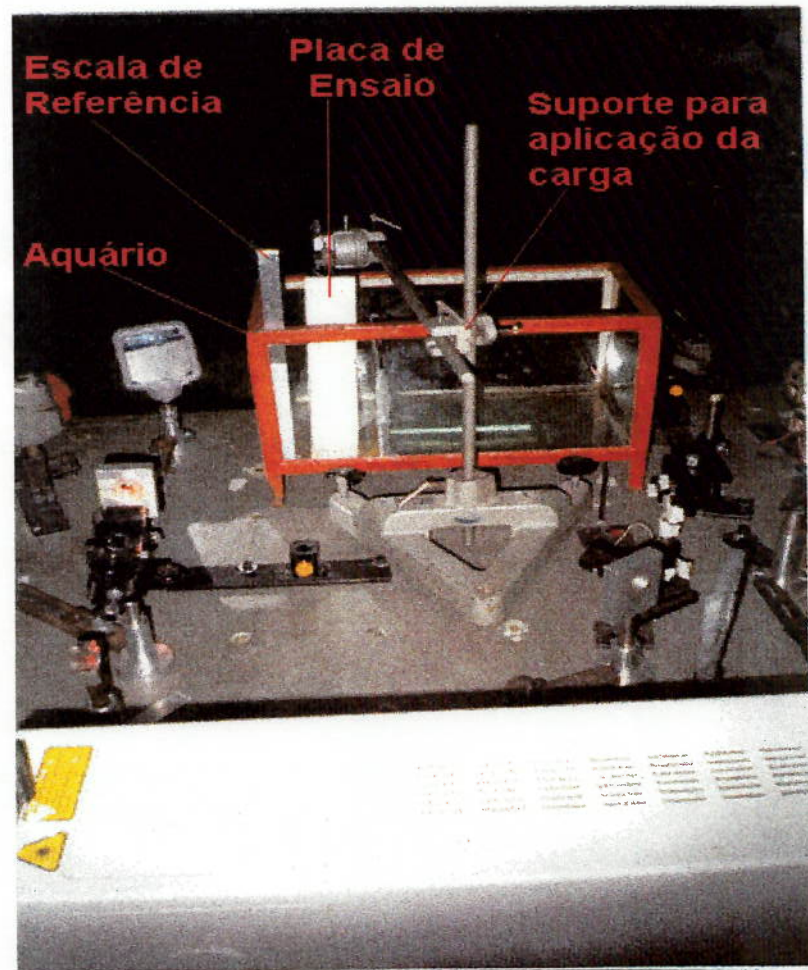


Figura 4.5- Mostra-se a localização da regua graduada, usada durante todos os ensaios.

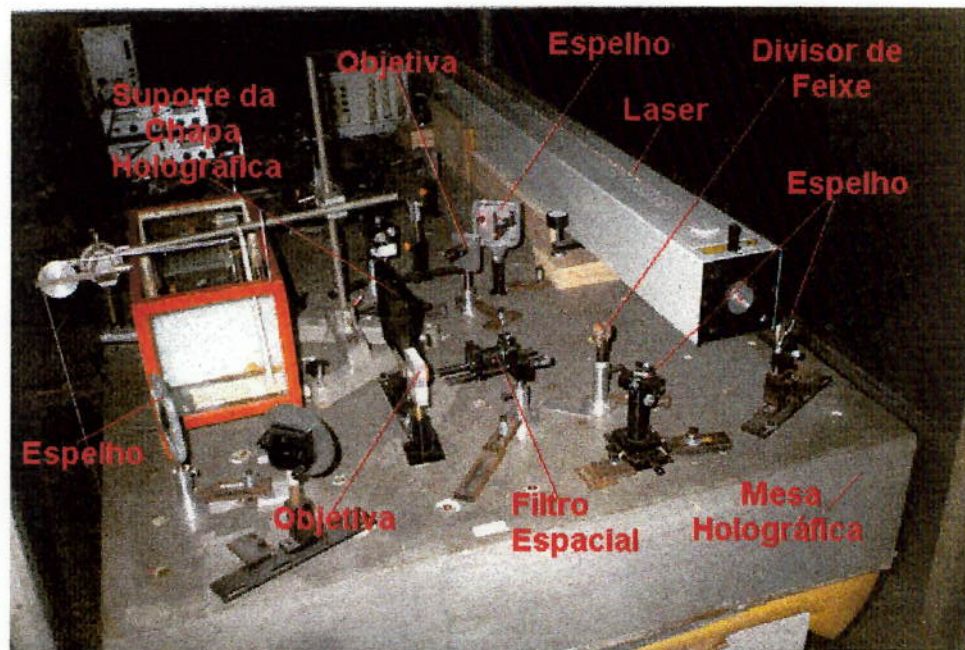


Figura 4.6- Foto do arranjo holográfico.



Figura 4.7- Foto onde aparecem representados os feixes, Referência (FR) e Objeto (FO), com suas respectivas trajetórias.

A mesa holográfica (MH) foi construída in-situ, formada por placa de concreto com 230mm de espessura; 1,20m de largura e 2,15m de comprimento, com isolamento formado por espuma de alta densidade, plástico de bóia, isopor e papelão.

Os porta espelhos E_1 e E_2 são da Optron de Campinas; no caso dos espelhos E_3 e E_4 ; estes foram construídos na oficina mecânica da EPUSP e o espelhamento do vidro para estes foi realizado por aluminização no laboratório de LSI - Depto. de Engenharia Eletrônica, Microeletrônica da Faculdade de Elétrica da USP. O tamanho destes é de 80 x 80mm. O filtro espacial (FE) e as objetivas (O_1 e O_2) são da Splindler & Hoyer. A magnificação das objetivas é de 20 x.

4.3.1. Placas holográficas

Existem três tipos de elementos que podem servir para obter hologramas: filmes, placas plásticas e placas de vidro. Os resultados crescem relativamente à qualidade dos filmes para as placas de vidro devido ao aumento de rigidez que facilita a estabilidade durante as tomadas, principalmente as de dupla-exposição: Filmes da Kodak, Placas plásticas da Agfa Gevaert, Placas de vidro da Kodak.

4.3.2. Registro dos Hogramas

Para a obtenção dos hologramas, a estabilidade mecânica da mesa é de importância fundamental. Isto é evidente pelo fato da holografia ser um registro de franjas de interferência. Se a fase relativa entre o feixe objeto e o feixe de referência muda durante a exposição, haverá superposição das franjas de interferência destruindo-se a figura de interferência. Por isso, movimentos da ordem de um quarto do comprimento de onda e maiores, devem ser evitados. Todos os hologramas foram registrados sobre placas holográficas Agfa tipo 8E56HD, o tempo de exposição da chapa holográfica foi de 3 s. na dupla exposição. Na Tabela 4.5, [65], 1987, são dadas as características básicas de algumas emulsões.

Tipo	Espessura (μm)	Resoluções (linhas/mm)	Sensibilidade ($\mu\text{j}/\text{cm}^2$)	Comp.de Onda (nm)
Kodak				
649 F	17	2000	70	632,8
120-02	6	2000	30	632,8
Agfa Gevaert				
8E75	7	5000	10	632,8
10E75	7	2800	5	632,8
8E56HD	7	5000	15	478,0

Tabela 4.5- Características principais de algumas emulsões fotográficas para holografia.

4.3.3. Revelação dos Hogramas

O método usado no processamento das placas determina características muito importantes no holograma. A curva de resposta depende do tempo de revelação, da temperatura e da natureza do revelador. No trabalho usou-se o Agfa GP62, estando a temperatura ao redor dos 20°C.

Para interromper a revelação põe-se o holograma 30 s. em água corrente. Após isto, fixa-se em Agfa GP62, uma vez exposto o filme, o mesmo foi revelado com o procedimento seguinte:

- a) Revelação por 5 minutos em revelador Agfa GP62, com agitação intermitente e lavagem em água corrente por 30 s. a 20°C.
- b) Fixação de 5 minutos com fixador PBQ (parabenzoquina).
- c) Lavagem por 10 minutos em água corrente.
- d) Secagem lenta na temperatura ambiente.

4.3.4. Alinhamento da Montagem Holográfica

A altura do feixe laser em relação à mesa define o plano óptico da montagem, a partir do qual todos os componentes ópticos ficarão alinhados. Os primeiros componentes, os espelhos E_1 e E_2 , direcionam o feixe; ao divisor de feixe (DF), composto por um disco de refletividade variável o que permite definir muito bem a intensidade de ambos os feixes (FR e FO) Figura 4.7.

Ajustando-o DF de forma que os feixes transmitidos FR e FO permaneçam aproximadamente com a mesma intensidade ($FR = FO$), garante-se uma melhor visibilidade das franjas do padrão. Definindo-se também o caminho óptico percorrido pelos FR e FO a partir do DF até a região de interferência, mantemos a diferença do caminho o mais próximo possível de zero, garantindo-se alto contraste do padrão.

A filtragem espacial de um feixe laser é necessária para eliminar os ruídos ópticos provenientes do próprio feixe ou defeitos e sujeiras nos componentes ópticos. O sistema de FE é composto por uma objetiva e um pequeno orifício circular conhecido como "pinhole" (com $20 \mu\text{m}$). Todo o alinhamento dos componentes ópticos foi feito de modo ordenado de forma a garantir a eficiência do procedimento.

Primeiramente, centralizamos o feixe Laser ao DF, mediante o ajuste dos espelhos E_1 e E_2 . Seguidamente procede-se ajustar e centralizar a objetiva do FE em relação ao FR proveniente do DF, e ajustar o pinhole de forma a deixá-lo no foco desta objetiva. A escolha do par objetiva-pinhole precisa ser ideal. No caso, onde o diâmetro do pinhole é menor que o foco da objetiva, surgirão anéis de difração comprometendo a filtragem do feixe. No caso, onde o diâmetro do pinhole é muito maior que o foco da objetiva, a filtragem será ineficiente, pois os ruídos ópticos citados anteriormente não serão eliminados. O caso ideal ocorre quando o diâmetro do pinhole é ligeiramente menor que o foco; desta maneira, obteremos uma filtragem espacial perfeita. Para a

realização de nossos ensaios, foi usado um conjunto com objetivo de 25x e um pinhole de 20 μ m.

O completamento do alinhamento, é o direcionamento do FR à chapa holográfica, e do FO à chapa de aço localizada na posição para o teste.

4.4. Descrição do Arranjo Holográfico para a reconstrução dos Hogramas

A reconstrução dos hologramas obtidos, foi desenvolvida no Laboratório de óptica do Instituto de Física da USP. Para a reconstrução dos hologramas, foi empregado o arranjo holográfico representado na Figura 4.8, formado por um Laser (L) de Argônio da Spectra Physics, com $\lambda = 488\text{nm}$ e potência de 200 mw, que se localiza embaixo da mesa, Figura 4.9, e ao sair acima desta, dirige-se ao espelho E.

A mesa holográfica (MH) table top, modelo RS 2000 48-12 com isoladores de vibração pneumáticas da Newport, modelo I-2000-435,5; Figura 4.10. Uma objetiva (O), uma câmera CCD (C) Hitachi B&W 2/3" com placa digitalizadora e sistema de aquisição de imagem, Figura 4.11; um monitor de TV e um microcomputador Pentium com Software (Global Lab.) para aquisição e processamento da imagem, Figura 4.12.

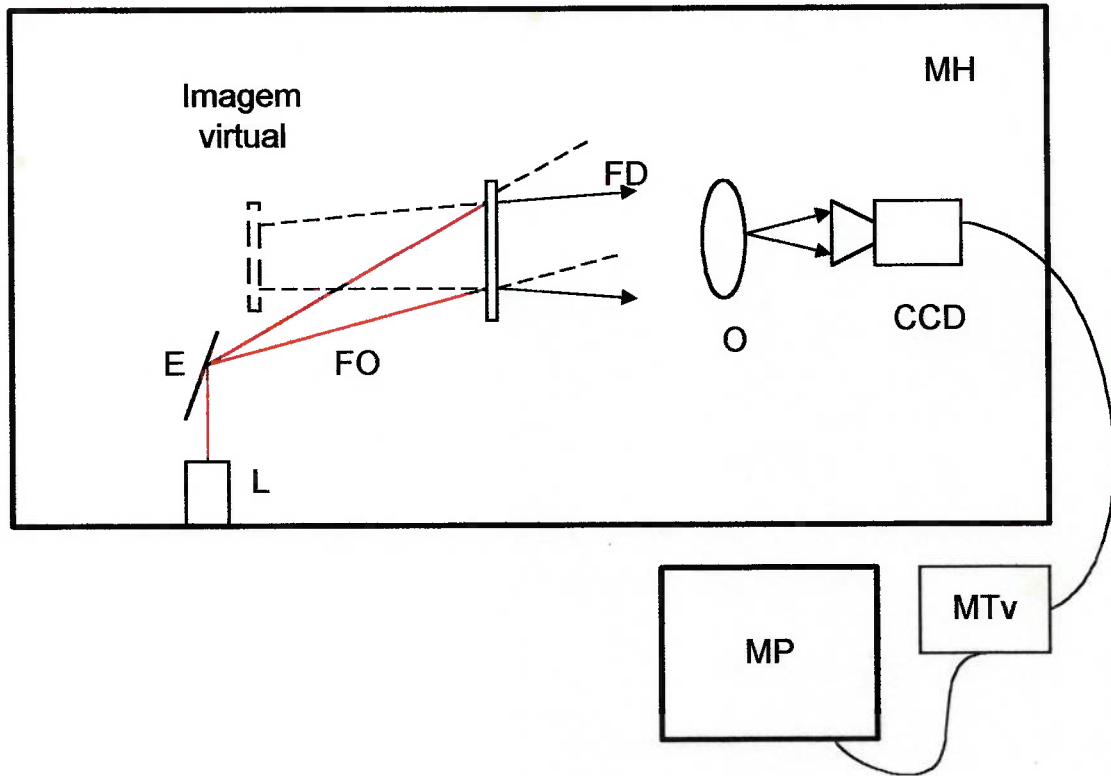


Fig 4.8- Arranjo holográfico utilizado para reconstruir os hologramas.

Da Figura:

L - Laser, E - Espelho, MH - Mesa Holográfica, O - Objetiva, CCD - Câmera CCD, MTv - Monitor de Tv, MP - Microcomputador, FO - Feixe de Observação e FD - Feixe Difrato.

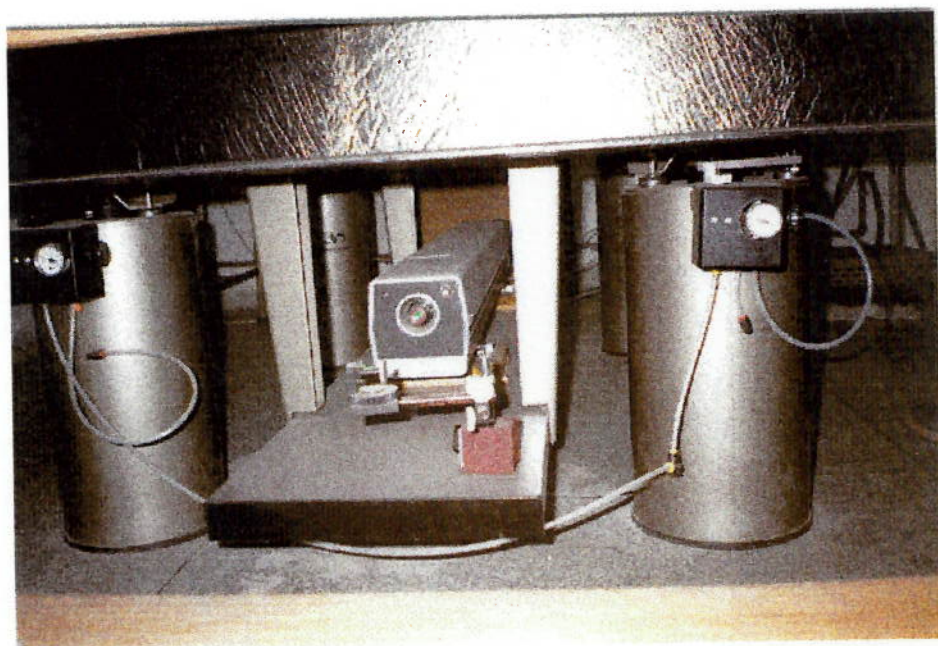


Figura 4.9- Foto onde se mostra a localização do laser de Argônio embaixo da mesa holográfica e o sistema de isoladores desta.



Figura 4.10- Foto demonstrativa da mesa holográfica utilizada na reconstrução dos hologramas. Distíngui-se parte do sistema de isoladores pneumáticos.

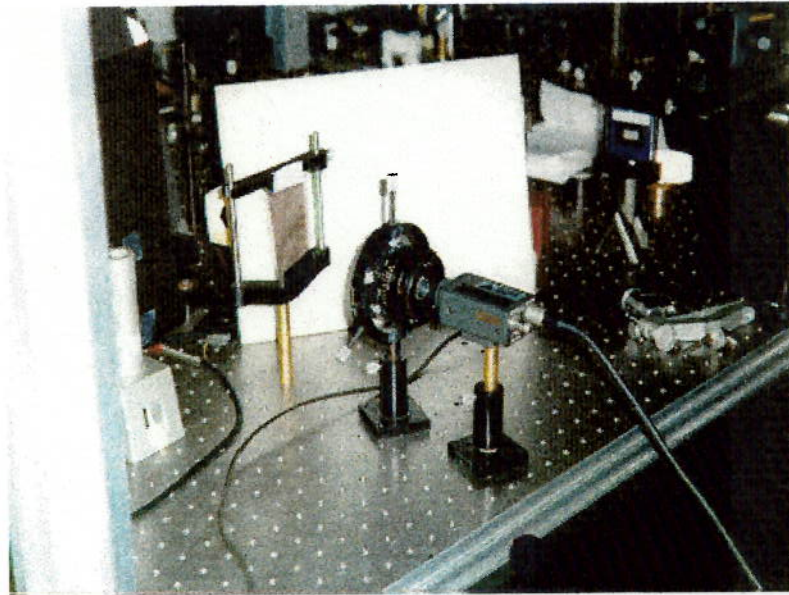


Figura 4.11- Mostra-se o sistema de aquisição da imagem holográfica, formado por uma objetiva e a câmera CCD.

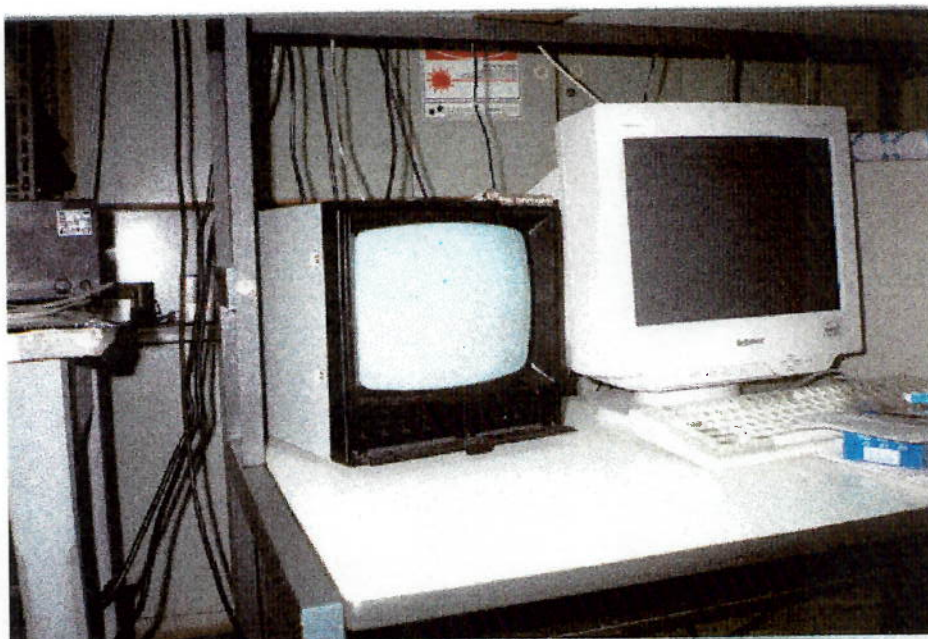


Figura 4.12- Foto do monitor de Tv e o microcomputador Pentium, utilizados no processamento dos interferogramas.

Este arranjo, trabalha da seguinte forma: O Laser (L), dirige o feixe de observação (FO) ao espelho (E) e deste é refletido ao holograma (h), o feixe difratado (FD) é coletado pela objetiva (O) e a câmera CCD (C), para que a imagem holográfica seja observada pelo monitor de TV (Mtv). O processamento necessário para a melhoria da imagem e para a interpretação do interferograma obtido foi feito usando uma placa digitalizadora de imagens e o microcomputador Pentium (MP).

4.5. Interpretação das Franjas de Interferência

Quando é empregada a holografia interferométrica pode-se ter, informação de tipo quantitativa ou qualitativa. Em dependência do objetivo do trabalho, é processada uma ou a outra.

Em situações de aquecimento, torção, mudanças de umidade, esforços, etc., é possível encontrar a diferença de fase entre a onda original e a onda do corpo deformado, a partir de nossas condições de trabalho, se instrumentou um método de decifrado consistente em uma combinação dos métodos de Aleksandrov e Bonch Bruevich, com as expressões finais de Haines e Hildebrand, [66], [67], 1968 e 1972.

O enfoque de Aleksandrov e Bonch-Bruevich é a base do desenvolvimento já clássico da interferometria holográfica. No mesmo utiliza-se o paralaxe das franjas no espaço para eliminar uma dificuldade essencial

na interpretação dos padrões, o desconhecimento da ordem das franjas. Neste método, contam-se as franjas que passam na frente do observador ao trocar seu ponto de vista em um determinado ângulo. Reiterando este procedimento o número de vezes apropriado, podem-se obter os três componentes do vetor deslocamento.

Pelas características especiais da holografia, os deslocamentos na direção de observação são os mais simples de interpretar, pelo que correspondem-se com situações de óptica elementar. Não obstante, a busca da solução do caso geral leva vários autores ao desenvolvimento das técnicas já estabelecidas. Devemos citar os trabalhos de Sollid, [68], 1969, e Ennos, [66]. O problema geral da localização das franjas é extremamente complexo e tem sido tratado pelos teóricos do tema, [69], [70], 1974 e 1970.

A equação fundamental da Interferometria holográfica estabelece que:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta \vec{r} (\vec{n}_0 - \vec{n}_i) \quad (4.1)$$

δ é a diferença de fases introduzida pelo deslocamento $\Delta \vec{r}$

λ é a longitude de onda do laser

$\Delta \vec{r}$ é o vetor deslocamento de um ponto qualquer do objeto

\vec{n}_0 é o vetor unitário na direção de observação

\vec{n}_i é o vetor unitário na direção de iluminação

Segundo o método de Aleksandrov e Bonch-Bruevich, ao variar o ângulo de observação, passando frente ao observador um número inteiro de franjas n , se obtém a seguinte expressão:

$$\Delta r_s = n \frac{\lambda}{2 \cos \alpha} \quad (4.2)$$

onde:

- n número de franjas que passam frente à nossa observação
- λ comprimento de onda do Laser He-Ne,
- α ângulo formado pelas direções de incidência e de observação.

Para os nossos ensaios, $\alpha = 30^\circ$, pelo tanto $\cos \alpha = 0,866$

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

Considerando nula a variação de δ , ao variar o ângulo de observação permitido pelo detetor, é possível localizar as franjas de interferência. Caso isto não se verifique sabe-se que as franjas não estão localizadas na posição

do detetor. Quando há apenas translação os valores de δ são praticamente iguais para os diversos pares de pontos.

Se a posição de observação, \vec{n}_0 , for modificada, então se passará a observar franjas claras e escuras pois os valores de δ são dependentes da direção de observação. Isto se verifica pela equação (4.1).

Esta fornece a diferença de fase entre os pares de pontos considerados. Na equação anterior consideramos uma luz incidente colimada e outra refletida também colimada. Para nossos ensaios, o ângulo formado pelas direções de incidência e de observação, α , possui o valor de 30° .

Considerando a equação 4.2, podemos concluir que o sistema de franjas observado tem dependência do deslocamento, de sua direção, mas não do seu sentido, e das direções de iluminação e de observação.

A tendência atual é para a automatização do processo de interpretar, pelo qual usam-se câmeras de TV para o registro das imagens holográficas e seu posterior processamento por meio de microcomputadores, [71], 1969 e [72], [73]. A interferometria holográfica tem demonstrado suas potencialidades na detecção de defeitos em distintos materiais, assim como na busca de trinca e seu estudo e seguimento, [74-82].

4.6. Análises Experimentais

Na Figura 4.3, foi mostrado o dispositivo empregado para realizar a experiência de flexão da chapa de aço, engastada, aplicando-se carregamento unidirecional, as dimensões da chapa já foram mostradas na Figura 4.2.

Foi aplicada uma carga de 0,29N no extremo superior da chapa, e analisa-se o padrão de franjas. Para a execução da experiência utilizou-se a técnica de exposição dupla. Expôs-se uma chapa holográfica durante 3 s. com a chapa de aço em sua posição natural (sem carga), seguida de outra exposição de 3 s. com a chapa de aço carregada com a carga P.

Uma vez revelada a chapa holográfica, esta foi recolocada em seu suporte e iluminada com o feixe de referência. Formou-se um padrão de franjas sobre a imagem virtual do objeto. Como a superfície da chapa de aço é plana e paralela ao plano do holograma e a direção dos deslocamentos é normal a este plano, a interpretação das franjas é simples. Ela é descrita pela equação 4.2.

Da teoria de resistência dos materiais se conhece que o deslocamento teórico para a extremidade da chapa, é dado por:

$$\delta = \frac{P L^3}{3EI} \quad (4.3)$$

onde:

- E Módulo de elasticidade, 2.1 E7 g/mm²
- I Momento de Inércia, 900 mm⁴
- P Carga aplicada, 30 g
- L Distância até a extremidade da placa, em nm

Aplicando as equações de cálculo, antes referidas, obtemos para os interferogramas registrados no ar e na água de mar, os resultados na Tabela 4.6. Estes são analisados comparativamente com os resultados teóricos.

Considerando a influência do índice de refração do vidro e da água nos resultados dos deslocamentos da Tabela 4.6, se estabeleceu a média ponderada destes índices, obtendo-se o parâmetro Damar/Média I_{ra} e I_{ru}. Esta análise, tenta eliminar em parte os efeitos da refração.

Distância até o engastamento (mm)	Deslocam. analítico Dan,(mm)	Deslocamento no ar		Deslocamento na água de mar		Para a água de mar
		Nº de franjas	Dar. (mm)	Nº de franjas	Damar (mm)	Damar/Média Ira e Irv
85	0.00040	1	0.00036	1	0.00036	0.00025
90	0.00048	1.1	0.00040	2	0.00073	0.00051
95	0.00056	1.8	0.00066	2.8	0.0010	0.00070
100	0.00066	2	0.00073	3.7	0.0013	0.00091
105	0.00076	2.8	0.0010	4.5	0.0016	0.0011
110	0.00088	3	0.0011	5.1	0.0018	0.0012
115	0.0010	3.9	0.0014	6	0.0022	0.0015
120	0.0011	4.1	0.0015	7	0.0025	0.0017
125	0.0012	5	0.0018	8	0.0029	0.0020
130	0.0014	5.6	0.0020	8.8	0.0032	0.0022
135	0.0016	6	0.0022	9.1	0.0033	0.0023
140	0.0018	6.8	0.0024	10	0.0036	0.0025
145	0.0020	7	0.0025	10.8	0.0039	0.0027
150	0.0022	7.1	0.0026	11.2	0.0041	0.0028
155	0.0024	7.3	0.0027	11.8	0.0043	0.0030

Tabela 4.6 - Valores dos deslocamentos obtidos pela teoria da resistência dos materiais e pela interpretação das franjas nos hologramas recolhidos no ar e embaixo da água.

Da Tabela:

Dan - Deslocamento analítico

Dar - Deslocamento obtido no ar

Damar - Deslocamento obtido na água de mar

Ira - índice de refração do ar

Irv - índice de refração do vidro

Dos resultados mostrados na Tabela 4.6, pode-se obter o Gráfico 1, (Figura. 4.13), do comportamento dos deslocamentos calculados para os interferogramas registrados nas cenas de ensaio.

Na Tabela 4.6, estão registrados os valores dos deslocamentos. Para obter a equação que rege o processo se faz necessário aplicar um método numérico que permita obter a expressão. Em nosso caso, decidiu-se que o melhor era efetuar uma interpolação, ou seja, determinar o polinômio interpolador, que é uma função de aproximação dos valores da Tabela 4.6. Com os valores da tabela se procede à obter a função, utilizando a Fórmula de Newton para Interpolação com Diferenças Divididas.

A expressão para o polinômio é:

$$P_n(x) = y_0 + \sum_{i=1}^n \Delta^i y_0 \prod_{j=0}^{i-1} (x - x_j) \quad (4.4)$$

No Anexo III mostra-se as instruções do programa elaborado em Qbasic para a obtenção dos valores de $\Delta^i y_0$. Estes resultados mostram-se na Tabela 4.7.

	<i>Dan</i>	<i>Dar</i>	<i>Damar</i>	<i>Damar/média Ira e Irv</i>
<i>I</i>	$\Delta^i y_0$	$\Delta^i y_0$	$\Delta^i y_0$	$\Delta^i y_0$
0	0.004	0.00036	0.00036	0.00025
1	1.5999999e-5	7.9999997e-06	7.399999885e-05	5.200000014e-05
2	0	4.40000003e-06	-2.00000013e-06	-1.399999928e-06
3	2.6666666e-8	-5.4666664e-07	1.7333337988e-07	1.999998908e-07
4	-2.666666e-9	5.33333320e-08	-1.066667039e-08	-8.666665252e-09
5	2.1333333e-10	-4.1599997e-09	2.400001797e-10	2.6666651109e-10
6	-1.422222e-11	2.719999928e-10	3.377777687e-11	2.5777787312e-11
7	7.111111302e-13	-1.541587333e-11	-4.698412606e-12	-4.139683040e-12
8	-2.539682602e-14	7.72063489e-13	3.4412698385e-13	3.1809526800e-13
9	7.336860852e-16	-3.442680891e-14	-1.846913464e-14	-1.752381035e-14
10	-2.70899474e-17	1.367478043e-15	7.9746024237e-16	7.7178138825e-16
11	1.50841756e-18	-4.83360621e-17	-2.864453669e-17	-2.841879473e-17
12	-8.17487089e-20	1.52056012e-18	8.6195269367e-19	8.9213844431e-19
13	3.588839210e-21	-4.263193751e-20	-2.151855801e-20	-2.406943190e-20
14	-1.277969591e-22	1.067292588-21	4.3138973748e-22	5.5961916526e-22

Tabela 4.7- Valores de $\Delta^i y_0$.

Da Tabela:

Dan - Deslocamento analítico

Dar - Deslocamento obtido no ar

Damar - Deslocamento obtido na água de mar

Ira - índice de refração do ar

Irv - índice de refração do vidro

$\Delta^i y_0$ - coeficiente de interpolação

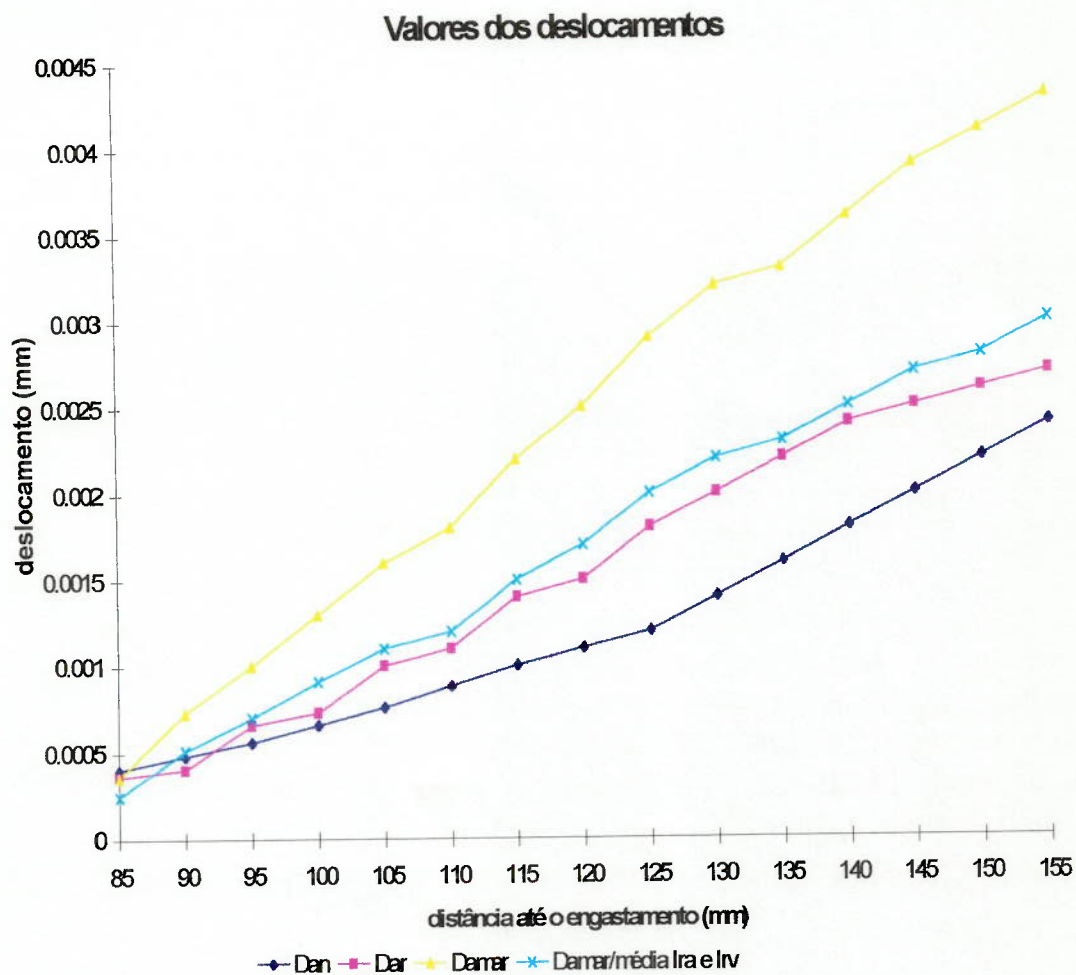


Figura 4.13- Gráfico 1, valores dos deslocamentos.

Do Gráfico:

Dan - Deslocamento Analítico

Dar - Deslocamento no ar

Damar - Deslocamento no mar

Ira - índice de refração do ar

Irv - índice de refração do vidro

4.7. Análise da Resolução dos Hogramas recolhidos no ar e na água

Considerando o uso do arranjo holográfico detalhado no item 4.3, assim como a escolha dos meios para os ensaios descrita no item 4.2, analisaremos os resultados obtidos nos hogramas recolhidos com a chapa de aço submetida ao carregamento unidirecional.

Todos os hogramas foram registrados com a chapa holográfica no portaplaca e a chapa de aço na posição mostrada na Figura 4.14, mantendo a distância fixa entre ambas de 200mm para todos os testes.

Um número de 5 hogramas (um para cada dos meios selecionados), foram registrados para monitorar a resolução óptica que poderia obter-se quando registram-se os hogramas no ar e embaixo da água.

Inicialmente, um holograma foi tomado baixo as condições planteadas, porém sem o tanque de observação (aquário) na posição. Portanto o holograma foi registrado inteiramente no ar para estabelecer um ponto de referência.

Na continuação, foram registrados os hogramas embaixo da água, mantendo as mesmas distâncias entre a chapa holográfica e a chapa de aço, já com o tanque de observação.



Figura 4.14- Foto, onde se localiza a chapa de aço no interior do aquário, para os testes embaixo da água.

4.7.1. Processamento e interpretação dos interferogramas recolhidos no ar e embaixo da água

Usando o equipamento detalhado no item 4.4, é realizado o processamento das imagens. Neste caso, obtemos a distribuição das franjas em uma zona do comprimento da placa de aço e em outra análise, obtemos a largura das franjas e também a largura entre elas. Nas situações anteriores, o processamento computadorizado oferece gráficos impressos em Intensidade do Padrão vs. Posição do Pixel.

Como foi prevista a colocação de uma régua graduada em linhas espaçadas horizontalmente a 5mm, durante cada ensaio, foi possível calcular para cada cena de interesse, o valor em mm de cada pixel obtido o qual, nos provê da ferramenta necessária para as análises posteriores, estes resultados da equivalência dos pixels em mm, mostram-se na Tabela 4.8.

Holograma recolhido	Valor da escala (mm)	Número de pixels
Em ar	5	31
Em água destilada	5	31
Em água corrente	5	31
Em água potável	5	32
Em água de mar	5	33

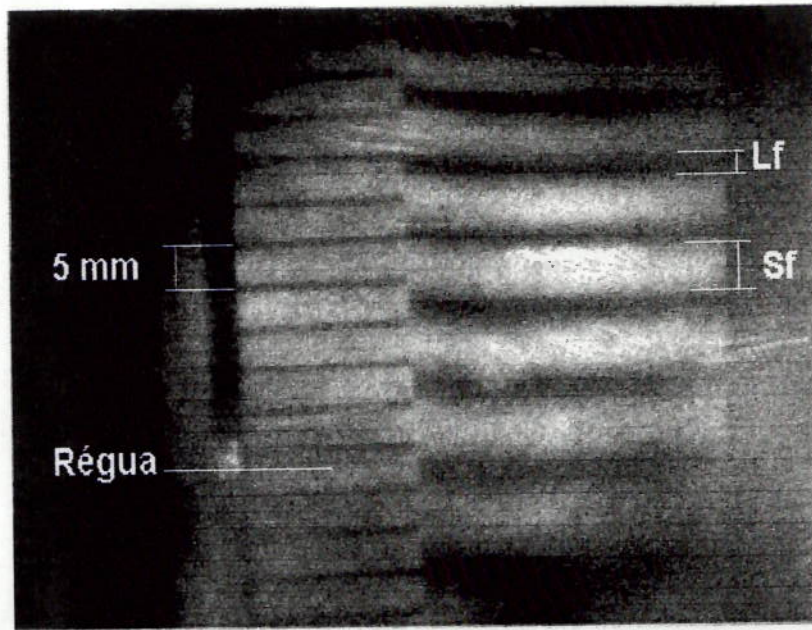
Tabela 4.8- Valores em mm de cada pixel obtido.

Os interferogramas, obtidos no ar, água destilada, água corrente, água potável e água de mar; são mostrados na Figura 4.15 até Figura 4.19. Também é exposto para cada interferograma, seu respectivo gráfico de distribuição do padrão das franjas em todo seu comprimento. Analisando estes resultados, obtemos informação da resolução de cada imagem, neste caso impressa na quantidade de franjas registradas para cada interferograma, o qual se mostra na Tabela 4.9.

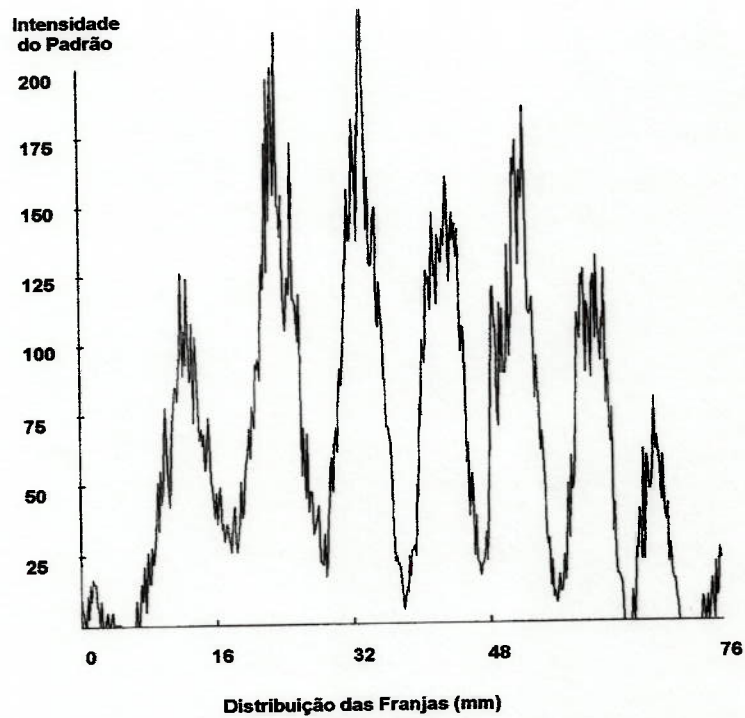
Na Figura 4.15, mostra-se a régua empregada em todos os registros, o valor de 5mm da sua escala; a magnitude considerada como separação entre as franjas (S_f) e a magnitude considerada como largura da franja (L_f).

Localização da chapa de aço	Distância entre a chapa de aço e holográfica (mm)	Resolução franja / mm	Resolução média para cada zona de interesse # de franjas
Em ar	200	0.11	8
Em água destilada	200	0.17	12
Em água corrente	200	0.17	12
Em água potável	200	0.17	12
Em água de mar	200	0.17	12

Tabela 4.9. Quantidade de franjas obtidas para cada interferograma.

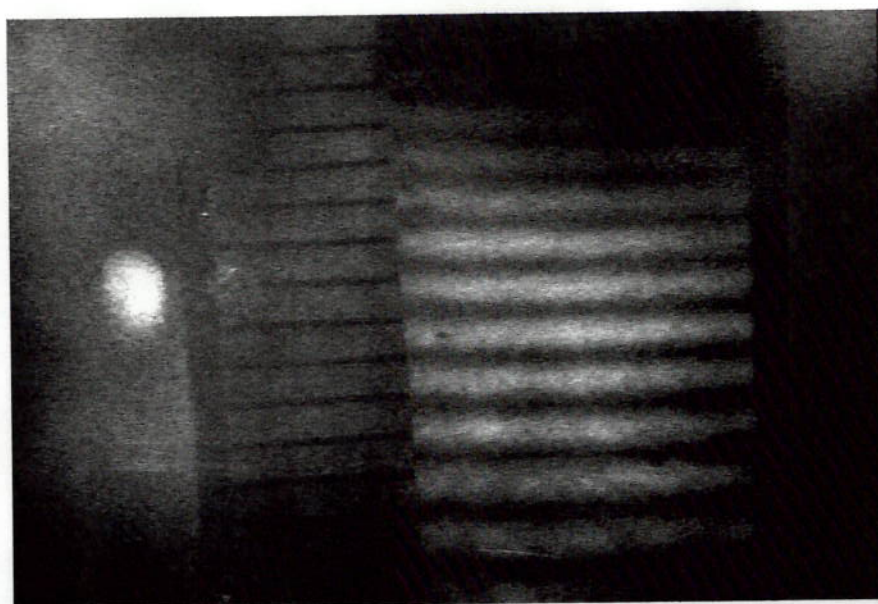


a)

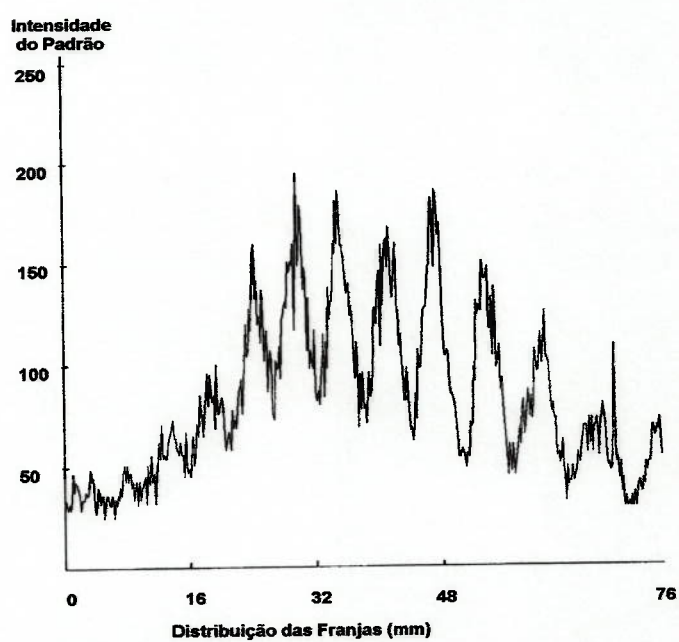


b)

Figura 4.15- a) Interferograma recolhido no ar, b) Distribuição das franjas em todo seu comprimento.

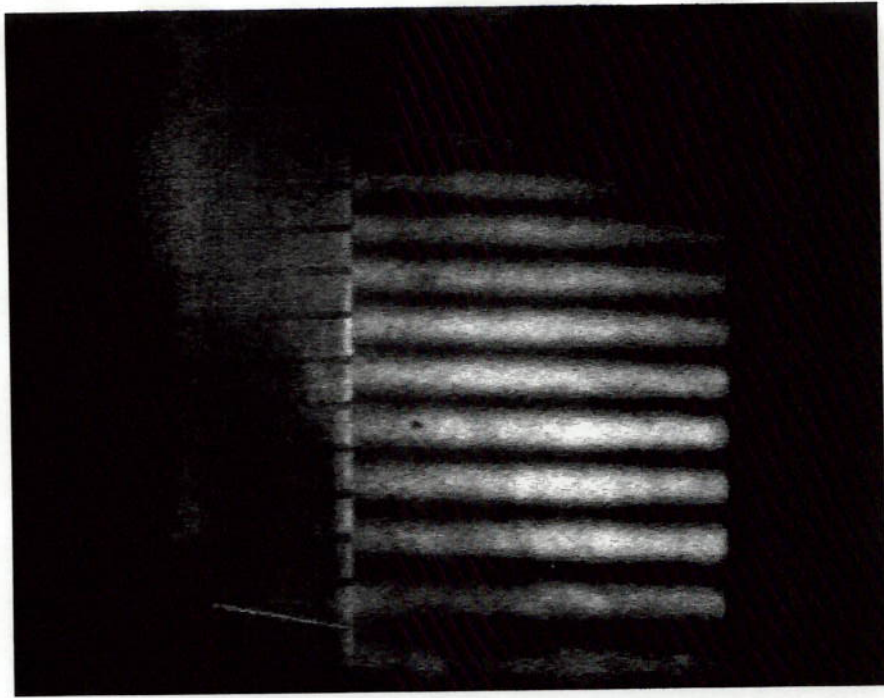


a)

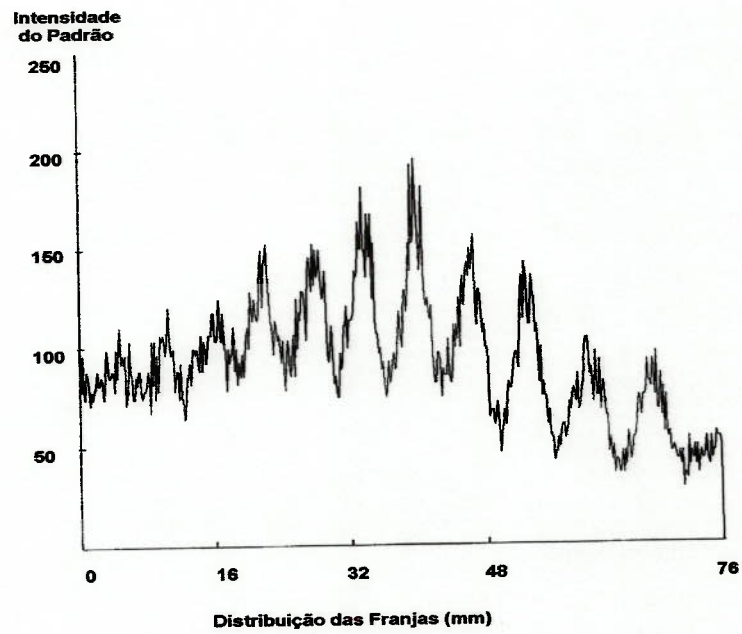


b)

Figura 4.16- a) Interferograma recolhido na água destilada, b) Distribuição das franjas em todo seu comprimento.

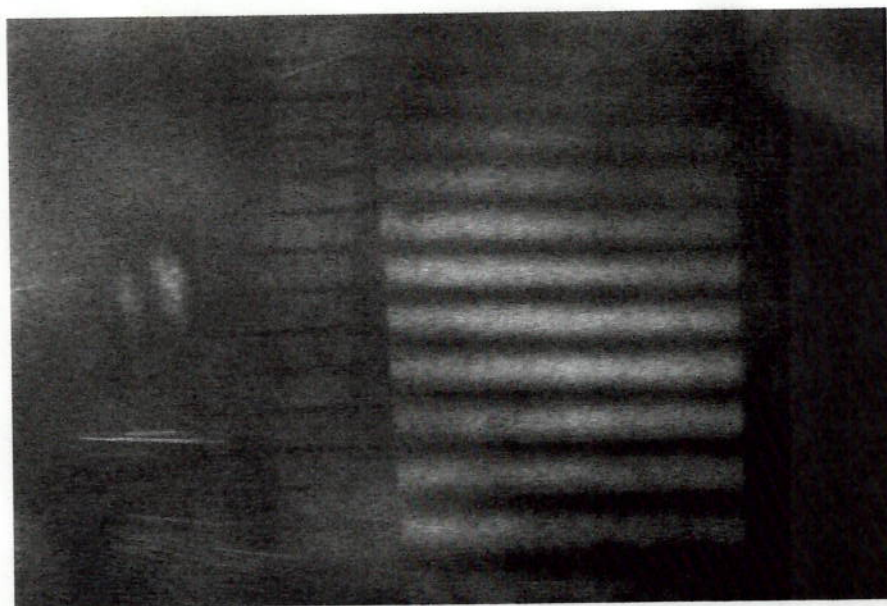


a)

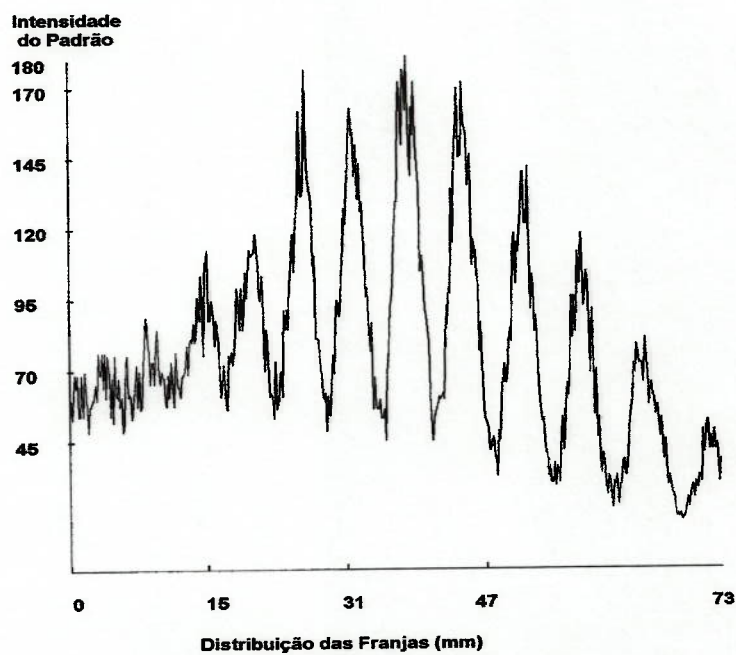


b)

Figura 4.17- a) Interferograma recolhido na água corrente, b) Distribuição das franjas em todo seu comprimento.

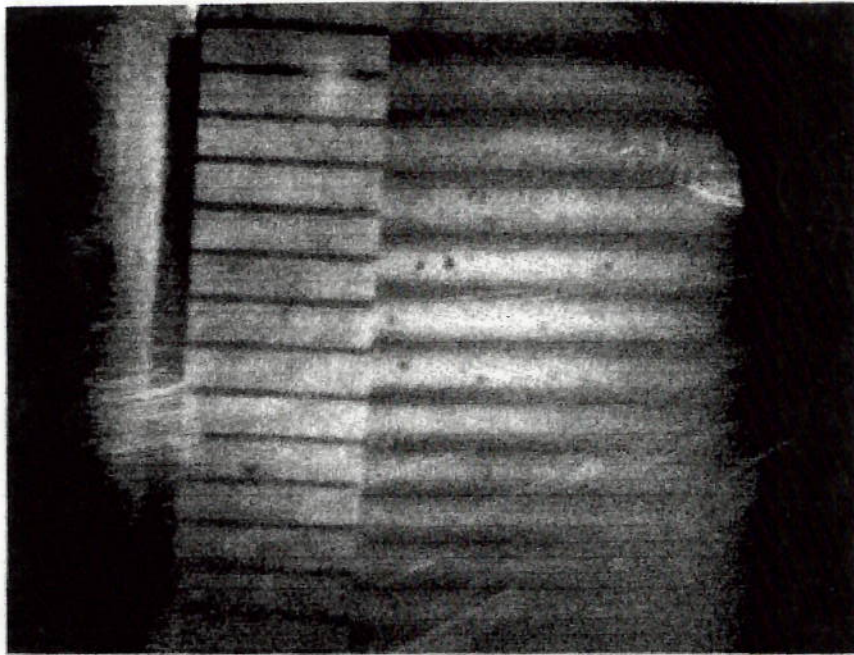


a)

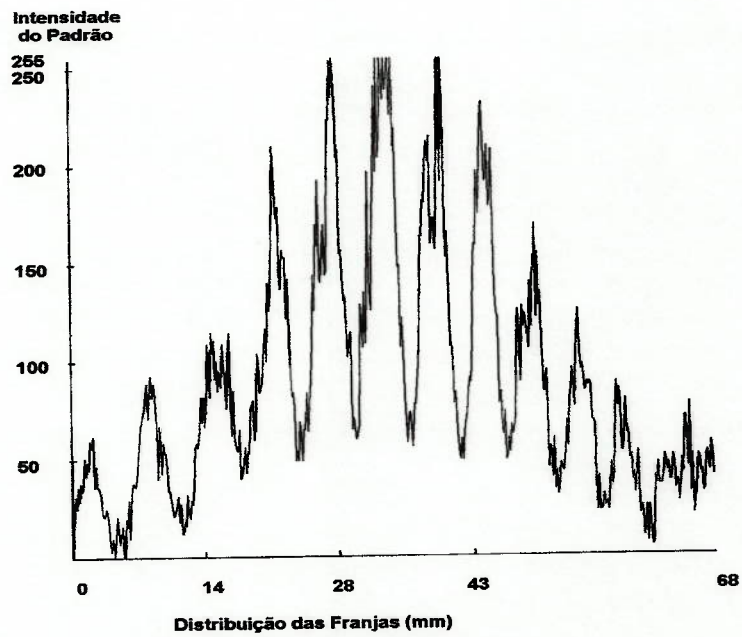


b)

Figura 4.18- a) Interferograma recolhido na água potável, b) Distribuição das franjas em todo seu comprimento.



a)



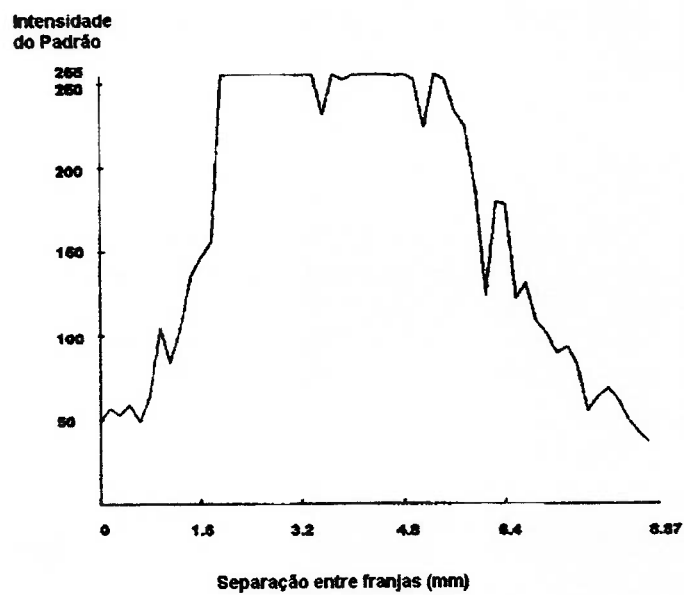
b)

Figura 4.19- a) Interferograma recolhido na água de mar, b) Distribuição das franjas em todo seu comprimento.

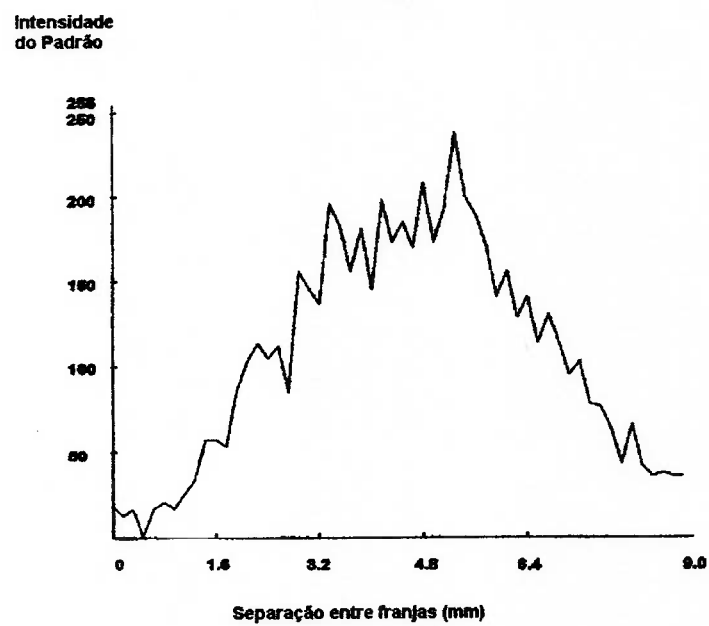
Mantendo a análise do poder de resolução, foi controlada a separação entre as franjas a partir do interferograma registrado em cada meio. Foram escolhidas em cada caso 4 pares de franjas e feitas as medições, desde o final da largura de uma até o início da largura da seguinte. Nas Figuras 4.20 até a Figura 4.29, se mostram os resultados para os interferogramas registrados no ar, água destilada, água corrente, água potável e água de mar respectivamente. Os valores numéricos destes resultados mostram-se na Tabela 4.10 Considerando estes resultados, é obtido o Gráfico 2 (Figura 4.30).

Meio do holograma	1ª medição (mm)	2ª medição (mm)	3ª medição (mm)	4ª medição (mm)	Separação média entre franja (mm)
Em ar	8.87	8.87	9.0	10.48	9.25
Em água destilada	5.48	5.80	5.80	6.93	6.0
Em água corrente	5.32	6.12	6.12	6.28	5.96
Em água potável	5.9	5.9	5.9	6.09	5.93
Em água de mar	5.28	5.28	5.42	6.12	5.52

Tabela 4.10- Valores da separação entre as franjas a partir do interferograma registrado em cada meio.

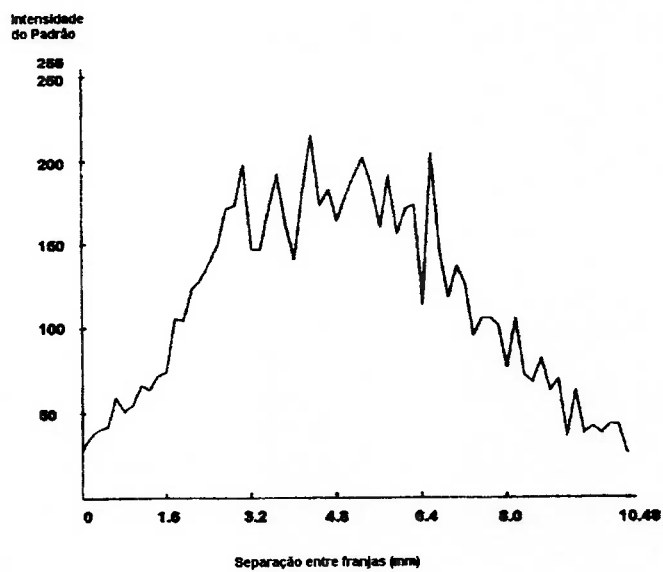


a)

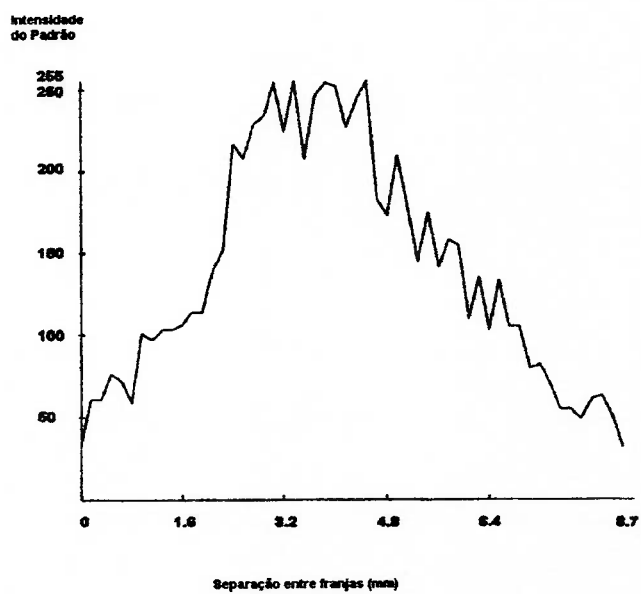


b)

Figura 4.20- Em a) e b), mostra-se a separação entre pares de franjas, obtida no interferograma recolhido no ar.

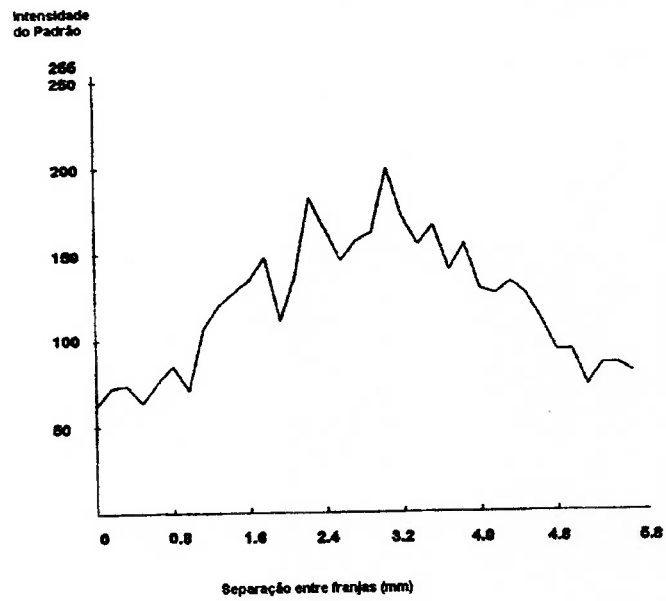


c)

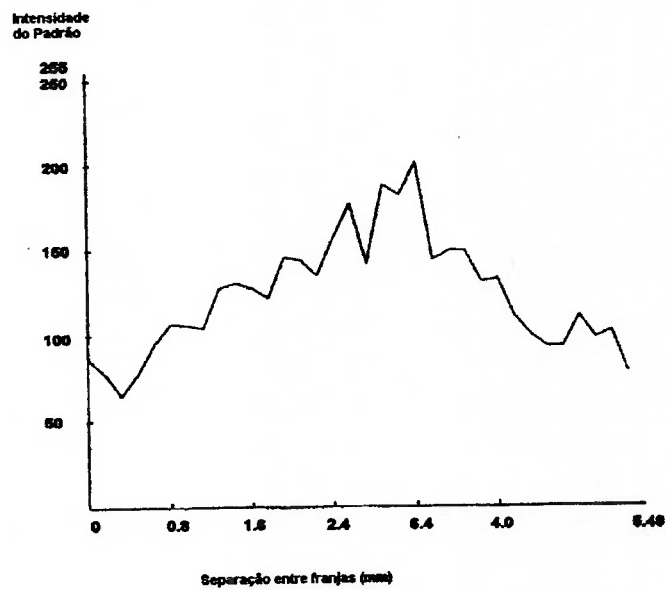


d)

Figura 4.21- Em c) e d), mostra-se a separação entre pares de franjas, obtida no interferograma recolhido no ar.

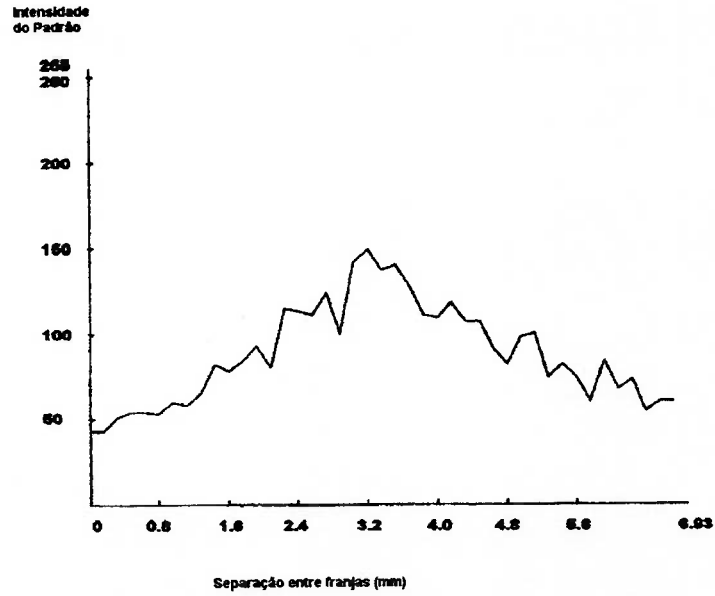


a)

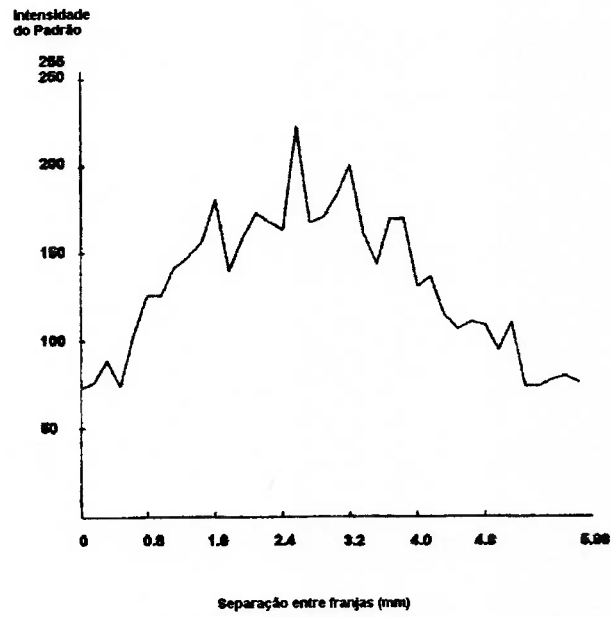


b)

Figura 4.22- Em a) e b), mostra-se a separação entre pares de franjas, obtida no interferograma recolhido na água destilada.

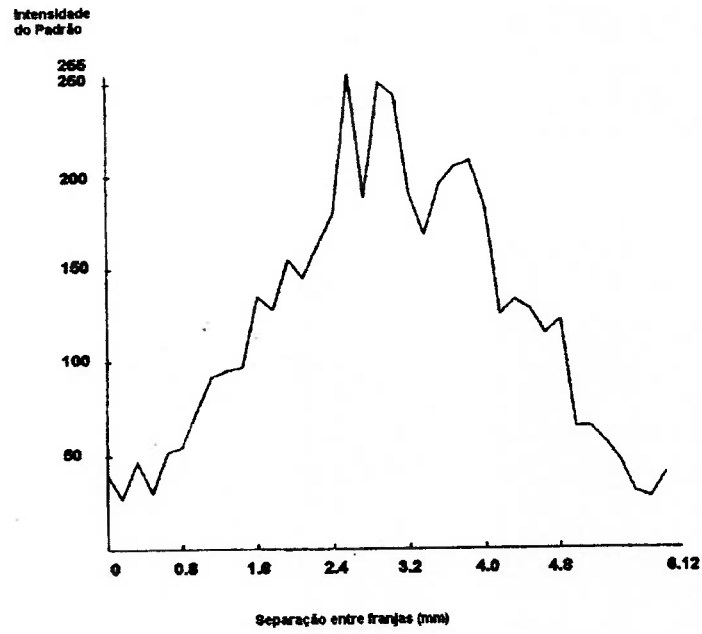


c)

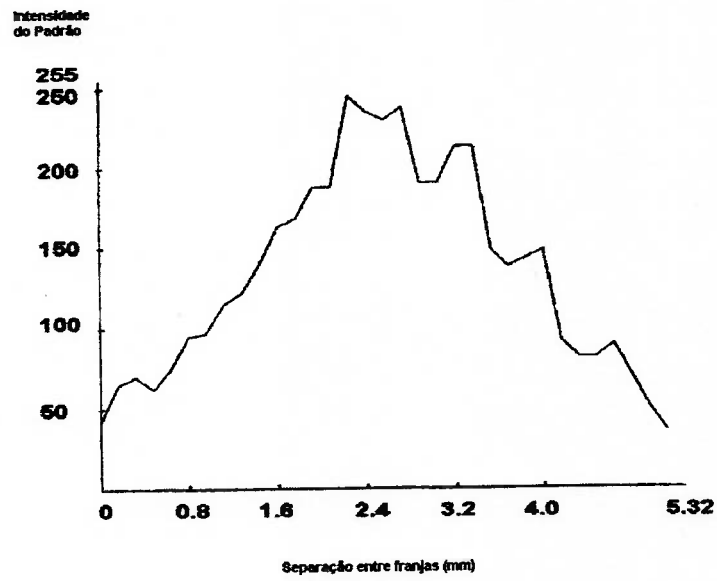


d)

Figura 4.23- Em c) e d), mostra-se a separação entre pares de franjas, obtida no interferograma recolhido na água destilada.

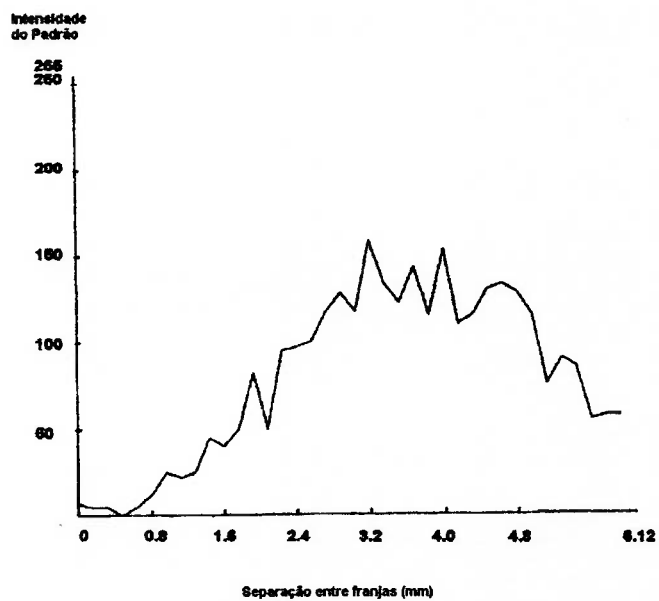


a)

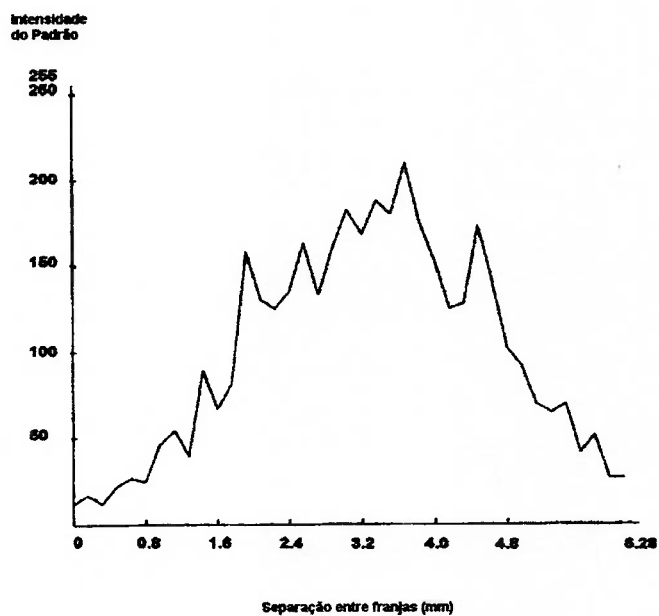


b)

Figura 4.24- Em a) e b), mostra-se a separação entre pares de franjas, obtida no interferograma recolhido na água corrente.

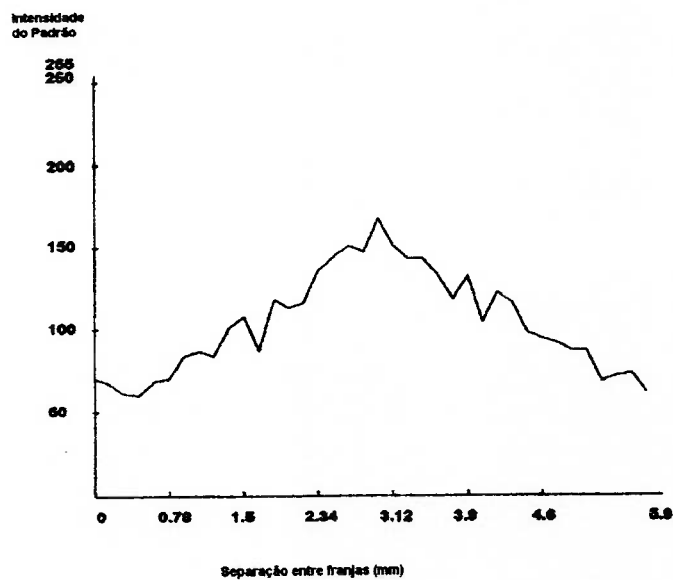


c)

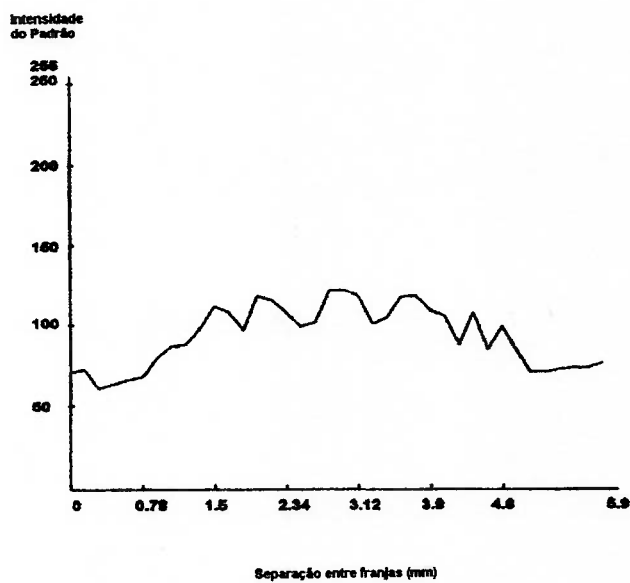


d)

Figura 4.25- Em c) e d), mostra-se a separação entre pares de franjas, obtida no interferograma recolhido na água corrente.

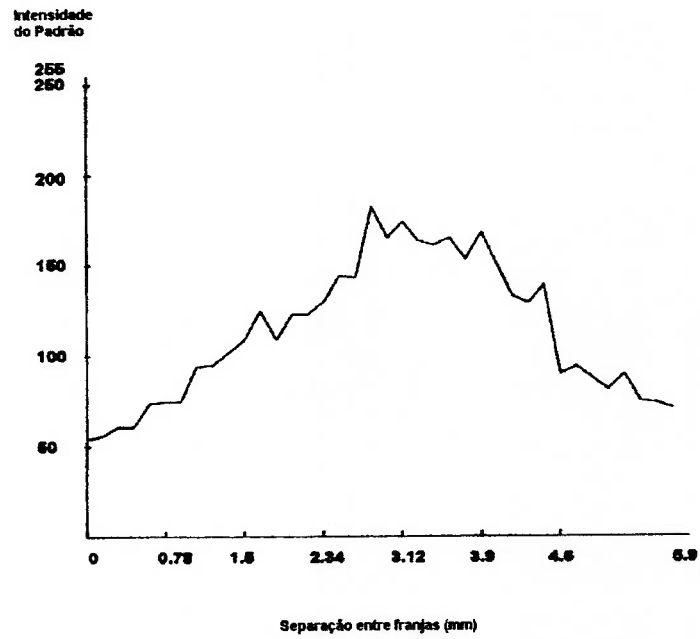


a)

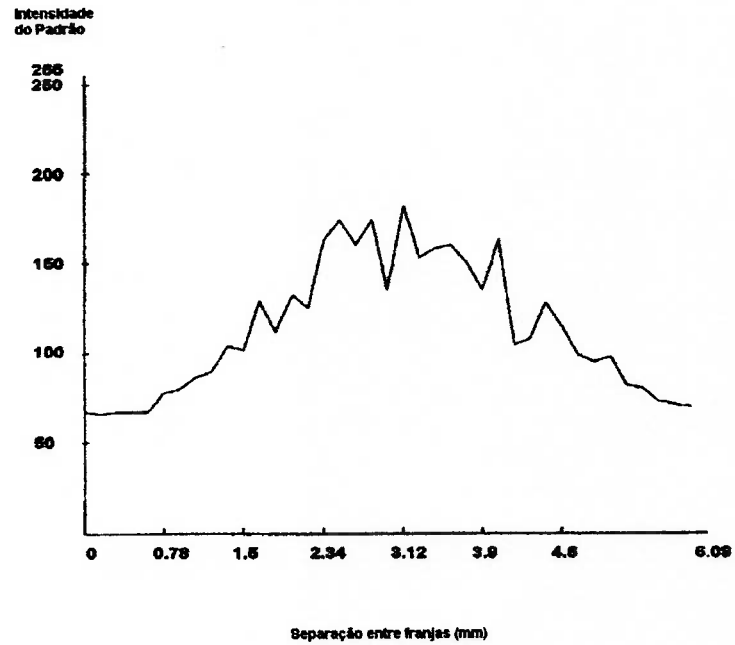


b)

Figura 4.26- Em a) e b), mostra-se a separação entre pares de franjas, obtida no interferograma recolhido na água potável.

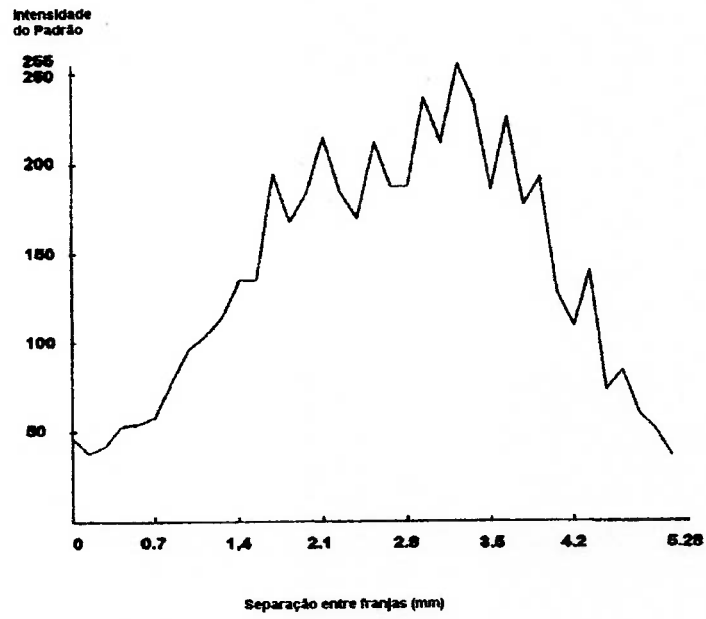


c)

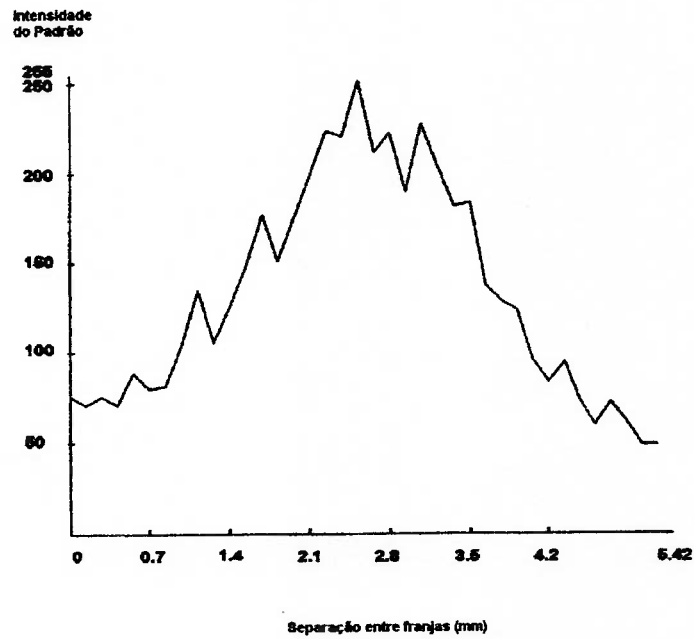


d)

Figura 4.27- Em c) e d), mostra-se a separação entre pares de franjas, obtida no interferograma recolhido na água potável.

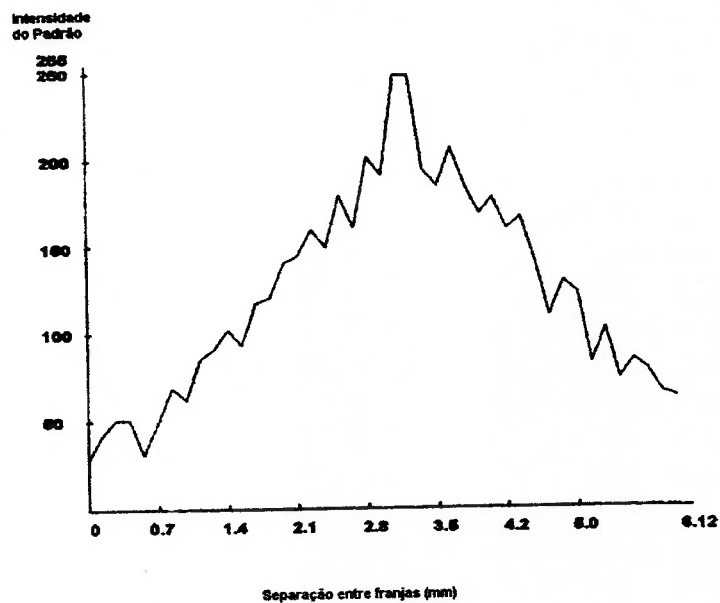


a)

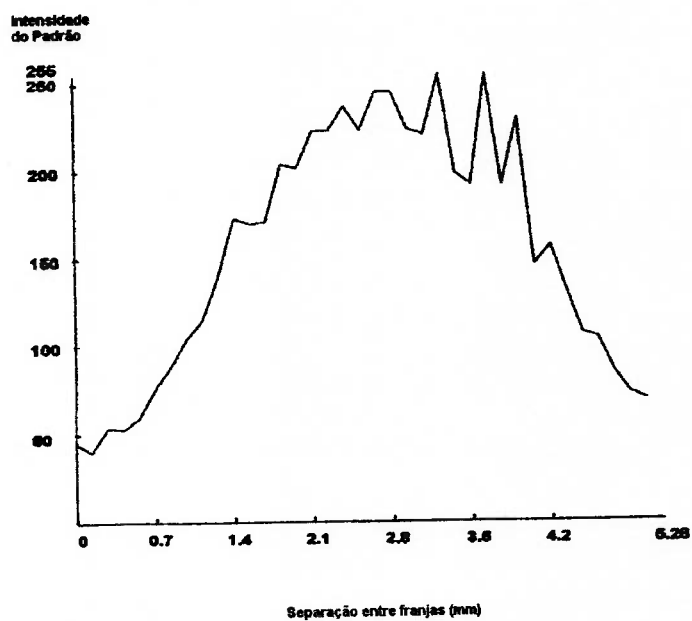


b)

Figura 4.28- Em a) e b), mostra-se a separação entre pares de franjas, obtida no interferograma recolhido na água de mar.



c)



d)

Figura 4.29- Em c) e d), mostra-se a separação entre pares de franjas, obtida no interferograma recolhido na água de mar.

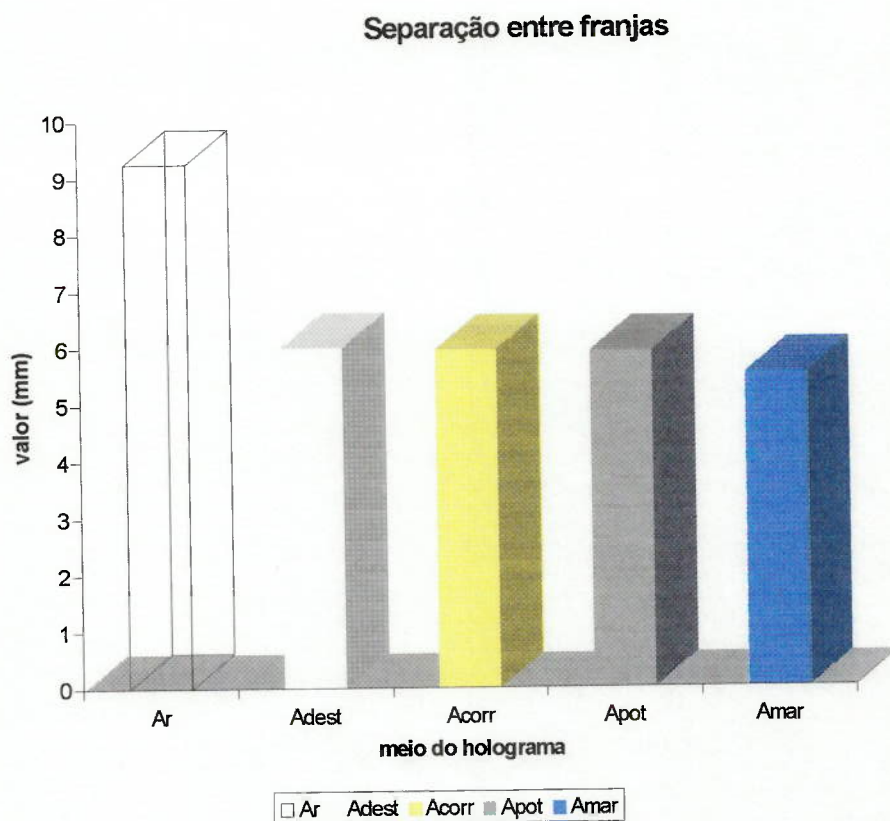


Figura 4.30- Gráfico 2, representação da separação média entre as franjas.

Do Gráfico:

Ar - Ar

Adest - Água destilada

Acorr - Água corrente

Apot - Água potável

Amar - Água de mar

Para obter a equação que rege o referido processo, empregou-se a Interpolação Polinomial. Os meios de registro dos hologramas, foram expressados em valores numéricos, assim:

Ar - 1

Adest - 2

Acorr - 3

Apot - 4

Amar - 5

A equação fica: $[[9.25, 6.0, 5.96, 5.93, 5.52], x]$

Solução:

$$f(x) = 21.72 - 19.7858x + 8.90292x^2 - 1.70417x^3 + 0.117083x^4$$

Também foi controlada a largura das franjas obtidas nas cenas registradas, assim foram escolhidas quatro franjas em cada interferograma e realizadas quatro medições da largura destas, os resultados se mostram nas Tabelas 4.11.a, b, c, d, e. O Gráfico 3 (Figura 4.31), mostra estes valores. Como resultado deste controle, foi registrado a distribuição de intensidade do padrão no perfil de cada uma destas franjas; os gráficos são mostrados nas Figuras 4.32 até a Figura 4.41.

franjas	valor das medições (pixels)	equivalência das medições (mm)	valor médio (mm)
f1	22, 19, 20, 19	3,5 - 3,1 - 3,2 - 3,1	3,2
f2	16, 16, 17, 18	2,5 - 2,5 - 2,7 - 2,9	2,6
f3	18, 21, 20, 23	2,9 - 3,3 - 3,2 - 3,7	3,2
f4	19, 22, 23, 25	3,1 - 3,5 - 3,7 - 4,0	3,5
Largura média das franjas (mm)			3,2

Tabela 4.11.a- Holograma recolhido no Ar.

franjas	valor das medições (pixels)	equivalência das medições (mm)	valor médio (mm)
f1	15, 16, 14, 15	2,4 - 2,5 - 2,2 - 2,4	2,4
f2	18, 15, 13, 13	2,9 - 2,4 - 2,1 - 2,1	2,4
f3	16, 13, 14, 13	2,5 - 2,1 - 2,2 - 2,1	2,2
f4	14, 15, 16, 14	2,2 - 2,4 - 2,5 - 2,2	2,3
Largura média das franjas (mm)			2,3

Tabela 4.11.b- Holograma recolhido na Água destilada.

franjas	valor das medições (pixels)	equivalência das medições (mm)	valor médio (mm)
f1	15, 17, 15, 15	2,4 - 2,7 - 2,4 - 2,4	2,5
f2	13, 14, 14, 14	2,1 - 2,2 - 2,2 - 2,2	2,2
f3	13, 11, 11, 12	2,1 - 1,8 - 1,8 - 1,9	1,9
f4	11, 13, 14, 14	1,8 - 2,1 - 2,2 - 2,2	2,1
Largura média das franjas (mm)			2,15

Tabela 4.11.c- Holograma recolhido na Água corrente.

franjas	valor das medições (pixels)	equivalência das medições (mm)	valor médio (mm)
f1	13, 15, 13, 12	2,0 - 2,3 - 2,0 - 1,9	2,1
f2	14, 12, 12, 11	2,2 - 1,9 - 1,9 - 1,7	1,9
f3	11, 12, 10, 10	1,7 - 1,9 - 1,6 - 1,6	1,7
f4	11, 11, 10, 10	1,7 - 1,7 - 1,6 - 1,6	1,6
Largura média das franjas (mm)			1,8

Tabela 4.11.d- Holograma recolhido na Água potável.

franjas	valor das medições (pixels)	equivalência das medições (mm)	valor médio (mm)
f1	10, 9, 11, 11	1,4 - 1,3 - 1,6 - 1,6	1,5
f2	10, 11, 12, 12	1,4 - 1,6 - 1,7 - 1,7	1,6
f3	9, 10, 9, 8	1,3 - 1,4 - 1,3 - 1,1	1,3
f4	9, 12, 10, 11	1,3 - 1,7 - 1,4 - 1,6	1,5
Largura média das franjas (mm)			1,5

Tabela 4.11.e- Holograma recolhido na Água de mar.

Para obter a equação que rege o referido processo, empregou-se a Interpolação Polinomial. Os meios de registro dos hologramas, foram expressados em valores numéricos, assim: Ar - 1, Adest - 2, Acorr - 3, Apot - 4, Amar - 5.

A equação fica: $[[\{ 3.2, 2.3, 2.15, 1.8, 1.5\}, x]]$

Solução:

$$f(x) = 7 - 6.26667 x + 3.075 x^2 - 0.658333 x^3 + 0.05 x^4$$

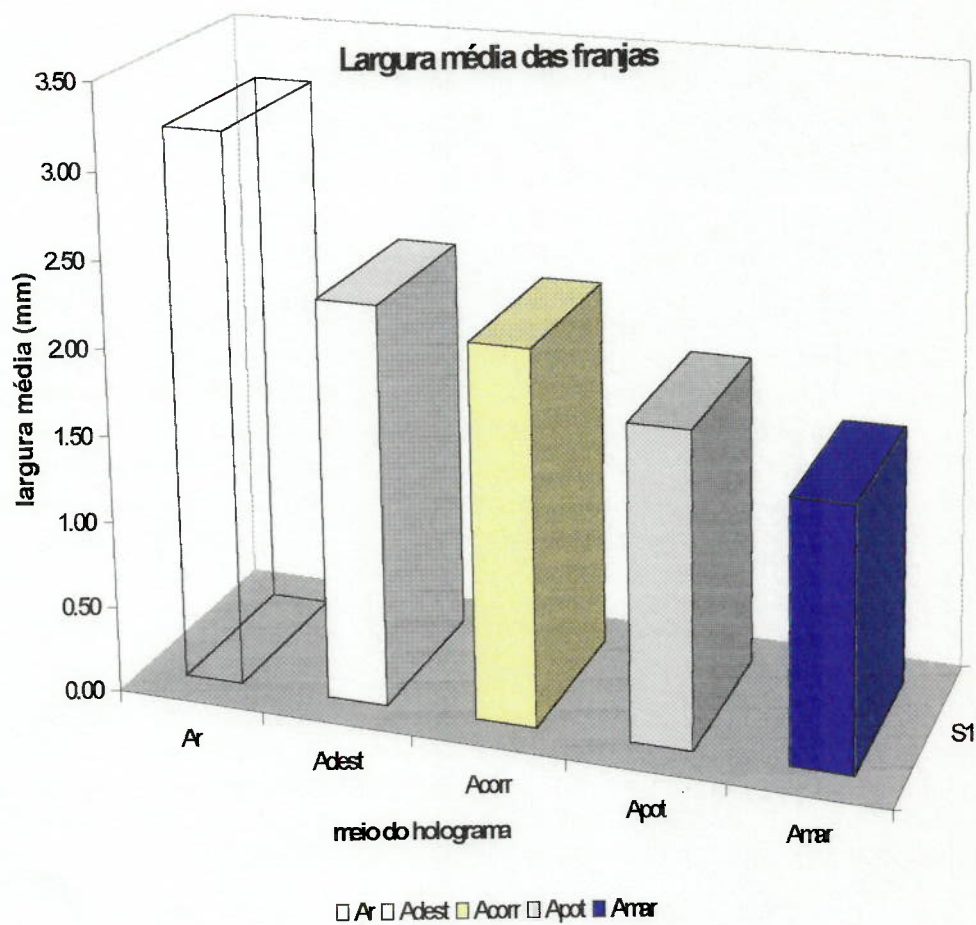


Figura 4.31- Gráfico 3, representação da largura média das franjas.

Do Gráfico:

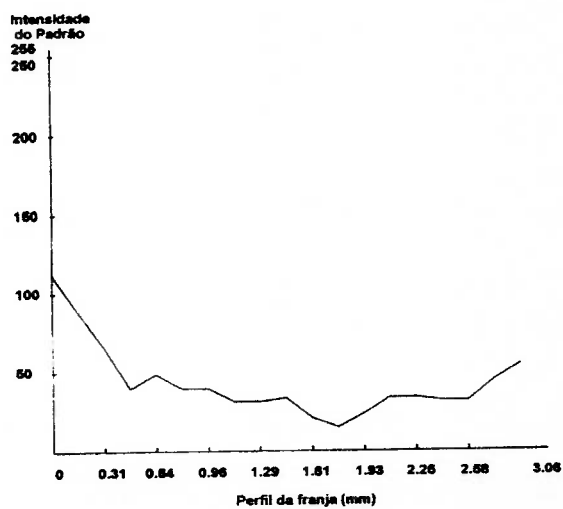
Ar - Ar

Adest - Água destilada

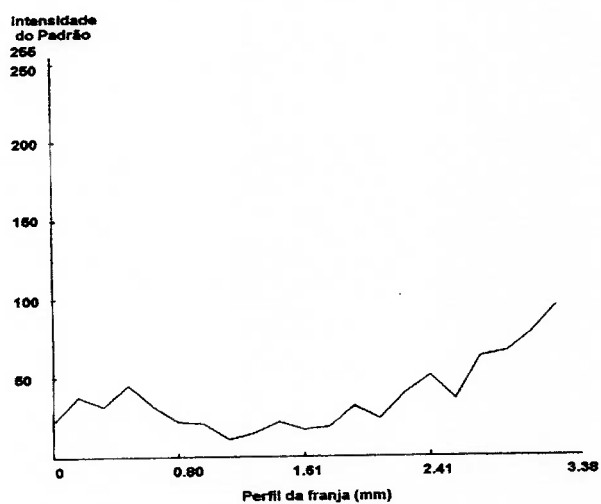
Acorr - Água corrente

Apot - Água potável

Amar - Água de mar

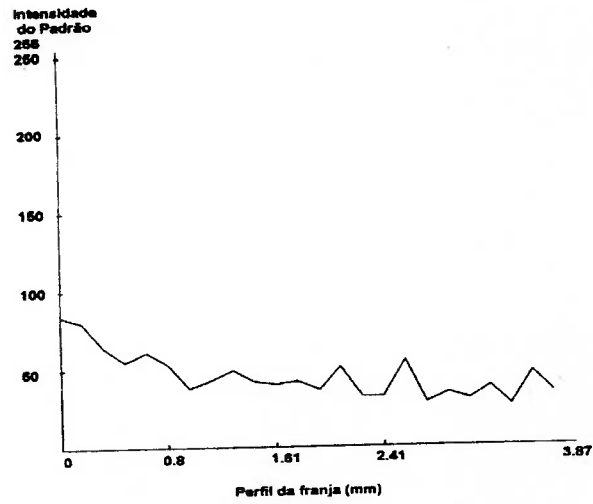


a)

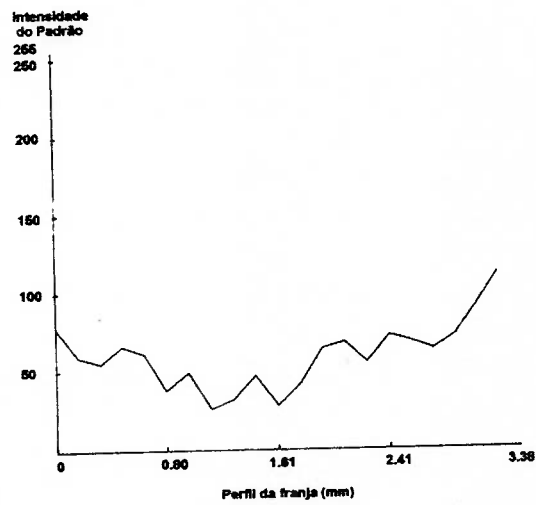


b)

Figura 4.32- Em a) e b), mostra-se a distribuição de intensidade do padrão, no perfil da franja, no interferograma recolhido no ar.

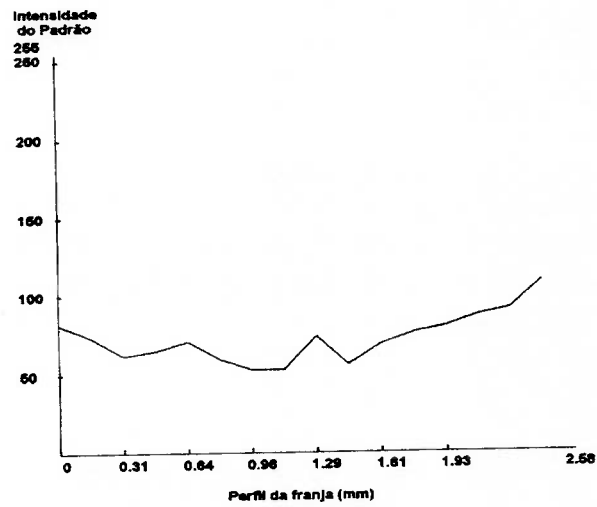


c)

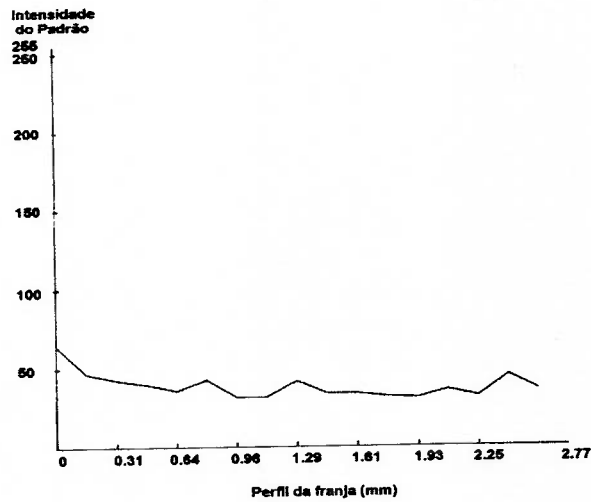


d)

Figura 4.33- Em c) e d), mostra-se a distribuição de intensidade do padrão, no perfil da franja, no interferograma recolhido no ar.

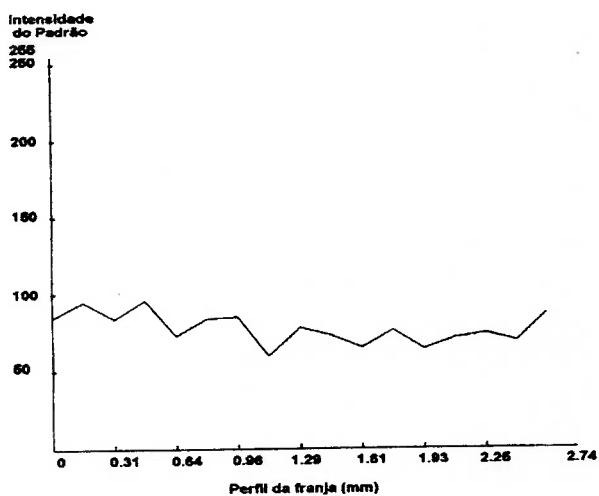


a)

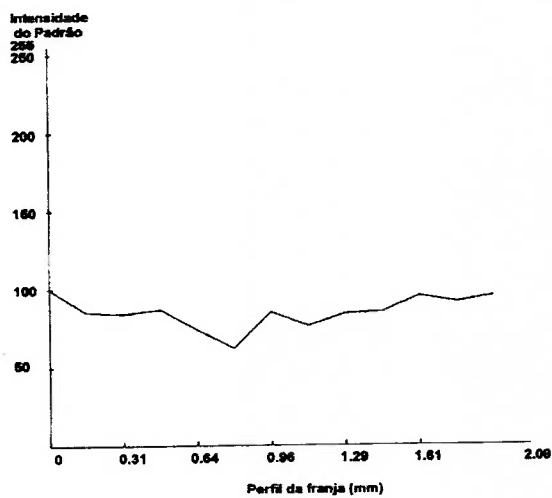


b)

Figura 4.34- Em a) e b), mostra-se a distribuição de intensidade do padrão, no perfil da franja, no interferograma recolhido na água destilada.

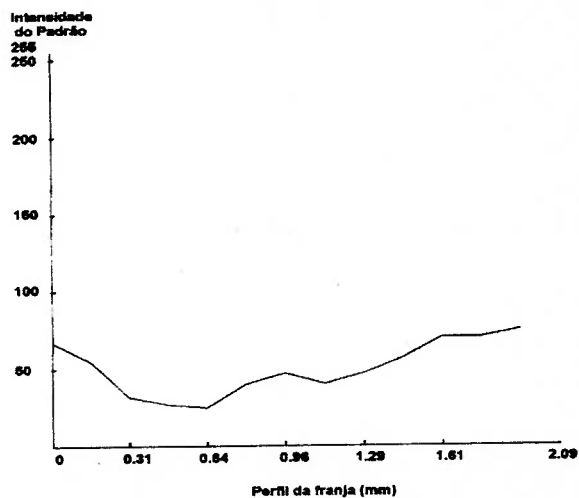


c)

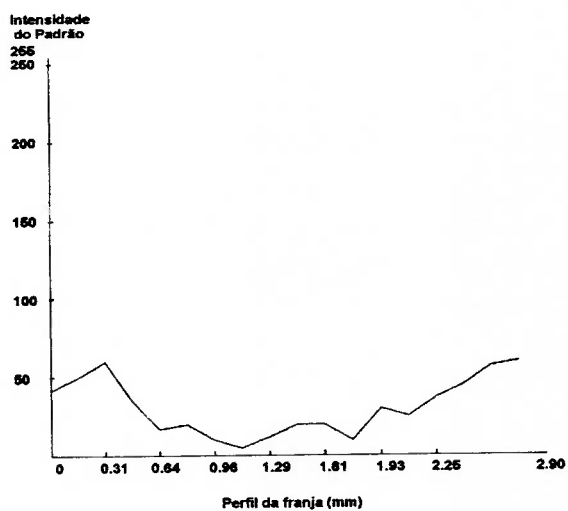


d)

Figura 4.35- Em c) e d), mostra-se a distribuição de intensidade do padrão, no perfil da franja, no interferograma recolhido na água destilada.

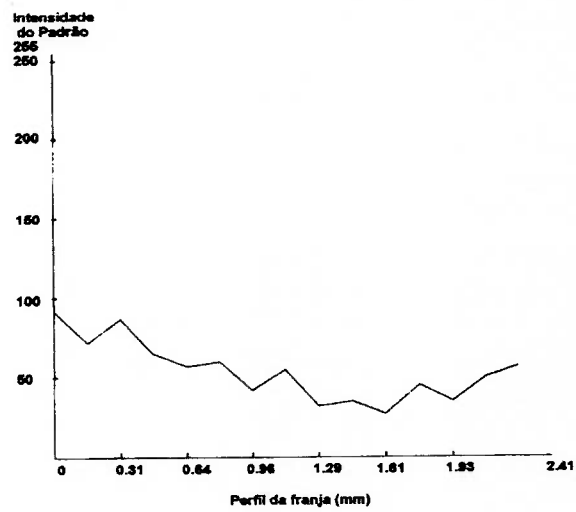


a)

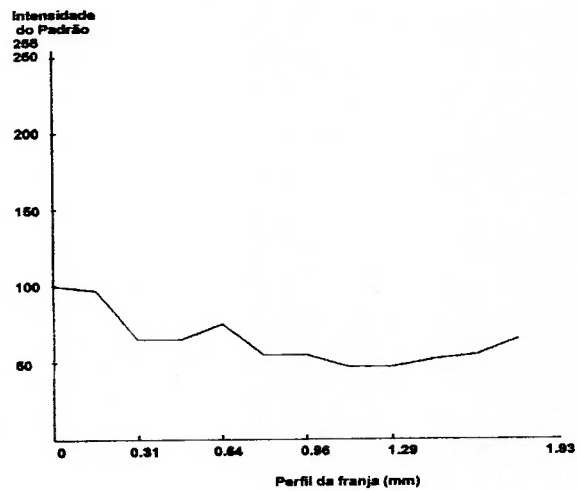


b)

Figura 4.36- Em a) e b), mostra-se a distribuição de intensidade do padrão, no perfil da franja, no interferograma recolhido na água corrente.

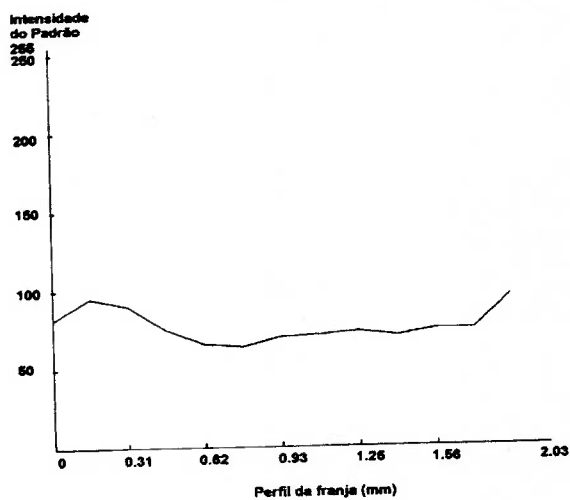


c)

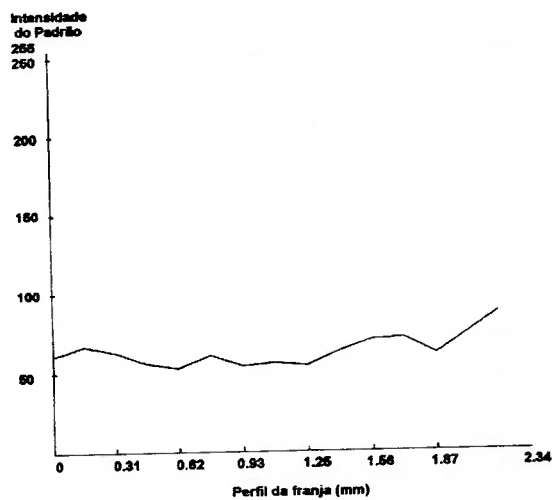


d)

Figura 4.37- Em c) e d), mostra-se a distribuição de intensidade do padrão, no perfil da franja, no interferograma recolhido na água corrente.

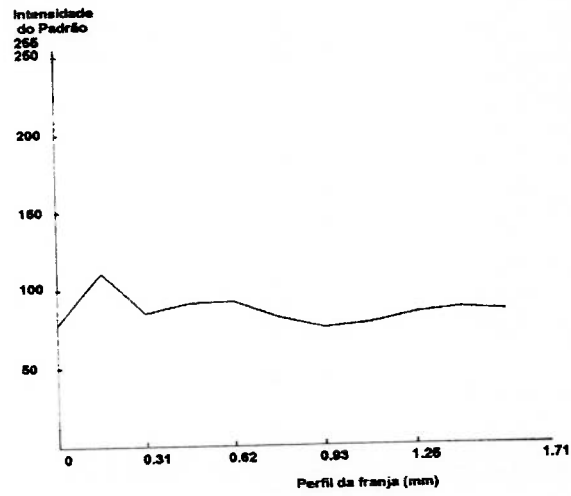


a)

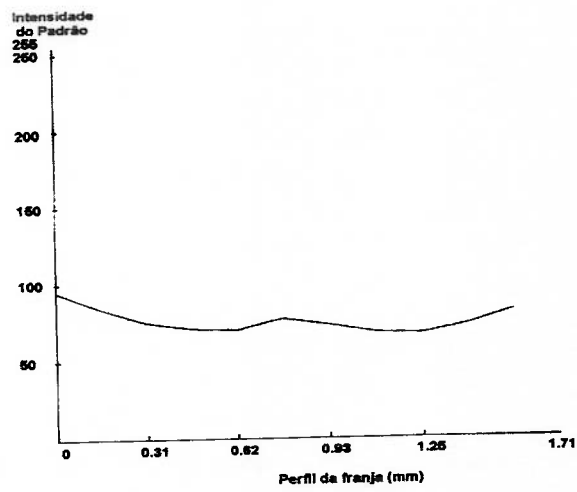


b)

Figura 4.38- Em a) e b), mostra-se a distribuição de intensidade do padrão, no perfil da franja, no interferograma recolhido na água potável.

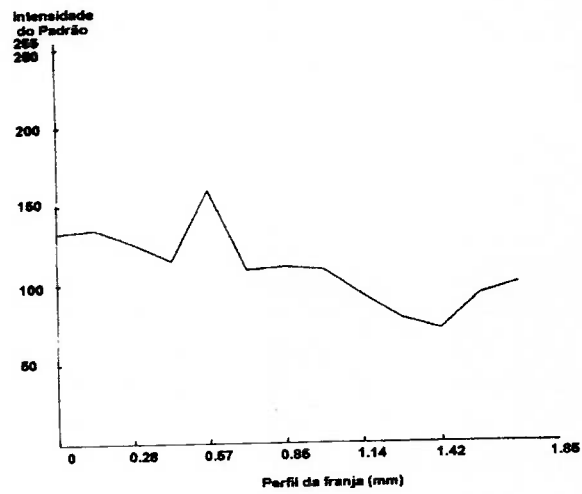


c)

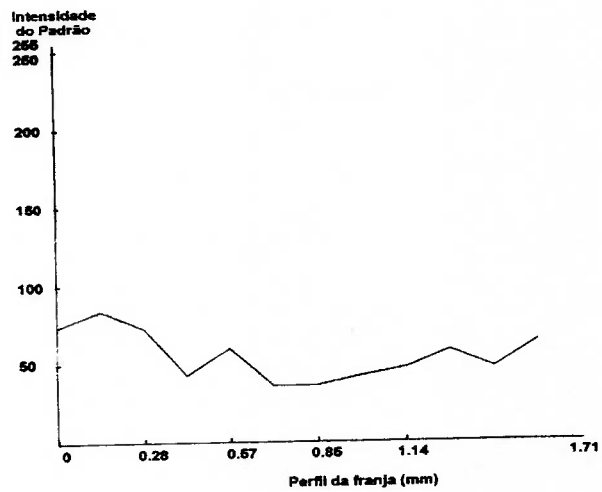


d)

Figura 4.39- Em c) e d), mostra-se a distribuição de intensidade do padrão, no perfil da franja na água potável.

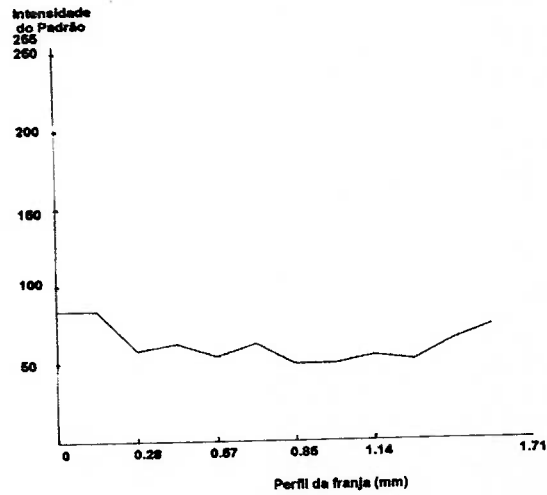


a)

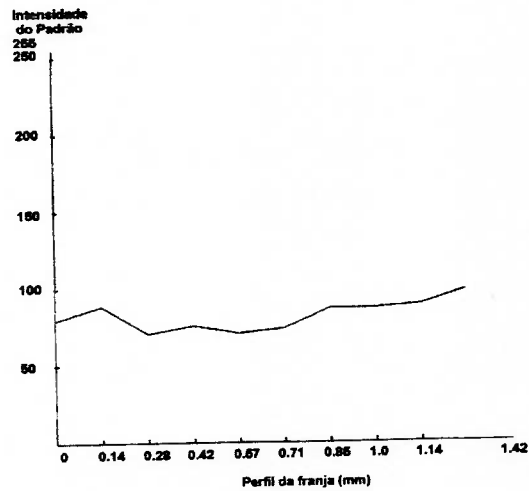


b)

Figura 4.40- Em a) e b), mostra-se a distribuição de intensidade do padrão, no perfil da franja, no interferograma recolhido na água de mar.



c)



d)

Figura 4.41- Em c) e d), mostra-se a distribuição de intensidade do padrão, no perfil da franja, no interferograma recolhido na água de mar.

4.8. Considerações sobre os resultados dos ensaios experimentais

Um objeto na água porém visto desde o ar parecerá estar aberrado. Um holograma obtido nestas condições registrará as mesmas aberrações. Similarmente um holograma registrado completamente na água dará uma imagem aberrada quando se vê no ar.

Os ensaios realizados, buscam a avaliação do poder de resolução da imagem na medida em que os hologramas são registrados em diferentes meios. Mediante a aplicação do carregamento sobre a placa de aço e usando a técnica de dupla exposição, obtiveram-se as franjas de interferência que se empregarão para as análises do resultado.

Analisando-se estes interferogramas, pode-se apreciar que a quantidade de franjas obtidas devido ao deslocamento produzido, é diferente para cada caso. Segundo mostrado na Tabela 4.8, a relação de franjas por mm, para a amplitude do holograma de 70 mm, é menor no ar, comparado com os hologramas submersos. Isto é devido a registrar-se maior número de franjas embaixo da água, pelas distorções que sofre a imagem quando é mudado o meio de registro.

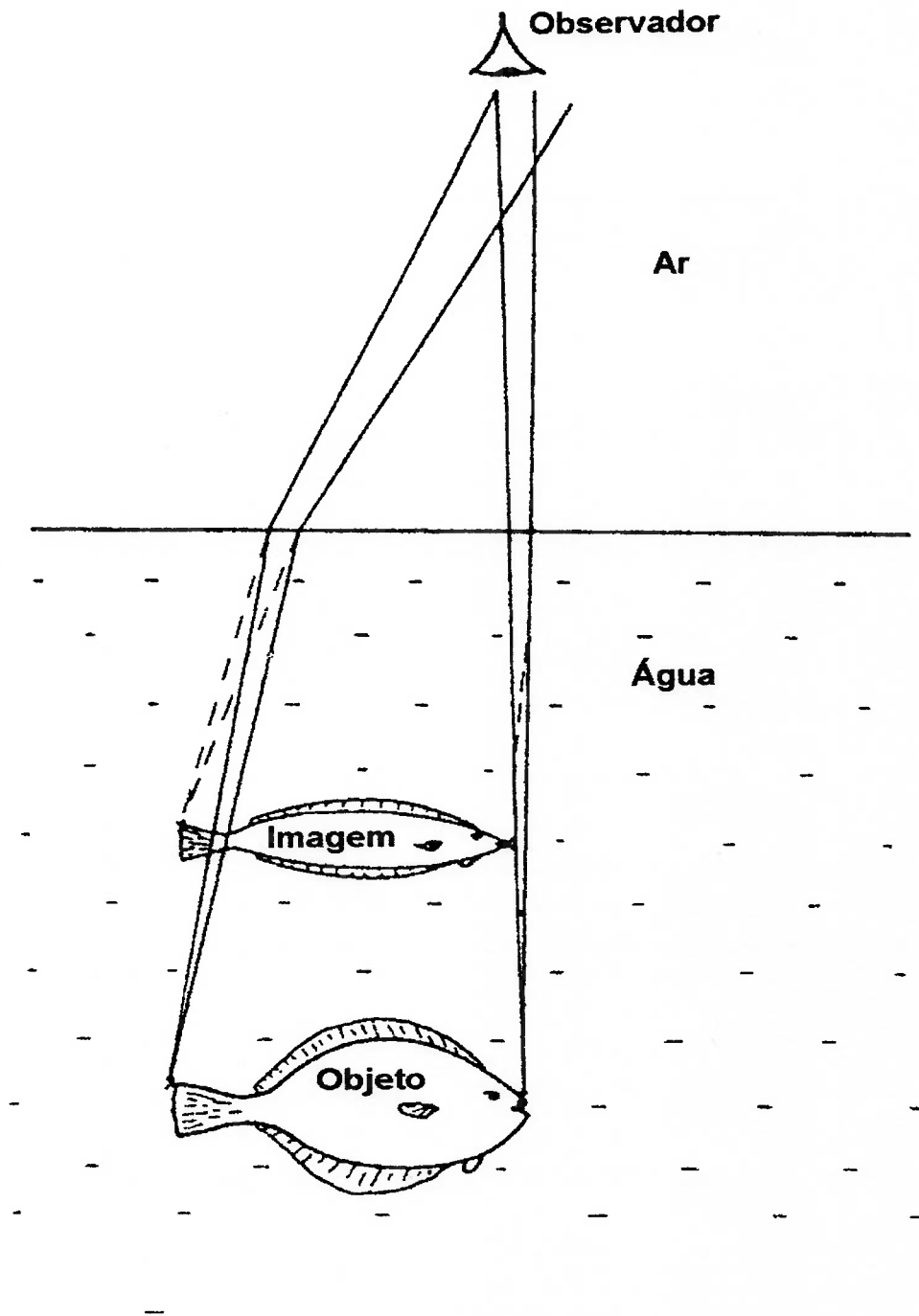


Figura 4.42- Distorção da imagem na água.

Aprecia-se também, na distribuição das franjas no comprimento analisado, que quanto mais distante se está do engastamento da placa, menor é o espaçamento entre as franjas, devido à magnitude do deslocamento produzido.

As medições da separação entre franjas, foi realizada entre pares destas, cada vez mais distantes do engastamento, verificando-se o exposto anteriormente, referido ao aumento do espaçamento.

A análise dos deslocamentos foi realizada para o interferograma recolhido no ar e na água de mar, comparando estes resultados com os cálculos analíticos obtidos pela teoria da resistência dos materiais. É de assinalar, que os valores mostrados na Tabela 4.6, não correspondem com todo o comprimento da placa de aço, pois o holograma foi recolhido somente para uma amplitude de 70 mm aproximadamente, portanto, estes resultados se correspondem com a seção da placa localizada entre os 80 e os 160 mm, desde o engastamento.

No Gráfico 1 (Figura 4.13), pode-se apreciar que os valores de deslocamentos para as condições analisadas, mantém proporcionalidade no comportamento das curvas, contudo, somente existe aproximação entre os valores obtidos analiticamente e no ar. Já para a situação na água de mar, os resultados se distanciam dos anteriores. A causa desta diferença nos

resultados, pode estar, na influência do índice de refração do vidro do aquário e da água de mar propriamente.

Tendo em conta a média ponderada entre o índice de refração da água (1,33) e o índice de refração do vidro (1,52); os valores dos deslocamentos para cada distância até o engastamento analisados, divididos por esta média dos índices; se aproxima aos valores para os respectivos pontos, calculados analiticamente. Esta análise sem chegar a ser totalmente absoluta procura aproximar as diferenças que pelo efeito de aberração, se obtém nos valores de deslocamentos na água de mar.

Na Figura 4.20 até a Figura 4.29, mostra-se para cada medição da separação entre franjas, a distribuição da intensidade do padrão, na largura medida.

Os gráficos anteriores, foram obtidos no instante em que realizou-se cada medição, portanto resulta uma confirmação do valor expressado na Tabela 4.9. No Gráfico 2 (Figura 4.30), se mostra que a maior separação entre as franjas se obtém no holograma recolhido no ar e esta diminui para as cenas de interesse; água destilada, água corrente, água potável e água de mar respectivamente.

Outro resultado exposto, é referido à largura das franjas. Determinou-se que esta diminui entre o interferograma registrado no ar e o recolhido na água

de mar (Tabela 4.11.a,b,c,d,e,). Neste caso, obteve-se a distribuição de intensidade do padrão no perfil de cada franja controlada, o qual se mostra nas Figura 4.32 até a Figura 4.41. Estes gráficos, foram obtidos a partir da escolha de uma franja representativa das que compõem o holograma.

Referido ao valor da intensidade, verifica-se que esta aumenta na ordem de análise; ar, água destilada, água corrente, água potável e água de mar. Este resultado, manifesta uma relação à inversa do valor da largura das franjas para os respectivos meios.

Como mostra o Gráfico 3 (Figura 4.31), as franjas de maior largura se obtém para o holograma no ar e estas são mais finas quando analisa-se a água destilada, água corrente, água potável e água de mar respectivamente.

Os resultados que neste item temos analisados, manifestam a influência marcada que exerce a mudança do índice de refração, na perda de resolução da imagem obtida para cada interferograma, assim como também, a mudança na composição para as condições submersas.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1. Conclusões

O trabalho permitiu, o desenvolvimento da técnica holográfica em condições submersas e a obtenção de seus respectivos interferogramas. Com o controle dos deslocamentos obtidos sobre uma chapa de aço, nos meios ensaiados, avaliou-se os efeitos produzidos pelos diferentes índices de refração, na qualidade da imagem holográfica.

A resolução de uma imagem holográfica é usualmente definida como a capacidade para distinguir dos pontos sobre um holograma separados por uma distância determinada. Quando o holograma foi registrado na água e reproduzido no ar, a imagem reconstruída sofreu aberrações ópticas devido à diferença dos índices de refração dos dois meios.

Os interferogramas obtidos embaixo da água mostram um decréscimo da resolução, quando comparados com o interferograma de referência obtido no ar, manifesto em que; a quantidade e a resolução das franjas por mm aumentou.

Foi possível controlar o valor dos deslocamentos registrados com a aplicação do carregamento e comparar estes resultados aos obtidos para a situação no ar.

Devido à mudança nas composições das águas empregada para os testes e suas diferenças com o registro no ar, obteve-se que: o poder de resolução, impresso em valores da separação entre as franjas e valores da largura destas, diminuiu entre os interferogramas registrados no ar; água destilada, água corrente, água potável e água de mar respectivamente.

O trabalho, trata sobre os problemas e vantagens potenciais para a produção de hologramas embaixo da água. Nos resultados obtidos, teve influência, a mudança do índice de refração, como também, entre as condições submersas, as composições diferentes de cada meio. A recompensa desta técnica, é sua alta resolução e que imagens tridimensionais de estruturas e componentes subaquáticos, podem ser registradas para propósitos de arquivo e inspeção não destrutiva. Crê-se, que tais registros seriam inviáveis nas indústrias do mar e poderiam substituir outros métodos de inspeção subaquática. Os problemas potenciais e limitações impostos pelo rigoroso ambiente, não devem contudo, ser subestimados. Ainda, sofrendo alguma degradação respeito à situação equivalente no ar, o poder de resolução obtido nos hologramas subaquáticos conduz a considerar com otimismo a futura aplicação da técnica.

5.2. Recomendações

A compreensão da natureza das aberrações ópticas em condições de índices de refração diferentes nas ocasiões do registro e da reprodução do holograma será um importante fator potencializados do uso futuro da holografia submersa.

A dispersão da luz do laser embaixo da água, pode degradar seriamente a qualidade da imagem e limitar a profundidade da cena de interesse que pode ser registrada, portanto; recomenda-se para trabalhos futuros, estudar a influência de fatores tais como: atenuação da luz, mudança da microestrutura da superfície, turbulência, variações térmicas, índice de refração da água, impedância acústica.

O principal freio para a aplicação da técnica, pode ser resolvido pela força da Engenharia, de um sistema que possa satisfatoriamente ser manipulável e operar embaixo da água, tal como, sistema computadorizado com uso de fibras ópticas. Para complementar estudos posteriores, recomenda-se comparar a imagem da holografia submersa, com a de outros métodos de inspeção subaquática.

ANEXO I

**CONJUNTO DE DADOS PARA O CÁLCULO DA COMPOSIÇÃO DA
ÁGUA POTÁVEL**

Considerando a Alcalinidade em 34 mg/L CaCO_3 , para a composição proposta, então $\text{CaCO}_3 = 43,48 \text{ mg/L}$.

Assim:

- $\text{Cl}^- \rightarrow 12,23 \text{ mg/L}$
massa atômica = 35
 $\text{Cl}^- = 12,23 / 35 = 0,34 \text{ meq.g/L}$
- Cálcio, $\text{Ca}^{2+} \rightarrow 6,74 \text{ mg/L}$
 $\text{Ca} \rightarrow 40 \text{ massa atômica}$
 $1 \text{ eq.g} = 40 / 2 = 20\text{g}$
 $\text{Ca}^{2+} = 6,74 / 20 = 0,34 \text{ meq.g/L}$
- Potássio, $\text{K}^+ \rightarrow 3,99 \text{ mg/L}$
 $\text{K}^+ \text{ massa atômica} = 39$
 $\text{K}^+ 3,99 / 39 = 0,10 \text{ meq.g/L}$
- Magnésio, $\text{Mg}^{2+} \rightarrow 1,82 \text{ mg/L}$
 $\text{Mg}^{2+} \text{ massa atômica} = 24,3 / 2 = 12,15$
 $\text{Mg}^{2+} 1,82 / 12,15 = 0,15 \text{ meq.g/L}$

- Sódio, $\text{Na}^+ \rightarrow 18,7 \text{ mg/L}$
 Na^+ massa atômica = 23
 $\text{Na}^+ 18,7 / 23 = 0,81 \text{ meq.g/L}$

Então:

- $\text{NaHCO}_3 = 0,68 \text{ meq.g/L} \Rightarrow 0,68 \text{ meq.g/L HCO}_3^- - 0,68 \text{ meq.g/L Na}^+$
- $\text{NaNO}_3 = 0,13 \text{ meq.g/L NO}_3^- \Rightarrow 0,13 \text{ meq.g/L Na}^+$
- $\text{CaCl}_2 = 0,34 \text{ meq.g/L Ca}^{2+} \Rightarrow 0,34 \text{ meq.g/L Ca}^{2+}$
- $\text{KCL} = 0,1 \text{ meq.g/L K}^+ \Rightarrow 0,1 \text{ meq.g/L CL}^-$
- $\text{MgCl}_2 = 0,15 \text{ meq.g/L Mg}^{2+} \Rightarrow 0,15 \text{ meq.g/L CL}^-$

chegando ao cálculo seguinte:

$\text{NaHCO}_3 - 0,68 \text{ meq.g/L}$

massa atômica

Na = 23

H = 1

C = 12

3O = 48

1 meq. = 84 mg

$\therefore 0,68 \text{ meq.} \times 84 \text{ mg} = 57,12 \text{ mg/L}$

$$\text{NaNO}_3 = 0,13 \text{ meq.g/L}$$

massa atômica

$$\text{Na} = 23$$

$$\text{N} = 14$$

$$3\text{O} = 48$$

$$1 \text{ meq.} = 85 \text{ mg}$$

$$\therefore 0,13 \text{ meq.} \times 85 \text{ mg} = 11,05 \text{ mg/L}$$

$$\text{CaCl}_2 = 0,34 \text{ meq.g/L}$$

massa atômica

$$\text{Ca} = 40$$

$$2 \text{ CL} = 71$$

$$\text{total } 111/2 \text{ por } \text{Ca}^{2+} \text{ CL} = 55,5$$

$$\therefore 0,34 \text{ meq.} \times 55,5 \text{ mg} = 18,87 \text{ mg/L}$$

$$\text{KCL} = 0,1 \text{ meq.g/L}$$

massa atômica

$$\text{K} = 39$$

$$\text{CL} = 35,5$$

$$\therefore 0,1 \text{ meq.} \times 74,5 \text{ mg} = 7,45 \text{ mg/L}$$

$$\text{MgCl}_2 = 0,15 \text{ meq.g/L}$$

massa atômica

$$\text{Mg} = 24$$

$$2\text{CL} = 71$$

$$\text{total } 95/2 = 47,5$$

$$\therefore 0,15 \text{ meq.} \times 47,5 \text{ mg} = 7,12 \text{ mg/L}$$

Na comprovação:

$$\Sigma \text{ meq.g/L Cations} \approx \Sigma \text{ meq.g/L Anions}$$

Na^+	=	0,81 meq.g/l	HCO_3^-	=	0,68 meq.g/L
Ca^{2+}	=	0,34 meq.g/L	NO_3^-	=	0,13 meq.g/L
K^+	=	0,10 meq.g/L	CL^-	=	0,59 meq.g/L
Mg^{2+}	=	0,15 meq.g/L			
total	=	1,40 meq.g/L	total	=	1,40 meq.g/L

ANEXO II

**CONJUNTO DE DADOS PARA O CÁLCULO DA COMPOSIÇÃO DA
ÁGUA DE MAR**

Considerando a composição standart da água de mar, temos:

- $\text{NaHCO}_3 = 2,5 \text{ meq.g/L}$

massa atômica

$$\text{Na} = 23$$

$$\text{H} = 1$$

$$\text{C} = 12$$

$$3\text{O} = 48$$

$$\therefore 2,5 \text{ meq.} \times 84 \text{ mg} = 210 \text{ mg/L}$$

- $\text{NaBr} = 0,9 \text{ meq.g/L}$

$$\text{Na} = 23$$

$$\text{Br} = 80$$

$$\therefore 0,9 \text{ meq.} \times 103 \text{ mg} = 92,7 \text{ mg/L}$$

- $\text{NaCl} = 4,77 \text{ meq.g/L}$

massa atômica

$$\text{Na} = 23$$

$$\text{CL} = 35,5$$

$$\therefore 4,77 \text{ meq.} \times 58,5 \text{ mg} = 279 \text{ mg/L}$$

- $\text{SrCl}_2 = 20,9 \text{ meq.g/L}$

massa atômica

$$\text{Sr} = 87,6$$

$$\text{Cl}_2 = 71,0$$

$$\text{total} = 158,6/2 = 79,3$$

$$\therefore 0,3 \text{ meq.} \times 79,3 \text{ mg} = 23,7 \text{ mg/L}$$

- $\text{CaCl}_2 = 20,9 \text{ meq.g/L}$

massa atômica

$$\text{Ca} = 40$$

$$\text{Cl}_2 = 71$$

$$\text{total} = 111/2 = 55,5$$

$$\therefore 20,9 \text{ meq.} \times 55,5 \text{ mg} = 1159,9 \text{ mg/L}$$

- $\text{KCl} = 10,2 \text{ meq.g/L}$

massa atômica

$$\text{K} = 39$$

$$\text{Cl} = 35,5$$

$$\therefore 10,2 \text{ meq.} \times 74,5 \text{ mg} = 759 \text{ mg/L}$$

- $\text{MgCl}_2 = 51,6 \text{ meq.g/L}$

massa atômica

$$\text{Mg} = 24$$

$$\text{Cl}_2 = 71$$

$$\text{total} = 95/2 = 47,5$$

$$\therefore 51,6 \text{ meq.} \times 47,5 \text{ mg} = 2451 \text{ mg/L}$$

- $\text{MgSO}_4 = 57,8 \text{ meq.g/L}$

massa atômica

$$\text{Mg} = 24$$

$$\text{S} = 32$$

$$4\text{O} = 64$$

$$\text{total} = 120/2 = 60$$

$$\therefore 57,8 \text{ meq.} \times 60 \text{ mg} = 3468 \text{ mg/L}$$

Na comprovação: $\Sigma \text{ meq.g/L C\acute{a}t\text{ions}} \approx \Sigma \text{ meq.g/L Anions}$

$$\text{Na}^+ = 2,5 + 0,9 + 477 = 480 \text{ meq.g/L}$$

$$\text{Mg}^{2+} = 51,6 + 57,8 = 109 \text{ meq.g/L}$$

$$\text{Ca}^{2+} = 20,9 \text{ meq.g/L}$$

$$\text{K}^+ = 10,2 \text{ meq.g/L}$$

$$\text{Sr}^{2+} = 0,3 \text{ meq.g/L}$$

$$\therefore \Sigma \text{ meq.g/L Cations} = 620,4 \text{ meq.g/L}$$

$$\text{Cl}^- = 477 + 0,3 + 20,9 + 10,2 + 51,6 = 559 \text{ meq.g/L}$$

$$\text{SO}_4^{2-} = 57,8 \text{ meq.g/L}$$

$$\text{HCO}_3^- = 2,5 \text{ meq.g/L}$$

$$\text{Br}^- = 0,9 \text{ meq.g/L}$$

$$\therefore \Sigma \text{ meq.g/L Anions} = 620,2 \text{ meq.g/L}$$

Assim $\Sigma \text{ meq.g/L Anions} \approx \Sigma \text{ meq.g/L Cations}$

ANEXO III

**INSTRUÇÕES DO PROGRAMA ELABORADO EM QBASIC PARA A
OBTENÇÃO DOS VALORES DE $\Delta^i y_0$.**

Instruções deste programa:

```
DECLARE SUB DIFDIV (TABL() AS DOUBLE, NMAX AS INTEGER,
                  MMAX AS INTEGER, N AS INTEGER)
DIM I AS INTEGER, MMAX AS INTEGER, N AS INTEGER.
DIM NMAX AS INTEGER, NPI AS INTEGER
DIM TABELA(20, 21) AS DOUBLE, X(20) AS DOUBLE, Y(20) AS DOUBLE
```

```
NMAX = 15
MMAX = NMAX + 1
READ N
FOR I = 1 TO N
  READ TABELA(I, 1), TABELA(I, 2)
NEXT
CALL DIFDIV(TABELA(), NMAX, MMAX, N)
REM CALL EXIT
```

```
DATA 15
DATA 85,0.00040
DATA 90,0.00048
DATA 95,0.00056
DATA 100,0.00066
DATA 105,0.00076
DATA 110,0.00088
DATA 115,0.0010
DATA 120,0.0011
DATA 125,0.0012
DATA 130,0.0014
DATA 135,0.0016
DATA 140,0.0018
DATA 145,0.0020
DATA 150,0.0022
DATA 155,0.0024
END
```

```
SUB DIFDIV (TABL() AS DOUBLE, NMAX AS INTEGER, MMAX AS INTEGER,
N AS INTEGER)
DIM I, IC, IK, IX, IY, J, K, KK, LF, LI, L1, L2 AS INTEGER
DIM M, NC, NL, N1 AS INTEGER
DIM P, Q, X, Y AS DOUBLE
  NL = N
  N1 = N + 1
  M = N - 1
  K = 1' MONTAGEM DA TABELA DE DIFERENCIAS DIVIDIDAS
```

```

FOR J = 3 TO N1
  FOR I = 1 TO M
    P = TABL(I + 1, J - 1) - TABL(I, J - 1)
    IK = I + K
    Q = TABL(IK, 1) - TABL(I, 1)
    TABL(I, J) = P / Q
  NEXT
  M = M - 1
  K = K + 1
NEXT
' FIM DA MONTAGEM
CLS
P = 1
PRINT "RESULTADO"
PRINT "I      Delta i"
LPRINT "RESULTADO"
LPRINT "I      Delta i" Em X, se armazena o valor do ponto que deseja-se
interpolat
X = 95
Y = TABL(1, 2)
FOR K = 3 TO N1
  P = P * (95 - TABL(K - 2, 1))
  ' Em Y, se armazena o valor da imagem do ponto que deseja-se interpolar
  Y = Y + TABL(1, K) * P
  PRINT K - 2;
  PRINT " ";
  PRINT TABL(1, K)
  LPRINT K;
  LPRINT " ";
  LPRINT TABL(1, K)
NEXT
PRINT Y
END SUB

```

Em cada caso se faz necessário variar os valores das instruções DATA por:

Dar

```

DATA 15
DATA 85,0.00036
DATA 90,0.00040
DATA 95,0.00066
DATA 100,0.00073
DATA 105,0.0010
DATA 110,0.0011
DATA 115,0.0014
DATA 120,0.0015
DATA 125,0.0018
DATA 130,0.0020
DATA 135,0.0022

```

DATA 140,0.0024
DATA 145,0.0025
DATA 150,0.0026
DATA 155,0.0027

Damar

DATA 15
DATA 85,0.00036
DATA 90,0.00073
DATA 95,0.0010
DATA 100,0.0013
DATA 105,0.0016
DATA 110,0.0018
DATA 115,0.0022
DATA 120,0.0025
DATA 125,0.0029
DATA 130,0.0032
DATA 135,0.0033
DATA 140,0.0036
DATA 145,0.0039
DATA 150,0.0041
DATA 155,0.0043

Damar/Média Ira e Irv

DATA 15
DATA 85,0.00025
DATA 90,0.00051
DATA 95,0.00070
DATA 100,0.00091
DATA 105,0.0011
DATA 110,0.0012
DATA 115,0.0015
DATA 120,0.0017
DATA 125,0.0020
DATA 130,0.0022
DATA 135,0.0023
DATA 140,0.0025
DATA 145,0.0027
DATA 150,0.0028
DATA 155,0.0030

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. Gabor: **A new microscopic principle**, Nature 161, 777-778 (1948).
- [2] D. Gabor: **Microscopy by reconstructed wavefronts**, Proc. Roy. Soc. (London) A 197, 454-487 (1949).
- [3] D. Gabor. **Electron-Optical systems with helical axis**. Roy. Soc. London, Section B, 64, 449-9, 1951.
- [4] M. E. Haine, J. Dyson, Nature, 166, 315, 1958.
- [5] M. E. Haine, J. Mulvey. **Diffraction microscopy with x-rays**. Letter in Nature, London. 170, 202-3, 1952.
- [6] A. Tokomura, A. Funkumura, M. Watanabe, T. Komada. Jap. J. Appl. Phys., 7, 295, 1968.
- [7] A. A. Michelson. **Studies in Optics**. p. 60, Uni. de Chicago, Press Chicago, Illinois, 1927.
- [8] M. J. Buerger. **The photography of atoms in crystals**. Proc. Nat. Acad. Sci. U. S. A., 36, 330 et J. Appl. Phys., 21, 909, 1950.
- [9] G. L. Rogers. **Experiments in diffraction microscopy**. A, 63, 193-221, (Pt 11,), 1952.
- [10] H. M. A. El - Sum, P. Kirkpatrick. Phys. Rev., 85, 763, 1952.
- [11] V. A. Baez. **Focusing by diffraction**. Amer. J. Phys., 20, 311, 1952.
- [12] A. W. Lohmann. Opt. Acta. 3, 97, 1956.
- [13] G. L. Rogers. **A new method of analysing ionospheric movement records**. Nature, 177, 613, 1956.
- [14] E. N. Leith, J. Uptnieks: **Reconstructed wavefronts and communication theory**, J. Opt. Soc. Am. 52, 1123-1130 (1962).
- [15] E. N. Leith, J. Upatnieks: **Wavefront reconstruction with continuous-tone objects**. J. Opt. Soc. Am. 53, 1377-1381 (1963).
- [16] E. N. Leith, J. Upatnieks: **Wavefront reconstruction with diffused illumination of three-dimensional objects**. J. Opt. Soc. Am. 54, 1295-1301 (1964).

- [17] Y. N. Denisyuk. **Representation of optical properties of an objective by means of wave pattern of light acattered by it.** Opt. Spectros (USSR), vol. 144, N° 6, 1275-8. 1965.
- [18] Y. N. Denisyuk. Opt. Spectros (USSR), 15, 271 et 18, 152, 1965.
- [19] **Applications de l'holographie.** Compt. Rend. Symposium International Besancon, Juillet 1970, Vienot J. Ch., Bulabois J., Pasteur J.
- [20] S. A. Benton. J. Opt. Amer., 59, 1545, 1969.
- [21] A. Vander Lugt. J. Opt. Soc. Amer., 53, 1341, 1963.
- [22] J. L. Tribillon. **Lasers Commercialisés**, CEDOCAR, Paris, 1977.
- [23] CENO-USP, **Relatório Técnico do Sub-Projeto 6 - Fase 2, "Desenvolvimento de Métodos Ópticos para a avaliação de Deslocamentos e Deformações em Estruturas: Desenvolvimento Teórico"**.
- [24] Watson, J & Britton, P.W., **Preliminary results on underwater holography** Optics and Laser Technol., (August 1983) 215-16.
- [25] C. West, **"Holographic Interferometry"**, John Wiley and Sons, N. Y., 1979.
- [26] J. Caufield, **"Handbook of Holography"**, Ac. Press, N. Y., 1979.
- [27] Ostrovsk, Butosov e Ostavskaya, **"Interferometry by Holography"**, Springer Series, N. Y. 1980.
- [28] K. Wanders, **"Holographic Interferometry"**, Third workshop DFVLR-CIA on lasers and holography, São José dos Campos, 1977.
- [29] K. A. Haines, B. P. Hildebrand: **Surface-deformation measurement using the wavefront reconstruction technique.** Appl. Opt. 5, 595-602 (1966).
- [30] J. Ch. Vienot, C. Froehly, J. Monneret, J. Pasteur. **The Engineering uses of holography**, Cambridge, Univ. Press, 1970.

- [31] J. Tsujiuchi, N. Takeya, K. Matsuda: **Mesure de la déformation d'un objet par interférométrie holographique.** Opt. Acta 16, 709-722 (1969).
- [32] P. M. Boone, R. Verbiest: **Applications of hologram interferometry. to plate deformation and translation measurements.** Opt. Acta 16, 555-567 (1969).
- [33] K. A. Stetson: **A rigorous treatment of fringes of holographic interferometry,** Optik 29, 386-400 (1969).
- [34] E. B. Aleksandrov, A. M. Bonch-Bruevich: **Investigation of surface strains by the hologram technique.** Sov. Phys. 12, 258-265 (1967).
- [35] J. W. C. Gates: **Holographic Measurement of Surface Distortion in three dimensions.** Opt. Technol. 1, 247-250 (1969).
- [36] R. K. Erf (Ed), **"Holographic Non Destructive Testing"** Academic Press (1978).
- [37] J. F. Ready, **"Industrial Applications of Lasers"** Academic Press (1978).
- [38] H. Maillet, **O Laser, Principios e Técnicas de Aplicação,** 1987.
- [39] M. R. Wall, **"Underwater Laser Applications"** Optics Tecnology, (May 1969) pp. 130-139.
- [40] Caulfield, H. J., **Handbook of Optical Holography,** Academic Press, New York, 1979.
- [41] Watson, J., **High resolution visual inspection using underwater holography.** International Advances in Non-Destructive Testing. vol. 14, ed. W. J. McGonnagle (London: Gordon and Breach), pp 335-60, 1989.
- [42] Hariharan, P., **Optical Holography,** Cambridge Univerty Press, Cambridge, Uk, 1984.
- [43] Hecht, E., **Optics,** Addison - Wesley, Reading, Mass, USA, 1987.
- [44] Meier, R.W., **Magnifications and third-order aberrations in holography.** JOSA,55 (1965) 987-92.

- [45] Champagne E.B., **Non-paraxial imaging, magnification and aberration properties in holography.** JOSA, 57 (1967) 51-5.
- [46] Watson, J., **Holography-Can it be used underwater?** J. Soc.Underwater Technology, 7 (Winter 1981) 16-20.
- [47] Britton, P.W., **A feasibility study of underwater holography.** M.Phil Thesis, University of Aberdeen, 1991.
- [48] Turner, J. P. **Underwater photogrammetry-of what value to the Offshore Industry,** J. Soc., for Underwater Tech., Aunumm, 1983.
- [49] Thomson B. J., **1974 Holographic particle sizing techniques,** J. Phys. E: Sci. Instrum. 7 781-8.
- [50] Nacn R., Bjelkhagen H., Burnstein R. and Voyvodic L., **1989 A system for viewing holograms** Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 283 24-36.
- [51] Wright D., Little M. j. and Tozer B. A., **1986 Hologrammetry on an AGR fuel Element.** TPRD/M/1577/R86 (CEGB).
- [52] Watson J. and Britton P. W., **1985 Engineering measurement from underwater optical holography,** J. Photo. Sci. 33 167-75.
- [53] Watson J., Britton P. W. and Cran A. C. S., **1987 Resolution in holographic images of underwater objects** Optics Laser Technol. 19 97-101.
- [54] Armour I., Kilpatrick J. M and Watson J., **1989, Reduction of aberrations in underwater holography** 2nd Annual Conference on Holographic Systems, Components and Applications, Proc. IEE 311 21-4.
- [55] Meier R. W., **1965 Magnification and third order aberrations in holography** J. Opt. Soc. Am. 55 987-91.
- [56] Gara A. D. and Yu F. T. S. 1971 Appl. Opt. 10 1324-8.
- [57] J. N. Latta: **Computer-based analysis of hologram imagery and aberration. I: Hologram types and their nonchromatic aberrations. II: aberrations induced by a wavelength shift.** Appl. Opt. 10, 599-605, 609- 618 (1971).

- [58] Champagne E. B. and Massey N. G. 1969 Appl. Opt. 8 1879-85.
- [59] Austin M. 1984 J. Phys. D: Appl. Phys. 17 1953-9.
- [60] Verlov, N.G., **Marine Optics**, Elsevier Scientific Publishing Company, New York, 1976.
- [61] Kilpatrick J. M. and Watson J., 1988 **Underwater hologrammetry: aberrations in the real image when reconstructed in air** J. Phys. D: Appl. Phys. 21 1701-5.
- [62] Secretaria de Serviços e Obras Públicas. Fomento Estadual de Saneamento Básico-Centro Tecnológico de Saneamento Básico. **Água: Qualidade, Padrões de Potabilidade e Poluição** CETESB, São Paulo, 1969.
- [63] Luiz Di Bernardo., **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. vol. I, ABES, 1993.
- [64] Degremont., **Water Treatment Handbook**. 1979.
- [65] Forneris R., **Análise de Deslocamentos e Deformações em Elementos Estruturais por Interferometria Holográfica**. Dissertação de Mestrado, 1987.
- [66] A. E. Ennos: **Measurement of in-plane surface stain by hologram-interferometry**. J. Sci. Instrum. 1, 731-734 (1968).
- [67] S. K. Dhir, J. P. Sikora: **An Improved Method for Obtaining the Obtaining the General-Displacement field from a holographic Interferogram**. Exp. Mech. 7, 323-327 (1972).
- [68] J.E. Sollid: **Holographic interferometry applied to measurements of small static displacements of diffusely reflecting surfaces** Appl. Opt. 8, 1587-1595 (1969).
- [69] Prikyl: **Localization of interference fringes in holographic interferometry**. Opt. Acta 21, 765-681 (1974).
- [70] S. Walles: **Visibility and locazition of fringes in holographic interferometry of diffuselly reflecting surfaces**. Ark Fys. 40, 229-403, (1970).

- [71] Yamaguchi, H. Saito; **Application of holographic interferometry to the measurement of Poisson's ratio.** Jpn. J. Appl. Phys. 8, 768-771 (1969).
- [72] L. Mente; **Determining the plastic limit of steel structural unit.** (Capítulo do livro LASER Applications-2), Ed. E. Scharst, Karl Zeiss Jena).
- [73] G. Wernicke, W. Osten; **Measurement of material parameters of type discs by Holographic Interferometry.** (Capítulo do livro LASER Applications-2), Ed. E. Scharst, Karl Zeiss Jena).
- [74] G. Frankowski; **On the use of holographic interferometry in the determination of fracture mechanical characteristics.** (Capítulo do livro LASER Applications-2), Ed. E. Scharst, Karl Zeiss Jena).
- [75] G. Frankowski, W. Winckler; **Crack detection using holographic double exposure technique.** (Capítulo do livro LASER Applications-2), Ed. E. Scharst, Karl Zeiss Jena).
- [76] C. M. Vest; **Application of holographic interferometry to Non-Destructive testing International Advances in Non-Destructive testing.** vol. 5, 1977, pp. 17-29.
- [77] W. R. Goggin, **Thermomechanical stability of graphite/epoxy composite.** Appl. Opt. vol. 13, nº 2, Feb. 1974, pp. 444-450.
- [78] D. Maskowski, (et. al.), **Holographic testing of defects in composite materials constructions: 10 World Conf. on NDT, 1982.**
- [79] J. R. Crawford, R. Benson; **HI Identification of circuit board component fallure.** Appl. Opt. vol. 15, Jan. 1976, pp. 24-25.
- [80] K. Grunewald, W. Fritach; **Non-Destructive testing of plastics by means of holographic interferometry.** Polymer Engineering and Science. vol. 15, nº 1, Jan. 1975, pp. 16-20.
- [81] D. Paoletti, (et. al.), **A fringe control method for real time HNDDT.** Opt. Commun. vol. 49, nº 2, Feb. 1984, pp. 112-116.
- [82] Gary Bloud; **Practical speckle interferometer for measuring in plane deformation.** Appl. Opt. vol. 14, nº 4, Apr. 1975, pp. 876-884.