

RODRIGO DE SOUZA DIAS

**DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO HOLOGRÁFICO PARA
INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS SUBMERSAS.**

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

São Paulo
2004

CONSULTA
FD-3825
Ed.rev.

OK

RODRIGO DE SOUZA DIAS

**DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO HOLOGRÁFICO PARA
INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS SUBMERSAS.**

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

Área de Concentração:
Engenharia Mecatrônica e
Sistemas Mecânicos

Orientador:

Prof. Dr. Edison Gonçalves

São Paulo

2004

AGRADECIMENTOS

Ao professor Edison Gonçalves pela confiança depositada em mim desde o início, pela sua orientação e incentivo para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas Palácios, Ricardo e Valin pela valiosa colaboração no desenvolvimento do trabalho.

Aos colegas do Centro de Estruturas Navais e Oceânicas (CENO), Anderson, Augusto, Daniel, Gelson, Gilberto, Gomes, Maria Luisa, Miguel Angel, Miguel Cale, Nelson e Zé Roberto, pela amizade e ajuda prestada.

Aos professores Oswaldo Horikawa e João Paulo Pereira Marcicano pelas suas sugestões. Também a todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

ÍNDICE

Lista de Figuras	III
Lista de Tabelas	VI
Lista de Abreviaturas	VII
Lista de Símbolos	VIII
Resumo	X
Abstract	XI

Capítulo I**I. INTRODUÇÃO**

1.1. Considerações Iniciais.....	1
1.2. Objetivos do Trabalho.....	3
1.3. Escopo do Trabalho.....	3

Capítulo II**II. CONCEITOS DE HOLOGRAFIA**

2.1. Introdução.....	4
2.2. O Processo Holográfico	5

Capítulo III**III. HOLOGRAFIA DIGITAL**

3.1. Introdução.....	9
3.2. Técnicas para Análise da Superfície	10
3.3. Método das Duas Fontes	16

Capítulo IV**IV. ENSAIOS EXPERIMENTAIS**

4.1. Arranjos Holográficos.....	19
4.2. Processamento de Imagens.....	26
4.3. Procedimento dos Ensaios.....	28

Capítulo V**V. RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

5.1. Avaliação da Superfície no Ar.....	30
5.2. Avaliação da Superfície na Água.....	43
5.3. Análise dos Resultados Obtidos	51

Capítulo IV**VI. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

6.1. Conclusões	53
6.2. Recomendações	54

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
---	-----------

APÊNDICES.....	59
-----------------------	-----------

LISTA DE FIGURAS

<u>FIGURAS</u>	<u>PÁG</u>
FIGURA 1.1 Equipamentos para controle e captura de imagens.	2
FIGURA 2.1 Obtenção de imagens holográficas.	6
FIGURA 2.2 Imagens do objeto observadas por diversos ângulos.	7
FIGURA 3.1 Geometria da Reconstrução para Holografia de Fresnel.	13
FIGURA 3.2 Parâmetros medidos no arranjo experimental utilizado.	16
FIGURA 4.1 Dimensões do objeto utilizado no ensaio.	19
FIGURA 4.2 Foto do arranjo holográfico utilizado para o ensaio com o objeto no ar.	20
FIGURA 4.3 Esquema do arranjo holográfico.	21
FIGURA 4.4 Valores das medidas do arranjo holográfico.	22
FIGURA 4.5 Foto do arranjo holográfico utilizado para o ensaio com o objeto em água.	24
FIGURA 4.6 Esquema do ensaio realizado em água.	25
FIGURA 4.7 Imagem do objeto capturada com uma câmera CCD usando uma lente de $f = 75$ mm.	26
FIGURA 4.8 Esquema do Procedimento para Realização dos Ensaio	29
FIGURA 5.1 Holograma digital de uma barra de alumínio.	31
FIGURA 5.2 Feixe objeto de uma barra de alumínio.	31
FIGURA 5.3 Feixe referência.	32
FIGURA 5.4 Imagem de intensidade da barra de alumínio com "d" positivo.	33
FIGURA 5.5 Imagem de intensidade da barra de alumínio com "d" negativo.	33

FIGURA 5.6	Interferograma de fase entre dois hologramas com um deslocamento lateral de 46,5 μm .	35
FIGURA 5.7	Interferograma de fase entre dois hologramas com um deslocamento lateral de 46,5 μm e com filtro seno-coseno 7x7.	35
FIGURA 5.8	Interferograma de fase entre dois hologramas com um deslocamento lateral de 70 μm .	36
FIGURA 5.9	Interferograma de fase entre dois hologramas com um deslocamento lateral de 70 μm e com filtro seno-coseno 9x9.	36
FIGURA 5.10	Interferograma de fase entre dois hologramas com um deslocamento lateral de 93 μm .	37
FIGURA 5.11	Interferograma de fase entre dois hologramas com um deslocamento lateral de 93 μm e com filtro seno-coseno 11x11.	37
FIGURA 5.12	Mapa de fase com desmodulação correspondente ao interferograma de fase com um deslocamento lateral de 46,5 μm .	39
FIGURA 5.13	Representação tridimensional correspondente aos dados da figura 5.12.	40
FIGURA 5.14	Representação tridimensional (vista lateral)	41
FIGURA 5.15	Gráfico para medição da profundidade do entalhe na superfície do objeto.	42
FIGURA 5.16	Holograma digital realizado em água correspondente a uma barra de alumínio.	43
FIGURA 5.17	Feixe objeto realizado em água correspondente a uma barra de alumínio.	44
FIGURA 5.18	Feixe referência.	44
FIGURA 5.19	Imagem de Intensidade da barra de alumínio em água.	45
FIGURA 5.20	Interferograma de fase entre dois hologramas com um deslocamento lateral de 46,5 μm em água.	45

FIGURA 5.21	Interferograma de fase entre dois hologramas com um deslocamento lateral de 46,5 μm em água e com filtro seno-coseno 5x5.	46
FIGURA 5.22	Interferograma de fase entre dois hologramas com um deslocamento lateral de 70 μm em água.	46
FIGURA 5.23	Interferograma de fase entre dois hologramas com um deslocamento lateral de 46,5 μm em água e com filtro seno-coseno 7x7	47
FIGURA 5.24	Mapa de fase com desmodulação correspondente ao interferograma de fase em água com um deslocamento lateral de 46,5 μm .	48
FIGURA 5.25	Representação tridimensional correspondente aos dados da figura 5.24.	48
FIGURA 5.26	Representação tridimensional (vista lateral).	49
FIGURA 5.27	Gráfico para medição da profundidade do entalhe na superfície do objeto para ensaio realizado em água.	50

LISTA DE TABELAS

<u>TABELAS</u>		<u>PÁG</u>
TABELA 5.1	Número de franjas e filtro utilizados para cada interferograma para o ensaio realizado no ar.	38
TABELA 5.2	Número de franjas e filtro utilizados para cada interferograma para o ensaio realizado em água.	47
TABELA 5.3	Comparação do número de franjas no ar e na água para diferentes deslocamentos.	51
TABELA 5.4	Valores de profundidade do entalhe obtidos para os ensaios realizados no ar e água.	52
TABELA 5.5	Valores da largura do entalhe obtidos para os ensaios realizados no ar e água.	52

LISTA DE ABREVIATURAS

CCD	Dispositivo de carga acoplada (Charge Couple Device)
CENO	Centro de Estruturas Navais e Oceânicas da Universidade de São Paulo.
DC	Componente contínua ou termo de ordem zero no espectro de Fourier.
HOLODIG	Programa utilizado para processamento das imagens.
ROV	Veículos remotamente controlados (Remote Operated Vehicles)
F.O	Fibra Óptica.
R.O	Feixe objeto.
R.R	Feixe de Referência.
B.S	Divisor de Feixe (Beam Splitter).
PC	Computador.
ROI	Região de Interesse

LISTA DE SÍMBOLOS

$E'(\xi, \eta)$	Campo ondulatório no plano do holograma.
(ξ, η)	Plano do holograma.
(x', y')	Plano da imagem.
$E'(x', y')$	Campo ondulatório no plano da imagem.
$h(\xi, \eta)$	Holograma.
$h'(\xi, \eta)$	Holograma modificado.
d	Distância objeto câmera e de reconstrução.
π	Constante universal igual a 3,1415.
$F_{\lambda d}$	Transformação de Fourier bidimensional modificada.
i	Unidade imaginária.
λ	Comprimento de onda da luz.
n	Índice de refração do meio.
$r(\xi, \eta)$	Campo ondulatório de referência no plano do holograma.
$\Delta\xi$	Tamanho do pixel segundo o eixo X no plano do holograma.
$\Delta\eta$	Tamanho do pixel segundo o eixo Y no plano do holograma
$\Delta x'$	Tamanho do pixel segundo o eixo X no plano da imagem.
$\Delta y'$	Tamanho do pixel segundo o eixo Y no plano da imagem.
A	Amplitude da onda de referência.
$\Phi(x', y')$	Valor da fase no plano da imagem.
$\text{Re}[E'(x', y')]$	Parte real do campo complexo no plano da imagem.
$\text{Im}[E'(x', y')]$	Parte imaginária do campo complexo no plano da imagem.
$I(x', y')$	Distribuição da intensidade no plano da imagem.

d'	Distância laser – objeto.
l'	Distância de deslocamento da fonte de uma posição para outra.
L	Distância laser – câmera.
θ	Ângulo em que se observam as duas fontes desde o objeto.
Y	Distância do máximo até a origem do sistema de coordenadas.
Δ	Diferença de caminho óptico entre os feixes interferentes que chegam a câmera CCD.
Δy	Distância entre duas franjas consecutivas.
h_{12}	Separação entre duas franjas consecutivas.
$h(x',y')$	Altura do objeto.
α	Ângulo entre a direção de iluminação e captura.
Θ_{\max}	Ângulo máximo entre os feixes objeto e referência.
Δl	Largura do pixel da câmera CCD.
a	Dimensão do objeto.
h	Dimensão do holograma.
d_{\min}	Distância mínima de registro.
$\phi(x,y,z)$	Fase das ondas luminosas em um dado ponto (x,y,z) no plano da imagem.

RESUMO

Um método holográfico para inspeção de defeitos superficiais em estruturas submersas é proposto com o objetivo de obter uma maior qualidade de imagem do que as obtidas pelos métodos convencionais de inspeção. Devido às deficiências das imagens produzidas pelos métodos que utilizam a óptica convencional, a introdução da holografia nos processos de inspeção submersa contribui para gerar uma imagem tridimensional com grande profundidade de campo e menores distorções, podendo-se, assim, avaliar com melhor precisão defeitos estruturais, tais como, corrosão localizada ou generalizada, trincas e porosidades superficiais, etc. Arranjos holográficos são utilizados para inspecionar um objeto com um defeito de geometria conhecida e avaliar a qualidade das imagens obtidas em condições submersas e não submersas. A análise e comparação da imagem holográfica com o defeito real comprovam a alta resolução e fidelidade do processo na avaliação das dimensões do defeito.

ABSTRACT

A holographic method for inspection of defects in underwater structures is proposed with the objective of obtaining an image with more quality than the obtained by the conventional methods of inspection. Due to the deficiencies of the images produced by the methods that use the conventional optics, the introduction of the holography in underwater inspection processes contributes to generate a three-dimensional image with great field depth and smaller distortions, being able to evaluate with better precision structural defects, such as, located or widespread erosion, superficial trines, etc. Specific holographic arrangements are used to inspect an object with a defect of known geometry and to evaluate the quality of the obtained images in submerged and non submerged conditions. The analysis and comparison of the holographic image with the real defect prove the high resolution and fidelity of the process in the avaluation of the dimensions of the defect.

CAPITULO I

INTRODUÇÃO

1. 1. Considerações Iniciais.

A inspeção visual é utilizada para detectar a ocorrência de defeitos superficiais em estruturas e peças mecânicas. Muitas vezes essa inspeção visual pode ser auxiliada por produtos (líquidos penetrantes) ou sistemas (partículas magnéticas) que realçam a existência dos defeitos. Em condições submersas essas possibilidades ficam inviabilizadas. Quando na inspeção se utiliza o método óptico convencional, onde as imagens são capturadas por vídeos e profissionais fazem a vistoria da estrutura, não se consegue obter imagens capazes de fornecer com precisão e fidelidade os detalhes do defeito analisado.

As estruturas voltadas a exploração e exploração de petróleo situadas na costa marítima requerem inspeções de qualidade em regiões e componentes muitas vezes situados em condições submersas. Usualmente estas inspeções são realizadas com pouca visibilidade e condições de segurança potencialmente arriscadas. Quando a profundidade aumenta, a dificuldade também aumenta colocando-se mais ênfase na inspeção remota, em lugar do mergulhador.

Os métodos óticos, tais como, fotografia convencional, estéreo-fotografia e videografia são extensivamente utilizados na inspeção industrial. A utilização da holografia, método este que apresenta boa resolução e elevada profundidade de campo, pode vir a fornecer enormes benefícios para a inspeção.

Atualmente, para a inspeção de estruturas submersas situadas em grandes profundidades, são usados veículos submarinos remotamente

controlados, denominados ROVs, como mostra a Figura 1.1. Os ROVs trabalham com um sistema de captação de imagens com uma câmera fixa dentro de um receptáculo estanque e transparente do ROV, ou em um braço mecânico que se move até a estrutura a ser inspecionada.

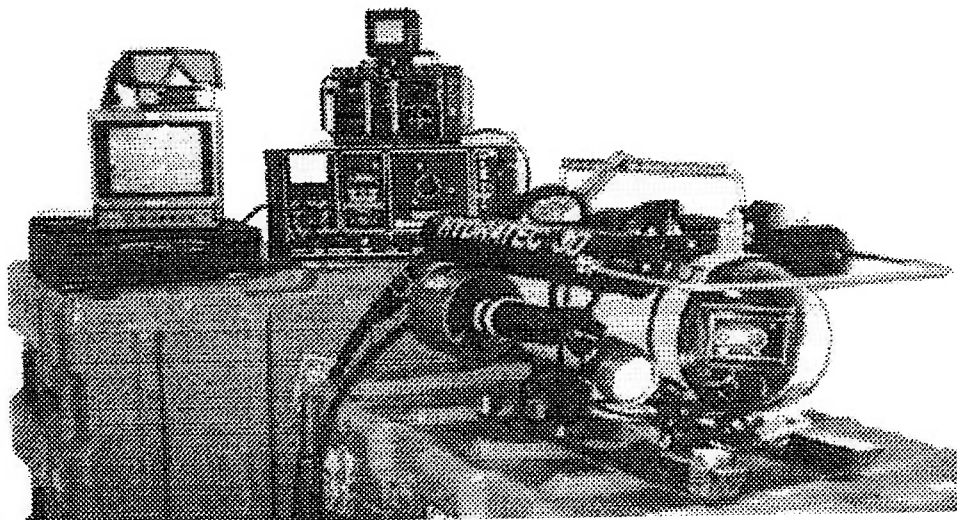


Figura 1.1. Equipamentos para controle e captura de imagens

O controle remoto do ROV é realizado através de um cabo umbilical, permitindo que o mesmo se movimente em todos os sentidos através de seus propulsores. O piloto, situado na superfície, controla o veículo baseado principalmente na orientação visual embora possa ser auxiliado por imagens de sonar, bússola, altímetro, etc. Os ROVs podem ter uma ou várias câmeras em posições e tipos diferentes. As imagens obtidas são de câmeras de vídeo normais ou câmeras de alta sensibilidade. O sinal é transmitido em tempo real para a superfície através de um cabo coaxial ou fibra ótica, em caso de veículos para grandes profundidades (>1000 a 4000 metros). Na superfície as imagens podem ser gravadas em fitas magnéticas ou CDs, sendo que a maioria dos veículos no mercado ainda utilizam vídeos analógicos. A qualidade das imagens depende do sistema, mas geralmente é de cerca de 480 linhas de resolução em cor ou 600 linhas em preto e branco.

1. 2. Objetivos do Trabalho

O objetivo do presente trabalho é implementar um método holográfico para obtenção de imagens com uma maior precisão do que as obtidas pelos métodos convencionais de inspeção visual na avaliação de estruturas submersas. Conseqüentemente além de se obter-uma diminuição dos gastos com o processo de inspeção, obter-se-á um grande aumento na qualidade e fidelidade das informações obtidas.

Para alcançar este objetivo, executam-se as seguintes tarefas:

- I. Implementação e ajuste de arranjo holográfico para a análise de defeitos superficiais de corpos sólidos em condições submersas e no ar.
- II. Processamento de imagem, reconstrução numérica da imagem holográfica, cálculo do interferograma de fase e de intensidade e a representação tridimensional do mapa de fase.

1. 3. Escopo do Trabalho.

O capítulo I trata dos aspectos gerais dos métodos convencionais de inspeção utilizados atualmente. Em seguida, no capítulo II, tratam-se dos conceitos básicos da holografia e da interferometria holográfica. No capítulo III apresenta-se a holografia digital, a reconstrução numérica dos hologramas e os métodos de análise da superfície de objetos. No capítulo IV, mostram-se os resultados experimentais, avaliando-se a superfície da estrutura tanto para condições submersas, como no ar. Por último, no capítulo V, são apresentadas as conclusões e as recomendações para estudos futuros.

CAPÍTULO II

CONCEITOS DE HOLOGRAFIA

2. 1. Introdução

O físico Denis Gabor, em 1948, desenvolveu uma técnica com o objetivo de melhorar a resolução de imagens geradas por microscopia eletrônica. A teoria da sua idéia foi desenvolvida numa época em que não se possuía os meios materiais ideais para sua execução, já que havia a necessidade de uma fonte de luz coerente e monocromática que ainda não existia. Sua idéia era registrar uma imagem contendo toda a informação luminosa do objeto observado e reconstruí-la por meios óticos. Para tanto, era necessário utilizar a fase das ondas luminosas, que na fotografia tradicional é completamente perdida, pois ela só grava a amplitude das mesmas. Entretanto, se fosse adicionada uma referência luminosa padrão à montagem haveria um ponto de comparação para se reconstruir a frente de ondas original.

Tornada pública pela primeira vez em 1948, em um artigo desenvolvido por D. GABOR e intitulado "A new microscopic principle", [1], e em artigos seguintes, D. Gabor apresentou discussões mais detalhadas, [2], [3], a teoria da holografia só foi colocada em prática com a invenção do laser, ocorrido no início da década de 1960. Desde então, as imagens holográficas vêm se proliferando e conquistando cada vez mais outros campos de aplicação.

Outros esforços foram feitos por M. E. HAINE et al. (1952), [4], ROGERS (1952), [5] e V. A. BAEZ (1952), [6]. Entretanto, as imagens obtidas através da holografia eram pobres, devido à baixa resolução do filme fotográfico, a pouca estabilidade vibracional do conjunto experimental e também a baixa coerência da luz. Todas essas experiências foram, em geral, feitas com lâmpadas de vapor de mercúrio.

Em 1960 na Universidade de Michigan nos Estados Unidos, Leith e Upatnieks reproduziram a experiência original de Gabor. O método consistia em separar a frente de onda coerente, que serve de referência, da frente de onda que ilumina o objeto, conforme descrito em E. N. LEITH et al. (1962), [7], E. N. LEITH et al. (1963), [8], E. N. LEITH et al. (1964), [9]. Desde então, esses hologramas são denominados de hologramas fora do eixo.

Em 1965, na União Soviética, ocorreu um grande avanço para a Holografia, quando DENISYUK (1965), [10], publicou uma técnica que possibilitava a visualização da imagem holográfica com luz branca. Estes tipos de holograma foram considerados como um grande avanço para a holografia.

2. 2. O Processo Holográfico

O arranjo holográfico tradicional consiste de uma fonte de luz coerente e monocromática (hoje utiliza-se o laser), que é dividido em dois percursos. Um deles ilumina diretamente o objeto a ser holografado (feixe objeto), enquanto que o outro percurso (feixe referência) ilumina o detector holográfico. A superposição desses dois feixes resulta em um padrão de interferência, contendo toda a informação do objeto a ser analisado.

O detector holográfico utilizado pode ser uma chapa holográfica com poder de resolução entre 3000 e 5000 linhas/mm, uma chapa fototermoplástica, um cristal foto-refrativo ou uma câmera CCD. A holografia analógica tradicional utiliza os dois primeiros tipos de detectores e é considerada lenta e muito sensível às vibrações quando comparada a holografia digital.

No plano do detector, ocorrem interferências destrutivas e construtivas entre o feixe de referência e o feixe refletido pelo objeto, que são registradas na forma de franjas microscópicas claras e escuras. Estas franjas contêm a totalidade da informação da frente de ondas luminosas refletida pelo objeto, inclusive sua fase. Para que o registro seja possível, ambos os feixes de luz (o feixe de referência, que ilumina o detector do holograma e o feixe objeto, que ilumina o objeto antes de ser refletido para o detector), sejam coerentes, isto é, tenham o mesmo comprimento de onda, uma diferença de fases constante e o mesmo estado de polarização.

Após a revelação do holograma tradicional, através de um processo idêntico ao usado para a fotografia, o holograma é iluminado com um feixe de luz com a mesma direção do feixe referência, reconstituindo uma imagem tridimensional do objeto holografado (Figura 2.1).

Obtenção de imagem holográfica com o laser

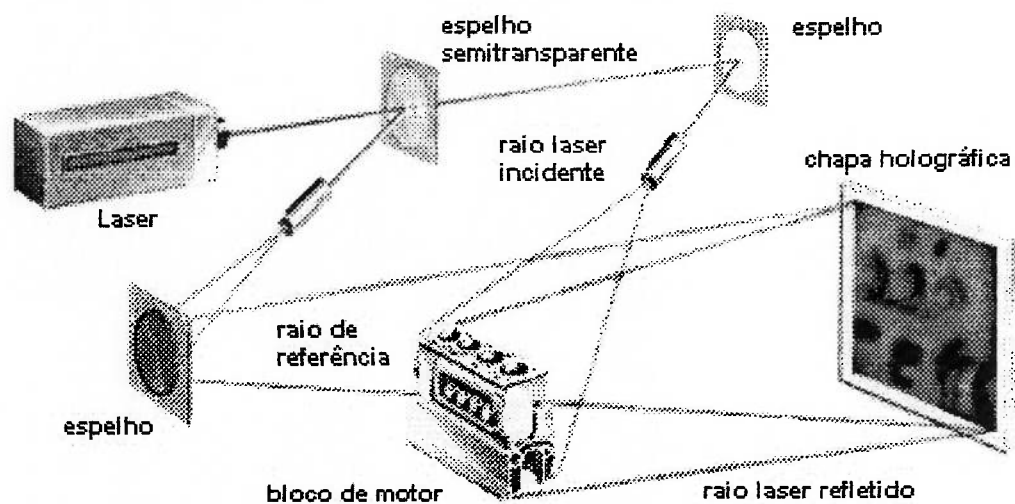


Figura 2.1. Obtenção de imagens holográficas, [11]

Ao contrário da fotografia, com a mudança do ângulo de observação do holograma, podemos ver novas superfícies, assim como, pela iluminação no ângulo certo, pode-se fazer com que imagens diferentes apareçam e

desapareçam no mesmo lugar, através de um simples movimento de luzes. Essas imagens representam o objeto fotografado de diferentes ângulos. Isso ocorre porque na holografia, ao contrário da fotografia, não se registra sobre a película (holograma) só a intensidade das ondas luminosas, mas também a sua fase. Isso garante o efeito tridimensional (Figura 2.2).

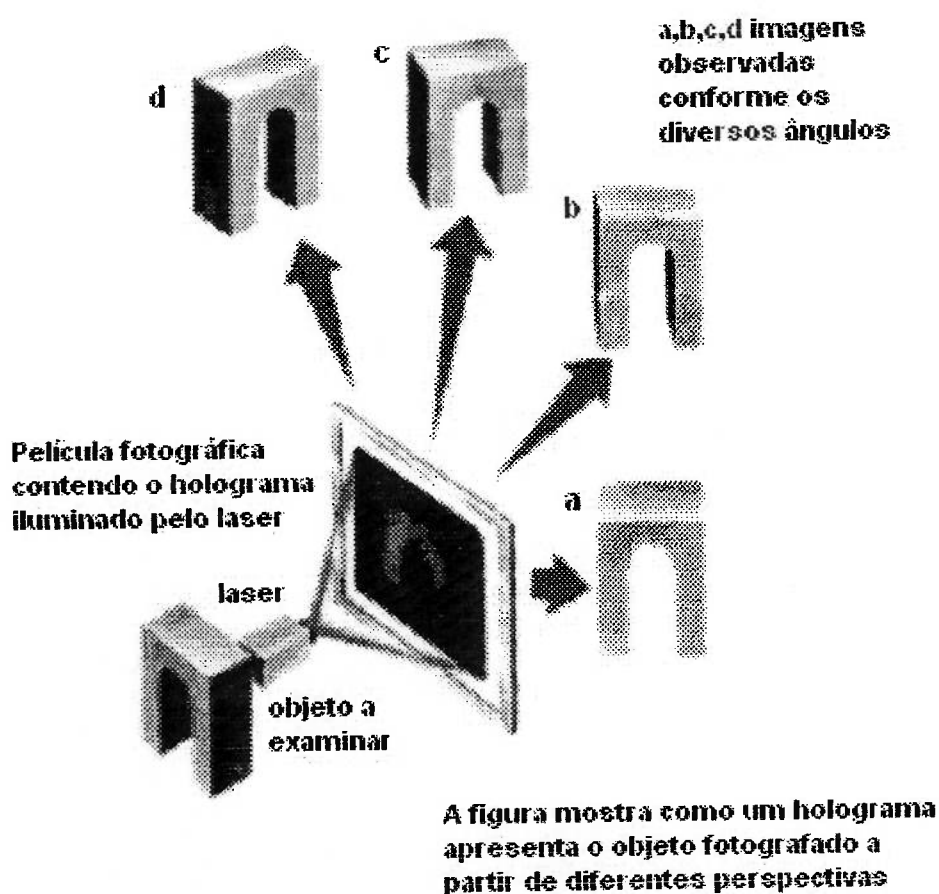


Figura 2.2. Imagens do objeto observadas por diversos ângulos, [12]

A imagem reconstruída pode ser real ou virtual, a imagem virtual reconstruída aparece como um prolongamento dos feixes luminosos difratados no holograma e esta situada na mesma posição do objeto. A intersecção dos feixes difratados ou transmitidos no holograma produz uma imagem real. A imagem real é uma imagem invertida. Se o feixe reconstrutor

for o conjugado complexo do feixe de referência, então a imagem real torna-se uma imagem normal.

A imagem real de um objeto pode ser reconstruída numericamente a partir de um holograma amostrado digitalmente com uma câmera CCD, mediante a difração da onda reconstutora na microestrutura do holograma. Em uma aproximação razoável, a transformada de Fresnel descreve esta difração. Isto foi apresentado por SCHNARS (1994), [13] e SCHNARS e POMÁRICO (1995), [14].

CAPÍTULO III

HOLOGRAFIA DIGITAL

3. 1. Introdução

A inspeção de estruturas submersas requer a utilização da holografia digital. A holografia digital substitui a forma clássica de registro, em filmes fotográficos, tornando-se uma técnica mais simples, rápida e eficiente. Esta técnica holográfica utiliza uma câmera CCD para o registro do holograma digital e o método numérico para a reconstrução da imagem. O método proporciona, simultaneamente uma imagem de amplitude e uma imagem de fase.

O processo de reconstrução destes hologramas digitalizados é realizado numericamente mediante determinados algoritmos implementados em computadores. Sendo reconstruída a imagem real. Em L. P. YAROSLAVSKY *et al.* (1980), [15], são descritos métodos para a reconstrução digital de hologramas. Contudo, quando essas técnicas foram apresentadas em 1980, os dispositivos eletrônicos de registro, mais especificamente o dispositivo de carga acoplada, (CCD), não estavam num estágio de desenvolvimento tão avançado como atualmente. Os hologramas não eram registrados eletronicamente de forma direta, mas sim através de cópia digitalizada (scanner) do holograma registrado em um filme.

Atualmente, a velocidade e capacidade de armazenamento dos computadores e a resolução espacial dos dispositivos de registro eletrônico estão aumentando de forma significativa. Os dispositivos CCD, atualmente, dispõem de uma grande capacidade de registro de pixels de menor dimensão. Dessa forma, é possível registrar diretamente o holograma e avaliá-lo digitalmente mediante a utilização de computadores.

A holografia digital permite a análise das frentes de ondas que foram previamente registradas sem necessidade da reconstrução óptica da imagem podendo ser utilizada para comparar duas ou mais frentes de ondas (interferometria holográfica digital). Os autores que apresentaram contribuições mais relevantes para a holografia digital foram U. SCHNARS, [16], G. PEDRINI, [17], [18], [19] e P. GREN, [20].

Diferentemente da holografia convencional, na qual os dados de fase são obtidos a partir dos dados de intensidade, a reconstrução numérica dá acesso à fase de cada holograma. Isto significa que a fase de interferência pode ser calculada a partir de uma simples diferença entre as fases dos hologramas. Os hologramas de estados diferentes de um objeto, em interferometria holográfica, também podem ser reconstruídos com diferentes comprimentos de ondas. Isto é de interesse particular para as técnicas holográficas com múltiplos comprimentos de ondas que são utilizadas para a avaliação de contornos geométricos.

3. 2. Técnicas para Análise da Superfície.

Existem diversos métodos com imagens tridimensionais baseados em interferometria que permitem a medição de deslocamentos e perfis de superfície. Métodos como interferometria holográfica e projeção de franjas podem gerar diversas informações, tais como, deformação, força, vibração e o perfil da superfície sem ter nenhum contato com a estrutura a ser analisada. Devido aos avanços da tecnologia na alta resolução das câmeras CCD e dos computadores, tornou-se possível a captação de hologramas diretamente pela câmera CCD e a gravação digital da imagem na memória do computador, permitindo, assim, o cálculo direto da fase e da intensidade do holograma através de soluções numéricas.

Para determinar o formato de um objeto reconstruindo sua imagem holográfica, existem basicamente três métodos holográficos: método de dois comprimentos de onda [21], o método de dois índices, [22], [23], o método das duas fontes, [24], [25], [26]. Hidelbrand [25] descreve a técnica de avaliação de contorno de objetos utilizando-se de uma fonte com capacidade de emissão em dois comprimentos de onda, em que a resolução da imagem depende desse comprimento. Também é utilizado o método holográfico das duas fontes para a avaliação do contorno da superfície. O método das duas fontes gera um mapa de contorno cuja resolução pode variar desde a ordem do comprimento de onda até centímetros.

Seebacher *et al.*, [27], descreve o método da avaliação de contorno com dois comprimentos de onda, o qual para ser bem explorado requer um laser sintonizado, já que só nesse caso se pode obter uma separação entre as franjas de interferência do contorno segundo se deseje, selecionando adequadamente a variação do comprimento de onda.

Para aplicação do método de dois comprimentos de onda é necessária a utilização de um laser que emita a onda em dois comprimentos, onde é feita a interferência entre os dois hologramas capturados em comprimentos diferentes. Como as instalações laboratoriais onde foram desenvolvidos os ensaios não possuem este tipo de laser, a realização dos experimentos por este método foi descartada.

Outro método holográfico para contorno de superfícies é o método dos dois índices. Neste método é realizada a interferência entre dois hologramas capturados em meios de índice de refração diferentes. Este método foi realizado no laboratório, onde o primeiro holograma foi capturado no ar e o segundo holograma na água. Com estes dados foi possível analisar a superfície do objeto. Os dados adquiridos por este método foram apresentados no artigo "Implementação de Método Holográfico para Inspeção superficial", [23].

Thalman *et al.*, [28], reportou a avaliação do contorno holográfico utilizando-se de medições eletrônicas da fase, no que se baseia o método das duas fontes. C. Quan *et al.*, [29], analisa o método das duas fontes, onde a detecção do holograma é realizada com uma chapa holográfica e, em seguida, é feita a captura com a câmera CCD do interferograma de intensidade reconstruído.

Como o objetivo do trabalho é o desenvolvimento de um método holográfico para análise de estruturas submersas, é necessária a utilização de um método em que ambas as imagens fossem capturadas na água, assim sendo, desenvolveu-se um arranjo holográfico para aplicação do método das duas fontes.

Neste trabalho, o interferograma de fase para avaliação do contorno da superfície, correspondente ao método das duas fontes, será gerado reconstruindo digitalmente, mediante o método proposto por Schnars e colaboradores, [13], [30], [31], [32]. O método da reconstrução numérica consiste basicamente no cálculo do padrão de difração de Fresnel do holograma. Como resultado deste cálculo se obtém um arranjo de números complexos chamado de frente de onda reconstruído $E'(x',y')$, o qual representa as amplitudes complexas do campo ondulatório no plano de observação $O'x'y'$ (plano da imagem). A distância entre o plano do holograma $O\xi\eta$ e o plano da imagem está definida pela distância de reconstrução d . Para valores positivos da distância de reconstrução d , a reconstrução se realiza frente ao holograma e se observa no foco a imagem real, contudo, para uma distância de reconstrução considerada negativa ($-d$), pode-se reconstruir a imagem virtual no foco.

O holograma criado pela interferência entre os feixes objeto e referência têm um campo ondulatório reconstruído no plano do holograma $E'(\xi,\eta)$ dado por:

$$E'(\xi, \eta) = R|R|^2 + R|O|^2 + RR^*O + RRO^* \quad (1)$$

sendo $|O|$ a intensidade do feixe objeto, $|R|$ a intensidade do feixe de referência e o $(*)$ denota o conjugado.

Os dois primeiros termos da equação constituem a componente contínua ou componente de ordem zero no espectro de Fourier, usualmente denominado DC. O terceiro e quarto termo contém, respectivamente, a informação sobre as imagens virtual e real. Como $E'(\xi, \eta)$ encontra-se no plano do holograma, aplica-se a transformada de Fresnel para levar até o plano da imagem real, existindo entre os dois planos uma distância d , que é a distância de registro do holograma ou distância do objeto à câmera, como mostrado na Figura 3.1.

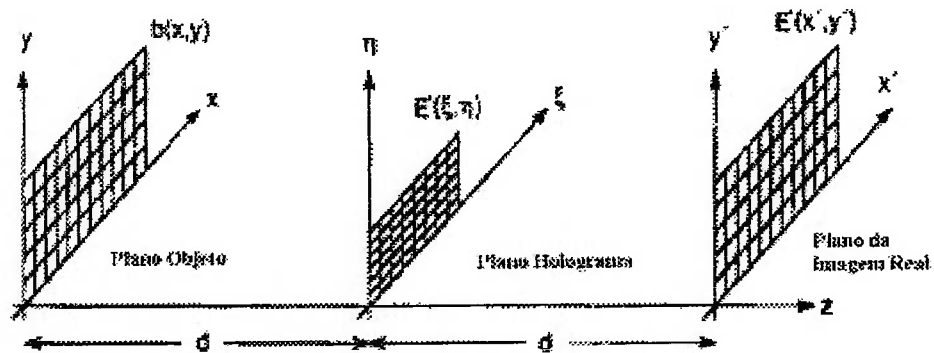


Figura 3.1. Geometria da Reconstrução para a Holografia de Fresnel.

Para a obtenção da imagem real na holografia digital, é necessário eliminar a componente DC da equação 1, que se manifesta como um pico intenso na zona central do espectro de Fourier.

Para eliminar a componente DC (ou espectro de ordem zero) é realizada a avaliação de um holograma modificado, $h'(\xi, \eta)$:

$$h'(\xi, \eta) = h(\xi, \eta) - |O| - |R| \quad (2)$$

Para a reconstrução digital das imagens, ou neste caso dos campos de fase com feixe de referência esférico, utiliza-se de uma variante generalizada do método de Schnars [30] segundo Seebacher (1999) [27] como segue:

$$E'(x', y') = \frac{i}{\lambda d} e^{\frac{-i2\pi d}{\lambda}} e^{\frac{-i\pi}{\lambda d}[x'^2 + y'^2]} \iint r(\xi, \eta) h(\xi, \eta) e^{\frac{-i\pi}{\lambda d}[(\xi)^2 + (\eta)^2]} e^{\frac{2i\pi}{\lambda d}(x'\xi + y'\eta)} d\xi d\eta \quad (3)$$

$$E'(x', y') = \frac{i}{\lambda d} e^{\frac{-i2\pi d}{\lambda}} e^{\frac{-i\pi}{\lambda d}[x'^2 + y'^2]} F_{\lambda d}^{-1} \left\{ r(\xi, \eta) h(\xi, \eta) e^{\frac{-i\pi}{\lambda d}[(\xi)^2 + (\eta)^2]} \right\} \quad (4)$$

onde $E'(x', y')$ é o campo ondulatório no plano da imagem, λ é o comprimento de onda, i é a unidade imaginária, $F_{\lambda d}$ indica a transformação de Fourier bidimensional, modificada mediante o fator $1 / (\lambda d)$.

A equação (4) pode ser resolvida completamente se o feixe de referência for plano, porém, se o feixe for esférico, e com raio de curvatura igual ao do termo $e^{\frac{-i\pi}{\lambda d}(\xi)^2 + (\eta)^2}$ com sinal contrário, então desaparecem desta equação este termo e o termo $r(\xi, \eta)$, resultando:

$$E'(x', y') = \frac{iA}{\lambda d} e^{\frac{-i2\pi d}{\lambda}} e^{\frac{-i\pi}{\lambda d}(x'^2 + y'^2)} F_{\lambda d}^{-1} \{h(\xi, \eta)\} \quad (5)$$

Para a digitalização de (5) faz-se as seguintes substituições: $x' = m\Delta x'$, $y' = n\Delta y'$ (isto é no plano da imagem), onde m e n são números inteiros, resultando como segue:

$$E'(x', y') = \frac{iA}{\lambda d} e^{-\frac{i2\pi d}{\lambda}} e^{-\frac{i\pi}{\lambda d}(m^2 \Delta x'^2 + n^2 \Delta y'^2)} F^{-1}_{\lambda d} \{h(\xi, \eta)\} \quad (6)$$

A distribuição do campo ondulatório calculado pela equação (6), considera as dimensões dos pixels no plano do holograma $\Delta\xi$ e $\Delta\eta$ (correspondente ao CCD). No plano da imagem reconstruída, o tamanho dos pixels se relaciona com os do plano do holograma conforme a equação (7).

$$\Delta x' = \frac{\lambda d}{N\Delta\xi} \quad e \quad \Delta y' = \frac{\lambda d}{M\Delta\eta} \quad (7)$$

onde N e M correspondem, respectivamente, ao número de pixels do eixo x e y da câmara CCD.

e para o cálculo da fase:

$$\Phi(x', y') = \arctan \frac{I_m[E'(x', y')]}{R_e[E'(x', y')]} \quad (8)$$

Como $E'(x', y')$ é um arranjo de números complexos donde I_m e R_e são as partes imaginária e real respectivamente, pode-se obter uma imagem de contraste de amplitude calculando a intensidade de $E'(x', y')$, ficando:

$$I(x', y') = I_m[E'(x', y')]^2 + R_e[E'(x', y')]^2 \quad (9)$$

O objetivo fundamental das formulações anteriores consiste no estabelecimento de um algoritmo utilizado na obtenção da fase e da imagem de intensidade do objeto, a partir da captação do seu holograma correspondente.

3. 3. Método das Duas Fontes

A geração do interferograma para análise do contorno da superfície do objeto pode ser facilmente ilustrada considerando as imagens da fonte refletidas no objeto, para o deslocamento lateral da fonte e as suas respectivas imagens. A Figura 3.2 esquematicamente ilustra o método das duas fontes, onde são apresentados os principais parâmetros medidos durante o experimento.

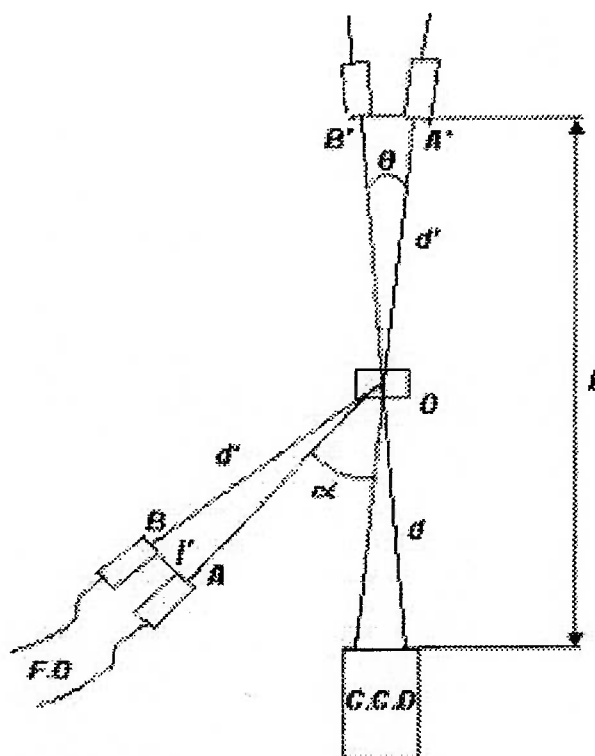


Figura 3.2. Parâmetros medidos no arranjo experimental utilizado

Onde l' é a distância que se desloca a fonte para passar de uma posição para a outra, esta mesma distância estão separadas suas imagens, d' é a distância laser - objeto, d a distância objeto - CCD, sendo $L = d' + d$ e " θ " é o ângulo com que se observam as duas fontes desde o objeto.

A diferença de caminho óptico entre os feixes interferentes que chegam a câmera CCD desde as imagens será:

$$\Delta = l' \text{sen } \theta \quad (10)$$

e para ângulos pequenos

$$\Delta = l' \tan \theta \quad (11)$$

$$\Delta = l'(y/L) \quad (12)$$

onde " y " é a distância desde o máximo até a origem do sistema de coordenadas. Com esta diferença de caminho óptico a condição de interferência máxima é dada por $\Delta = l'(y/L) = m\lambda$, resultando que a distância entre duas franjas consecutivas Δy será:

$$\Delta y = L \frac{\lambda}{l'} \quad (13)$$

Porém, se $l' = 2L \text{sen}(\theta/2)$, então a separação entre duas franjas consecutivas ao longo do eixo z será dada por:

$$h_{12} = \frac{\lambda}{2n\text{sen}(\theta/2)} \quad (14)$$

e considerando o valor $\Phi(x', y')$ da fase, então a altura do objeto será:

$$h(x', y') = \frac{\lambda}{4\pi n\text{sen}(\theta/2)} \Phi(x', y') \quad (15)$$

A equação (15) tem limitações por não refletir todos os parâmetros que se medem no experimento, como o ângulo entre a direção de iluminação e captura (α) e a variação linear em que se desloca a fonte. A Figura 3.2 esquematicamente apresenta esses parâmetros que não constam na equação (15). Considerando estas magnitudes, a expressão para o método das duas fontes será:

$$h(x, y) = \frac{\lambda d}{4\pi n \Delta L \text{sen} \alpha} \Phi(x', y') \quad (16)$$

Esta equação (16) será utilizada no próximo capítulo pelo método das duas fontes.

CAPÍTULO IV

ENSAIOS EXPERIMENTAIS

4.1. Arranjos Holográficos.

Conforme apresentado no item 3.2, o método holográfico utilizado nos experimentos foi o método das duas fontes. Inicialmente, a fim de aferir o arranjo holográfico e comparar as imagens obtidas com o objeto submerso em água, foram realizados ensaios com o objeto dentro de um recipiente, mas sem a presença de água.

Para a realização de ensaios no ar e na água, através do método das duas fontes foram montados arranjos holográficos visando a avaliação de um entalhe de geometria conhecida posicionado na superfície de uma barra de alumínio. A figura 4.1 esquematicamente apresenta a barra com entalhe utilizada no ensaio. A geometria do entalhe foi realizada de forma que se pudesse obter suas dimensões através de outro método, e assim, comparar os resultados com os obtidos através do método holográfico.

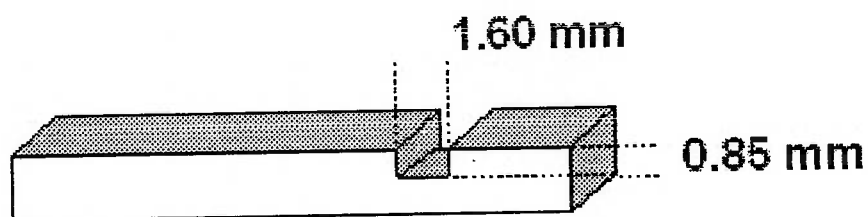


Figura 4.1. Dimensões do objeto utilizado no ensaio

A Figura 4.1 mostra a barra de alumínio e as dimensões do entalhe. As dimensões do entalhe foram avaliadas através de um microscópio óptico, apresentando uma largura de 1,60 mm e uma profundidade de 0,85 mm.

A Figura 4.2 apresenta uma fotografia do arranjo holográfico utilizado para os ensaios com o corpo de prova no ar. Esquemáticamente esse arranjo holográfico é apresentado na Figura 4.3.

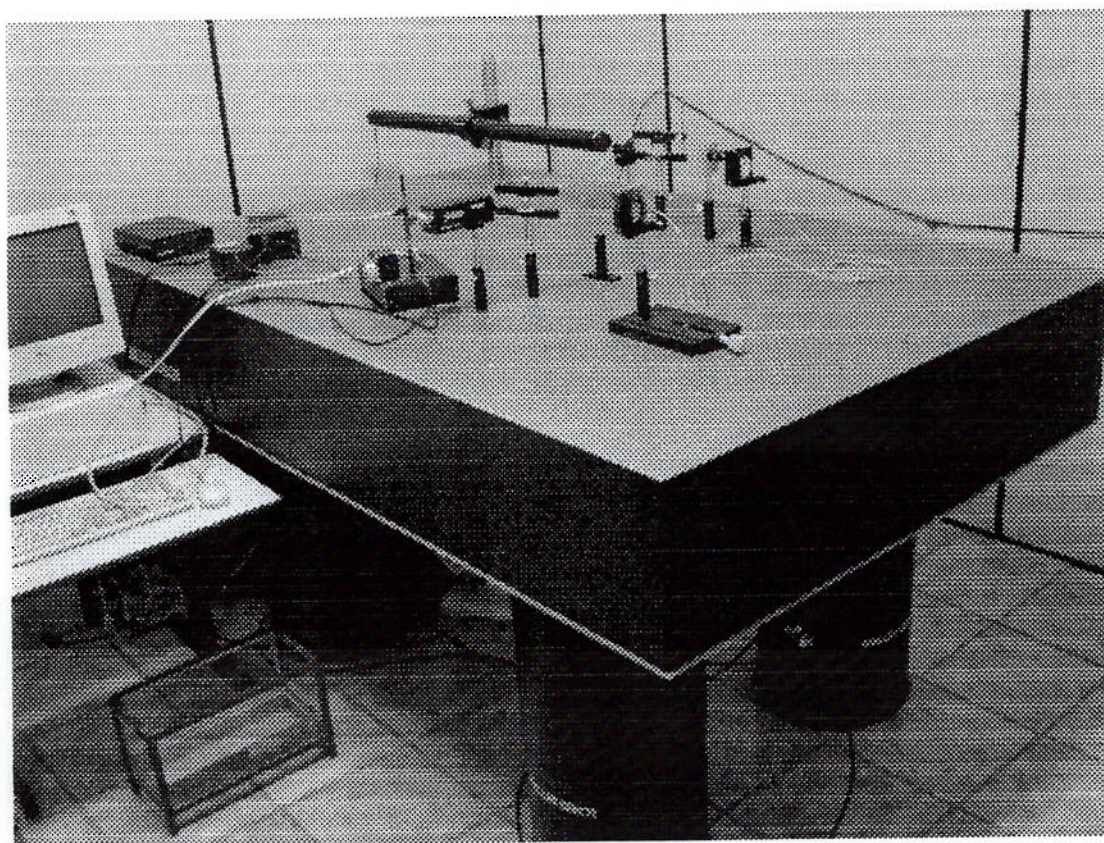


Figura 4.2. Foto do arranjo holográfico utilizado para o ensaio com o objeto no ar

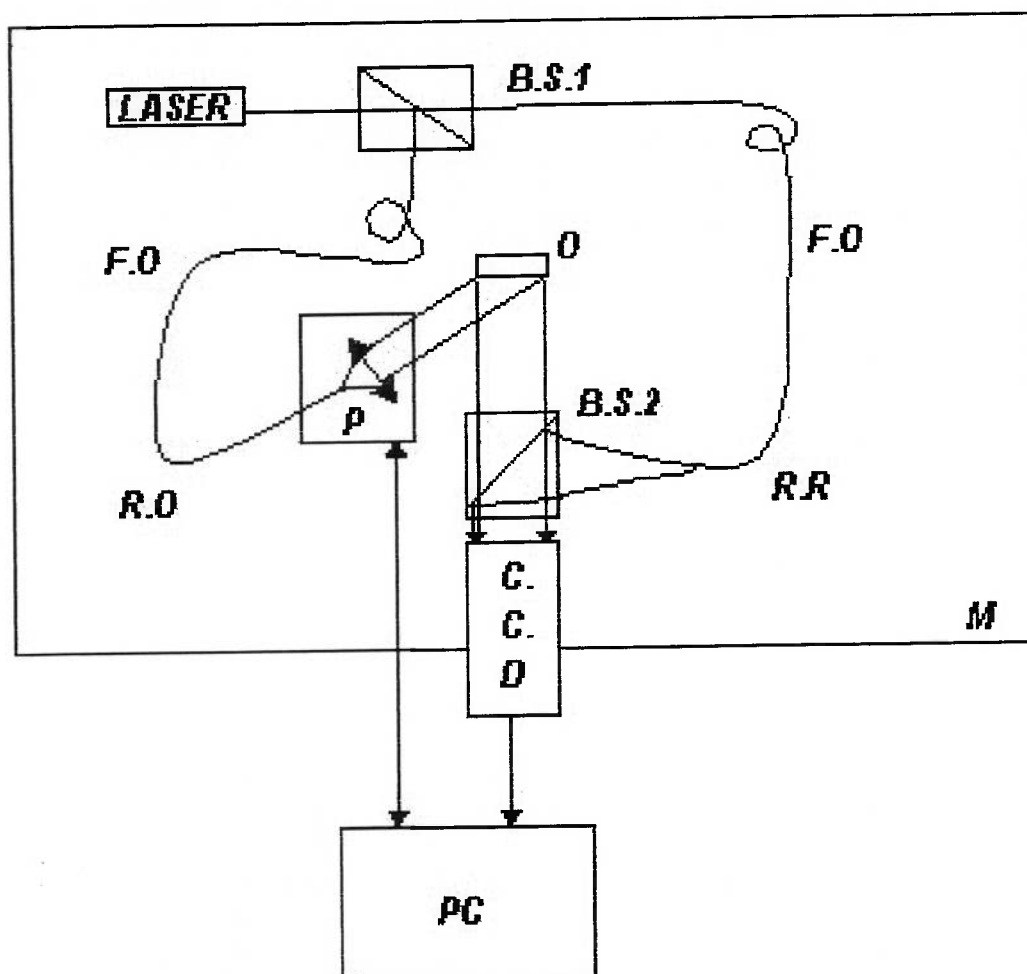


Figura 4.3. Esquema do arranjo holográfico

Na Figura 4.3, "BS 1" e "BS 2" são divisores de feixe, "P" é uma plataforma automatizada com deslocamento unidimensional, "R.R" é o feixe de referência, "R.O" é o feixe objeto, "F.O" são as fibras ópticas, "O" é o objeto investigado, "PC" é o computador, "M" é a mesa Holográfica e "CCD" é a câmera para a captura dos hologramas.

Neste arranjo, o feixe do laser se divide, mediante o divisor de feixe, em feixe objeto e feixe de referência. Divididos os feixes, estes são acoplados a uma fibra óptica. Um segundo divisor de feixe é usado para direcionar o feixe objeto, proveniente da iluminação do objeto pelo feixe objeto, e o feixe referência.

As medidas mais importantes no arranjo da Figura 4.3 estão mostradas na Figura 4.4.

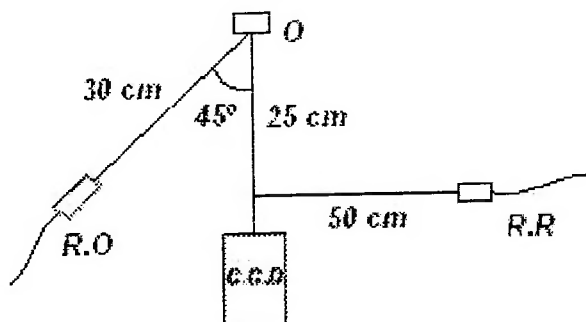


Figura 4.4. Valores das medidas do arranjo holográfico.

O arranjo foi montado em uma mesa holográfica, fabricada pela Melles Griot, de dimensões de 1,25m x 2m e apoiada em suportes pneumáticos.

É utilizado um laser de He - Ne, com comprimento de onda 632.8 nm e potência de 25 mW.

A fibra óptica utilizada é uma fibra monomodo, com 0,3 mm de diâmetro e 3m de comprimento. Os divisores de feixe utilizados dividem o feixe incidente em dois feixes com intensidade de 90% (feixe objeto) e 10% (feixe referência) da intensidade do feixe que incide sobre este.

Um variador de posição automatizado foi construído para realizar a tarefa de deslocar o extremo da fibra óptica em uma certa magnitude controlada, condição necessária para a aplicação do método das duas fontes. O deslocamento do variador é feito em múltiplos inteiros de 4.65 μm e sua calibração foi realizada com uma exatidão de 0.1 μm , utilizando-se de um comparador horizontal. O intervalo de deslocamento é de 0 a 2.5 mm, o que excede as necessidades do método das duas fontes, normalmente como máximo 100 μm para que não se acumulem muitas franjas de

interferência no interferograma de fases. O controle do mesmo se realiza mediante a porta da impressora do computador, de fácil acoplamento por não requerer interface. O programa é executado em Windows.

Para a captura dos hologramas, utilizou-se uma câmera CCD (Dispositivo de Carga Acoplada), PULNIX TM-9701 monocromática, possuindo 768 pixels no eixo X e 484 pixels no eixo Y. Os tamanhos de célula da câmera possuem $x = 11.6 \mu\text{m}$ e $y = 13.6 \mu\text{m}$.

Na sua chegada ao CCD, o ângulo máximo entre os feixes objeto e referência θ_{max} é dado por, [33]:

$$\theta_{\text{max}} = \frac{\lambda}{2\Delta l} \quad (17)$$

donde Δ é a largura do pixel do CCD. Se "a" é a dimensão do objeto e "h" a dimensão do holograma, a distância mínima de registro d_{min} necessária para satisfazer o critério de Shannon é:

$$d_{\text{min}} = \frac{a + h}{\theta_{\text{max}}} = \frac{2\Delta l(a + h)}{\lambda} \quad (18)$$

portanto a distância mínima de registro é proporcional à largura do pixel do CCD (Δl).

O arranjo holográfico para a realização dos ensaios com o corpo de provas na água é apresentado na fotografia da Figura 4.5 e esquematicamente na Figura 4.6. Perceba-se que, excetuando-se a utilização de um aquário com água com o corpo de provas imerso, o arranjo

holográfico utilizado é basicamente o mesmo do utilizado para o ensaio com o corpo de provas no ar.

Nota-se que para realização do ensaio em água, apenas o corpo de provas ficou imerso em água, enquanto que restante dos equipamentos utilizados no ensaio foram mantidos no ar.

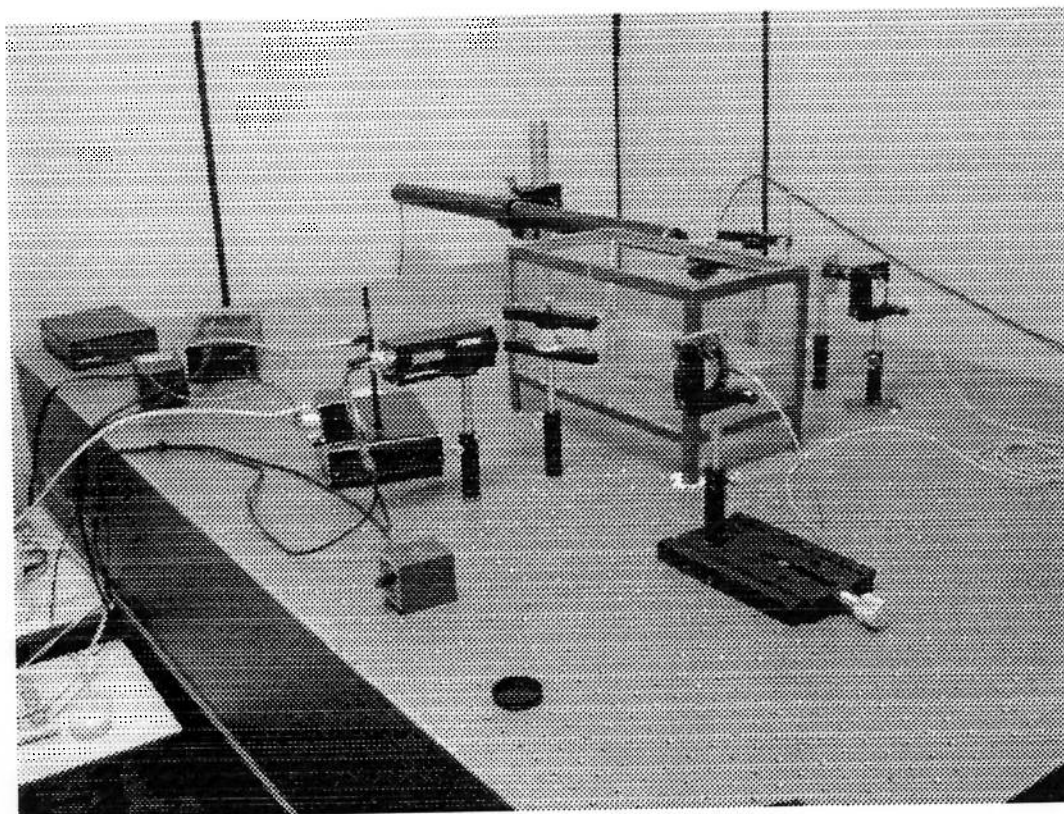


Figura 4.5. Foto do arranjo holografico utilizado para o ensaio com o objeto em água

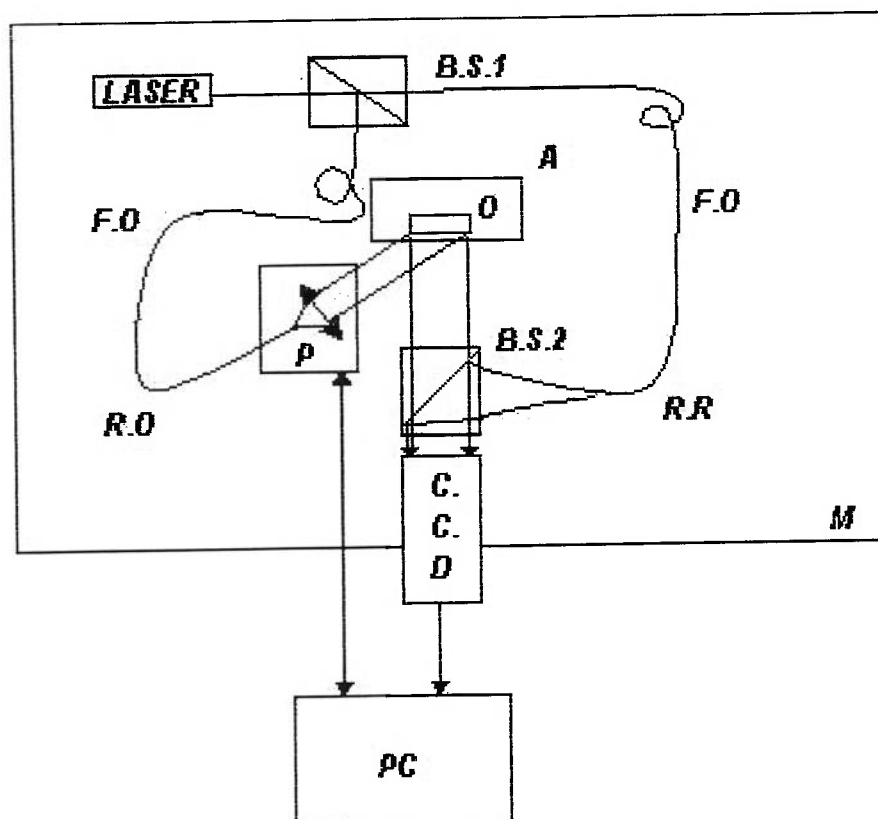


Figura 4.6. Esquema do ensaio realizado em água

A verificação da influência do nível de ruído na captura dos hologramas foi realizada através de aquisições de imagens em intervalos de tempos diferentes e comparadas através da subtração digital dessas imagens obtidas. Constatou-se que as imagens capturadas pelo arranjo holográfico não sofreram influências mensuráveis dos ruídos existentes durante o intervalo de captura das imagens.

Antes da realização dos ensaios holográficos propriamente ditos, a imagem do corpo de provas, Figura 4.7 foi captada no ar com a câmera CCD usando uma lente de distância focal igual a 75 mm, digitalizada e armazenada na memória do computador.

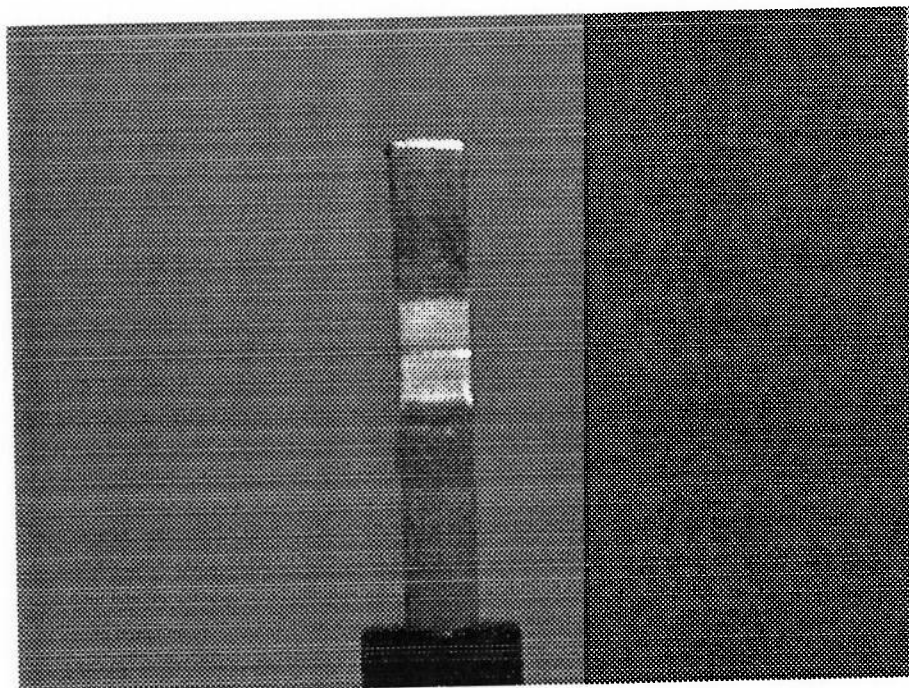


Figura 4.7. Imagem do objeto capturada com uma câmera CCD usando uma lente de $f = 75$ mm

4. 2. Processamento de imagens.

A câmera CCD encontra-se acoplada a um computador PC e monitor, com placa digitalizadora. Com este sistema se armazena a imagem utilizando o programa OPTIMAS 6.2, [34]

Para realização da reconstrução das imagens holográficas pelo método digital é utilizado um sistema desenvolvido no CENO (Centro de Estruturas Navais e Oceânicas da Universidade de São Paulo) denominado "HOLODIG", [35].

O programa HOLODIG foi desenvolvido com a versão 6.0 do MATLAB, [36], e realiza as seguintes funções:

1. Reconstrução da imagem de intensidade.
2. Reconstrução dos interferogramas de intensidade e de fase.
3. Reconstrução do interferograma de fase correspondente aos métodos de contorno com dois comprimentos de onda e das duas fontes objetivando a determinação do formato do objeto.
4. Processo de filtragem do interferograma.
5. Processo de Desmodulação da fase.
6. Representação 3D do formato do objeto, considerando as dimensões do pixel da câmera CCD.

O processo de reconstrução se realiza utilizando-se do método proposto por SCHNARS (1994), [29].

Para se realizar a desmodulação da fase emprega-se o método das ramas cortes, proposto por GOLDSTEIN (1988), [37] e HUNTLEY (1993), [38]. A desmodulação da fase é realizada por uma comparação sucessiva dos pixels vizinhos, assumindo que o mapa de fase deve variar de maneira suave, ou seja, cada pixel deverá possuir uma diferença de fase pequena com relação a dos pixels vizinhos, exceto no local em que existam franjas de interferência.

O processo de desmodulação da fase se realiza partindo do interferograma modulado e filtrado, selecionando a região de interesse (ROI). Desta forma, o processo de desmodulação se realiza na região desejada, com a finalidade de economizar tempo. Realizada a seleção da região de interesse o programa varre o mapa o mapa de fase movendo-se desde a borda superior esquerda até a borda inferior direita, partindo de um

ponto (x,y) da imagem, para outro $(x+1,y)$. Feito todo o escaneamento a desmodulação consegue detectar os locais das franjas de interferência.

O programa Holodig disponibiliza diversos tipos de filtros que podem ser utilizados para a melhoria das imagens e a remoção de ruídos. Dentre os filtros, disponíveis em diferentes matrizes (por exemplo, $[5 \times 5]$, $[7 \times 7]$, $[9 \times 9]$, $[11 \times 11]$), pode-se citar: filtro seno-coseno, filtro médio, filtro de transformada de Fourier, e filtro Gaussian.

A aplicação do filtro seno-coseno, que consiste em calcular o seno e o coseno da fase desmodulada do padrão de franja, foi a mais efetiva para definição das imagens interferométricas obtidas com o método das duas fontes. O aumento do número de franjas no interferograma resultou na necessidade de se utilizar o filtro seno-coseno com matrizes maiores, podendo-se assim, manter o realce das franjas adequado ao processo de desmodulação.

Para os dados deste trabalho, na maioria dos interferogramas processados, tem sido suficiente a aplicação de somente um ciclo de filtrado para cada caso.

4. 3. Procedimento dos Ensaios.

De acordo com procedimento do método das duas fontes, realiza-se a captura dos dados, através da câmera CCD, correspondentes ao holograma, feixe objeto e feixe de referência para um estado de iluminação do objeto. Em seguida é feito o deslocamento do extremo da fibra óptica, com o variador de posição automatizado, em uma distância e se tomam os dados para o outro estado. A partir destes dados se reconstruem os mapas de fases respectivos e se calcula as diferenças de fase, a qual é filtrada e posteriormente aplicada a desmodulação. O mapa de fase desmodulado é,

então, representado tridimensionalmente. O Esquema da Figura 4.8 mostra este procedimento.

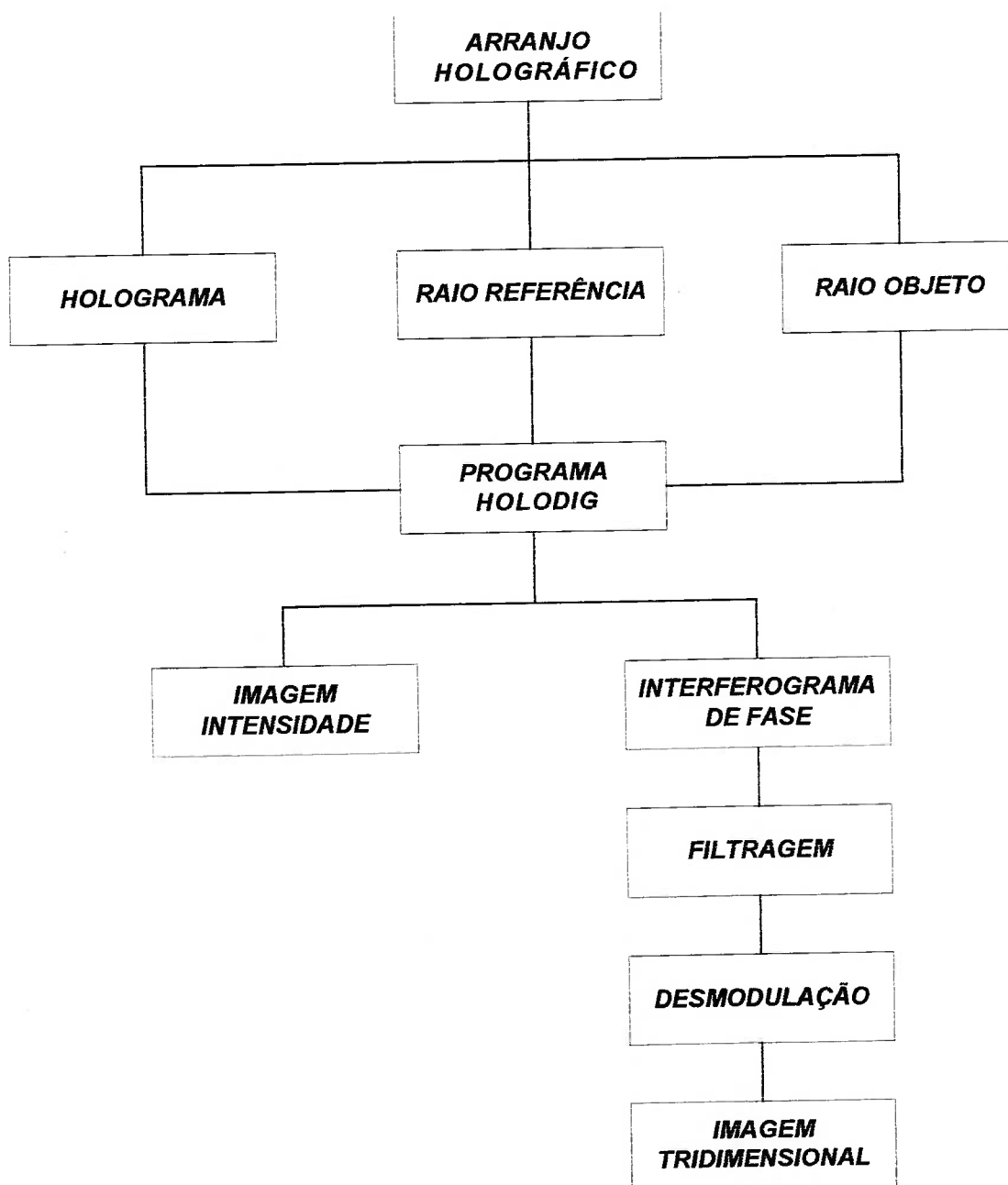


Figura 4.8. Esquema do Procedimento para Realização dos Ensaios.

CAPÍTULO V

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5. 1. Avaliação da Superfície no Ar.

A captura dos hologramas para a aplicação do método holográfico, na análise de defeitos superficiais, realiza-se utilizando o arranjo experimental da Figura 4.4.

A Figura 5.1 mostra o holograma capturado para a análise da superfície da barra. Pode-se optar no programa de processamento das imagens (HOLODIG) pela análise da superfície partindo-se do holograma ou de uma variante que utiliza $h = H - |O| - |R|$, para isto, faz-se à captura das imagens dos feixes objeto e referência, como mostra as Figuras 5.2 e 5,3 respectivamente. Esta análise serve para eliminar a componente DC do espectro reconstruído, correspondendo à ordem zero na imagem reconstruída.

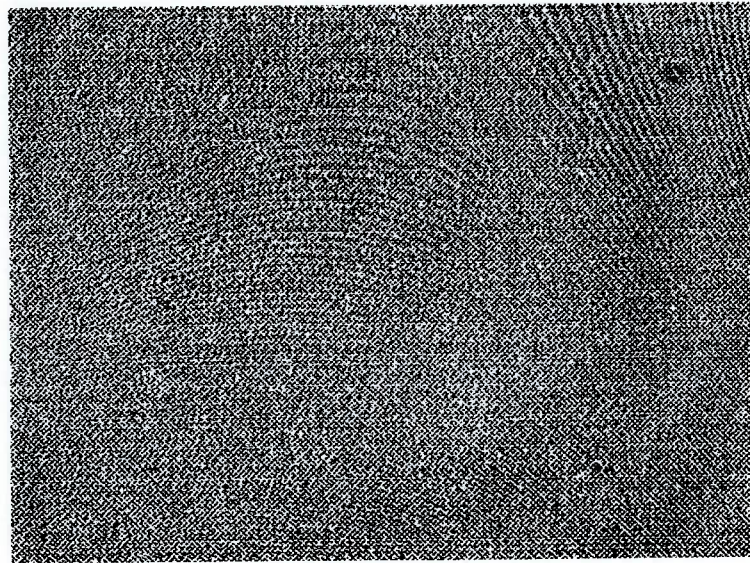


Figura 5.1. Holograma digital correspondente a uma barra de alumínio

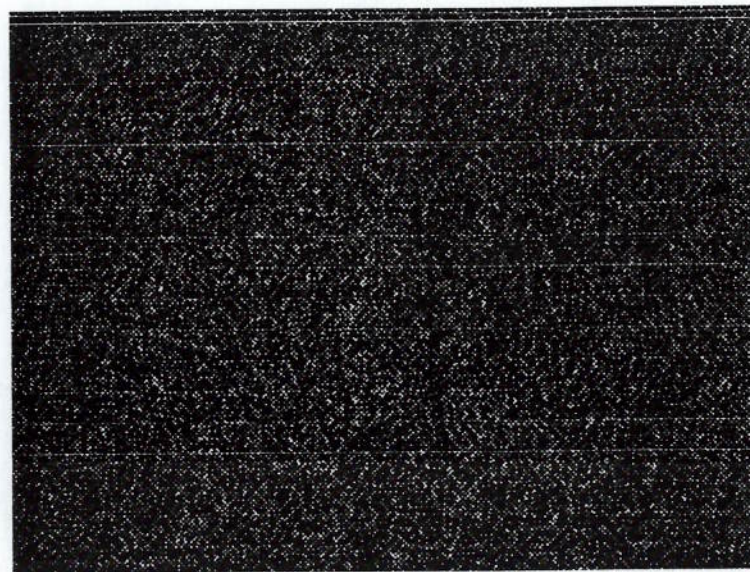


Figura 5.2. Feixe Objeto correspondente a uma barra de alumínio

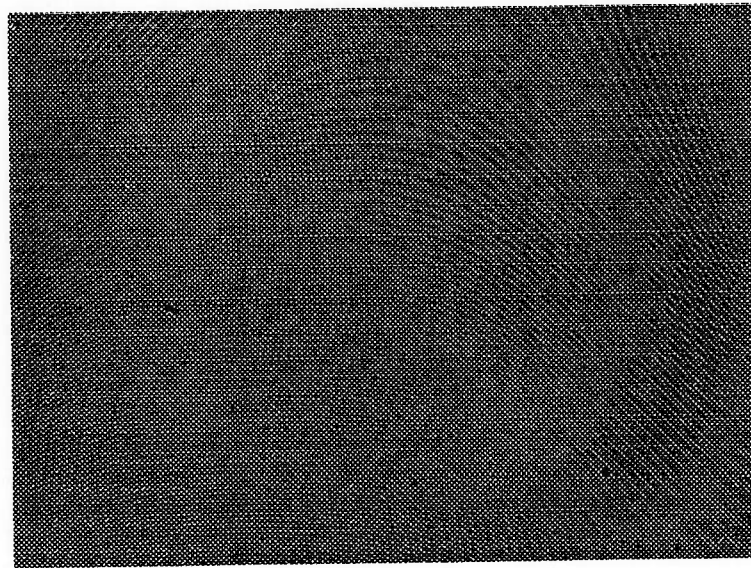


Figura 5.3. Feixe referência

Executando-se o processamento dos hologramas, os resultados mais importantes obtidos são: a imagem de intensidade, mostrada na Figura 5.4; o interferograma de fase, Figura 5.6; a superfície de fase desmodulada, Figura 5.12, e a sua representação tridimensional, Figura 5.13.

A Figura 5.4 mostra a imagem de intensidade da barra de alumínio, onde se pode observar o formato da superfície do objeto. Alterando-se a distância de reconstrução "d", distância entre o objeto e a câmera CCD, com um valor negativo, obtém-se a imagem virtual do objeto. A Figura 5.5 mostra esta imagem virtual.

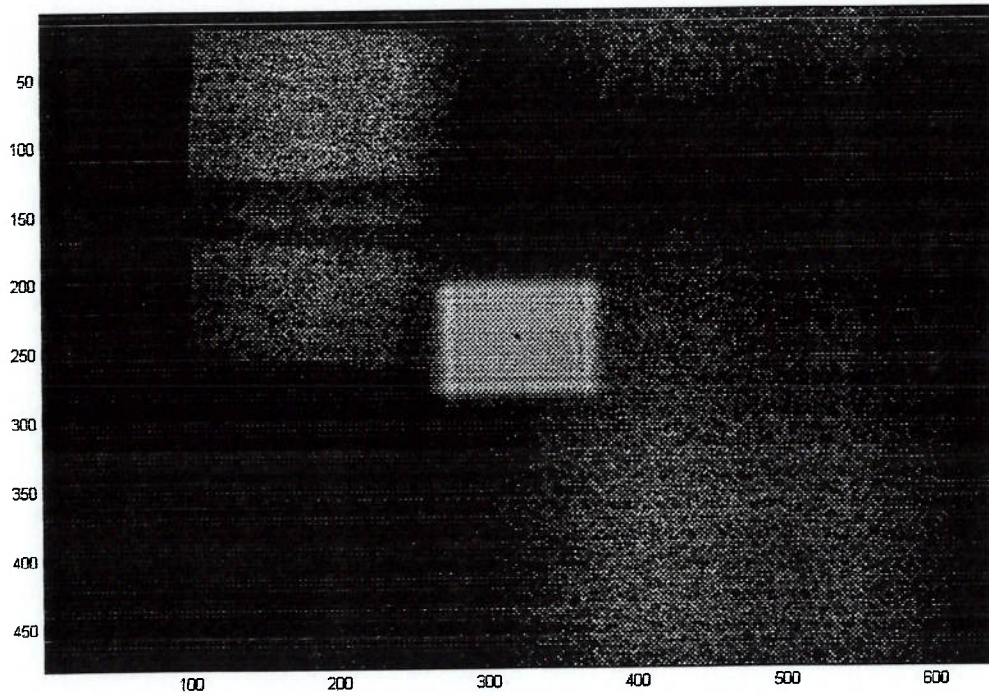


Figura 5.4. Imagem de intensidade da barra de alumínio com "d" positivo

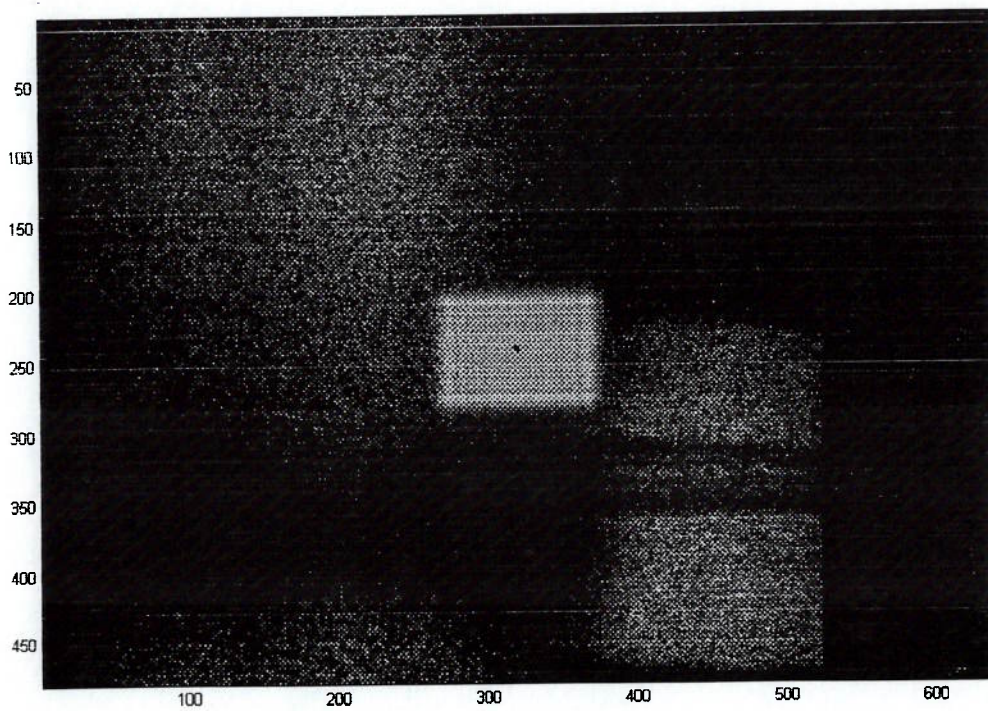


Figura 5.5. Imagem de intensidade da barra de alumínio com "d" negativo

Na Figura 5.6 tem-se uma imagem do interferograma de fase. As franjas indicam o local da superfície do objeto e as franjas centrais deslocadas mostram o local do entalhe no objeto. Este interferograma foi realizado fazendo a interferência entre dois hologramas tomados com um deslocamento lateral de $46,5 \mu\text{m}$. Com o auxílio de um filtro seno-coseno consegue-se aumentar a resolução das franjas, ajustando a imagem para a realização da desmodulação. A Figura 5.7 mostra o interferograma de fase com um filtro seno-coseno de matriz 7×7 .

Na Figura 5.8 pode-se observar o interferograma de fase com um deslocamento lateral de $70 \mu\text{m}$. Para realização de uma desmodulação de maior qualidade, utiliza-se um filtro seno-coseno de matriz 9×9 , como mostrado na Figura 5.9.

As Figuras 5.10 e 5.11 mostram os interferogramas, sem filtro e com um filtro seno-coseno de matriz 11×11 respectivamente, para um deslocamento lateral de $93 \mu\text{m}$.

Os valores do deslocamento lateral do feixe objeto de $46,5 \mu\text{m}$, $70 \mu\text{m}$ e $93 \mu\text{m}$, correspondem respectivamente, a variação de 10, 15 e 20 passos realizados pelo variador automatizado de posição. O valor inicial foi de 10 passos, pois para um valor menor que este o número de franjas é muito pequeno e de pouca definição. O intervalo de 5 passos entre as capturas foi realizado para que se pudesse notar com maior exatidão o aumento do número de franjas em consequência do aumento do valor do deslocamento.

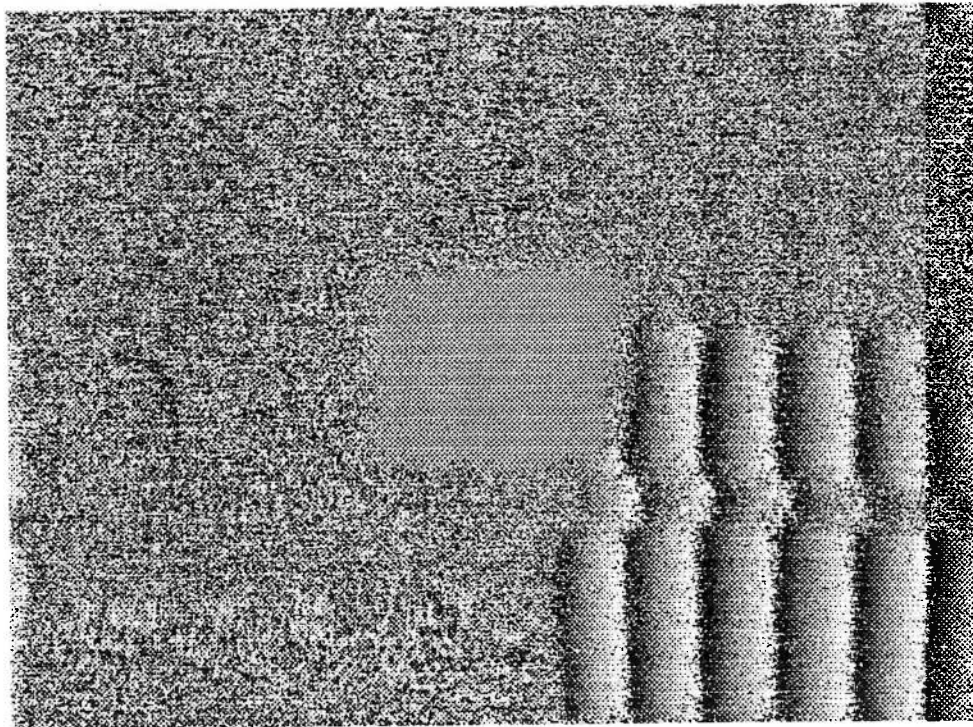


Figura 5.6. Interferograma de fase entre dois hologramas com um deslocamento lateral de $46,5 \mu\text{m}$

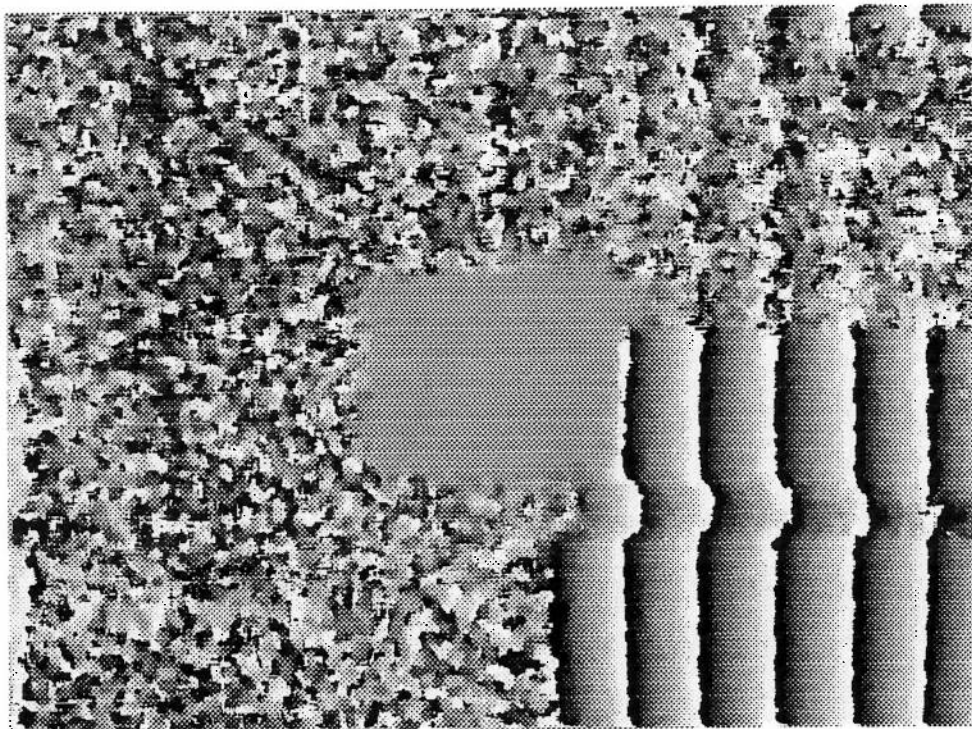


Figura 5.7. Interferograma de fase entre dois hologramas com um deslocamento lateral de $46,5 \mu\text{m}$ e com filtro seno- coseno 7×7

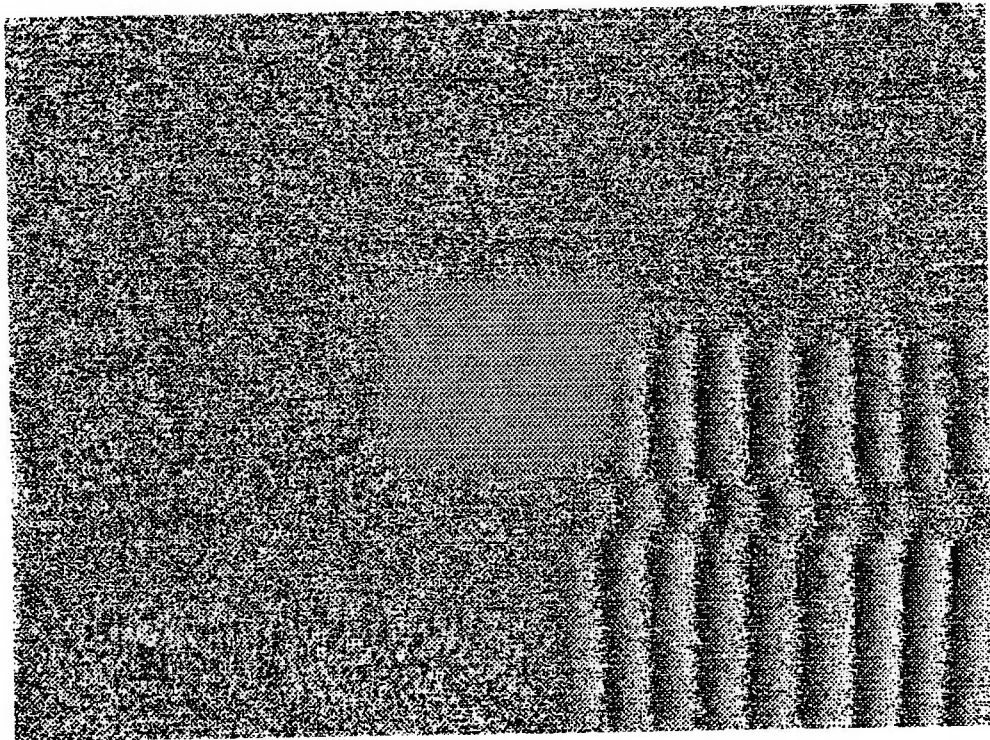


Figura 5.8. Interferograma de fase entre dois hologramas com um deslocamento lateral de $70 \mu\text{m}$

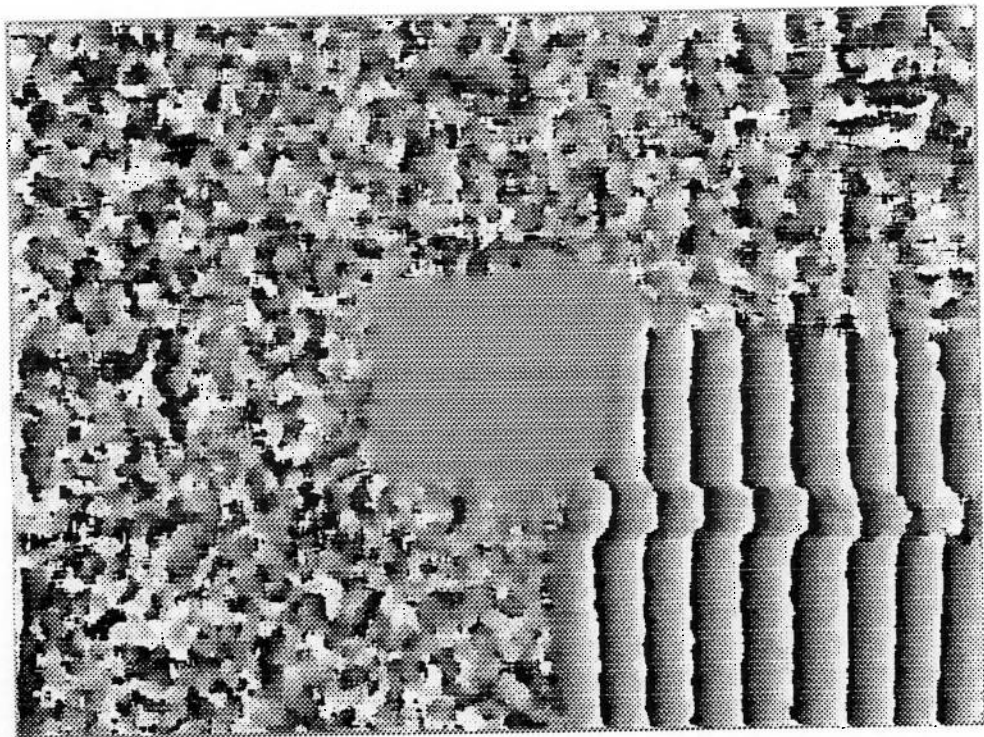


Figura 5.9. Interferograma de fase entre dois hologramas com um deslocamento lateral de $70 \mu\text{m}$ e com filtro seno- coseno 9×9

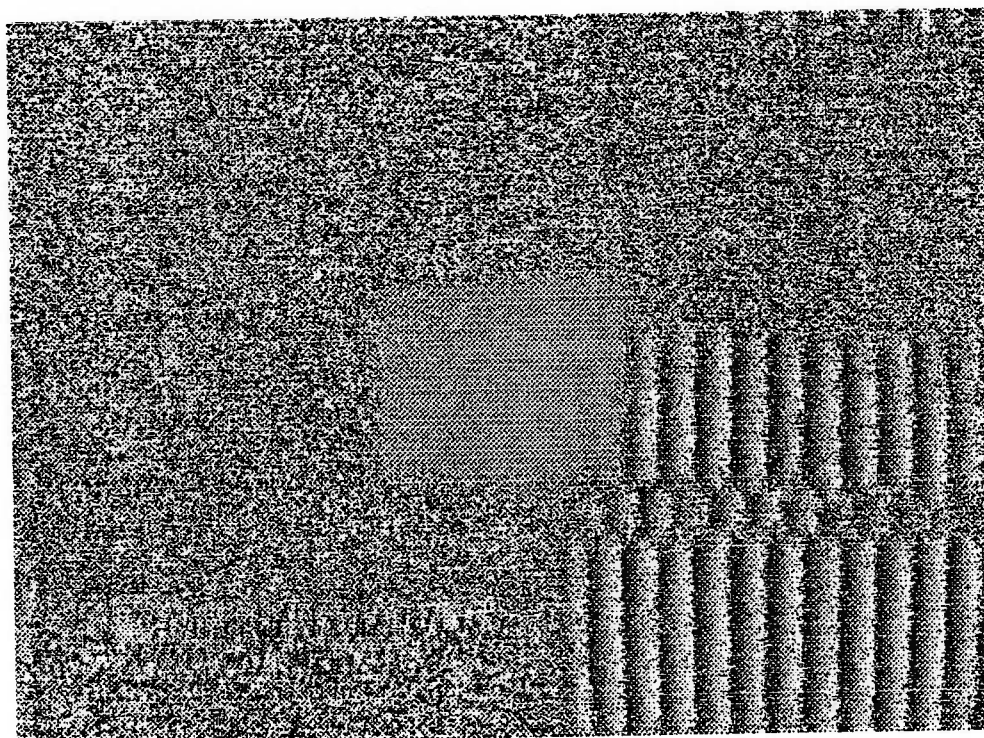


Figura 5.10. Interferograma de fase entre dois hologramas com um deslocamento lateral de $93 \mu\text{m}$

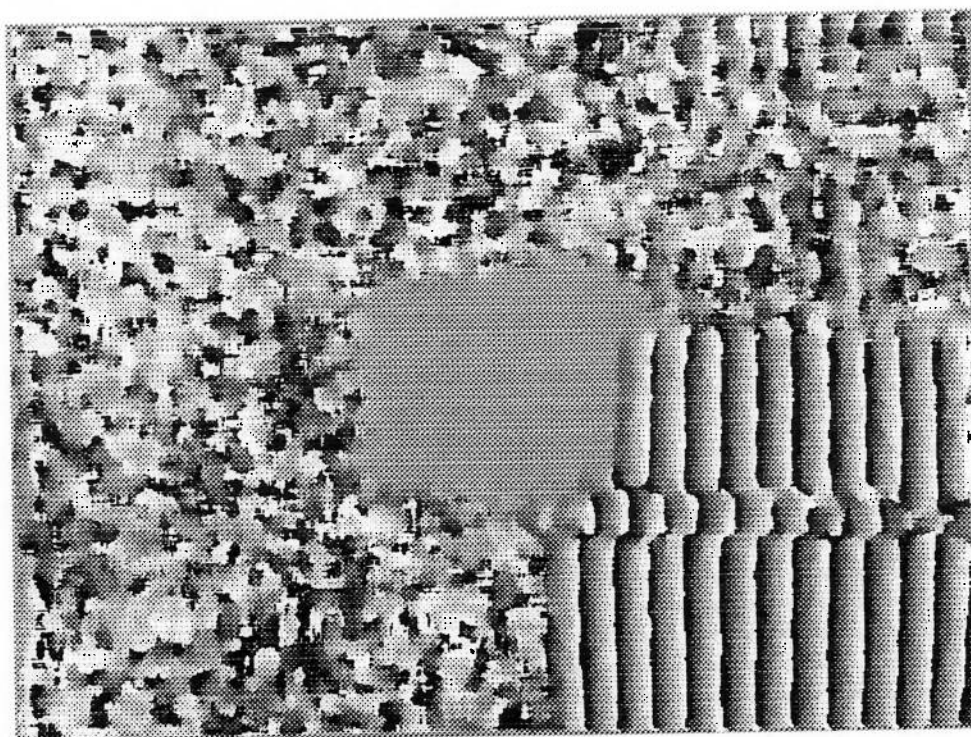


Figura 5.11. Interferograma de fase entre dois hologramas com um deslocamento lateral de $93 \mu\text{m}$ e com filtro seno- coseno 11×11

Nos interferogramas de fase processados, obteve-se um maior número de franjas na medida em que a magnitude do deslocamento lateral foi incrementado. Isto pode ser observado nos resultados das Figuras 5.6 a 5.11 e resumidos na Tabela 5.1.

Tabela 5.1. Número de franjas e filtro utilizados para cada interferograma para o ensaio realizado no ar.

Deslocamento (μm)	Filtro Utilizado	Número de Franjas
46,5	<i>Seno-Coseno 7x7</i>	6
70	<i>Seno-Coseno 9x9</i>	9
93	<i>Seno-Coseno 11x11</i>	12

O processo de desmodulação da fase correspondente ao interferograma com um deslocamento lateral de 46,5 μm , Figura 5.6, conduz ao mapa de fase desmodulado, mostrado na Figura 5.12.

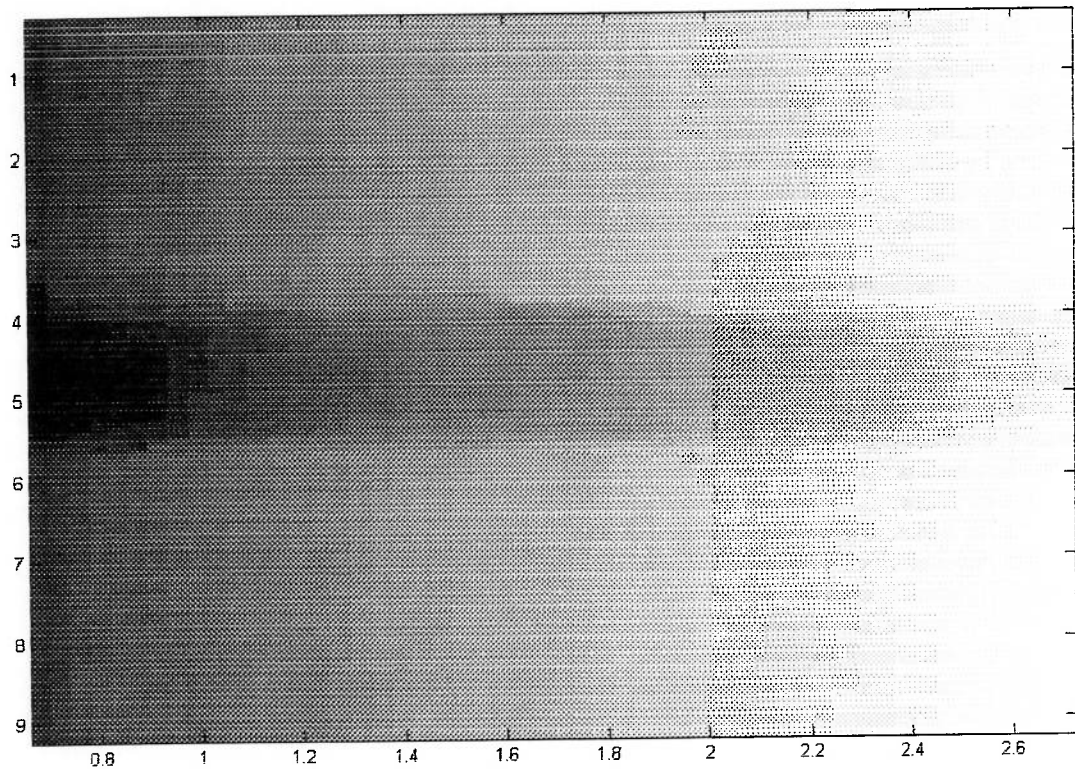


Figura 5.12. Mapa de fase com desmodulação correspondente ao interferograma de fase com um deslocamento lateral de $46,5 \mu\text{m}$

Uma representação tridimensional da Figura 5.12 é mostrada nas Figuras 5.13 e 5.14, correspondente também ao conjunto de dados analisados para um deslocamento lateral de $46,5 \mu\text{m}$.

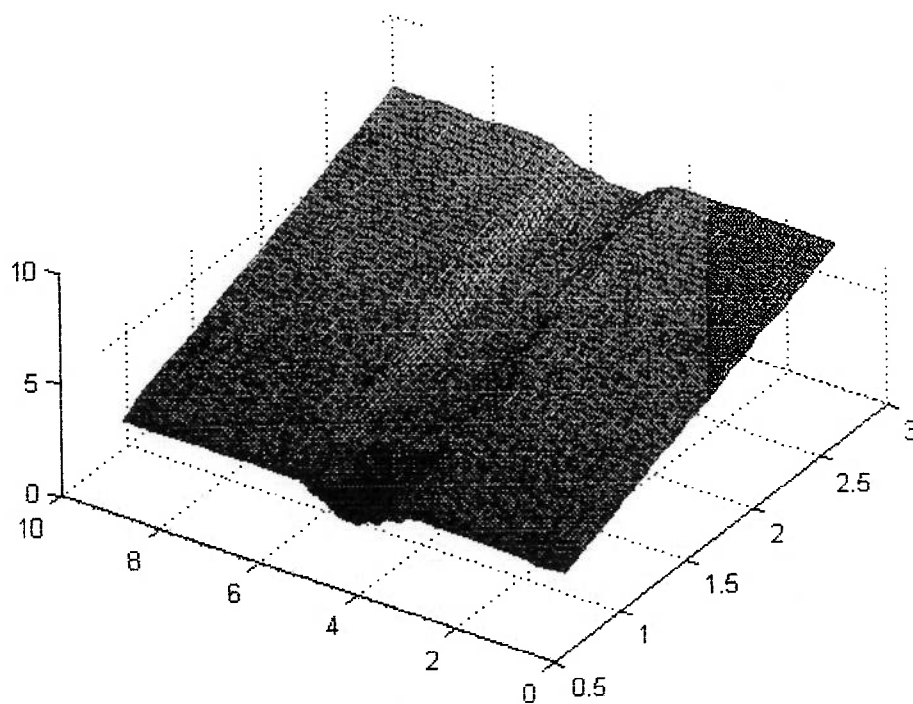


Figura 5.13. Representação tridimensional correspondente aos dados da Figura 5.12

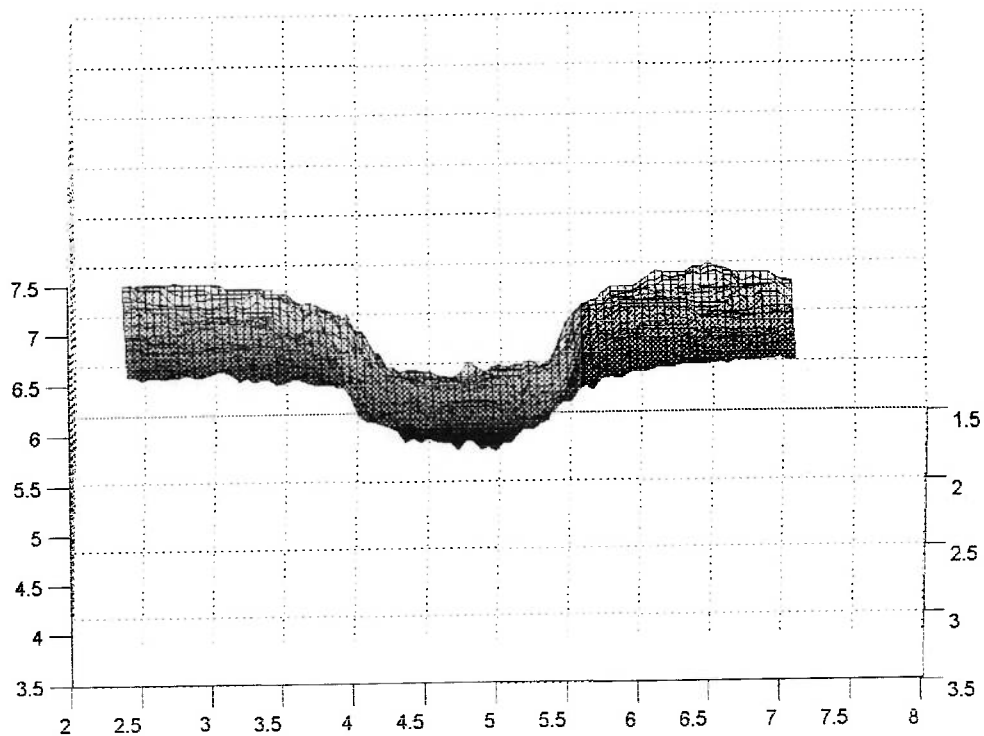


Figura 5.14. Representação tridimensional (vista lateral)

Pelo gráfico da Figura 5.14 pode-se obter um valor aproximado da largura do entalhe na superfície do objeto:

$$\text{LARGURA DO ENTALHE} = 5,5 - 4,0 = 1,5 \text{ mm}$$

O programa utilizado para fazer o processamento das imagens também fornece a matriz dos valores do mapa de fase com desmodulação (Figura 5.12). Com o auxílio desta matriz, consegue-se um maior detalhamento das dimensões da superfície do objeto, adquirindo assim os valores da profundidade do entalhe, como mostrado na Figura 5.15. A matriz resultante com os valores do mapa de fase é apresentada no apêndice A.

A figura 5.15 é uma média de 10 pontos dos valores obtidos pela matriz com os valores do mapa de fase.

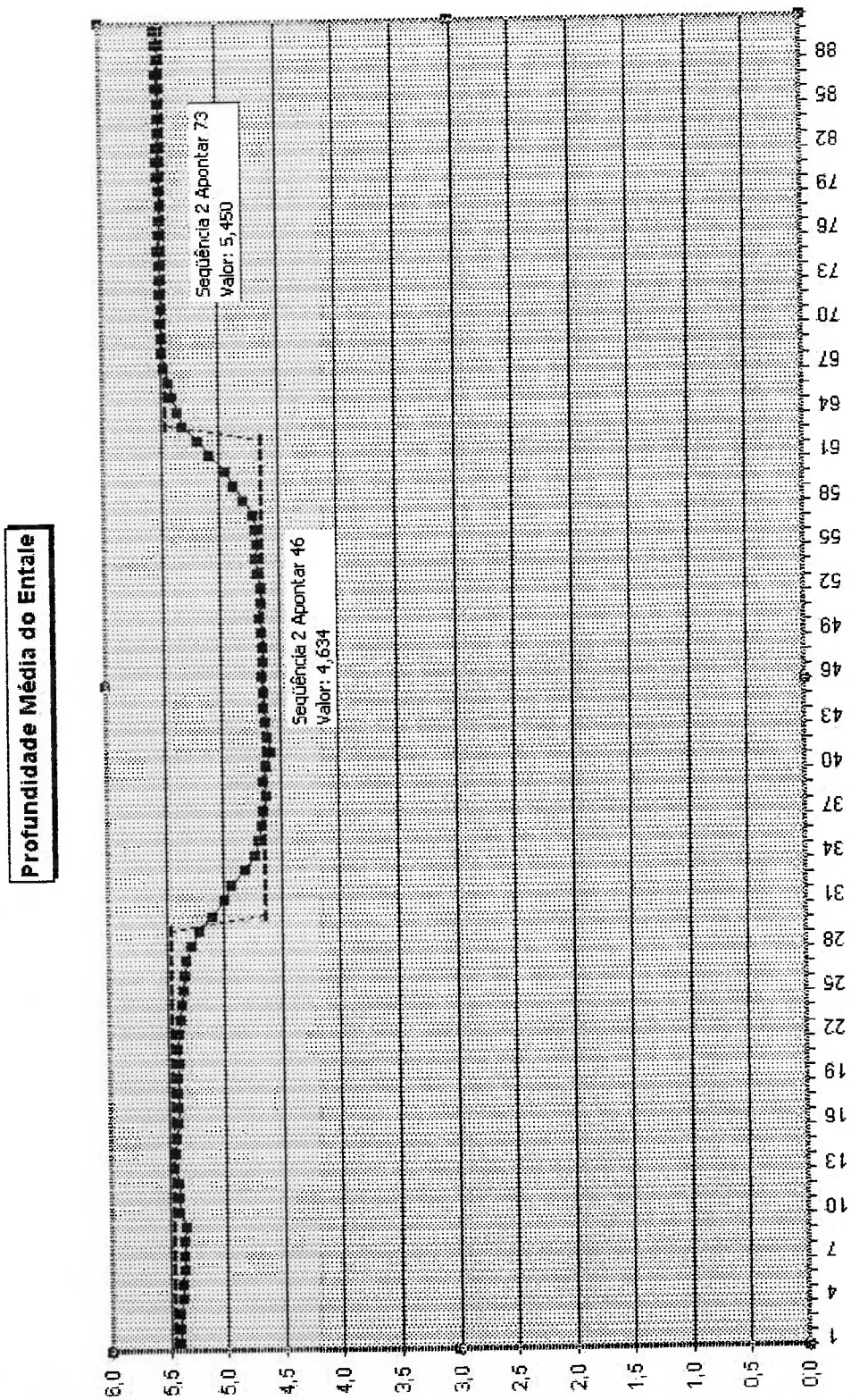


Figura 5.15. Gráfico para medição da profundidade do entalhe na superfície do objeto

Comparando um valor médio da superfície do objeto com o valor médio da parte mais profunda do entalhe podemos definir qual a sua profundidade. Da figura 5.15 obtemos:

$$\text{PROFUNDIDADE DO ENTALHE} = 5,450 - 4,634 = 0,816 \text{ mm}$$

5. 2. Avaliação da Superfície na Água.

Nas Figuras 5.16 a 5.25, mostram-se o holograma, o feixe objeto e o feixe referência, a imagem de intensidade, os interferogramas de fase para diferentes valores de deslocamento lateral, o mapa de fase com desmodulação (vista 2D) e a sua representação tridimensional para um ensaio, do mesmo objeto utilizado anteriormente, realizado em água.

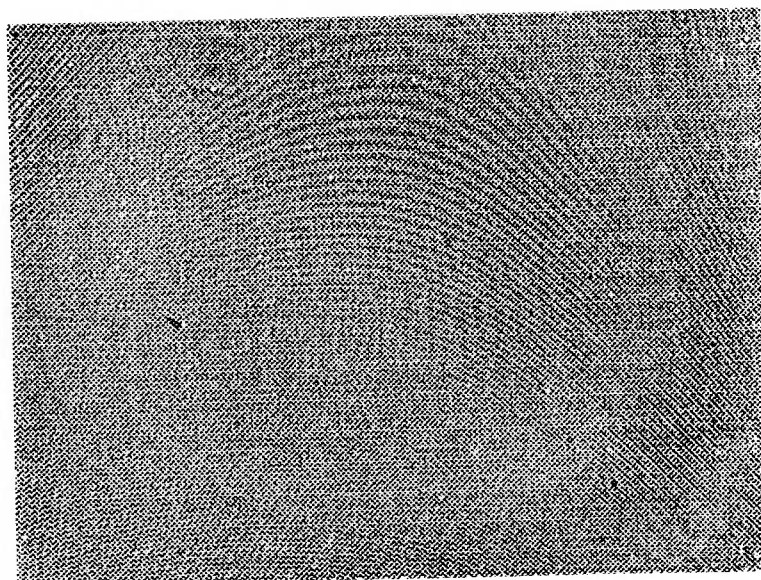


Figura 5.16. Holograma digital correspondente a uma barra de alumínio para ensaio realizado em água

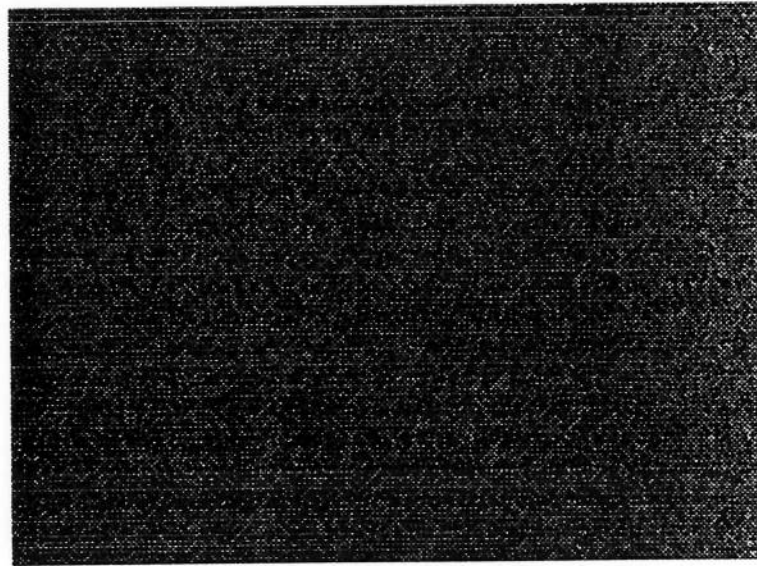


Figura 5.17. Feixe objeto correspondente a uma barra de alumínio para ensaio realizado em água

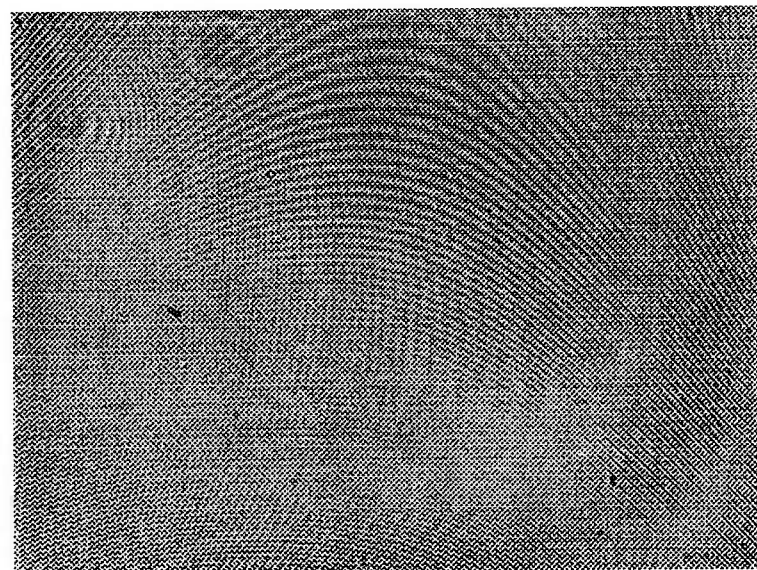


Figura 5.18. Feixe referência

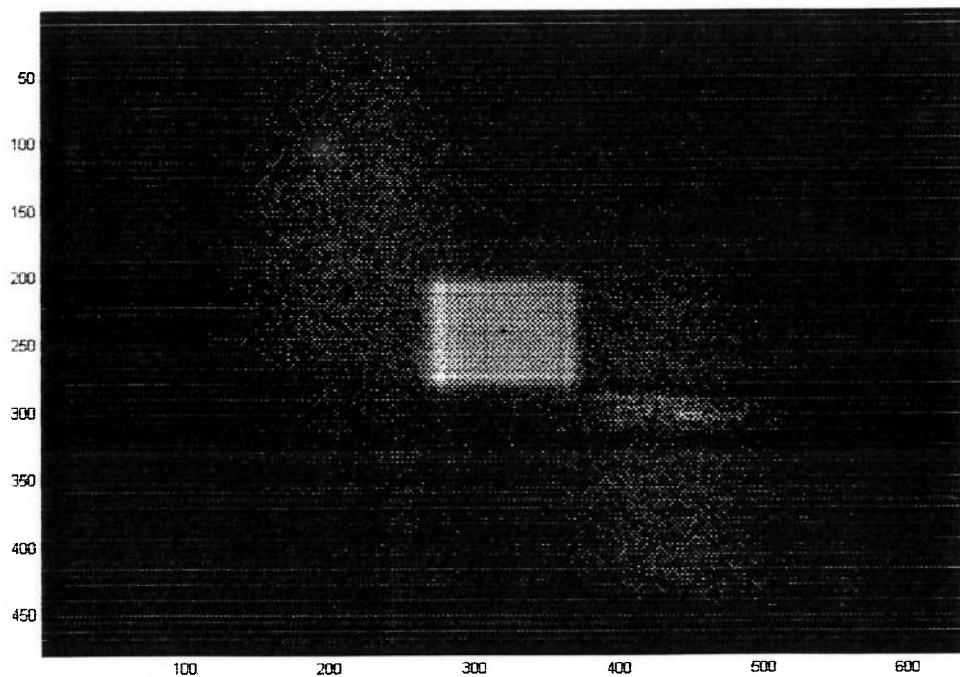


Figura 5.19. Imagem de intensidade da barra de alumínio em água

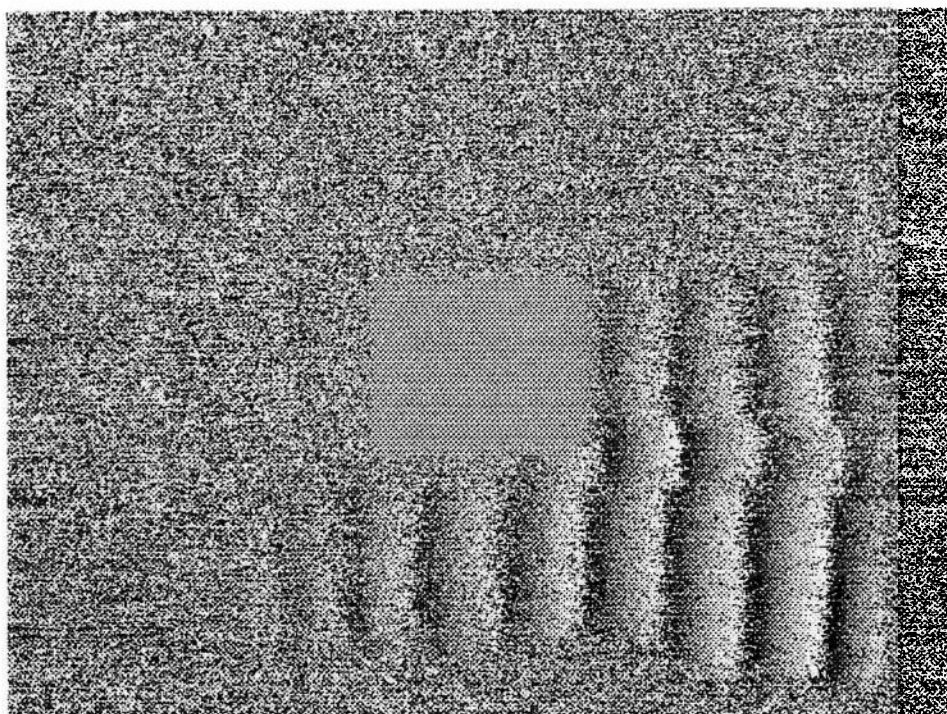


Figura 5.20. Interferograma de fase entre dois hologramas com um deslocamento lateral de $46,5 \mu\text{m}$ em água

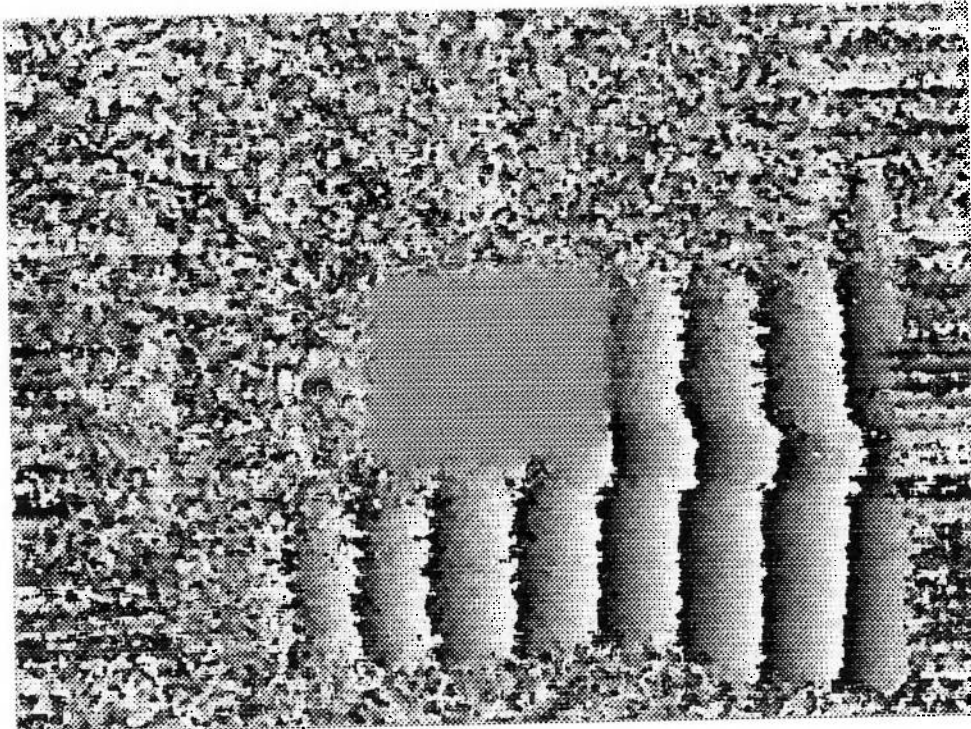


Figura 5.21. Interferograma de fase entre dois hologramas com um deslocamento lateral de $46,5 \mu\text{m}$ em água e com filtro seno- coseno 5×5

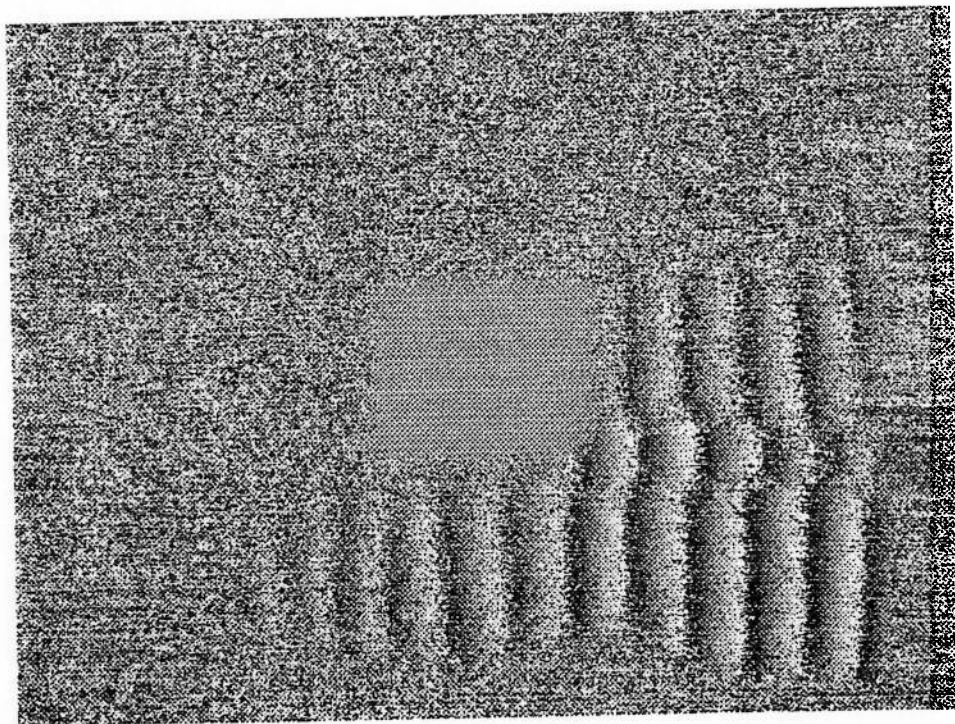


Figura 5.22. Interferograma de fase entre dois hologramas com um deslocamento lateral de $70 \mu\text{m}$ em água

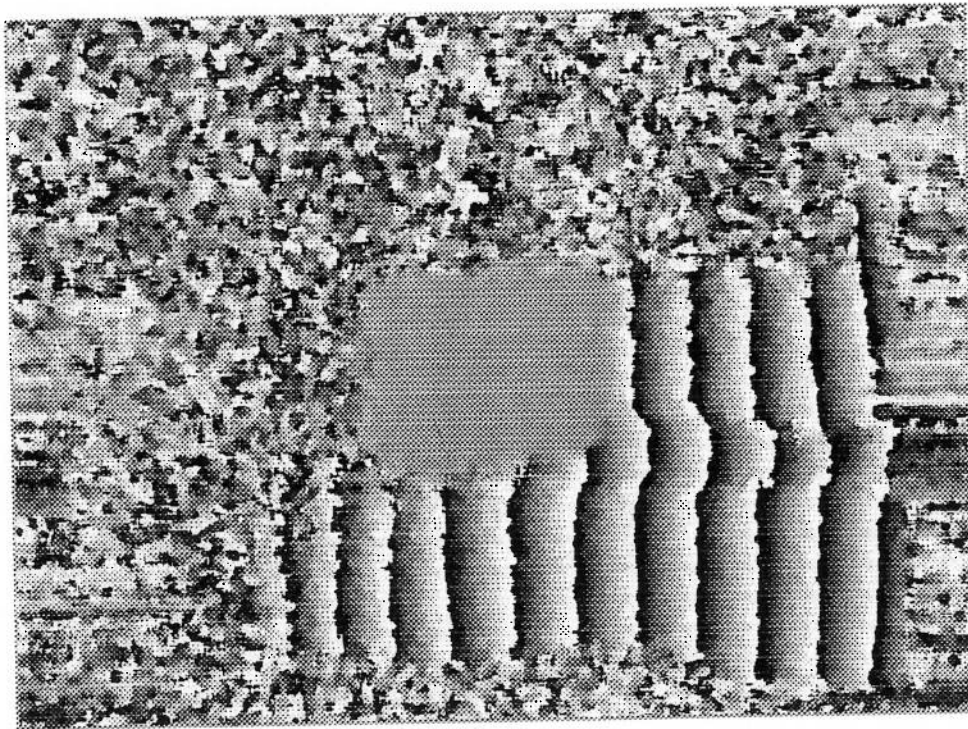


Figura 5.23. Interferograma de fase entre dois hologramas com um deslocamento lateral de $70 \mu\text{m}$ em água e com filtro seno- coseno 7×7

A Tabela 5.2 resume o aumento do número de franjas ocorrido à medida que o deslocamento lateral foi aumentado. Isto pode ser observado nos resultados das Figuras 5.20 e 5.23.

Tabela 5.2. Número de franjas e filtro utilizados para cada interferograma para o ensaio realizado em água.

Deslocamento (μm)	Filtro Utilizado	Número de Franjas
46,5	Seno-Coseno 5×5	8
70	Seno-Coseno 7×7	11

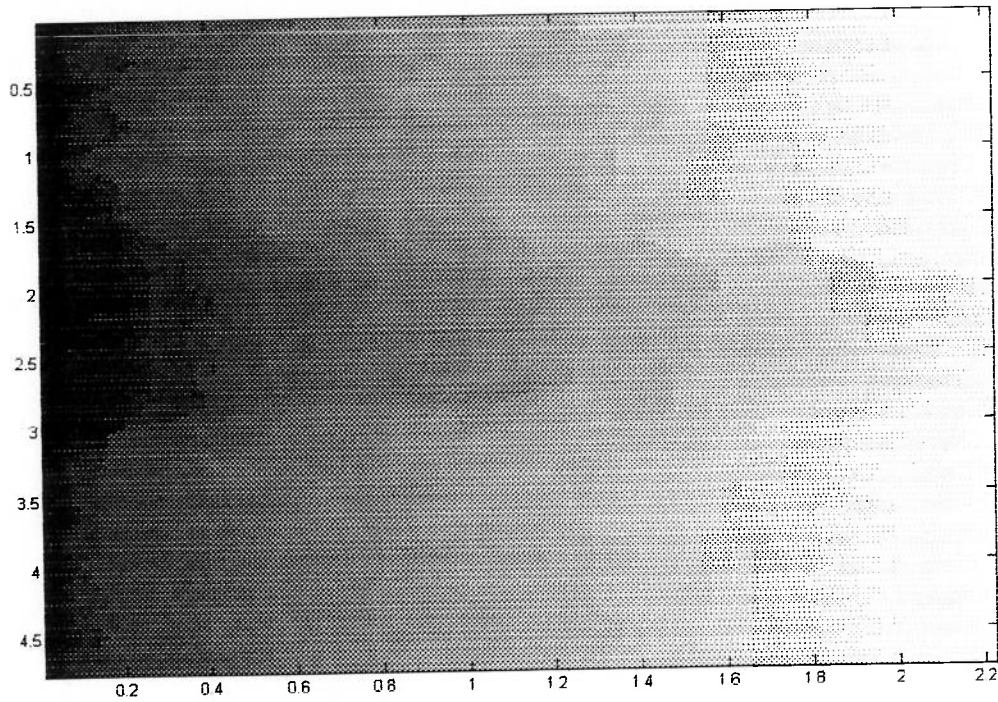


Figura 5.24. Mapa de fase com desmodulação correspondente ao Interferograma de fase em água com um deslocamento lateral de $46,5 \mu\text{m}$

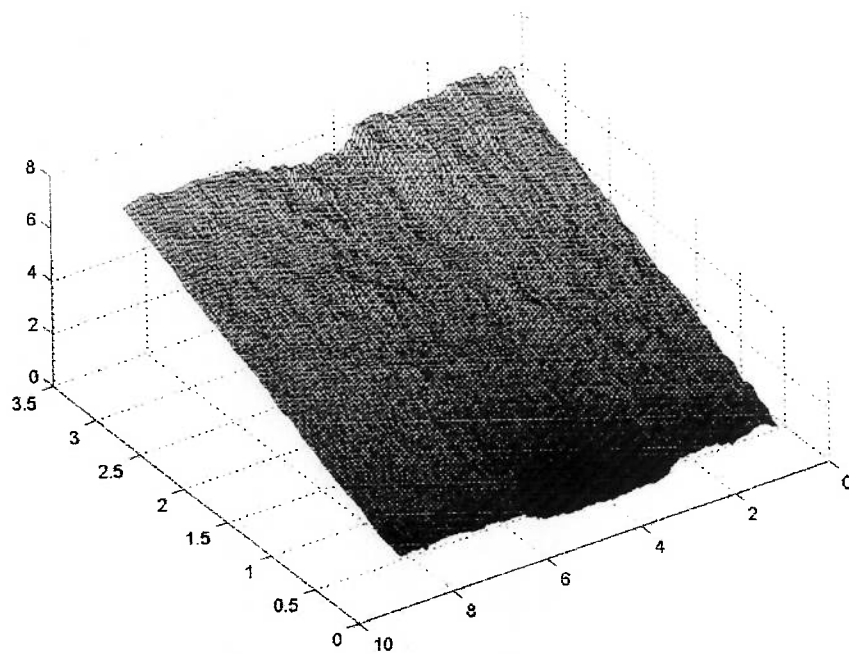


Figura 5.25. Representação tridimensional correspondente aos dados da Figura 5.24.

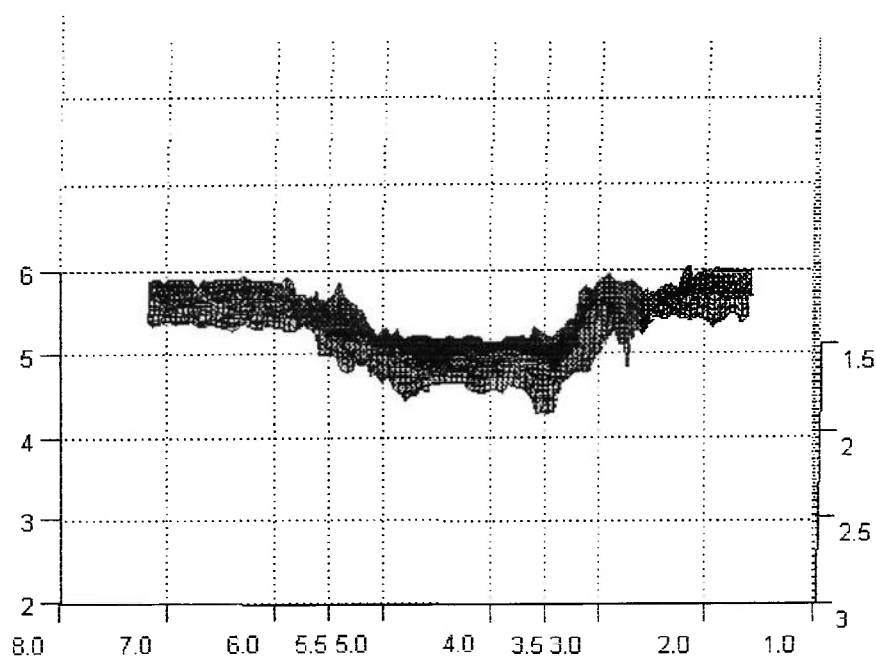


Figura 5.26. Representação tridimensional (vista lateral)

Pelo gráfico da Figura 5.26 pode-se obter um valor aproximado da largura do entalhe na superfície do objeto:

$$LARGURA DO ENTALHE = 5,15 - 3,25 = 1,9 \text{ mm}$$

Com o auxílio da matriz da imagem do mapa de fase desmodulado, adquirem-se os valores da profundidade do entalhe, como mostrado na Figura 5.27. A matriz resultante com os valores do mapa de fase para o ensaio realizado em água é apresentada no apêndice B

A Figura 5.27 é uma média de 10 pontos dos valores obtidos pela matriz com os valores do mapa de fase

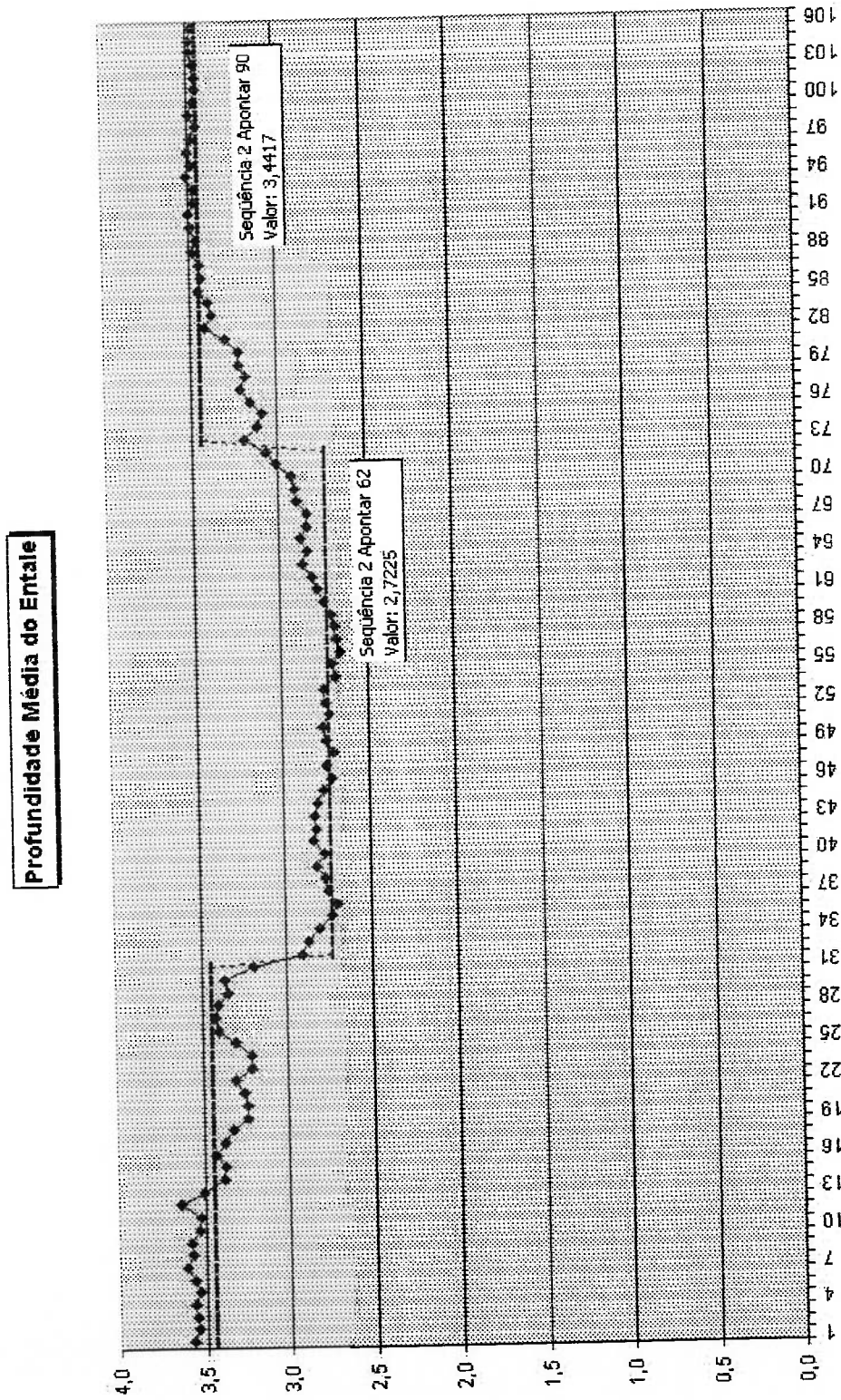


FIGURA 5.27. Gráfico para medição da profundidade do entalhe na superfície do objeto para ensaio realizado em água

Comparando o valor médio da superfície do objeto com o valor médio da parte mais profunda do entalhe podemos definir a sua profundidade. Da Figura 5.27 obtemos:

$$\text{PROFUNDIDADE DO ENTALHE} = 3,4417 - 2,7225 = 0,7192 \text{ mm}$$

5.3. Análise dos Resultados Obtidos

Obteve-se maior número de franjas na medida em que a magnitude do deslocamento foi se incrementando. Isto também ocorre quando comparados os interferogramas processados no ar e na água para um mesmo valor de deslocamento, segundo os dados qualitativos mostrados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3. Comparação do número de franjas no ar e na água para diferentes deslocamentos

<i>Ensaio Realizado</i>	<i>Deslocamento</i>		
	<i>46,5 (µm)</i>	<i>70 (µm)</i>	<i>93 (µm)</i>
AR	6	9	12
ÁGUA	8	11	-

Para o conjunto de dados processados no ar, as dimensões da superfície coincidem com o resultado obtido experimentalmente, enquanto que para o conjunto de dados processados na água, as dimensões da superfície sofreram uma alteração devido a influência do índice de refração da água. A influência do índice de refração da água em imagens obtidas pelo método holográfico pode ser observada no trabalho de Valin, [35], onde é apresentada a influencia do índice de refração na medição de um

deslocamento de uma barra. A Tabela 5.4 mostra os valores da profundidade e a Tabela 5.5 mostra os valores da largura do entalhe obtidos.

Tabela 5.4. Valores de profundidade do entalhe obtidos para os ensaios realizados no ar e água

Ensaio Realizado	Profundidade do Entalhe (mm)	Diferença (mm)	Desvio Relativo (%)
AR	0,816	0,034	4%
ÁGUA	0,719	0,131	15%

Tabela 5.5. Valores da largura do entalhe obtidos para os ensaios realizados no ar e água

Ensaio Realizado	Largura do entalhe (mm)	Diferença (mm)	Desvio Relativo (%)
AR	1.5	0,1	6,25 %
ÁGUA	1.9	0,3	18,75%

Com os dados das tabelas 5.4 e 5.5 pode-se comparar os resultados obtidos através do método holográfico e do método ótico. O desvio relativo para a avaliação da profundidade do entalhe foi de 4% no ar e 15% na água enquanto que para a avaliação da largura do entalhe o desvio relativo foi de 6,25% no ar e 18,75% na água.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1. Conclusões

O desenvolvimento deste estudo permite se inferir as seguintes conclusões:

- a) Apesar do extenso levantamento bibliográfico sobre a holografia digital e sobre os métodos de análise de contorno de superfícies, comprovou-se a inexistência de trabalhos que utilizam a holografia para inspeção da superfície de estruturas submersas.
- b) Desenvolveu-se uma instalação holográfica capaz de capturar hologramas mediante a utilização de uma câmera CCD, e assim, avaliar a geometria de defeitos superficiais de uma barra de alumínio.
- c) O método das duas fontes mostrou-se adequado para avaliação da superfície de estruturas, assim como o variador de posição automático desenvolvido e fabricado especialmente para deslocar o extremo da fibra óptica do feixe objeto de um pequeno deslocamento.
- d) Os resultados experimentais da análise geométrica da superfície do objeto comparado com os valores medidos com um microscópio ótico garantiram a correta aplicação de todo o sistema experimental, tanto para o objeto no ar como na água.

5.2. Recomendações

As seguintes recomendações são sugeridas como resultados deste estudo:

- a) A atualização de uma câmera CCD com tamanho de pixel menor permitiria melhorar a qualidade dos interferogramas e com isso da imagem de fase reconstruída, reduzindo, assim, as dificuldades do método para realizar a captura dos hologramas.
- b) Aperfeiçoamento da técnica de captura de imagem e do processamento das imagens holográficas incorporando a opção de desmodulação temporal, a qual permite uma melhor análise de objetos que apresentem descontinuidades reais na sua superfície.
- c) A montagem de um arranjo holográfico compacto para realização dos ensaios com todo o equipamento submerso.
- d) Realização de ensaios de análise da superfície através do método de dois comprimentos de onda e comparação dos resultados obtidos com o método das duas fontes.
- e) Análise de diferentes tipos de objeto, com diferentes defeitos na superfície, com o intuito de melhorar o poder de resolução do método das duas fontes na análise de defeitos superficiais.
- f) Realização de ensaios com um laser pulsado que permitiria a realização de ensaios sem a utilização de uma mesa holográfica, como é o processo submerso.

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. MULVEY. **Diffraction microscopy with x-rays**. Letter in Nature, London. 170, 202-3, 1952.
- [5] G. L. ROGERS. **Experiments in diffraction microscopy**. A, 63, 193-221, (Pt 11,), 1952.
- [6] V. A. BAEZ. **Focusing by diffraction**. Amer. J. Phys., 20, 311, 1952.
- [7] E. N. LEITH, J. UPATNIEKS: **Reconstructed wavefronts and communication theory**, J. Opt. Soc. Am. 52, 1123-1130 (1962).
- [8] E. N. LEITH, J. UPATNIEKS: **Wavefront reconstruction with continuous-tone objects**. J. Opt. Soc. Am. 53, 1377-1381 (1963).
- [9] E. N. LEITH, J. UPATNIEKS: **Wavefront reconstruction with diffused illumination of three-dimensional objects**. J. Opt. Soc. Am. 54, 1295-1301 (1964).
- [10] Y. N. DENISYUK. **Representation of optical properties of an objective by means of wave pattern of light scattered by it**. Opt. Spectros (USSR), vol. 144, Nº 6, 1275-8. 1965.
- [11] VICTOR CIVITA, "**Conhecer**". São Paulo, Nova Cultural, vol 1, p. 90, 1996.
- [12] VICTOR CIVITA, "**Conhecer**". São Paulo, Nova Cultural, vol 1, p. 89, 1996.
- [13] U. SCHNARS, W. O. JUPTNER, "**Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction**" Appl. Opt. v 33, n.2, p 179-181, 1994.

- [14] J. POMÁRICO, U. SCHNARS, H. J. HARTMANN, and JUPTNER, "Digital recording and numerical reconstruction of holograms: a new method for displaying light in flight" *Appl. Opt.* v. 34, n 35, p. 8095-8099, 1995.
- [15] L. P. YAROSLAVSKY, N. S. MERZYALOV, "Methods of Digital Holography", Consultant Burcau, New York, 1980.
- [16] U. SCHNARS, "Direct phase determination in hologram interferometry with use of digitally recorded holograms", *J. Opt. Soc. Am. A.* 11 (1994) 2011-2015.
- [17] G. PEDRINI, Y. L. ZOU, H. J. TIZIANI, "Digital double pulse-holographic interferometry for vibration analysis", *J. Mod. Opt.* 42 (1995) 367-374.
- [18] G. PEDRINI, H. J. TIZIANI, Y. L. ZOU, "Digital double pulse-TV-holography", *Opt. Laser Eng.* 26 (1997) 199-219.
- [19] G. PEDRINI, Ph. FROENING, H. FESSLER, H. J. TIZIANI, "In-line digital-holographic interferometry", *Appl. Opt.* 37 (26) (1998) 6262-6269.
- [20] P. GREN, S. SCHEDIN, X. LI, "Tomographic reconstruction of transient acoustic fields recorded by pulsed TV holography", *Appl. Opt.* 37 (5) (1998) 834-840.
- [21] Yonemura M. "Wavelength-change characteristics of semiconductors lasers and their application to holographic contouring". *Opt. Lett.* 1985, 10(1) 3.
- [22] Zelenka JS. Varner JR. "Multi-index holographic contouring". *Appl. Opt.* 1969, 8, 1431-34.
- [23] Rodrigo S. Dias, Edison Gonçalves. "Implementação de Método Holográfico para Inspeção Superficial". COBEF II, Uberlândia, 2002.
- [24] Quan C. ,Bryanston-Cross PJ. "Double-Source holographic contouring using fibre optics." *Opt. lasers Tech.* 1990(22), 4, 255-9.

- [25] Hildebrand BP, Haines KA **“multiple-Wavelength and multiple-source holography applied to contouring generation”**. J. Op. Soc. Am. 1967, 57, 155-6.
- [26] Ostrovsky YI. Et al. **“Holographic interferometry in experimental Mechanics”**. Springer 1991, 190-204.
- [27] S. Seebacher, W. Osten et. al. **“The determination of material parameters of microcomponents using digital holography”**. Optics and Lasers in Engineering 36 (2001)103-126.
- [28] Thalman R. et al. **“Holographic contouring using electronic phase measurements”**. Opt. Eng 1985, 24(6), 930-5.
- [29] C. Quan et al. **“Holographic contouring using double source technique.”** Optics and lasers in Eng. 30(1998) 357-362.
- [30] U. SCHNARS, **“Direct phase determination in hologram interferometry with use of digitally recorded holograms”**, J. Opt. Soc. Am. A,11 (1994) 2011-2015.
- [31] S. SEEBACHER, W. OSTEN, and D W. JÜPTNER, **“Measuring shape and deformation of small objects using digital holography”**, in Laser Interferometry IX: Applications, R. J. Pryputniewicz, G. M. Brown, and W. O Jüptner, eds., Proc. SPIE 3479, 104-115 (1998).
- [32] SEEBACHER, W. OSTEN, and W. JÜPTNER, **“3-D deformation analysis of micro-components using digital holography”**, in Optical Inspection and Micrommeasurements II, C. Gorecki, ed., Proc. SPIE 3098, 382-391 (1997).
- [33]. Máxime Jacquot et al. **“High reslution digital holography”**. Opt. Comm. 190(2001)87-94.
- [34]. Optimas Version 6.2 for Windows. <http://www.optimas.com>.
- [35]. José Luis Valin Rivera, 2001, **“Uso da holografia Digital para a analise da deformação em corpos sólidos pequenos”**. Tese de Doutorado; São Paulo.
- [36]. Matláb Version 6.0 for Windows. <http://www.matlab.com>.

- [37]. R. M. GOLDSTEIN, H. A. ZEBKER, C. L. WERNER. **"Satelite radar interferometry two-dimensional phase unwrapping"**. Radio Science, v 23, n. 4, p. 713-20, 1988.
- [38]. J. M. HUNTLEY **"Noise-immune phase unwrapping algorithm"**. Appl. Optics, v.28, n. 15, p. 3268-3270, 1989.

APÊNDICES

Matriz de dados dos gráficos obtidos com o programa Holodig

APÊNDICE A: Matriz gerada pelo programa de processamento de imagens "Holodig" com os valores do mapa de fase para o ensaio realizado no ar. Esta matriz 90x10 foi utilizada para geração do gráfico da Figura 5.15.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5,073	5,147	5,236	5,338	5,400	5,446	5,537	5,585	5,627	5,702
5,073	5,147	5,236	5,338	5,400	5,446	5,537	5,585	5,627	5,702
5,073	5,147	5,252	5,346	5,398	5,446	5,540	5,585	5,627	5,722
5,041	5,120	5,162	5,293	5,353	5,445	5,493	5,585	5,635	5,677
5,041	5,147	5,162	5,272	5,353	5,421	5,445	5,591	5,645	5,702
5,041	5,094	5,147	5,272	5,353	5,421	5,493	5,585	5,635	5,702
5,033	5,094	5,147	5,272	5,353	5,398	5,445	5,585	5,635	5,741
5,004	5,094	5,178	5,272	5,346	5,398	5,493	5,585	5,635	5,686
4,954	5,094	5,147	5,236	5,303	5,394	5,444	5,591	5,645	5,738
5,051	5,120	5,200	5,252	5,346	5,394	5,544	5,645	5,704	5,791
5,051	5,120	5,200	5,252	5,293	5,442	5,600	5,686	5,751	5,769
5,012	5,120	5,178	5,236	5,338	5,388	5,600	5,666	5,751	5,817
5,061	5,135	5,200	5,293	5,338	5,496	5,600	5,721	5,769	5,838
5,051	5,135	5,200	5,293	5,346	5,444	5,544	5,721	5,751	5,828
5,073	5,152	5,200	5,293	5,346	5,394	5,544	5,721	5,769	5,817
5,073	5,152	5,200	5,272	5,338	5,394	5,494	5,600	5,721	5,791
5,073	5,135	5,200	5,252	5,315	5,388	5,494	5,600	5,738	5,844
5,061	5,120	5,200	5,293	5,346	5,444	5,494	5,600	5,721	5,791
5,022	5,120	5,200	5,272	5,388	5,444	5,494	5,600	5,721	5,791
5,022	5,120	5,200	5,272	5,394	5,394	5,494	5,591	5,702	5,791
5,022	5,120	5,200	5,257	5,388	5,444	5,544	5,635	5,686	5,738
5,022	5,120	5,200	5,236	5,388	5,444	5,494	5,591	5,674	5,721
5,022	5,106	5,200	5,236	5,279	5,442	5,496	5,645	5,686	5,721
5,022	5,120	5,236	5,236	5,279	5,388	5,442	5,600	5,645	5,686
5,022	5,120	5,236	5,236	5,293	5,338	5,442	5,600	5,600	5,702
5,033	5,060	5,216	5,236	5,279	5,279	5,439	5,575	5,600	5,659
5,046	5,076	5,191	5,236	5,279	5,279	5,382	5,584	5,584	5,659
4,986	5,046	5,152	5,236	5,236	5,257	5,328	5,528	5,523	5,584
4,864	4,997	5,076	5,152	5,191	5,191	5,261	5,439	5,439	5,565
4,738	4,874	4,880	5,076	5,115	5,115	5,208	5,269	5,269	5,426
4,677	4,670	4,728	4,880	4,961	5,061	5,140	5,167	5,198	5,343
4,590	4,655	4,645	4,887	4,907	4,907	5,084	5,167	5,198	5,318
4,535	4,590	4,590	4,655	4,655	4,723	4,907	5,036	5,144	5,274
4,421	4,421	4,452	4,535	4,590	4,655	4,806	4,937	5,144	5,274
4,363	4,397	4,421	4,548	4,612	4,670	4,732	4,907	5,036	5,182
4,363	4,397	4,397	4,560	4,612	4,677	4,738	4,868	4,992	5,112
4,345	4,397	4,397	4,492	4,580	4,686	4,742	4,800	4,930	5,112
4,330	4,378	4,406	4,462	4,580	4,634	4,742	4,800	4,930	5,024
4,330	4,378	4,406	4,462	4,580	4,686	4,799	4,857	4,976	5,033
4,283	4,330	4,378	4,426	4,580	4,694	4,798	4,851	4,948	4,960
4,283	4,330	4,378	4,426	4,503	4,645	4,697	4,799	4,851	4,960
4,283	4,330	4,378	4,426	4,503	4,645	4,747	4,849	4,948	4,948
4,251	4,306	4,378	4,480	4,547	4,747	4,798	4,849	4,898	4,948

4,293	4,345	4,426	4,492	4,563	4,697	4,798	4,849	4,948	4,989
4,293	4,362	4,426	4,503	4,601	4,650	4,747	4,851	4,948	4,996
4,306	4,378	4,426	4,503	4,601	4,650	4,798	4,849	4,948	4,996
4,306	4,378	4,426	4,538	4,601	4,650	4,745	4,851	4,948	4,996
4,272	4,345	4,426	4,538	4,601	4,650	4,694	4,849	4,948	4,996
4,262	4,381	4,503	4,547	4,650	4,653	4,697	4,849	4,948	5,004
4,306	4,426	4,503	4,588	4,653	4,653	4,699	4,847	4,948	5,004
4,397	4,426	4,538	4,588	4,653	4,653	4,650	4,798	4,854	4,960
4,426	4,473	4,538	4,595	4,607	4,650	4,640	4,742	4,864	4,997
4,426	4,503	4,580	4,628	4,634	4,650	4,682	4,802	4,868	4,997
4,397	4,517	4,580	4,628	4,628	4,634	4,740	4,874	4,939	5,024
4,386	4,489	4,535	4,612	4,612	4,612	4,655	4,887	4,896	5,140
4,435	4,535	4,535	4,612	4,590	4,645	4,718	4,907	4,920	5,084
4,519	4,612	4,612	4,590	4,590	4,645	4,718	4,907	4,920	4,920
4,560	4,612	4,612	4,728	4,645	4,718	4,920	5,012	5,036	5,112
4,612	4,735	4,728	4,723	4,723	4,920	5,036	5,084	5,112	5,112
4,728	4,735	4,728	4,887	4,896	5,012	5,112	5,084	5,112	5,182
4,874	4,930	4,949	5,041	5,061	5,112	5,208	5,208	5,234	5,318
4,939	4,939	4,949	5,061	5,115	5,269	5,295	5,295	5,426	5,595
4,939	5,086	5,101	5,208	5,238	5,360	5,373	5,436	5,595	5,730
5,033	5,073	5,120	5,238	5,295	5,439	5,442	5,565	5,643	5,730
5,086	5,120	5,152	5,293	5,338	5,444	5,494	5,565	5,643	5,780
5,120	5,169	5,252	5,303	5,394	5,445	5,544	5,556	5,651	5,780
5,120	5,217	5,252	5,346	5,444	5,540	5,544	5,610	5,722	5,892
5,200	5,252	5,264	5,353	5,445	5,540	5,544	5,610	5,722	5,916
5,169	5,252	5,303	5,353	5,445	5,540	5,563	5,600	5,738	5,844
5,187	5,217	5,264	5,353	5,445	5,540	5,591	5,686	5,791	5,877
5,187	5,217	5,264	5,311	5,445	5,493	5,591	5,686	5,791	5,817
5,187	5,217	5,264	5,311	5,445	5,540	5,591	5,686	5,817	5,865
5,187	5,217	5,264	5,303	5,444	5,544	5,591	5,686	5,791	5,865
5,187	5,217	5,264	5,303	5,445	5,544	5,674	5,721	5,817	5,838
5,187	5,217	5,303	5,346	5,444	5,544	5,674	5,721	5,817	5,838
5,169	5,217	5,264	5,346	5,444	5,544	5,674	5,721	5,794	5,838
5,121	5,169	5,252	5,303	5,444	5,591	5,674	5,721	5,794	5,838
5,121	5,169	5,252	5,303	5,394	5,494	5,674	5,721	5,794	5,838
5,121	5,217	5,264	5,353	5,445	5,494	5,674	5,721	5,794	5,838
5,143	5,217	5,264	5,346	5,445	5,544	5,674	5,721	5,794	5,912
5,143	5,217	5,264	5,346	5,445	5,494	5,686	5,721	5,817	5,912
5,143	5,230	5,303	5,353	5,445	5,494	5,645	5,721	5,817	5,905
5,169	5,230	5,303	5,353	5,398	5,494	5,645	5,686	5,791	5,865
5,169	5,230	5,264	5,353	5,398	5,494	5,635	5,686	5,791	5,865
5,169	5,230	5,264	5,346	5,398	5,494	5,635	5,686	5,791	5,865
5,217	5,230	5,303	5,394	5,394	5,494	5,635	5,686	5,804	5,865
5,230	5,230	5,303	5,398	5,445	5,494	5,635	5,686	5,804	5,865
5,217	5,230	5,264	5,353	5,398	5,494	5,635	5,686	5,817	5,897
5,187	5,230	5,264	5,398	5,444	5,544	5,635	5,686	5,817	5,865
5,169	5,230	5,303	5,394	5,444	5,544	5,635	5,721	5,817	5,897

APÊNDICE B: Matriz gerada pelo programa de processamento de imagens "Holodig" com os valores do mapa de fase para o ensaio realizado em água. Esta matriz 90x10 foi utilizada para geração do gráfico da Figura 5.27.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3,841	4,102	4,154	4,276	4,363	4,504	4,645	4,650	4,750	4,750
3,881	4,158	4,276	4,363	4,412	4,538	4,640	4,645	4,697	4,747
3,981	4,158	4,212	4,345	4,397	4,449	4,450	4,521	4,640	4,697
4,033	4,163	4,193	4,222	4,363	4,397	4,363	4,397	4,480	4,634
3,968	4,163	4,193	4,262	4,363	4,397	4,426	4,480	4,580	4,694
4,102	4,171	4,193	4,262	4,363	4,426	4,449	4,503	4,580	4,745
4,033	4,171	4,236	4,386	4,426	4,473	4,473	4,480	4,503	4,620
4,102	4,171	4,204	4,222	4,323	4,363	4,363	4,363	4,480	4,670
3,968	4,040	4,163	4,163	4,212	4,276	4,363	4,363	4,517	4,677
3,910	3,968	4,040	4,102	4,193	4,294	4,363	4,372	4,561	4,703
3,968	4,171	4,222	4,250	4,276	4,344	4,421	4,435	4,517	4,634
3,968	4,102	4,171	4,250	4,276	4,386	4,421	4,386	4,386	4,372
3,886	4,102	4,102	4,163	4,222	4,276	4,363	4,363	4,363	4,344
3,938	4,102	4,102	4,102	4,102	4,212	4,306	4,345	4,363	4,344
3,780	4,102	4,102	4,102	4,102	4,158	4,262	4,262	4,323	4,294
3,741	4,022	3,795	4,102	4,102	4,142	4,236	4,320	4,344	4,416
3,948	4,054	3,771	4,062	4,102	4,102	4,163	4,262	4,306	4,323
3,723	3,683	3,642	3,750	3,808	3,949	4,102	4,222	4,276	4,300
3,771	3,852	3,642	3,750	3,750	3,750	3,808	4,102	4,181	4,280
3,702	3,771	3,714	3,714	3,750	3,714	3,752	3,808	4,102	4,280
3,642	3,661	3,540	3,472	3,731	3,700	3,687	3,714	3,731	4,181
3,714	3,771	3,602	3,602	3,750	3,700	3,714	3,731	3,731	4,254
3,731	3,750	3,687	3,687	3,700	3,665	3,675	3,700	3,782	3,817
3,466	3,592	3,569	3,608	3,648	3,648	3,648	3,648	3,700	3,799
3,349	3,513	3,563	3,608	3,648	3,635	3,635	3,635	3,648	3,752
3,349	3,513	3,563	3,602	3,648	3,635	3,635	3,668	3,682	3,730
3,349	3,513	3,558	3,597	3,635	3,624	3,635	3,668	3,668	3,711
3,349	3,510	3,558	3,597	3,635	3,629	3,668	3,668	3,682	3,730
3,352	3,510	3,558	3,602	3,597	3,635	3,682	3,682	3,682	3,711
3,302	3,513	3,563	3,641	3,635	3,668	3,682	3,682	3,700	3,752
3,352	3,510	3,648	3,648	3,648	3,682	3,700	3,700	3,675	3,750
3,293	3,563	3,608	3,648	3,648	3,700	3,700	3,700	3,787	3,910
3,293	3,513	3,615	3,648	3,656	3,700	3,711	3,711	3,808	3,928
3,404	3,569	3,615	3,665	3,675	3,787	3,787	3,808	3,885	3,981
3,293	3,517	3,569	3,656	3,711	3,723	3,723	3,723	3,859	3,928
3,243	3,460	3,563	3,608	3,569	3,575	3,700	3,723	3,837	3,928
3,243	3,405	3,507	3,563	3,563	3,575	3,665	3,723	3,859	3,928
3,243	3,349	3,460	3,563	3,513	3,563	3,569	3,687	3,799	3,928
3,243	3,349	3,502	3,547	3,547	3,554	3,563	3,575	3,723	3,823
3,293	3,510	3,547	3,550	3,550	3,554	3,563	3,592	3,737	3,881
3,243	3,309	3,502	3,550	3,550	3,558	3,608	3,623	3,767	3,806
3,243	3,309	3,358	3,502	3,504	3,554	3,648	3,665	3,782	3,840

3,142	3,250	3,406	3,504	3,554	3,648	3,730	3,767	3,806	3,859
3,162	3,207	3,305	3,507	3,513	3,648	3,700	3,767	3,806	3,859
3,142	3,200	3,250	3,513	3,569	3,691	3,753	3,826	3,873	3,873
3,162	3,200	3,250	3,404	3,675	3,723	3,782	3,859	3,910	3,940
3,162	3,200	3,207	3,297	3,569	3,711	3,782	3,826	3,873	3,885
3,117	3,200	3,243	3,404	3,655	3,723	3,799	3,859	3,873	3,920
3,200	3,200	3,243	3,347	3,583	3,711	3,753	3,806	3,826	3,859
3,243	3,250	3,352	3,405	3,563	3,608	3,711	3,723	3,798	3,859
3,293	3,347	3,404	3,460	3,583	3,665	3,687	3,753	3,798	3,826
3,405	3,460	3,513	3,563	3,623	3,665	3,723	3,753	3,778	3,859
3,406	3,458	3,461	3,569	3,643	3,643	3,714	3,753	3,897	3,897
3,458	3,569	3,583	3,583	3,771	3,714	3,782	3,817	3,897	3,942
3,405	3,510	3,533	3,613	3,750	3,714	3,752	3,817	3,897	3,897
3,347	3,522	3,602	3,702	3,831	3,881	3,910	3,897	3,992	4,045
3,343	3,602	3,702	3,795	3,928	3,928	3,931	3,919	3,966	3,992
3,522	3,583	3,668	3,750	3,840	3,840	3,840	3,881	3,928	4,040
3,402	3,602	3,702	3,831	3,881	3,840	3,840	3,881	3,928	3,981
3,548	3,747	3,795	3,928	3,881	3,840	3,817	3,787	3,859	3,910
3,831	3,910	3,928	3,966	3,928	3,840	3,817	3,831	3,831	3,885
3,787	3,910	3,928	3,954	3,885	3,885	3,852	3,886	3,949	4,023
3,859	3,910	3,981	3,949	3,923	3,886	3,806	3,885	3,949	4,023
3,897	3,942	3,999	4,040	4,023	3,949	3,885	3,948	3,948	3,986
3,967	3,999	4,055	4,154	4,045	4,040	4,033	4,023	3,986	3,986
4,010	3,999	4,055	4,102	4,045	4,040	4,062	4,043	3,986	4,043
3,910	3,910	4,010	4,053	4,053	4,073	4,102	4,062	4,043	4,043
3,859	3,881	3,992	3,981	4,040	4,133	4,163	4,218	4,102	4,102
3,968	3,881	4,045	4,040	4,102	4,163	4,276	4,294	4,218	4,409
3,981	3,981	4,133	4,163	4,163	4,294	4,372	4,395	4,409	4,501
3,787	3,859	3,981	4,133	4,163	4,344	4,386	4,405	4,421	4,538
3,684	3,831	3,949	4,181	4,236	4,344	4,405	4,421	4,473	4,503
3,852	3,949	4,195	4,409	4,372	4,421	4,473	4,473	4,473	4,473
3,923	4,102	4,397	4,472	4,452	4,467	4,503	4,503	4,473	4,513
3,852	3,923	4,317	4,395	4,452	4,421	4,450	4,421	4,450	4,473
3,771	3,923	4,280	4,409	4,435	4,452	4,480	4,421	4,450	4,503
3,787	3,885	4,023	4,318	4,405	4,421	4,480	4,450	4,473	4,513
3,859	3,885	4,181	4,372	4,452	4,452	4,467	4,421	4,450	4,503
3,859	3,949	4,181	4,405	4,437	4,437	4,450	4,450	4,450	4,547
3,859	3,910	4,102	4,294	4,386	4,421	4,421	4,450	4,503	4,555
3,897	3,992	4,158	4,262	4,306	4,345	4,362	4,378	4,426	4,503
3,928	4,045	4,212	4,262	4,306	4,345	4,363	4,397	4,450	4,513
3,999	4,102	4,198	4,221	4,293	4,293	4,345	4,397	4,473	4,521
4,154	4,198	4,243	4,293	4,306	4,345	4,381	4,450	4,503	4,521
4,102	4,194	4,194	4,236	4,283	4,345	4,450	4,473	4,513	4,521
4,151	4,194	4,194	4,236	4,293	4,344	4,480	4,513	4,521	4,536
4,102	4,194	4,194	4,236	4,306	4,421	4,503	4,521	4,569	4,607
4,102	4,149	4,194	4,194	4,323	4,480	4,555	4,569	4,569	4,612
4,055	4,102	4,147	4,194	4,306	4,449	4,521	4,536	4,569	4,612
4,010	4,102	4,147	4,194	4,283	4,426	4,521	4,569	4,569	4,616
3,967	4,010	4,102	4,149	4,236	4,330	4,426	4,492	4,536	4,616