

HOLOGRAFIA DIGITAL APLICADA NA ANÁLISE DE DESLOCAMENTOS EM CONDIÇÕES SUBMERSAS

José Luis Valin Rivera ⁽¹⁾, Jorge Ricardo Pérez ⁽²⁾, Francisco Palacios ⁽²⁾

⁽¹⁾ Faculdade de Engenharia Mecânica, Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”, CP 19390, AP 6028, Habana, Cuba. Professor Visitante da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Amazonas (EST/UEA), Brasil.

⁽²⁾ Faculdade de Ciências Naturais, Universidade de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba.

RESUMO

Neste trabalho descreve-se a montagem de uma instalação experimental para o registro de hologramas digitais em CCD. A reconstrução da imagem holográfica é realizada numericamente através do cálculo do integral de difração de Fresnel-Kirchhoff. Um código numérico, designado por HOLODIG, foi programado para este efeito em MATLAB 6.0. Este código foi testado com padrões de franjas de interferência simulados e com hologramas digitais obtidos em “contouring” realizado com duplo comprimento de onda. São apresentados como exemplos de aplicação do método, a determinação do deslocamento de uma barra de aço de secção quadrada, ensaiada no ar, e de uma chapa de Alumínio, ensaiada no ar e submersa em água. Os valores experimentais obtidos para o deslocamento apresentam boa concordância com os valores teóricos. Com a chapa de alumínio submersa na água a magnitude do deslocamento se incrementa proporcionalmente ao índice de refração da água como era de se esperar.

Palavras chave: Holografia digital, CCD, interferometria holográfica, desmodulação.

1. INTRODUÇÃO

A principal característica da holografia, ou seja, a sua capacidade para gerar uma imagem tridimensional finamente detalhada que mantém a paralaxe, a perspectiva e o contraste do objecto original, tem feito desta técnica uma ferramenta poderosa para a avaliação dimensional de corpos. As técnicas de interferometria holográfica utilizam a correlação entre frentes de onda, em que pelo menos uma delas provém de um holograma, para realizar medições de elevada resolução.

Na interferometria holográfica convencional, interferem dois campos ondulatórios (frentes de onda) coerentes, os quais são reflectidos em dois estados

diferentes da superfície de um objecto. Esta interferência é obtida, por exemplo, em holografia de dupla exposição, mediante o registro de ambos os campos ondulatórios numa só chapa holográfica. Se a chapa holográfica revelada, for iluminada com uma onda similar à onda de referência utilizada no processo de registro, forma-se um interferograma.

No registro holográfico a fase da interferência não pode ser registrada directamente pois todos os detectores sensíveis à luz, como são, por exemplo, as chapas fotossensíveis e as câmaras de vídeo, apenas são sensíveis à intensidade das ondas luminosas e não à sua fase. Por

isso é a interferência entre frentes de onda coerentes que permite gravar a fase.

Os interferogramas consistem em padrões de franjas resultantes da interferência entre frentes de onda provenientes da superfície do objecto em instantes diferentes. A distribuição de fase destes padrões corresponde normalmente ao campo de deslocamentos sofrido pelo objecto.

A técnica de *Phase shift* é vulgarmente utilizada na interferometria holográfica para obter os mapas de fase. Nesta técnica são registrados três ou mais interferogramas com o uso de um deslocamento de fase uniforme na onda de referência, (W. Jüptner 1978), (T. H. Kreis *et al.* 1983). A fase de interferência é depois calculada, ponto a ponto, através da distribuição de intensidades registradas.

Na holografia digital utiliza-se a forma clássica de registro, com a placa holográfica, substituída por uma matriz de CCD (*Charge-Coupled Device*). Nesta técnica holográfica o CCD registra um holograma digital e é utilizado um método numérico (L. P. Yaroslavsky *et al.* 1980) para a reconstruir a frente de onda gravada. Do processo de reconstrução resulta simultaneamente uma imagem de amplitude e uma imagem de fase, para cada holograma.

A holografia digital permite a análise numérica das frentes de ondas registradas sem necessidade da sua reconstrução física por via óptica, podendo ser utilizada para comparar duas ou mais frentes de ondas (interferometria holográfica digital), (U. Schnars 1994), (G. Pedrini *et al.* 1995), (G. Pedrini *et al.* 1997), (G. Pedrini *et al.* 1998), (P. Gren *et al.* 1998).

Como nesta técnica existe uma portadora espacial nas franjas primárias é possível calcular a distribuição de fase de cada um dos hologramas. Da correlação de dois hologramas registrados para duas situações distintas do objecto obtém-se facilmente a distribuição de fase do interferograma. Os mapas de fase obtidos variam entre $-\pi$ e $+\pi$ e permitem uma análise quantitativa do

deslocamento do objecto. Para obter mapas de fase contínuos é necessário eliminar as discontinuidades resultantes do processo de cálculo recorrendo a uma operação conhecida, na literatura internacional, como *unwrapping* da fase.

2. HOLOGRAFIA DIGITAL

Diferentemente da holografia convencional, na qual os dados de fase têm de ser obtidos a partir de várias medições de intensidade, a reconstrução numérica da holografia digital permite aceder directamente à fase módulo 2π 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 obtidos de um objecto também podem ser gravados com diferentes comprimentos de ondas. Isto é de interesse particular para as técnicas de múltiplos comprimentos de ondas que são utilizadas para *contouring*. No caso da holografia digital submersa podem registar-se hologramas de uma superfície submersa e após remoção da água. Em ambos os casos a correlação entre hologramas conduz a um conjunto de franjas de contorno do objecto.

2.1. Reconstrução numérica de hologramas digitais

A imagem real de um objecto pode ser reconstruída numericamente a partir de um holograma amostrado digitalmente com uma câmara CCD a partir do cálculo da difracção da onda reconstrutora na micro estrutura do holograma. A transformada de Fresnel descreve esta difracção com uma aproximação razoável. Na literatura, isto foi apresentado por (Schnars 1994), (Schnars e Pomárico *et al.* 1995). Outros trabalhos reflectem a tendência cada vez mais crescente na utilização da holografia digital, (M. Jacquot *et al.* 2001), (S. De Nicola *et al.* 2001).

A geometria para a descrição da holografia de Fresnel é mostrada na figura 1. Dado um objecto de superfície difusa iluminado por radiação coerente o campo

ondulatório reflectido por ele, é descrito por $b(x, y)$ no plano (x, y) , o holograma (e o CCD) estão localizados no plano (ξ, η) a uma distância d do objecto e a imagem real reconstruída está no plano (x', y') , a qual, por sua vez, está a uma distância d' do plano do holograma.

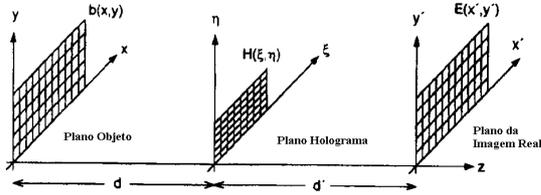


Fig 1. Geometria de Reconstrução para a Holografia de Fourier sem Lentes.

Para o caso do feixe de referência plano, a distribuição de amplitudes do campo ondulatório no plano da imagem real é dada, segundo (Schnars 1994), por:

$$b'(x, y) = \frac{ia}{\lambda d} \exp\left[-i\frac{\pi}{\lambda d}(x^2 + y^2)\right] \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} t(\xi, \eta) \exp\left[-i\frac{\pi}{\lambda d}(\xi^2 + \eta^2)\right] \times \exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda d}(x\xi + y\eta)\right] dx dy \quad (1)$$

e para o feixe de referência esférico, a distribuição de amplitudes do campo ondulatório no plano da imagem real, será obtido por:

$$r(\xi, \eta) = \frac{e^{\frac{i2\pi d}{\lambda}}}{i\lambda d} \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda d}(\xi^2 + \eta^2)\right] \quad (2)$$

considerando a sua expressão totalmente discretizada, e dada por:

$$b'(x, y) = \frac{e^{\frac{i2\pi d}{\lambda}}}{i\lambda d} \exp\left[-i\frac{\pi}{\lambda d}(m^2\Delta\xi^2 + n^2\Delta\eta^2)\right] \times F_{\lambda d}[h(\xi, \eta)] \quad (3)$$

Nesta expressão $\Delta\xi$ - é a dimensão do pixel correspondente ao eixo x da câmara (plano do holograma); $\Delta\eta$ - dimensão do pixel da câmara correspondente ao eixo y; $b'(x, y)$ - campo ondulatório complexo, no plano da imagem real; $r(\xi, \eta)$ - é a onda reconstutora de referência no plano do holograma; λ - é o comprimento de onda; $F_{\lambda d}$ - indica a

transformada de Fourier bidimensional, modificada pelo factor $1/(\lambda d)$.

A distribuição do campo ondulatório calculado pela equação discreta (3), considera as dimensões dos pixels no plano do holograma $\Delta\xi$ e $\Delta\eta$ (correspondentes ao CCD). No plano da imagem reconstruída, o tamanho dos pixels é relacionado com os do plano do holograma mediante a equação 4.

$$\Delta x = \frac{\lambda d}{N\Delta\xi} \quad \Delta y = \frac{\lambda d}{M\Delta\eta} \quad (4)$$

onde:

N - número de pixels segundo a direcção do eixo x da câmara CCD;

M - número de pixels correspondentes ao eixo y da câmara CCD.

Finalmente, o cálculo da intensidade do campo ondulatório correspondente ao objecto, é dado por:

$$I(x, y) = |b'(x, y)|^2 = Re^2[b'(x, y)] + Im^2[b'(x, y)] \quad (5)$$

onde:

Re - parte real de $b'(x, y)$;

Im - parte imaginária de $b'(x, y)$.

O valor da fase correspondente a cada pixel da imagem pode calcular-se como segue:

$$\Phi(x, y) = \arctg \frac{Im[b'(x, y)]}{Re[b'(x, y)]},$$

$$\text{se } Re[b'(x, y)] > 0 \quad (6)$$

$$\Phi(x, y) = \arctg \frac{Im[b'(x, y)]}{Re[b'(x, y)]} + \pi \operatorname{sgn}[Im[b'(x, y)]]$$

$$\text{se } Re[b'(x, y)] < 0 \quad (7)$$

$$-\pi \leq \Phi(x, y) \leq \pi \quad (8)$$

2.2. Algoritmo para a desmodulação

Muitas técnicas em interferometria geram um interferograma bidimensional. O *software* para a análise de interferogramas opera sobre imagens que contém amostras

discretizadas da distribuição espacial da intensidade. A exactidão da medida está limitada pela discretização da intensidade, pela não linearidade do detector e por outros tipos de ruídos ópticos e electrónicos.

Na análise de franjas, podem utilizar-se técnicas baseadas no cálculo de transformadas de Fourier (FFT) que permitem obter um mapa de fase a partir de um só interferograma. A distribuição de fase aparece "modulada" e é geralmente representada de forma normalizada usando uma escala de níveis de cinza para representar os valores de fase entre $-\pi$ e $+\pi$ ou entre zero e 2π radianos. Esta modulação resulta do fato de no processo de cálculo da fase estar envolvida uma função $arctan()$ que faz com que a fase varie no intervalo de $[-\pi, +\pi]$. O mapa de fase fica assim modulado nesse intervalo pelo que a obtenção de uma distribuição contínua implica um processo conhecido por desmodulação da fase, (*unwrapping*).

Ao longo dos últimos anos têm sido desenvolvidas várias técnicas para a desmodulação da fase imunes ao ruído, (Denis C. Ghiglia *et al.* 1987). Estes autores propuseram um novo método que designaram por "*Cellular-automata*" que permite obter dados de fase contínuos em n dimensões e de uma forma independente da trajectória. Porém, esta a técnica requer um grande número de iterações para convergir e é pouco eficiente do ponto de vista computacional.

Outros algoritmos têm também sido desenvolvidos para realizar o processo de desmodulação de mapa de fases. Assim, temos, entre outros, algoritmos baseados na solução da equação de Poisson com condições de fronteiras de Neumann, algoritmos baseados no método dos mínimos quadrados e também os algoritmos de (Pierre Soille 2000), que usa técnicas de processamento de imagens morfológicas.

(Goldstein *et al.* 1988) e (Huntley *et al.* 1989), tem descrito algoritmos baseados na hipótese de que o campo de fase varia contínua e levemente, e seu valor é uma

função do ponto correspondente ao campo avaliado, pelo que o processo da obtenção da fase real é independente à trajectória assumida no processo de desmodulação.

2.3. Método do "short branch"

Neste trabalho, para realizar o cálculo da desmodulação emprega-se o método proposto por Goldstein e Huntley. Estes autores marcam cada descontinuidade no primeiro pixel dos quatro que a determinam. Neste trabalho este método é ligeiramente modificado ao incluir mais um pixel na direcção do "short branch" (linha de pontos mais claros da figura 2). É considerada uma matriz G com valor 1 nos outros dois pontos que conformam a descontinuidade.

A determinação dos cortes é efectuada da seguinte forma. Na figura 2.2, seja $P(x, y)$ um ponto onde $S = +1$, ponto no qual se encontra uma descontinuidade ou resíduo inicial. A partir deste ponto busca-se outra descontinuidade de sinal contrário; seja $P(x_1, y_1)$, onde $S = -1$, o ponto encontrado com sinal contrário. Seja V a matriz que contém os pontos de corte verticais e H a matriz que contém os pontos de corte horizontais. Desta maneira, marca-se primeiramente as V (na direcção vertical) e as H correspondentes na direcção horizontal, critério este unicamente assumido na execução deste trabalho, na falta de referências da literatura consultada.

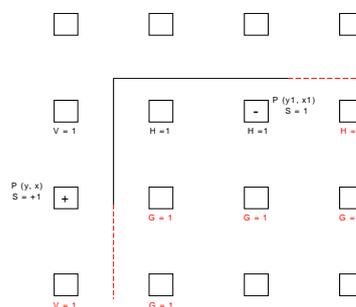


Fig .2.- Esquema representativo do traçado dos cortes.

Para o traçado dos cortes, foram estabelecidas condições, das quais só duas aparecem mostradas na literatura consultada. Em dependência das posições

relativas do ponto de descontinuidade inicial $P(x, y)$ e da posição do ponto encontrado $P(x_1, y_1)$. A matriz dos cortes verticais é denotada como $V(y,x)$ e a matriz dos cortes horizontais como $H(y,x)$. Também, y' e x' , são considerados índices que mostram o intervalo de variação das suas respectivas variáveis. Os pontos das matrizes V e H consideram primeiro a variável y e depois a x , diferentemente da geometria cartesiana comum, devido ao fato de que esta é a maneira como é processado no MATLAB 6.0

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

3.1. Sistema de cômputo "HOLODIG"

Actualmente no mercado, é possível adquirir programas de processamento de imagem como o Optimas da Media Cybernetic, porem os mesmos se caracterizam por ser gerais, não estando preparados para serem aplicados na reconstrução de imagens holográficas por métodos digitais. Além disso, os mesmos carecem de um algoritmo de desmodulação capaz de desmodular e integrar as fases tal como se requer nas aplicações da Holografia digital. Existem grupos especializados que dispõem dos seus próprios sistemas, mas, não são fáceis de obter. Por isto, como nosso grupo iniciou seu trabalho neste campo da holografia digital, foi desenvolvido um sistema capaz de resolver os problemas apresentados, o Sistema de Cômputo "HOLODIG".

Este Sistema é suportado pela versão 6.0 do MATLAB. Neste, é programado o processo de reconstrução digital da imagem holográfica, incluindo:

1. Reconstrução da imagem de intensidades;
2. Reconstrução do interferograma de intensidades e de fase correspondente ao deslocamento de um corpo;
3. Reconstrução do interferograma de fases e das curvas de contorno correspondentes ao método de contorno de dois comprimentos de onda,

objectivando a determinação da forma do objecto;

4. Processo de desmodulação e integração da fase;
5. Representação 3D do deslocamento e da forma do objecto, considerando as dimensões do pixel da câmara (CCD) e do pixel no plano da imagem.

3.2. Validação mediante simulação do processo de desmodulação

O Sistema de Cômputo desenvolvido foi concebido para a execução de dois conjuntos de cálculos principais, apesar de não ser compartilhado desta maneira. O primeiro deste conjunto de cálculos refere-se à obtenção dos valores das intensidades e das fases correspondentes ao campo ondulatório reconstruído do objecto, assim como os seus respectivos interferogramas. O segundo conjunto de cálculos executa o processo de desmodulação ou integração do mapa de fase.

Como sabemos que a obtenção da imagem de fase depende da correcta execução do processo de desmodulação, iniciamos a comprovação do Sistema de Cômputo justamente por esta face final.

Para gerar o interferograma de fase foi utilizada a técnica introduzida por (A. Spik 1991), onde o campo de fase corresponde a uma função de tipo Gaussiana, gerada de acordo a equação $\phi(x, y) = a \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2W}\right)$,

onde $a = 30$ e $W = 600$. A estes valores da fase adiciona-se um ruído distribuído normalmente que varia no intervalo $(-\pi, +\pi)$ radianos, o mesmo no qual varia o ruído na holografia digital. Este ruído é gerado aleatoriamente pelo MATLAB. Os valores de fase levam-se a um interferograma com descontinuidades geradas pela a equação, $\phi_w(x, y) = b \arctan\left(\frac{\sin[\phi(x, y)]}{\cos[\phi(x, y)]}\right) + c$, onde $b = 127/\pi$ e $c = 127$, enchendo a faixa de 8-bit. Os resultados obtidos mostram-se na continuação:

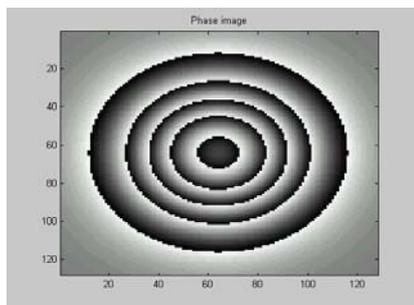


Fig 3 - Mapa de fase simulado

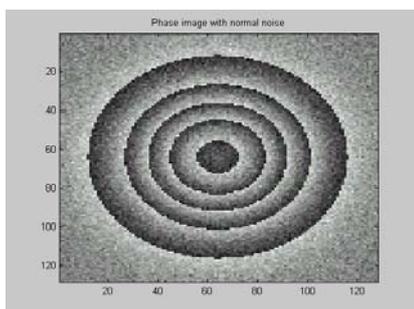


Fig. 4.- Mapa de fase com ruído adicionado

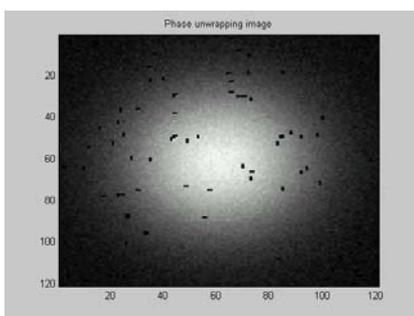


Fig. 5.- Mapa de fase com desmodulação

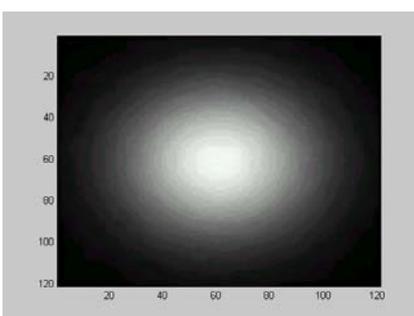


Fig 6 - Mapa de fase com desmodulação e filtrado

3.3. Avaliação do deslocamento de uma barra de aço engastada

A captura dos hologramas para a aplicação do método da holografia digital, na análise de deslocamento, realiza-se utilizando o arranjo experimental mostrado na figura 7 (esquema simplificado). Neste arranjo, o feixe do laser se divide, mediante o divisor de feixe, em raio iluminador e raio de referência, sendo este último um feixe

plano, devido à utilização da lente # 2. Por esta razão, será necessário realizar no Sistema de Cômputo o cálculo da correcção correspondente ao termo esférico ou termo de Fresnel - Kirchoff.

Desta mesma forma, o feixe iluminador é convertido em paralelo com a utilização da lente # 2. O padrão de interferência do feixe objecto e do feixe de referência (holograma) é registrado em forma digital no sensor da câmara CCD, sendo este transferido ao computador para seu processamento posterior. Para conseguir os valores de deslocamentos que serão mostrados, utilizou-se, um micrómetro da marca MITUTOYO, com resolução de 0,01 mm (10 µm).

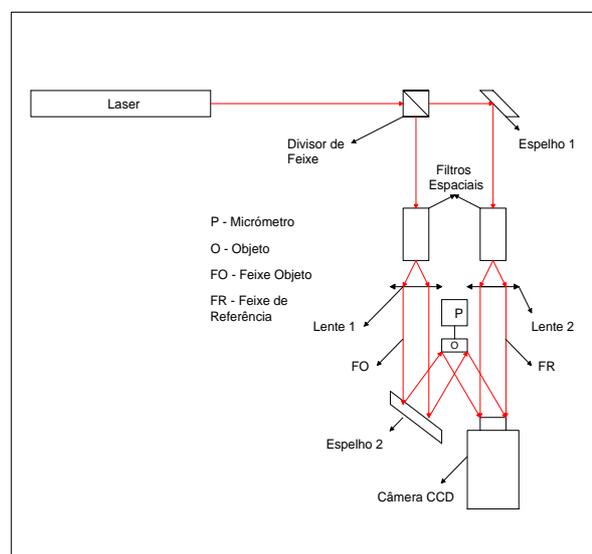


Fig 7 - Arranjo holográfico utilizado na aplicação da holografia digital.

Realizaram-se as capturas no estado não deslocado e, mediante o accionamento do micrómetro, o extremo livre da barra se desloca em ralação à posição inicial, realizando-se novamente a captura do holograma.

Mediante o algoritmo de cálculo implementado no Sistema de Cômputo HOLODIG, calculam-se os mapas de fases correspondentes aos respectivos estados e a diferença de fase $\Delta\phi = \phi_{\text{final}} - \phi_{\text{inic}}$, a qual, depois de filtrada com filtro digital de 3 x 3, conduz ao interferograma de fase, o qual é mostrado na figura 8 correspondente ao

deslocamento de 30 μm . Deve referir-se que apenas parte da placa é mostrada.

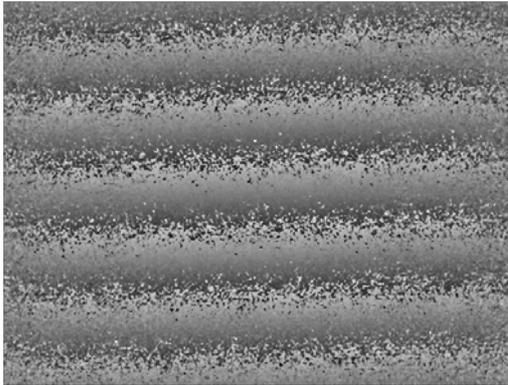


Fig 8 - Interferograma de fase para valor do deslocamento de 30 μm .

O processo de desmodulação da fase correspondente a este interferograma, da figura 8, conduz ao mapa de fase desmodulado, mostrado na figura 9.

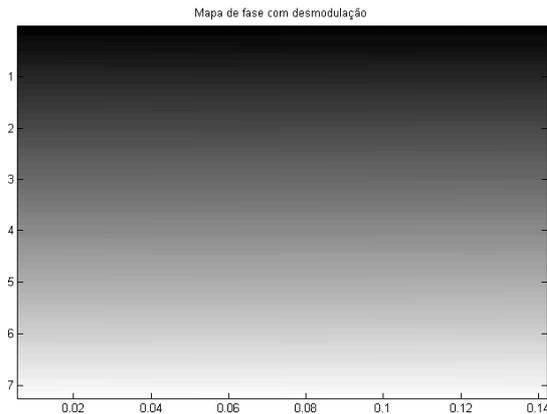


Fig 9 - Mapa de fase com desmodulação (vista 2D) correspondente ao Interferograma de fase, para valor do deslocamento de 30 μm .

Com estes valores da diferença de fase $\Delta\phi$, mostrados ponto a ponto para uma zona do objecto na figura 9, calcula-se o deslocamento (D) na direcção normal à superfície do objecto, dado segundo (Seebacher 1998), dado pela seguinte equação:

$$D = \frac{\lambda}{4\pi \cos \frac{\alpha}{2}} \Delta\phi \quad (9)$$

onde $\Delta\phi$ é a diferença de fase desmodulada e α o ângulo entre a direcção de iluminação

do objecto e de captura do holograma. Uma representação tridimensional de D é mostrada na figura 10, correspondente também ao conjunto de dados analisados para 30 μm de deslocamento.

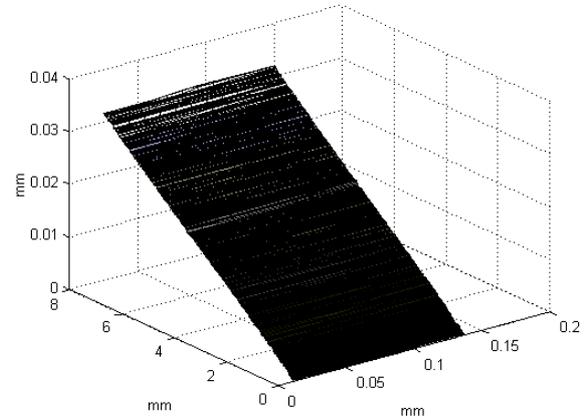


Fig 10 - Representação tridimensional de D, correspondente ao valor de deslocamento aplicado, 30 μm .

Também foram obtidos dados aplicando outros valores de deslocamentos ao extremo superior da barra de aço. Estes foram: para 10 μm e com incremento de 10 μm até o valor de 160 μm . Na tabela 1, apresentam-se as magnitudes dos deslocamentos aplicados em μm , o número de descontinuidades calculadas em uma matriz de 480 x 21 pixel (1080 pixels), positivas e negativas (N), com filtragem e a relação do número de descontinuidades dividido pelo número total de pixels, parâmetro este que é chamado na literatura de número de descontinuidades por pixel (DPP). Pode-se ver que este valor varia entre 0,02 e 0,046 para os dados obtidos nas medições que foram realizadas.

Tabela 1 - Descontinuidades por pixel correspondentes aos mapas de fase processados.

Deslocamento (μm)	N (descontinuidades)	DPP
10	468	0,046
30	308	0,030
40	334	0,033
50	204	0,020
100	412	0,041
150	341	0,034

Utilizando a filtragem 3x3, para os mapas de fase com valor de N menor que

0,033; foi possível aplicar o processo de desmodulação de maneira satisfatória. Nestes, o número de descontinuidades é tal que o algoritmo de desmodulação pode propagar-se sem interrupção até mostrar o resultado final. Nos casos restantes (com DPP maior a 0.033), o algoritmo de desmodulação não consegue chegar ao resultado final da integração, isto devido ao grande número de “*short branches*” que se interpõem na sua trajectória. Por isto, foi aplicada uma nova técnica de filtrado anisotrópico, (Bernd Gutmann *et al.* 1999), a qual consiste em filtrar por separado a parte co-seno, ou real e a parte seno, ou imaginária da fase. Este filtrado se faz anisotrópico permitindo que a fortaleza do filtro (utilizado no trabalho um filtro de 3 x 7), seja desigual nas direcções horizontais e verticais. Este processo de filtrado anisotrópico pode-se realizar o número de vezes que estarão em dependência do ruído que possua o interferograma. Para os dados deste trabalho, na maioria dos interferogramas processados, tem sido suficiente a aplicação de somente um ciclo de filtrado para cada caso.

3.4 Avaliação do deslocamento de uma chapa de alumínio engastada: no ar e submersa na água

A avaliação do deslocamento mudando o meio onde se encontra a chapa de alumínio engastada com dimensões de 120 x 6 x 1,5 mm, tem permitido mostrar uma aplicação do método da Holografia Digital desenvolvido neste trabalho.

Para a captura dos hologramas tanto no ar como na água, foi utilizado um montagem experimental que se pode ver na figura 11 para esta aplicação é colocado um aquário na posição correspondente ao objecto. A distância objecto – câmara é de 240 mm e é utilizado um micrómetro da marca MITUTOYO, com exactidão de 0,001 mm (1 μ m) para impor deslocamentos. Para a análise em condições submersas, é colocada água corrente.

A chapa de alumínio ensaiada foi colocada no interior do aquário. Para

eliminar as influências das paredes do aquário sobre os resultados obtidos na água, as medições realizadas no ar foram feitas mantendo a chapa no interior do aquário. A aplicação do deslocamento foi feita segundo o que se mostra na figura 12.



Fig. 11 - Montagem experimental utilizada na aplicação da holografia digital em condições submersas.



Fig. 12 - Sistema utilizado para determinação do deslocamento.

Da holografia digital em condições submersas obtiveram-se mapas de fase, dos quais foi possível obter os seguintes resultados:

1. Para o conjunto de valores obtidos com o objecto no ar; o deslocamento coincide com o aplicado experimentalmente, segundo é mostrado na tabela 2;
2. Para o objecto submerso, o valor do deslocamento aplicado é diferente do resultado obtido experimentalmente. Este facto resulta da influência do índice de refração da água e é mostrado na tabela 2;
3. Com o objecto submerso são obtidas mais franjas devido à amplificação do

deslocamento pelo aumento do índice de refração;

4. Visando investigar o efeito do índice de refração da água nos resultados obtidos foi medida a distancia entre as franjas para as condições de ar e água respectivamente.

A contagem das franjas e a medição da distância entre estas para cada interferograma, foi realizada utilizando o software OPTIMAS 6.2.

Tabela 2 - Resultados do conjunto de dados processados no ar e na água respectivamente.

Desl Aplicado (μm)	Desl Obtido Ar (μm)	Desl Obtido Água (μm)	No de franjas Ar	No de franjas Água	Separ. entre franjas Ar (mm)	Separ. entre franjas Água (mm)	Rel sep entre Água e ar (mm)
15	15	17	2	3	4,842	4,016	1,205
20	20	26	3	4	3,293	2,914	1,130
25	25	35	5	7	2,667	1,825	1,461
30	30	40	5	8	2,494	1,576	1,582
35	35	48	7	9	1,714	1,399	1,225
40	40	52	8	10	1,486	1,173	1,266
45	45	60	9	11	1,375	1,119	1,229

Em geral, os resultados obtidos mostram concordância entre o deslocamento aplicado e o valor obtido experimentalmente, permitindo desta forma validar o Sistema de Processamento de imagem desenvolvido.

Segundo os resultados obtidos, as magnitudes dos deslocamentos determinados por esta técnica, com a chapa de alumínio submersa na água, aumentam proporcionalmente ao índice de refração da água (1,33). Deve destacar-se que com esta técnica as medições são realizadas de forma simultânea em toda a superfície da chapa, o que representa uma grande vantagem do método. Nota-se também que a influencia das paredes do aquário não interfere nos resultados da magnitude do deslocamento obtido.

4. CONCLUSÕES

Deste trabalho podem inferir-se as seguintes conclusões:

Foi possível realizar uma montagem experimental de holografia digital com a

qual forma obtidos hologramas de qualidade suficiente para calcular os deslocamentos em objectos. Foram obtidos dados para a avaliação do deslocamento de uma barra de aço encastrada e de uma chapa de alumínio, deslocamentos medidos no ar e na água.

Foi desenvolvido um Sistema de Processamento para a reconstrução numérica da imagem holográfica real (o qual chamamos "HOLODIG"), que permite a obtenção da imagem de intensidade (módulo do campo ondulatorio complexo), o cálculo da fase do holograma em cada ponto da imagem, a fase do interferograma e a avaliação do deslocamento. O programa foi realizado com a versão 6.0 do MATLAB e constitui, pelas suas opções, um instrumento essencial para a aplicação da Holografia Digital.

Foi implementado um algoritmo de desmodulação baseado no método "short branches" e com filtro anisotrópico de seno e co-seno, o qual demonstrou bons resultados nesta aplicação.

Os resultados experimentais da medição do deslocamento mostram concordância com os valores aplicados, garantindo a correcta operação de todo o sistema experimental e de cálculo.

Foi aplicado o método da holografia digital na avaliação do deslocamento de uma chapa de alumínio submersa na água. Foram obtidos hologramas nas condições submersas e a reconstrução numérica da imagem de fase. O deslocamento calculado apresenta concordância com os valores aplicados e o valor deste para o caso submerso resulta equivalente ao obtido no ar, somente afectado pela influência do índice de refração da água.

O desenvolvimento deste trabalho possibilita a utilização da técnica da Holografia Digital em objectos submersos. Este facto representa uma enorme contribuição no sentido da modernização dos ensaios experimentais em holografia. Esta aplicação poderá ser de grande utilidade na inspecção de estruturas submersas podendo inclusivamente ser

realizada por submersíveis não tripulados. O sistema de cálculo HOLODIG poderá ser adaptado e aplicado para outros casos de interesse.

5. AGRADECIMENTOS

Especial agradecimento à Fundação para Ciência e a Tecnologia do Ministério da Ciência e do Ensino Superior de Portugal, pelo apoio financeiro oferecido.

6. REFERÊNCIAS

- W. Jüptner, “Automatisierte Auswertung holografischer Interferogramme mit dem Zeilen-Scan-Verfahren”, Hannover, April 4-7, 1978.
- T. H. Kreis, and H. Kreitlow, “Automatic evaluation of holographic interferograms by reference beam phase shifting”, in *Industrial Applications of Laser Technology*, W. F. Fagan, ed., Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 398, 22-29 (1983).
- L. P. Yaroslavsky, N. S. Merzlyalov, “Methods of Digital Holography”, Consultant Bureau, New York, 1980.
- U. Schnars, “Direct phase determination in hologram interferometry with use of digitally recorded holograms”, *J. Opt. Soc. Am. A* 11 (1994) 2011-2015.
- G. Pedrini, Y. L. Zou, H. J. Tiziani, “Digital double pulse-holographic interferometry for vibration analysis”, *J. Mod. Opt.* 42 (1995) 367-374.
- G. Pedrini, H. J. Tiziani, Y. L. ZOU, “Digital double pulse-TV-holography”, *Opt. Laser Eng.* 26 (1997) 199-219.
- G. Pedrini, Ph. Froening, H. Fessler, H. J. Tiziani, “In-line digital-holographic interferometry”, *Appl. Opt.* 37 (26) (1998) 6262-6269.
- P. Gren, S. Schedin, X. Li, “Tomographic reconstruction of transient acoustic fields recorded by pulsed TV holography”, *Appl. Opt.* 37 (5) (1998) 834-840.
- U. Schnars and Jüptner, “Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction”, *Appl. Opt.* Vol. 33, N° 2, pp. 179 – 181, 1994.
- Pomarico J., U. Schnars, H. J. Hartmann, and Jüptner, “Digital recording and numerical reconstruction of holograms: a new method for displaying light in flight”, *Appl. Opt.* Vol. 34, N° 35, pp. 8095 – 8099, 1995.
- Máxime Jacquot, *et al.* “High resolution digital holography”. *Optics Communications* 190 (2001) 87-94.
- Sergio De Nicola *et al.* “Correct-image reconstruction in the presence of severe anamorphism by means of digital holography”. *Opt. Letters* Vol 26, No. 13, p. 974-976 (2001).
- Dennis C. Ghiglia, Gary A. Mastin, and D Louis A. Romero, “Cellular-automata method for phase unwrapping”. *J. Opt. Soc. Am.*, 4A (1987) 267-80.
- Pierre Soille, “Morphological phase unwrapping”, *Optics and lasers in Engineering* 32 (2000) 339-352.
- Goldstein, R. M., Zebker, H. A. and Werner, C. L., “Satellite radar interferometry two-dimensional phase unwrapping”. *Radio Science*, 23 (4) (1988), 713-20.
- Huntley, J. M., “Noise-immune phase unwrapping algorithm”. *Appl. Optics*, 28 (15) (1989) 3268-3270.
- A. Spik, “Investigation of the Cellular Automata Method for Phase Unwrapping”. *Optics and lasers in Engineering* 14 (1991) 25-37.
- 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).
- Bernd Gutmann And Herbert Weber. “Phase unwrapping with the branch-cut method: clustering of discontinuity sources and reverse simulated annealing”. *Appl. Optics* Vol. 38, No. 26,p. 5577-5593 (1999).