

# **Interferometría Holográfica Digital de Doble Exposición para Ensayos No Destructivos**

Digital holographic interferometry of double exposure for non destructive testing

Oscar Laiton Poveda \*

Freddy A. Monroy R. \*\*

## **RESUMEN**

La investigación presentada en este trabajo, fue realizada en el laboratorio de Óptica aplicada de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, y se desarrolla alrededor de una aplicación de la interferometría holográfica digital (IHD) de doble exposición en la medición de micro deformaciones.

Se hicieron registros holográficos digitales en configuración fuera del eje, con un montaje óptico tipo interferómetro de Mach-Zehnder, de una placa de hierro-níquel sometida a un esfuerzo mecánico, con el fin de medir su deformación por la técnica de IHD de doble exposición. De la reconstrucción numérica y posterior superposición de los hologramas del objeto antes y después de deformado se obtuvo la diferencia de fase, la cual es proporcional a la deformación producida al objeto en estudio.

## **ABSTRACT**

This paper presents a research developed in the Applied Optics laboratory of the Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, and it is based around an application of the double exposure digital holographic interferometry (DHI) for measurements of micro deformations.

We made holographic digital recording in off-axis configuration using a set-up type Mach-Zehnder interferometer of an iron-nickel plate was put under a mechanical effort, with the purpose of measure its deformation by the double exposure IHD technique. From the numerical reconstruction and the superposition of the holograms of the object, before and after its deformation, we obtained the phase difference, which is proportional to the deformation produced to the object.

*Palabras clave:* Holografía diferencia de fase Interferometría. deformación

*Key words:* Holography phase difference Interferometry deformative

*Fecha de recepción:* Marzo 20 de 2007.

*Fecha de aprobación:* Abril 16 de 2007.

\* Docente Instituto Técnico Central [olaitonp@unal.edu.co](mailto:olaitonp@unal.edu.co)

\*\* Docente Departamento de física Universidad Nacional de Colombia, Bogotá [famonroyr@unal.edu.co](mailto:famonroyr@unal.edu.co)

## **1. Introducción**

En cerca de 50 años la holografía se ha constituido en uno de los campos de investigación más productivos dentro de la óptica, desde cuando el científico Húngaro Denis Gabor publicó sus dos papers: "Un nuevo principio microscópico", en 1948 y "Microscopía por reconstrucción de frente de onda", en 1949, en los que reportó la obtención de las primeras imágenes holográficas logradas con luz visible de un arco de mercurio filtrado [1].

En los años 60 del siglo XX la aparición del primer láser disponible comercialmente dio un impulso inusitado a la holografía, al poner en manos de los investigadores fuentes de luz altamente coherentes, que permitieron producir los primeros hologramas de transmisión, registrados en placas holográficas después de un proceso de desarrollo químico parecido al que se usa en fotografía.

Al mismo tiempo en los laboratorios Bell se obtenían los primeros dispositivos CCD (Couple Charged Device) que permitieron capturar imágenes en forma digital y se comercializaron los primeros computadores con capacidad de cómputo y almacenamiento cada vez mayor, lo que favoreció el desarrollo de los trabajos de Yaroslavski y Merzlyakov en los que se estableció la teoría fundamental de la holografía digital en la década de los 80-s del siglo XX [2].

La holografía permite almacenar la información tridimensional de una imagen mediante el registro de la amplitud y la fase de una onda luminosa, permitiendo por lo tanto reconstruir la imagen tridimensional de un objeto. Un holograma óptico o convencional se obtiene al registrar en una placa holográfica el patrón de interferencia entre una onda dispersada desde el objeto y otra onda plana llamada de referencia. Cuando el holograma registrado se ilumina con un haz de luz similar al de la onda de referencia,

se puede reconstruir la imagen en forma tridimensional, con todas sus características de perspectiva y profundidad [2].

En un holograma digital se sustituye la placa holográfica por una CCD, dispositivo electrónico que tiene diferentes aplicaciones, pero que en el caso que nos interesa se usa para registrar el patrón de interferencia entre la onda objeto y la onda de referencia. Su diseño consiste en un arreglo rectangular de sensores de luz llamados pixeles donde, por efecto fotoeléctrico la luz se convierte en carga eléctrica que luego es transferida a celdas de memoria donde se hace su conversión a voltaje y finalmente se emite una señal amplificada. La información digitalizada en matrices numéricas se almacena en un computador y posteriormente, mediante el uso de la transformada de Fresnel, se reconstruye la imagen.

Entre las bondades que presenta la holografía digital frente a la holografía óptica, la primera que cabe mencionar es que se logra una importante reducción de tiempo en la obtención del holograma. La imagen en el monitor de un computador pierde la belleza de la tridimensionalidad, pero a cambio se tiene más información útil, especialmente para el investigador dedicado por ejemplo a la metrología.

Adicionalmente con el uso de la cámara CCD se supera la necesidad del procesamiento químico o físico de los medios de almacenamiento y se gana versatilidad en el procesamiento holográfico.

Si se registran dos hologramas del mismo objeto en dos estados diferentes y se superponen, al hacer su reconstrucción se podrá observar la interferencia de las dos ondas dispersadas desde el objeto en sus dos estados. Esta técnica corresponde a un campo de aplicación de la holografía conocido como interferometría holográfica de doble exposición. Existen otras formas de

interferometría como la interferometría speckle, siendo el speckle ese granulado aleatorio de puntos brillantes y oscuros que aparece sobre una superficie rugosa cuando es iluminada por una luz coherente como la de un láser, originado en las fluctuaciones al azar de la intensidad de la luz dispersada por la superficie.

Las técnicas interferométricas holográficas y de speckle se han convertido en un campo de investigación fundamental para el desarrollo de la metrología de alta precisión, debido a que han generado métodos de medición muy exactos de los cambios que se producen en una superficie rugosa cuando es sometida, por ejemplo, a un esfuerzo de tensión o de compresión o a una deformación térmica y también a que superan en muchos aspectos a los métodos de medición tradicionales, ya que eliminan la medición por contacto físico directo con el objeto a medir, permitiendo la aparición de técnicas útiles en la implementación de ensayos no destructivos (END).

Normalmente se conocen tres tipos de interferometría holográfica: de doble exposición, en tiempo real y en tiempo promedio [2]. Este trabajo se desarrolla alrededor de una aplicación de la interferometría holográfica digital de doble exposición en la medición de micro deformaciones, partiendo de los trabajos ya realizados en el grupo de óptica aplicada de la UN sede Bogotá en la línea de holografía digital, tales como: montaje experimental para el registro de hologramas digitales fuera de eje, el desarrollo teórico necesario para la implementación del software de reconstrucción de los hologramas registrados utilizando la transformada de Fresnel, los algoritmos de filtrado del orden cero y los diferentes algoritmos

de filtrado de speckle y mejoramiento de contraste[2][3][4][5].

Se hicieron registros holográficos digitales en configuración fuera del eje [2][3][4][5], de una placa metálica en diferentes estados, sometida a esfuerzo mecánico. Se hizo la reconstrucción de los hologramas, obteniendo los interferogramas correspondientes y de la superposición de los interferogramas se obtuvo información sobre las diferencias de fase de las ondas, las cuales, por medio de los mapas de fase evidenciaron la presencia de las franjas debidas a la deformación sufrida por el objeto al aplicarle el esfuerzo mecánico. Al hacer el desenvolvimiento unidimensional de los mapas de fase se obtuvieron las curvas que son proporcionales a la deformación.

## 2. Teoría Básica

Para hablar de la interferometría holográfica digital, es necesario hacer primero un recuento de los principios generales de obtención de una imagen holográfica digital.

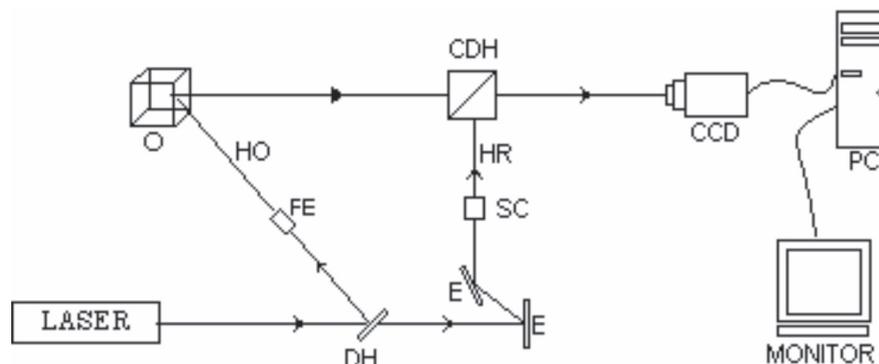
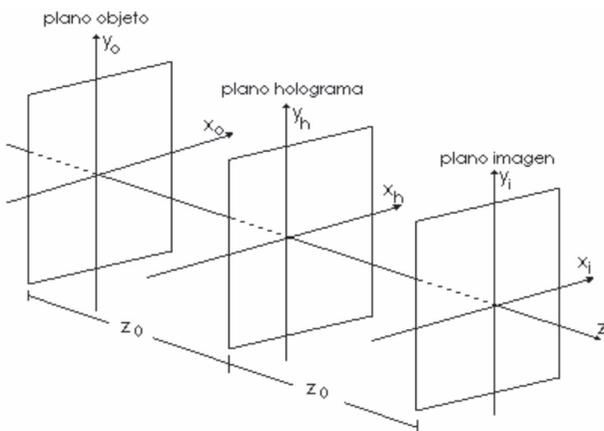


Figura 1: Esquema del montaje tipo Mach-Zehnder utilizado para el registro digital de los hologramas. DH=Divisor de haz, FE=Filtro Espacial, HO=Haz Objeto, O=Objeto, CDH=Cubo Divisor de Haz, HR=Haz de Referencia, E=Espejo, SC=Sistema de Colimación, CCD=Cámara CCD, PC=Computador.

Existen diferentes tipos de montaje con los que se puede hacer holografía digital. La figura 1 muestra el montaje usado en el desarrollo de este trabajo, conocido como interferómetro de Mach - Zehnder, en el cual se utiliza como fuente de luz coherente un láser que se divide en dos haces: HO y HR obtenidos de la misma porción del frente de onda primario, mediante un divisor de haz (DH), divisor de amplitud, el haz objeto (HO) es dispersado por un objeto (O) y el haz de referencia (HR), un haz plano, colimado que viaja directamente hasta el cubo divisor de haz (CDH), en el cual se recombinan nuevamente y son dirigidos hacia la matriz de sensores de la CCD, donde se registra el patrón de difracción y se envía al computador para su almacenamiento en forma de una matriz. Luego se reconstruye numéricamente, utilizando la transformada de Fresnel, la estructura de amplitud y fase que se obtendría en el plano imagen, suponiendo que una onda de referencia plana y uniforme incidiera sobre el holograma registrado, mostrando en el monitor una imagen similar a la que se obtendría con el frente de onda reconstruido cuando se difracta el haz de referencia a través de una rejilla con transmitancia dada por el patrón de intensidades registrado en el holograma .[1]

Un diagrama mostrando los planos de importancia en el estudio de la técnica holográfica se puede ver en la figura 2.



**Figura 2: Diagrama de los planos objeto, holograma e imagen utilizados en holografía digital.**

Sean:

$$(1) \quad E_o(x_h, y_h) = a_o(x_h, y_h)e^{i\phi_o(x_h, y_h)}$$

$$E_R(x_h, y_h) = a_R(x_h, y_h)e^{i\phi_R(x_h, y_h)}$$

las amplitudes complejas de las ondas objeto y referencia. Al interferir sobre la superficie de los elementos sensores de la CCD, la intensidad registrada será:

$$(2) \quad I(x_h, y_h) = |E_o(x_h, y_h) + E_R(x_h, y_h)|^2 = E_R E_R^* + E_o E_o^* + E_o E_R^* + E_R E_o^*$$

La amplitud de transmisión o función holograma  $h(x_h, y_h)$  cuando se usa una CCD es:

$$(3) \quad h(x_h, y_h) = AI(x_h, y_h)$$

Donde A es una constante de proporcionalidad que depende del medio de registro y que en la reconstrucción únicamente influye en el brillo de la imagen. Para obtener la reconstrucción del holograma, esta función holograma debe multiplicarse por la amplitud compleja de la onda de referencia, usada como onda de reconstrucción:

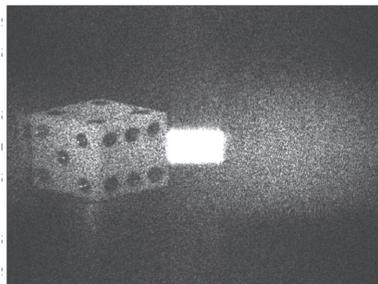
$$(4) \quad E_R(x_h, y_h) h(x_h, y_h) = M E_R(x_h, y_h) + N E_o(x_h, y_h) + P E_R^2(x_h, y_h) E_o^*(x_h, y_h)$$

Siendo M, N y P constantes. El primer término del lado derecho de la igualdad corresponde a la onda de referencia multiplicada por una constante, atravesando el holograma sin difractarse; es el denominado orden cero de difracción que se manifiesta como un cuadrado brillante en el centro del campo reconstruido, ocultando la imagen holográfica y corresponde a la porción de haz no difractada por lo que es de mayor intensidad que los demás. El segundo término, que contiene, porta la información del haz objeto y es

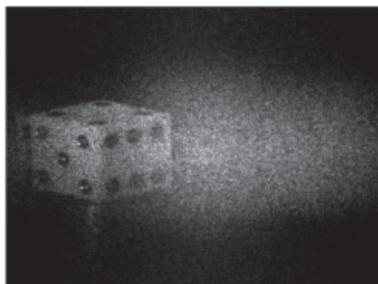
la imagen virtual de la onda objeto reconstruida y el tercer término, que contiene  $N E_o(x_h, y_h)$ , porta la información del complejo conjugado del haz objeto y es una imagen real distorsionada conjugada del objeto reconstruida y el tercer término, que contiene  $P E_R^2(x_h, y_h) E_o^*(x_h, y_h)$  porta la información del complejo conjugado del haz objeto y es una imagen real distorsionada conjugada del objeto.

En la holografía digital, la imagen reconstruida se ve afectada por un ruido característico, determinado por el patrón de speckle y la presencia del orden cero; además, en ciertos montajes holográficos, como por ejemplo en la holografía en línea, las tres imágenes: orden cero, imagen real e imagen virtual, aparecen superpuestas.

El montaje en configuración fuera del eje tiene la ventaja de mostrar estas tres imágenes separadas (figura 3), facilitando el filtrado digital del orden cero y la imagen virtual, aunque al hacerlo se produce una pérdida de calidad en la imagen obtenida.



**Figura 3:** Imagen de un holograma reconstruido. A la izquierda sin ningún tipo de filtro, mostrando los tres ordenes de difracción, a la derecha con el orden cero de difracción filtrado y con un filtro promedio para el speckle.



Un método para filtrar el orden cero consiste en promediar la intensidad de todos los pixeles de la matriz del holograma y luego sustraer esta intensidad promedio del holograma, con el inevitable deterioro de la imagen obtenida; otro método empleado aplica un filtro de frecuencias pasa alto de bajo corte, que igualmente puede a veces ser muy agresivo y dañar la imagen, siendo necesario hacer un compromiso entre desaparecer completamente el orden cero y mantener una imagen de buena calidad [4].

Una vez obtenido el holograma, la reconstrucción se logra haciendo que un haz de luz (haz de referencia) se difracte al pasar a través del holograma. El campo obtenido en el plano de observación, plano imagen, en el esquema de la figura 2, está dado por la integral de Fresnel - Kirchoff [2].

(5)

$$E(x_i, y_i) = \frac{i}{\lambda} \iint_{-\infty}^{\infty} h(x_h, y_h) E_R(x_h, y_h) \frac{e^{-i\frac{2\pi}{\lambda} \rho}}{\rho} dx_h dy_h$$

Del mismo esquema resulta natural que el holograma puede ser iluminado con el conjugado del haz de referencia, obteniendo en ese caso una imagen real dada por [2]:

(6)

$$E(x_o, y_o) = \frac{i}{\lambda} \iint_{-\infty}^{\infty} h(x_h, y_h) E_R^*(x_h, y_h) \frac{e^{-i\frac{2\pi}{\lambda} \rho}}{\rho} dx_h dy_h$$

Esta es la ecuación básica para la reconstrucción numérica de un holograma, aunque usualmente se transforma en la ecuación 7, llamada la aproximación de Fresnel o transformación de Fresnel; si los valores  $x_h, y_h, x_o$ , son pequeños comparados con la distancia  $Z_0$  entre el plano holograma y el plano imagen:

(7)

$$E(x_o, y_o) = \frac{i}{\lambda z_o} e^{-i\frac{2\pi}{\lambda} z_o} e^{-i\frac{\pi}{\lambda z_o}(x_o^2 + y_o^2)} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x_h, y_h) E_R^*(x_h, y_h) e^{-\frac{i\pi}{\lambda z_o}(x_h^2 + y_h^2)} e^{i\frac{2\pi}{\lambda z_o}(x_h x_o + y_h y_o)} dx_h dy_h$$

La intensidad y la fase se calculan, respectivamente, mediante:

(8)  $I(x_o, y_o) = |E(x_o, y_o)|^2$

(9)  $\varphi(x_o, y_o) = \arctan\left(\frac{\Im[E(x_o, y_o)]}{\Re[E(x_o, y_o)]}\right)$

La reconstrucción numérica, el filtrado digital del orden cero y el filtrado del speckle de los hologramas obtenidos en este trabajo se implementaron en la plataforma de MATLAB® bajo WINDOWS y, como ya se mencionó, son el resultado de trabajos anteriores desarrollados en el grupo de óptica aplicada de la Universidad Nacional de la sede Bogotá y de la Sede Medellín y que han originado presentaciones en eventos nacionales como el IX Encuentro Nacional de Óptica en la Universidad EAFIT y Nacional de Medellín y el XXI Congreso Nacional de Física en la Universidad del Atlántico de Barranquilla[3][4][5][6].

### 3. Interferometría Holográfica Digital De Doble Exposición

El frente de onda reconstruido digitalmente es completamente equivalente al de la onda original, puesto que se almacena la información tanto de la amplitud como de la fase. Haciendo uso de esta propiedad se registran dos estados del objeto, un estado inicial relajado y otro estado del mismo objeto después de someterlo a algún tipo de cambio, como por ejemplo una deformación mecánica o térmica.

Si las amplitudes complejas de las ondas objeto y referencia en cada uno de los estados son:

$$E_{o1}(x_h, y_h) = a_o(x_h, y_h) e^{i\varphi_o(x_h, y_h)} \quad E_R(x_h, y_h) = a_R(x_h, y_h) e^{i\varphi_R(x_h, y_h)}$$

$$E_{o2}(x_h, y_h) = a_o(x_h, y_h) e^{i\varphi'_o(x_h, y_h)} \quad E_R(x_h, y_h) = a_R(x_h, y_h) e^{i\varphi_R(x_h, y_h)}$$

Y recordando que la intensidad se puede calcular según la ecuación (2), para este caso se obtiene:

$$I_1 = a_o^2 + a_R^2 + 2a_o a_R \cos \Delta\varphi$$

$$I_2 = a_o^2 + a_R^2 + 2a_o a_R \cos \Delta\varphi'$$

Donde  $\Delta\varphi = \varphi_R - \varphi_o$  y  $\Delta\varphi' = \varphi_R - \varphi'_o$  son las diferencias de fase en los dos estados, con  $\varphi'_o$  la fase del haz objeto en el segundo estado.

Al superponer los dos hologramas, la intensidad obtenida es de la forma:

$$(12) \quad I(x_i, y_i) = A(x_i, y_i) \cos \Delta\phi$$

La cual se puede suponer asociado a un campo de la forma  $E(x_i, y_i)$ , donde  $\phi$  es una fase directamente relacionada con la diferencia de fase de la onda objeto entre los dos estados, y describe la componente de la deformación sufrida por la placa en la dirección del vector de sensibilidad, el cual se define para la geometría del montaje holográfico, como paralelo a la dirección de propagación del haz de luz y da la dirección en la cual el arreglo experimental permite máxima sensibilidad. De otra parte la ecuación (12) describe un interferograma con franjas moduladas por una función coseno.

Como la distribución de intensidad correspondiente a la estructura compleja  $E(x_i, y_i)$  está determinada por:

$$(13) \quad I(x_i, y_i) = |E(x_i, y_i)|^2 = \Re[E(x_i, y_i)]^2 + \Im[E(x_i, y_i)]^2$$

Su fase estará dada por:

$$(14) \quad \Delta\phi(x_i, y_i) = \arctan\left(\frac{\Im[E(x_i, y_i)]}{\Re[E(x_i, y_i)]}\right)$$

Según la última ecuación, la fase podrá tomar valores en el intervalo  $[-\pi, \pi]$  conformando un mapa de fase módulo  $2\pi$ .

Se dice que la fase de la interferencia esta "envuelta", debido a que se encuentra indefinida a múltiplos aditivos de  $2\pi$  y por lo tanto es necesario "desenvolverla" para que la distribución de fase se haga continua. Se conocen diferentes algoritmos de desenvolvimiento de fase (unwrapping phase) unidimensional, disponibles en paquetes comerciales como MATLAB®.

Por lo tanto la diferencia de fase entre el objeto deformado y el objeto no deformado se calcula de la siguiente forma:

$$(15) \quad \Delta\phi = \begin{cases} \Delta\phi - \Delta\phi' & \text{si } \Delta\phi \geq \Delta\phi' \\ \Delta\phi - \Delta\phi' + 2\pi & \text{si } \Delta\phi < \Delta\phi' \end{cases}$$

En el caso general, un objeto después de sometido a un esfuerzo puede haber sufrido una deformación tridimensional; restringiendo al caso práctico, cuando solo interesa la deformación perpendicular a una superficie, deformación fuera del plano, esta deformación puede medirse usando un montaje apropiado con direcciones de observación e iluminación paralelas. El desplazamiento axial del objeto entonces se puede calcular con la ecuación:

$$(16) \quad d = \Delta\phi \frac{\lambda}{4\pi}$$

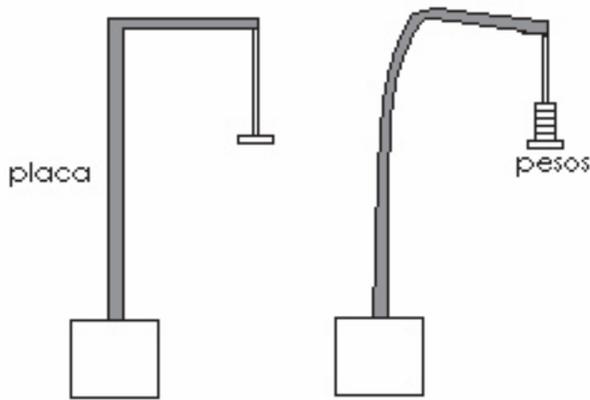
Donde  $\Delta\phi$  es la diferencia de fase y  $\lambda$  es la longitud de onda de la iluminación; cuando  $\Delta\phi = 2\pi$  la deformación será de  $\frac{\lambda}{2}$ .

## 4. Montaje experimental y procedimiento

El montaje óptico para el registro digital de los hologramas es una configuración tipo Mach-Zehnder [6] (figura 1), se utilizó como fuente de luz coherente un láser de He-Ne (632.8 nm) de 8 mW de potencia que iluminó el interferómetro; los registros se realizaron a una distancia de 1.0 m, (distancia obtenida experimentalmente para la reconstrucción con mejor enfoque de acuerdo al tamaño del objeto, tamaño del elemento sensor y ángulo entre el eje óptico y el haz objeto)[5]. Como medio de registro se utilizó una cámara CCD Oscar OS225-II, con  $N_x \times N_y = 768 \times 576$  pixeles, cada uno con un área de  $\Delta x \times \Delta y = 9.5 \mu\text{m}$

X 9.5  $\mu\text{m}$ , conectada a una tarjeta de captura K-World instalada en un computador. La señal de salida tiene una escala de 256 niveles de gris por pixel y el almacenamiento y procesamiento de las imágenes se hizo en un computador con procesador Pentium IV de 3.0 GHz, con 512 MB de memoria RAM.

El objeto de estudio fue una lámina de hierro-níquel, rectangular de 2 cm X 3 cm X 0,2 cm, firmemente anclada en uno de sus extremos (figura 4) la cual fue sometida a un esfuerzo mecánico de deformación mediante la carga de 25 pesos sucesivos que se le suspendieron en el extremo libre, cada uno de masa  $0.33 \pm 0.01\text{g}$ , el esquema del montaje usado para deformar la placa se ve en la siguiente figura.



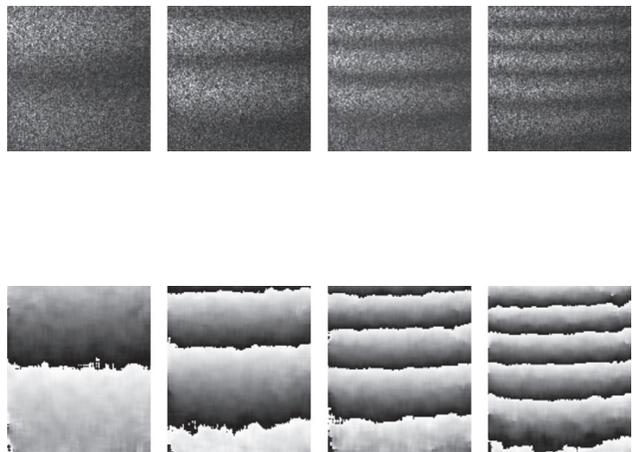
**Figura 4: Esquema del perfil de la placa antes y después del esfuerzo aplicado.**

Inicialmente se hizo un registro de la placa sin deformación y luego se la sometió a esfuerzos mecánicos sucesivos y se hicieron nuevos registros, obteniendo los hologramas de la lámina en cada estado mecánico de deformación. La placa sufrió desplazamientos axiales determinados por el aumento progresivo del esfuerzo mecánico aplicado. La reconstrucción de cada holograma se hizo utilizando la transformación de Fresnel (ecuación (7)) en forma discreta [2].

## 5. Resultados

Al seguir el procedimiento descrito anteriormente, se obtuvieron los interferogramas que muestran las franjas de deformación, resultado de la comparación de cada estado con el estado inicial (figura 5). Al calcular la diferencia de fase entre las fases de los hologramas deformados y sin deformar, se obtiene la diferencia de fase módulo  $2\pi$ , la cual es proporcional a la deformación mecánica sufrida por el objeto.

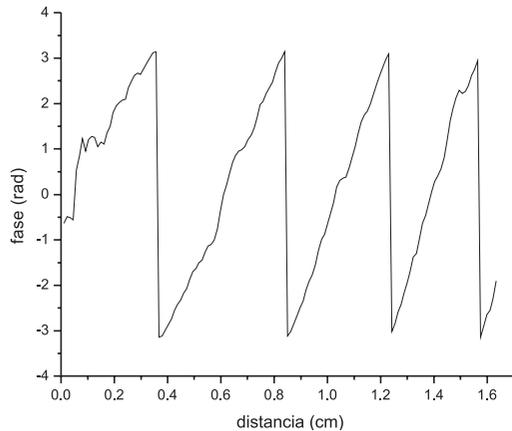
La figura 5-a muestra los mapas de intensidad para diferentes deformaciones y la figura 5-b sus respectivos mapas de fase envuelta, de una región de la placa cuyo tamaño en pixeles es 121 X 141, que corresponde a un área de 1.04 cm X 1.62 cm



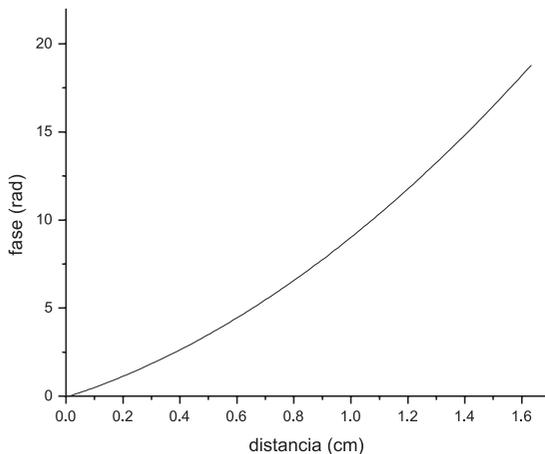
**(5-a) Mapas de intensidad correspondientes a (de izquierda a derecha) esfuerzos aplicados de  $1.32 \pm 0.01\text{g}$ ,  $2.64 \pm 0.01\text{g}$ ,  $3.96 \pm 0.01\text{g}$ ,  $5.28 \pm 0.01\text{g}$ . (5-b) Mapas de fase correspondientes a cada mapa de intensidad.**

En los mapas de fase se hizo un corte perpendicular a las franjas por el centro de la región en estudio, con la finalidad de graficar la fase envuelta a lo largo de la placa. Como era de esperarse se observa una gráfica diente de sierra, módulo  $2\pi$  (ver grafica 6-a); utilizando la herramienta unwrapp de la plataforma MATLAB® se

hizo el desenvolvimiento de la fase, obteniendo la curva que describe la variación de la fase a lo largo de la región estudiada, la cual es proporcional a la deformación sufrida por la placa (ver figura 6-b).



**6-a: Fase envuelta**



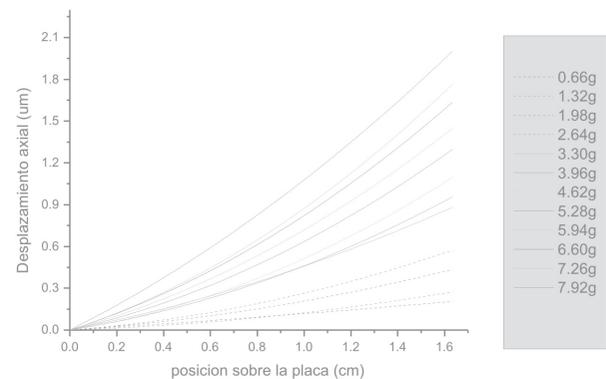
**6-b: Fase desenvuelta**

**Figura 6: Corte en el mapa de fase correspondiente al esfuerzo aplicado de  $3.96 \pm 0.01g$  a lo largo de la región en estudio.**

Para expresar la distancia en cm, se utilizó como factor de escala el tamaño del pixel reconstruido dado por las ecuaciones [2]:

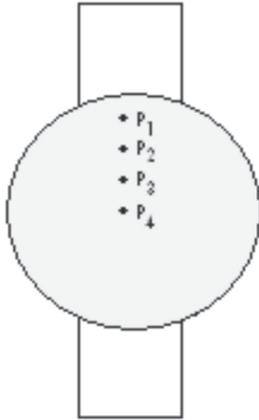
$$(17) \quad \Delta x_i = \frac{\lambda z_0}{N_x \Delta x} \quad \Delta y_i = \frac{\lambda z_0}{N_y \Delta y}$$

Al repetir el procedimiento descrito anteriormente a la misma región en estudio, aplicando diferentes esfuerzos y haciendo la conversión de diferencia de fase a desplazamiento axial según la ecuación (16) se obtuvo la siguiente figura:



**Figura 7: Desplazamiento axial sufrido por la placa a lo largo del corte realizado, para diferentes esfuerzos aplicados.**

Con la finalidad de realizar las gráficas esfuerzo-deformación, se tomaron 4 puntos a lo largo de la placa dentro de la región en estudio, más cerca al extremo libre de la placa, con separaciones entre si de 0.115 cm, así: P1 a 0.0 cm del borde de la región analizada, P2 a 0.115cm, P3 a 0.230cm y P4 a 0.345 cm, como se muestra en la figura 8



**Figura 8: Puntos tomados para realizar la curva de esfuerzo –vs- deformación.**

Para los puntos mencionados se realizaron las curvas de esfuerzo – vs – deformación que se observan en la figura 9.

## 6. Análisis de Resultados

· El buen contraste de las franjas observadas en la figura 5-a, permite deducir que el orden de magnitud de la deformación producida está dentro del rango de posibles mediciones, si el contraste no fuera bueno, el método no permitiría medir tales deformaciones.

· De la figura 5-b, se observa que la estructura de franjas paralelas y su orientación transversal, dan información sobre la forma del anclaje y de la aplicación del esfuerzo; en este caso las franjas son aproximadamente rectas porque la placa se sujetó de manera uniforme, no puntual, a lo largo de uno de sus bordes y a la vez, la forma en que se aplicó el esfuerzo produjo una deformación homogénea en los puntos de la placa a igual separación del borde anclado.

· De la misma figura se puede observar también que en aquellos puntos más cercanos al anclaje, las franjas (en el mapa de intensidad y de fase) no están muy definidas, se confunden

con el ruido speckle, debido a que allí la deformación lograda no produce cambios de fase suficientemente grandes que los diferencien apreciablemente del ruido, lo cual limita la resolución del método en las zonas cercanas al anclaje de la placa.

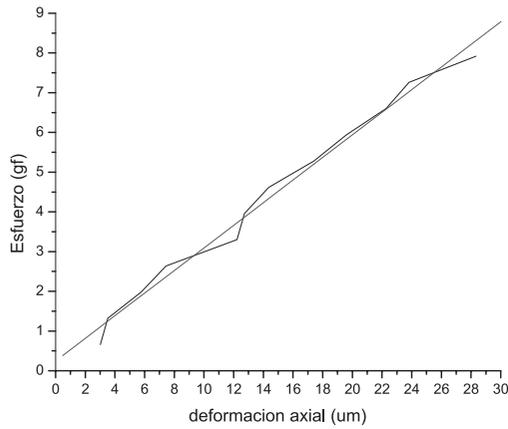
· Al observar los mapas de fase envueltos y compararlos con los esfuerzos aplicados en cada caso, se puede deducir que la frecuencia de las franjas es directamente proporcional al esfuerzo aplicado y por lo tanto a la deformación producida.

· La dirección de variación de la frecuencia revela información sobre el punto de aplicación del esfuerzo, ya que ésta aumenta a medida que se acerca a su punto de aplicación.

· La figura 6-b, que muestra la fase desenvuelta en función de los puntos axiales de la placa, no es una línea recta porque ella no se deforma de la misma manera a medida que nos alejamos del punto de anclaje, como era de esperarse, la deformación aumenta a medida que nos acercamos a su extremo libre. El perfil de dicha curva es a la vez el perfil de la placa deformada.

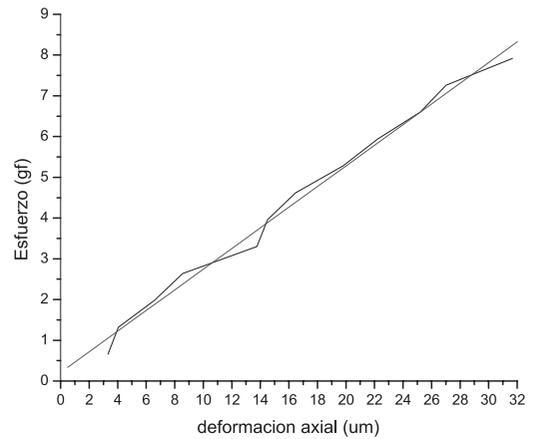
· Los cortes observados entre las curvas de desplazamiento contra posición sobre la placa a diferentes esfuerzos aplicados, muestran los límites inferiores de resolución de la técnica de interferometría holográfica digital de doble exposición.

· Las curvas de esfuerzo deformación en los puntos estudiados, muestran un comportamiento aproximadamente lineal, lo que indica que los esfuerzos aplicados son de un orden de magnitud tal, que provocan deformaciones que se encuentran dentro de la zona elástica en la placa.



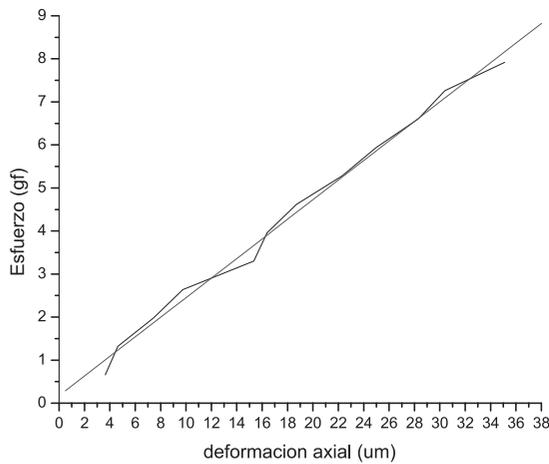
Ajuste lineal:

$$P_4: Y = 0.2460 + 0.2846 x \quad SD = 0.2805$$



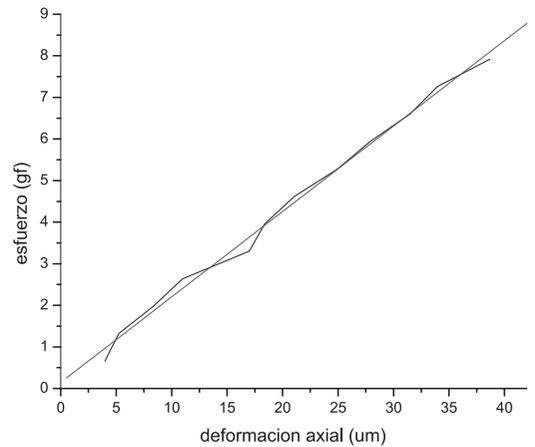
Ajuste lineal:

$$P_3: Y = 0.2089 + 0.2535 x \quad SD = 0.2469$$



Ajuste lineal:

$$P_2: Y = 0.1756 + 0.2275 x \quad SD = 0.2166$$



Ajuste lineal:

$$P_1: Y = 0.1456 + 0.2054 x \quad SD = 0.1899$$

**Figura 9: curvas de esfuerzo vs Deformación para los puntos P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub> y P<sub>4</sub> y sus correspondientes ajustes lineales.**

· La desviación estándar de la linealización de las gráficas esfuerzo - deformación se hace mayor a medida que nos acercamos al borde anclado de la placa, debido a que la deformación en esta dirección disminuye y no se tiene la misma resolución.

## 7. Conclusiones

· La interferometría holográfica digital aplicada como ensayo no destructivo permite medir deformaciones hasta del orden de los micrómetros.

· El método de interferometría holográfica digital de doble exposición permite obtener diferencias de fase sin tener que hacer corrimientos de fase.

## **8. Perspectivas**

Con base en los procedimientos realizados y los conocimientos adquiridos durante la realización del presente trabajo se pueden visualizar perspectivas de mejoramiento y optimización de los procesos de filtrado de orden cero y del ruido speckle; así como también la realización de ensayos no destructivos usando interferometría holográfica digital por el método del tiempo promedio.

En cuanto al tipo de anclaje y tipo de esfuerzo aplicado, los trabajos que están por realizarse son:

1. Cambiar la forma de sujetar el material a estudiar, con la finalidad de obtener y analizar la variación en la forma y la frecuencia de las franjas de deformación.
2. Realizar pruebas con distintos tipos, formas y tamaños del objeto a estudiar.
3. Analizar cuantitativamente y en forma más detallada los esfuerzos aplicados y las deformaciones producidas.

## **9. Referencias Bibliográficas**

- [1] K. E. Olsen, R. Andreassen "Construction of a holographic printer using silver-halide film plate 3-D", Technical digest series, Vol. 4, 1996.
- [2] Schnars U., Jueptner W. "Digital Holography", Springer Berlin Heidelberg, New York, 2005.
- [3] Herrera J. , "Tratamiento del ruido en holografía digital", Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2004.
- [4] Monroy F., Rincón O., García Sucerquia J, "Filtrado de orden cero en Holografía Digital", Memorias IX Encuentro Nacional de óptica, Universidad Nacional de Colombia, Universidad EAFIT, Medellín junio 13-17 de 2005.
- [5] Monroy F., Torres M., García Sucerquia J, "Efecto de la relación referencia objeto en el registro digital de hologramas", Memorias IX Encuentro Nacional de óptica, Universidad Nacional de Colombia, Universidad EAFIT, Medellín junio 13-17 de 2005.
- [6] Monroy F., Rincón O. "Obtención de franjas de deformación por medio de interferometría holográfica digital de doble exposición", Memorias XXI Congreso Nacional de Física, Universidad del Atlántico, Sociedad Colombiana de Física, Barranquilla Octubre 24-28 de 2005.