

Medición de la evolución temporal de los campos dinámicos de desplazamiento mediante interferometría de moteado para una probeta de latón

A. Martínez^a, J.A. Rayas^a y J.C. Madrid Garay^b

^aCentro de Investigaciones en Óptica,

A.C. Loma del Bosque 115, Col. Lomas del Campestre, León, Gto., México,

e-mail: amalia@cio.mx

^bUniversidad de La Salle Bajío,

Av. Universidad 602, Col. Lomas del Campestre, León, Gto., México.

Recibido el 23 de noviembre de 2009; aceptado el 29 de abril de 2010

En este trabajo se utiliza la técnica de interferometría de moteado y el algoritmo de desplazamiento de fase de tres pasos para obtener los campos de desplazamiento en una probeta, la cual es sujeta a una carga mecánica. El objeto bajo estudio corresponde a una probeta de latón de forma rectangular cuyas dimensiones son: 30 mm por 210 mm y un espesor de 3 mm. Ésta fue colocada en la máquina universal a prueba de tensión. La carga mecánica fue aplicada de manera continua y controlada desde una PC. El registro de los datos de salida del ensayo, tanto de las cargas aplicadas como de las deformaciones obtenidas, se fue almacenando en una base de datos para posteriormente obtener las gráficas tanto de desplazamiento, esfuerzo-deformación y el módulo de Young.

Descriptores: Metrología óptica; interferometría de moteado; campos de esfuerzos mecánicos; módulo de Young.

In this work, we have used the speckle interferometry technique and 3-steps-phase shifting to evaluate the displacement fields induced on a sample by mechanical load. The specimen was a brass sheet metal, 3 mm thick and an area of 210 mm×3 mm. The sample was tested on an Instron machine working in tension at a constant speed. The mechanical load was controlled by using of a computer. Additional to the displacement fields, stress fields and Young's modulus were obtained.

Keywords: Optical metrology; speckle interferometry; mechanical stress fields; Young's modulus.

PACS: 42.30 Ms; 89.20Bb; 89.20.a

1. Introducción

Entre las diferentes técnicas experimentales utilizadas para la medición de esfuerzos y deformaciones, podemos mencionar algunas técnicas ópticas como son la fotoelasticidad [1], shearografía [2], interferometría holográfica [3], interferometría de moteado [4-10], holografía digital [11], etc. Por parte de la mecánica experimental podemos mencionar la extensometría eléctrica [12].

Las técnicas mencionadas forman parte del grupo de pruebas no destructivas, es decir, de aquellas que no requieren que el elemento sujeto a prueba deba ser afectado estructuralmente.

El desarrollo de la interferometría de moteado es útil en el análisis de vibración para usos industriales y medición de los campos de deformación [4-10] lo cual conlleva a análisis de esfuerzos. Los elementos mecánicos sometidos a tensión sufren deformaciones no lineales. Estas deformaciones pueden causar concentraciones de esfuerzo que localmente pueden sobrepasar los límites admisibles y provocar micro-fracturas. Los métodos interferométricos proporcionan una herramienta de gran sensibilidad y precisión mediante la interferencia constructiva y destructiva de las ondas tanto para la obtención de los campos de deformación [4-10] como para la obtención de la topografía de objetos [13].

La importancia del estudio de las propiedades de los materiales radica en las diversas aplicaciones que puedan tener de acuerdo a sus propiedades físicas. El primer paso en el

proceso de selección requiere que se analice la aplicación para determinar las características más importantes que debe poseer el material. ¿Debe ser el material resistente, rígido o dúctil? ¿Estará sometido a la aplicación de una gran fuerza, o a una fuerza súbita intensa, a un gran esfuerzo, a elevada temperatura o a condiciones de abrasión? Una vez determinadas las propiedades requeridas se selecciona el material apropiado usando datos que se encuentran en los manuales. Sin embargo, se debe saber cómo se obtienen las propiedades listadas en los manuales, saber qué significan y darse cuenta que resultan de pruebas ideales que pueden no aplicarse a casos reales de la ingeniería. Aquí resulta importante la aplicación de técnicas experimentales ya mencionadas. El material bajo estudio es el latón, el cual es un excelente material para la manufactura de muchos componentes debido a sus características únicas. Buena resistencia y el ser muy dúctil se combinan con su resistencia a la corrosión y su fácil manejo en las máquinas y herramientas.

2. Interferometría electrónica de patrones de moteado (ESPI)

Existen arreglos interferométricos para la medición de deformaciones fuera de plano [14], deformaciones en plano [8] y la derivada del desplazamiento [2], entre otros, cuya sensibilidad depende de las geometrías de iluminación y observación.

Considerando el interferómetro mostrado en la Fig. 1, el cual corresponde a un interferómetro con sensibilidad en plano, la intensidad de algún punto $P(x, y)$ del objeto en el pla-

no imagen (superficie del detector) está dada por

$$I_i(x, y) = I_A(x, y) + I_B(x, y) + \sqrt{I_A \cdot I_B} \cos(\psi) \quad (1)$$

Después de un cambio en la fase entre los dos frentes de ondas, esta distribución estará dada por

$$I_f(x, y) = I_A(x, y) + I_B(x, y) + \sqrt{I_A \cdot I_B} \cos(\psi + \Delta\phi), \quad (2)$$

donde I_A e I_B son las intensidades de los haces y ψ es la diferencia de la fase aleatoria entre los haces. La diferencia de fase adicional $\Delta\phi$ corresponde a la deformación o desplazamiento del objeto bajo prueba.

El patrón de moteado deformado es comparado con el patrón inicial, mediante la suma o sustracción de intensidades. La correlación de estos patrones da como resultado la aparición de un conjunto de franjas claras y oscuras que corresponden a los sitios de diferencia de la fase igual entre los frentes de onda. Esta diferencia de fase $\Delta\phi$ se relaciona con la diferencia de camino óptico introducido por el movimiento de la superficie, haciendo posible su cuantificación.

Una mejor visibilidad del patrón de franjas se puede observar usando la correlación por sustracción. Ésta consiste en calcular el valor absoluto de la sustracción entre el patrón inicial y el patrón deformado. Esto da como resultado la siguiente relación:

$$I_f - I_i = \sqrt{I_A \cdot I_B} \sin\left(\frac{2\psi + \Delta\phi}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right). \quad (3)$$

Esta ecuación tiene dos términos que son funciones moduladas entre sí: la primera, con una frecuencia espacial alta (el ruido del moteado); y la segunda, con una frecuencia espacial más baja (las franjas de correlación).

La dirección de sensibilidad puede ser definida por un vector " \vec{S} " llamado vector de sensibilidad. Si establecemos un sistema de coordenadas sobre el objeto, la sensibilidad en el plano se refiere a la capacidad del interferómetro para detectar los desplazamientos medidos en las direcciones de los ejes " x " e " y ", respectivamente, la sensibilidad fuera de plano a la capacidad para detectar los desplazamientos en la dirección del eje " z ".

La diferencia de fase $\Delta\phi$ está relacionada mediante el vector de sensibilidad \vec{S} al vector de desplazamiento \vec{d} mediante la ecuación

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{S} \cdot \vec{d}. \quad (4)$$

El vector de sensibilidad \vec{S} queda determinado por la diferencia de los vectores unitarios de iluminación \hat{k}_1 y \hat{k}_2 (Fig. 1). Su dirección es paralela al plano del objeto. Según esta geometría y para iluminación colimada, el cambio de fase se puede calcularse como

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} v \cdot \sin\theta, \quad (5)$$

donde v es la componente del vector de desplazamiento en la dirección " y ", θ es el ángulo de incidencia de la iluminación y λ la longitud de onda de la luz de iluminación.

Despejando en la Ec. 5 el campo de desplazamiento v se obtiene

$$v = \frac{\Delta\phi}{4\pi} \cdot \frac{\lambda}{\sin\theta}. \quad (6)$$

Como ya ha sido mencionado, la resta de los patrones de moteado registrados antes y después de la deformación genera franjas de correlación, lo cual es ilustrado en la Fig. 2.

Para obtener la fase del patrón de franjas se aplica el método de desplazamiento de fase de tres pasos. Un cambio de fase óptico de 120° es introducido de manera secuencial en uno de los haces del sistema de iluminación dual utilizado.

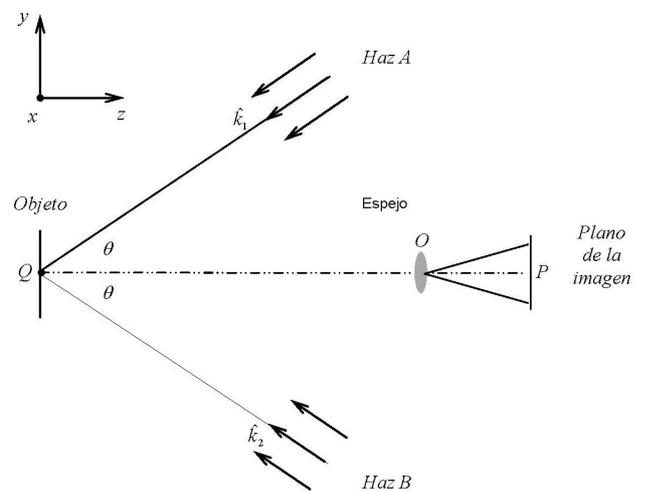


FIGURA 1. Esquema de un interferómetro sensible a desplazamientos en el plano.

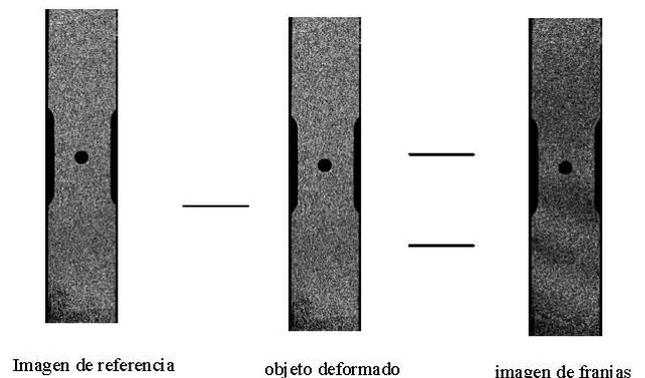


FIGURA 2. Franjas de correlación obtenida como resultado de la sustracción de los patrones de moteado correspondientes a dos estados diferentes del objeto.

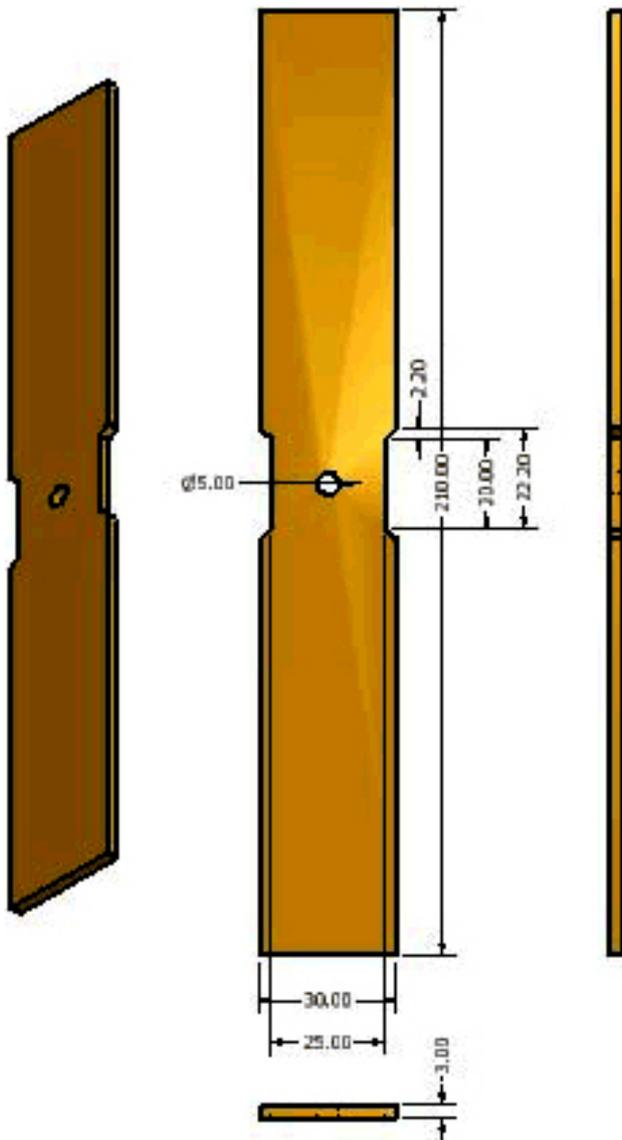


FIGURA 3.



FIGURA 4. Resultados de los ensayos a tensión para la fila $y = 0$.

La ecuación que determina el algoritmo para la obtención de la fase es

$$\Delta\phi = \tan^{-1} \frac{\sqrt{3}(I_3 - I_2)}{2I_1 - I_2 - I_3} \tag{7}$$

La Ec. (7) da como resultado lo que se conoce como fase envuelta. Para la obtención de la fase desenvuelta se hace uso de algunos algoritmos presentados por Malacara y colaboradores [15].

3. Generación de datos experimentales

3.1. Obtención de la curva carga-desplazamiento y esfuerzo-deformación mediante el uso de la máquina universal de ensayos mecánicos

La máquina universal de ensayos mecánicos tiene como función comprobar la resistencia de diversos tipos de materiales. Para esto posee un sistema que aplica cargas controladas sobre una probeta (modelo de dimensiones preestablecidas) y mide en forma de gráfica el desplazamiento y la carga al momento de la ruptura.

Se maquinó una probeta de latón, (Fig. 3, forma rectangular 30 mm por 210 mm y un espesor de 3 mm), la cual fue colocada en la máquina universal de ensayos mecánicos a prueba de tensión y sometida a una carga continua controlada desde una PC. Antes de iniciar el ensayo se aplicó una pequeña precarga a la probeta para estabilizar el inicio del ensayo (5N).

Los datos de salida de la máquina de ensayo, tanto de las cargas aplicadas como de desplazamientos obtenidos, fueron almacenados en una base de datos para posteriormente obtener la gráfica carga-desplazamiento (Fig.4).

Teniendo las cargas aplicadas y el área transversal de la probeta en la fila $y = 0$, calculada de los datos originales de la probeta antes de ser deformada, pudimos obtener el esfuerzo unitario en esas filas considerando todas las cargas aplicadas durante el ensayo al utilizar la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{8}$$

donde σ es el esfuerzo unitario dado en N/m^2 , F es la carga aplicada cuyas unidades corresponden a *newtons* y A es el área sobre la cual actúa la carga dada en m^2 .

La deformación unitaria de la probeta de latón fue calculada tomando en cuenta que la longitud original de la probeta es de 210 mm, pero debido a la sujeción de las mordazas y la precarga, la longitud que tomamos en cuenta es de 139.7 mm, que es la distancia entre las mordazas. De los desplazamientos obtenidos en la gráfica carga-desplazamiento, se pudo obtener la deformación del latón en una sección transversal $y = 0$ (Fig. 5).

Representando el esfuerzo en función de la deformación unitaria para un metal obtenemos una curva característica semejante a la que se muestra en la Fig. 5.

Durante la primera parte de la curva, el esfuerzo es proporcional a la deformación unitaria, estamos en la región

elástica. Cuando se disminuye el esfuerzo, el material vuelve a su longitud inicial. La línea recta termina en un punto denominado límite elástico.

Si se sigue aumentando el esfuerzo la deformación unitaria aumenta rápidamente, pero al reducir el esfuerzo, el material no recobra su longitud inicial. La longitud que corresponde a un esfuerzo nulo es ahora mayor que la inicial, y se dice que el material ha adquirido una deformación permanente.

El material se deforma hasta un máximo, denominado punto de ruptura. Entre el límite de la deformación elástica y el punto de ruptura tiene lugar la deformación plástica.

Si entre el límite de la región elástica y el punto de ruptura tiene lugar una gran deformación plástica el material se denomina dúctil. Sin embargo, si la ruptura ocurre poco después del límite elástico el material se denomina frágil.

3.2. Obtención de los campos de desplazamiento por métodos ópticos

Para obtener la deformación de la probeta de latón, se utilizó un interferómetro sensible a desplazamientos en plano. La Fig. 6 muestra el arreglo óptico implementado con sensibilidad en la dirección “y”.

El ángulo de incidencia de los haces de iluminación divergente es de $\theta = 28.74^\circ$. La fuente de iluminación corresponde a un láser cuya longitud de onda es de 532 nm. El sistema de video para la captura de los patrones de moteado esta constituido por una cámara CCD con 640×480 píxeles y un software que permite guardar los datos en forma de arreglo de bits (8 bits por elemento) en 256 niveles de gris.

El objeto bajo prueba fue sometido a una fuerza de 5N con la finalidad de tensarla. En esta posición se colocó en cero y se grabó el patrón de moteado correspondiente al que se identifica como patrón de referencia.

La máquina universal a tensión fue programada para obtener 1683 datos de fuerza (N) consecutivas aplicadas, mientras que mediante el arreglo interferométrico se tomaron 168 imágenes. Para cada uno de ellas se aplicó un desplazamiento de fase de tres pasos de $\pi/3$.

Para la evaluación de los campos de desplazamientos se realizaron los siguientes pasos:

1. Se toma una imagen de referencia y correlaciona por medio de una sustracción con la siguiente imagen obtenida después de aplicar la carga mecánica, obteniéndose un patrón de franjas.
2. Se aplica un corrimiento de fase a la imagen de referencia, obteniéndose tres patrones de franjas correspondientes al corrimiento de tres pasos.
3. Se obtiene mediante la Ec. (7) la fase conocida como fase envuelta.
4. La fase envuelta pasa a ser una fase desenvuelta al aplicar el algoritmo basado en el método de regularización [15].

5. Utilizando los datos de la fase desenvuelta y del vector de sensibilidad se obtiene el campo de desplazamiento a través de la Ec. (6).

Los resultados correspondientes a lo descrito arriba se muestran en la Fig. 7a-d.

3.3. Evaluación de los campos de esfuerzo, deformación y módulo de Young por medios ópticos

Los campos de deformación se expresan en términos de las derivadas de las componentes del campo de desplazamiento. En el estudio realizado, el campo de desplazamiento obtenido está en la dirección “y”, el cual fue evaluado mediante la

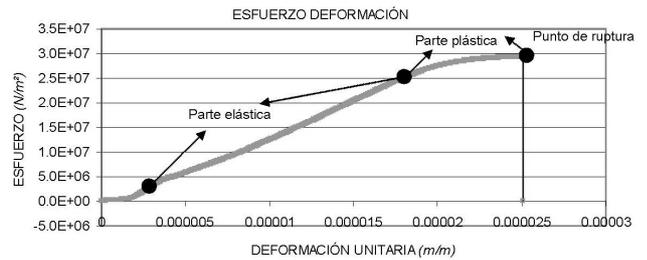


FIGURA 5. Diagrama esfuerzo - deformación para el latón considerando la fila $y = 0$.

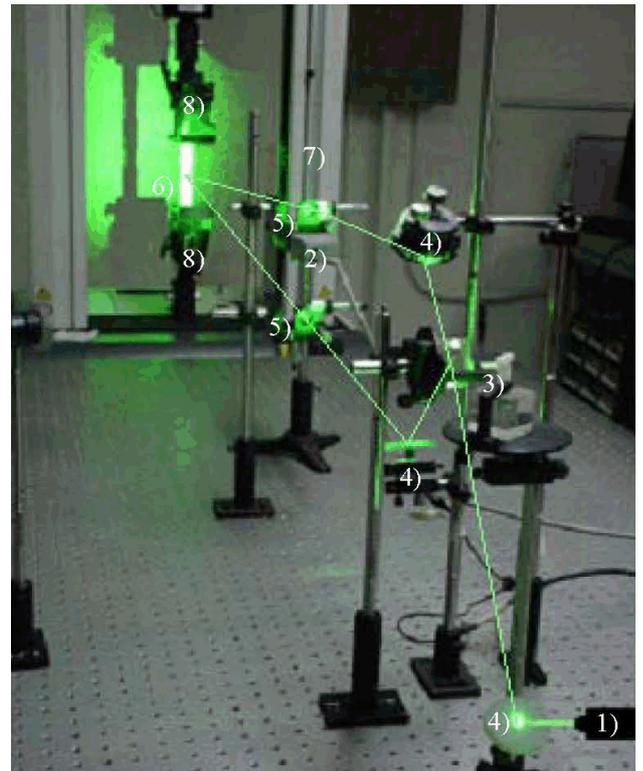


FIGURA 6. Sistema de interferometría de moteado de doble iluminación. Sus componentes corresponden a: 1) Láser, 2) Cámara CCD y lente zoom, 3) Divisor de haz, 4) Espejos, 5) Objetivo de microscopio, 6) Probeta de latón, 7) Máquina universal, 8) Mordazas.

Ec. (6). Los resultados de los campos de desplazamiento son mostrados en las Figs. 7, 8 y 9, incisos d). El campo de deformación ϵ_y se obtiene directamente como la derivada del campo de desplazamiento $v(x, y)$ con respecto a “y”. En las Figs. 7, 8 y 9, incisos e) se muestra los campos de deformación.

Los campos de deformación son obtenidos por diferenciación numérica, donde la longitud del intervalo de la derivada Δ_y es 1.

Es bien conocido al hecho de que el ruido en los datos es severamente amplificado por la diferenciación.

Por consiguiente se aplicó un filtro para suavizar las superficies de la Fig. 7d antes de hacer la diferenciación numérica para obtener la deformación Fig. 7e.

La aproximación directa para la diferenciación numérica es calculada por diferencias finitas:

$$\epsilon_y = \frac{\partial v(x, y)}{\partial y} = \frac{v(x_i, y_{j+1}) - v(x_i, y_j)}{y_{j+1} - y_j} \quad (9)$$

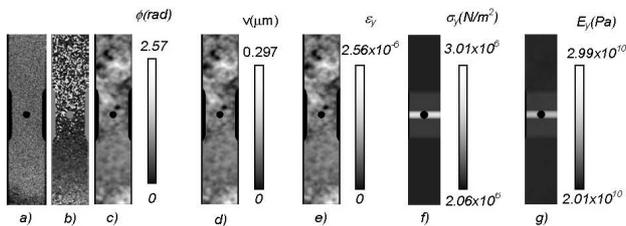


FIGURA 7. Resultados para la correlación “5”: a) patrón de franjas, b) fase envuelta, c) fase desenvuelta, d) campo de desplazamientos, e) deformación unitaria, f) campo de esfuerzos y g) módulo de Young (en promedio 20.98 GPa).

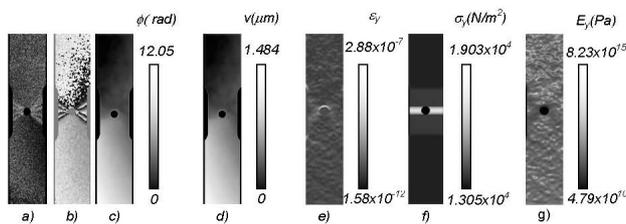


FIGURA 8. Resultados para la correlación “105”: a) patrón de franjas, b) fase envuelta, c) fase desenvuelta, d) campo de desplazamientos, e) deformación unitaria, f) campo de esfuerzos y g) Módulo de Young (en promedio 134.5 GPa).

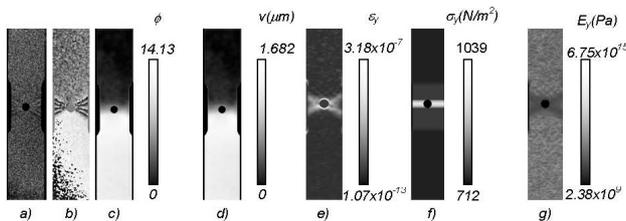


FIGURA 9. Resultados para la correlación “151”: a) patrón de franjas, b) fase envuelta, c) fase desenvuelta, d) campo de desplazamientos, e) deformación unitaria, f) campo de esfuerzos y g) Módulo de Young (en promedio 766.5 GPa).

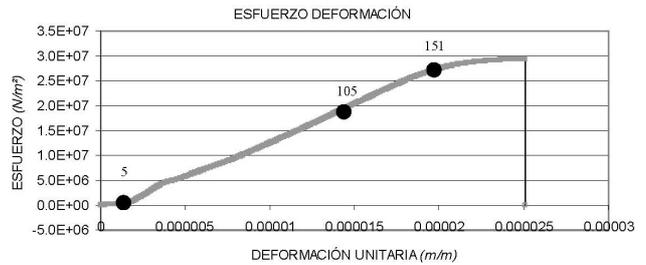


FIGURA 10. Gráfica de esfuerzo deformación.

Los mapas de desplazamiento $v(x, y)$ exhiben discontinuidades a lo largo de la región central circular de la placa (Fig. 7d). Para evitar esas discontinuidades, la derivada no fue calculada en la región circular central de la placa.

El esfuerzo en la probeta, (Fig. 7f), se pudo calcular con la carga aplicada y el área transversal mediante la Ec. (8).

Haciendo uso de una de las imágenes del ensayo, se obtuvo el área transversal de la probeta en cada fila de tal forma que esa imagen se binarizó dando 1 donde había material y 0 donde no había material, una vez binarizado la imagen se calculó el número de píxeles con valor de 1 que correspondían a cada sección transversal de la probeta (cada fila). Tomando en cuenta el ancho de la probeta medido con un vernier (25 mm) y el número de píxeles (160) obtenidos en un programa, pudimos saber cuántos milímetros mide un píxel (6.4 mm). De esta forma se pudo medir el ancho de las secciones no constantes de la probeta.

El espesor de la probeta se tomó constante obteniendo así, el área transversal de la probeta en cada fila.

Para poder obtener el módulo de Young, (Fig. 7g), de esta probeta se utilizaron los datos obtenidos del esfuerzo y deformación tomando en cuenta parte inicial, parte elástica y parte plástica del material mediante la ecuación

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (10)$$

Las Figs. 8 y 9 muestran los resultados experimentales correspondientes a las imágenes 105 y 151 de acuerdo a la Fig. 10.

4. Conclusiones

Se obtuvieron resultados experimentales del comportamiento mecánico de una probeta de latón utilizando la técnica de interferometría de moteado. Los campos de desplazamiento en la probeta fueron consecuencia de una carga mecánica que le fue aplicada mediante una máquina universal para ensayos. Se obtuvo entonces los campos de desplazamiento (en la dirección “y”) y a través de ellos los campos correspondientes de deformación, esfuerzo y módulo de Young del material.

Se obtuvo también una gráfica de esfuerzo-deformación del material bajo estudio a través del equipo de la máquina universal.

Las ventajas del uso de técnicas ópticas es que se obtienen resultados de campo completo, en tiempo real y que son no destructivas.

De los resultados se tiene que la ruptura del material ocurrió a un desplazamiento de 3.51 mm y una carga mecánica aplicada de 21.54 KN sin tomar en cuenta que el material fue estabilizado con una carga de 5 KN.

El módulo de Young experimentalmente obtenido corresponde a 134.5 GPa (Fig. 8) valor que corresponde a la región elástica (Fig. 10), que puede compararse con el teórico de 100 GPa. La diferencia se puede asociar al tipo de aleaciones y porcentajes de los materiales. Se pueden observar las demás gráficas donde el valor se dispara pero la razón es que el material ya no está en la parte lineal del material.

Es importante mencionar que las propiedades del latón dependen principalmente de la proporción de zinc y cobre que presente, así como la adición de pequeñas cantidades de otros metales (plomo y estaño) esto es conveniente para darle distintos usos. También depende de algunas de sus impure-

zas a la hora de ser fundidos los materiales, ya que el material puede perder cualquiera de sus propiedades y así obtener diferentes resultados.

El método de interferometría de moteado es aplicable a desplazamientos muy pequeños, del orden de micras. Dado que se toma una serie de imágenes y dado que se correlacionan cada dos imágenes consecutivas es posible extender la técnica a medir desplazamientos mayores como se observa en los resultados.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido apoyada parcialmente mediante el proyecto de CONACYT: Interferometría de moteado para contorno y análisis de deformaciones 3D, Ref: 48286-F así como del SNI-ESTUDIANTES del Fondo CONACYT.

1. A. Kuske y G. Robertson, *Photoelastic Stress Analysis*, (John Wiley, printed in Great Britain by J.W. Arrowsmith. Ltd. Winterstok. Road, Bristol. ISBN 0471511013).
2. W. Steinchen y L. Yang, *Digital Shearography*, SPIE-The International Society for Optical Engineering Press (ISBN 0-8194-4110-4, USA, 2003).
3. T. Kreis, *Holographic Interferometry* (Akademie Verlag Inc., New York, NY, ISBN 3-05-501644-0, 1996).
4. A. Martínez, R. Cordero, J.A. Rayas, H.J. Puga y R. Rodríguez-Vera, *Applied Optics* **44** (2005) 1141.
5. A. Martínez, J.A. Rayas y R. Cordero, *Optics Communications* (262) (2006) 8.
6. A. Martínez y J.A. Rayas, *Optics Communications* **271** (2007) 445.
7. A. Martínez, J.A. Rayas, R. Cordero y K. Genovese, *Optics and Lasers in Engineering* **46** (2008) 48.
8. R.R. Cordero, J. Molimard, F. Labbé y A. Martínez, *Optics Communications* **281** (2008) 2195.
9. A. Martínez, J. Antonio Rayas, C. Meneses-Fabian y M. Anguiano-Morales, *Optics Communications* **281** (2008) 4291.
10. M. Anguiano-Morales, A. Martínez, J.A. Rayas, R.R. Cordero y F. Labbé, *Optics Communications* **282** (2009) 686.
11. U. Schnars y W. Jueptner, "*Digital Holography*" (Springer-Verlag, Germany, ISBN 2005) 3.
12. C.C. Perry y H.R. Lissner, *Strain Gauge Primer* (McGraw-Hill Instruments & Measurements CRC Press Inc. 1962).
13. A. Martínez, J.A. Rayas, J.M. Flores, M.R. Rodríguez-Vera y D.D. Aguayo, *Rev. Mex. Fís.* **51** (2005) 431.
14. H.J. Puga, R. Rodríguez-Vera y A. Martínez, *Optics and Laser Technology* **34** (2002) 81.
15. D. Malacara, M. Servín y Z. Malacara, "*Interferogram analysis for optical testing*", Second Edition (Taylor&Francis Group, N. W., Published in 2005.) p. 493.