

ALGUNAS APLICACIONES INDUSTRIALES DE LA INTERFEROMETRIA ELECTRONICA DE PATRONES DE MOTEADO

R. Rodríguez-Vera, J. A. Rayas, A. Martínez y A. Dávila
Departamento de Metrología Óptica, Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.
Apartado Postal 1-948, 37000 León, Gto. México.
Tel: (4)7175823; Fax: (4) 7175000; E-mail: rarove@foton.cio.mx

J.L. Marroquín
Centro de Investigación en Matemáticas
Apartado Postal 402, 36000 Guanajuato, Gto. México.

Resumen: Las técnicas ópticas no destructivas y sus aplicaciones industriales han jugado un papel muy importante en los últimos años. Esto es debido a que se pueden hacer mediciones sin estar en contacto con los objetos a medir. En adición, es posible hacer la medición en campo completo y casi en tiempo real. Entre las técnicas ópticas no destructivas más importantes encontramos la interferometría de moteado. El principio básico en que se fundamenta la interferometría de moteado, es el uso de láseres para iluminar los objetos a medir. Cuando una superficie rugosa se ilumina con una fuente de láser aparece un campo granular o centelleo. Al correlacionar dos imágenes de moteado – antes y después de la deformación que sufre el objeto bajo prueba– aparece un patrón de franjas indicativo de que se modificó el objeto. Debido a que esta técnica es interferométrica, los desplazamientos que se pueden medir van desde el orden de fracciones, hasta varias decenas de micras. En este trabajo se describe la técnica y se muestran algunas aplicaciones en detección y medición de fracturas, así como la determinación de torsión en flechas de automóvil.

INTRODUCCIÓN

Una estructura de ingeniería expuesta a fuerzas externas se deforma y en consecuencia se producen concentraciones de esfuerzo dentro y en su superficie. Por tanto, deformaciones y esfuerzos están íntimamente relacionados. La detección de las deformaciones representa una parte vital para un completo análisis de esfuerzos en una estructura de ingeniería. A partir de las deformaciones y concentración de esfuerzos es posible determinar otras características mecánicas de los materiales que componen a las estructuras, estas pueden ser el módulo de Young, la razón de Poisson, etc.

Por otro lado, en evaluación de materiales es de suma importancia estudiar la firmeza e integridad de las estructuras de ingeniería bajo condiciones de cargas dinámicas y en condiciones de trabajo. En consecuencia, esto lleva a tener posibilidades de detección de fallas en dichas estructuras. Las fallas se pueden presentar, también, en la superficie o en el interior de ellas en forma de fracturas o fisuras. Para llevar a cabo ésta evaluación, las estructuras se someten a rudas condiciones mecánicas hasta que aparecen las fracturas.

En las pasadas dos décadas han aparecido diferentes métodos experimentales para estudiar la mecánica de fracturas. Las pruebas no destructivas han sido utilizadas ampliamente en los últimos años

para detectar, evaluar y cuantificar fracturas. Algunas técnicas no destructivas se han basado en desarrollos tecnológicos recientes y muchas otras lo han hecho en los métodos tradicionales como las de líquidos penetrantes, inspección magnética, corriente circulantes (eddy-current), ultrasonido y rayos X [1,2].

La interferometría electrónica de patrones de moteado (ESPI, por sus siglas en inglés: Electronic Speckle Pattern Interferometry) es un método óptico no destructivo basado en iluminación láser y sistemas optoelectrónicos de captura y análisis de datos cuyo diseño determina la sensibilidad a las diferentes componentes del vector desplazamiento [3]. Dependiendo del diseño experimental, se puede hacer un instrumento sensible a componentes de desplazamiento fuera del plano, en el plano, e incluso a funciones de ellas mismas, como sus primeras y segundas derivadas. ESPI permite la detección en campo completo de los desplazamientos de un objeto de prueba. Como los defectos internos y externos introducen anomalías en los desplazamientos, éstos son traducidos en anomalías del patrón de franjas observado. Esto explica el porqué la detección interna de fracturas es posible con ESPI. Hay evidencia de comparaciones entre ESPI y las técnicas con ultrasonido. En general, ambas proporcionan información de defectos internos. Sin embargo, hay dos puntos a favor de ESPI y uno en contra; a favor son los tiempos de detección, mientras ESPI lo hace en menos de un segundo, ultrasonido tarda varios

minutos en la realización del muestreo. Otro punto a favor es que ESPI discierne la importancia de una fractura en función de los esfuerzos a que está sometida, mientras que ultrasonido no. Un punto en contra del método ESPI es que es necesario someter a esfuerzos al objeto de prueba; pero esto se compensa por que no requiere, como el ultrasonido en general, de un fluido entre el transductor y el objeto de prueba.

La investigación que se presenta en este artículo enfatiza el uso de técnicas de ESPI con su aplicación a la deformación elasto-plástica de una superficie. A partir del mapa de desplazamientos de la superficie se hace una reducción de datos para cuantificar la fractura superficial o torsión de objetos metálicos. Las técnicas de moteado se describen de una manera teórica de forma breve. Así mismo, con la finalidad de corroborar su potencial, se presentan los resultados experimentales en la medición de una fractura de una placa metálica sometida a esfuerzo mecánico y la torsión de una flecha de carro.

TÉCNICAS DE MOTEADO

La apariencia granular de un objeto cuando es iluminado por luz coherente es llamada efecto de moteado [3]. El patrón de moteado, causado por la interferencia aleatoria de luz esparcida desde varios puntos de la superficie del objeto, actúa como una rejilla natural impresa en el objeto. Se han reportado varias técnicas en la utilización de este modelo para medir deformación de la superficie [4,5]. El efecto de moteado puede usarse para obtener información de los desplazamientos a lo largo de los ejes x , y , z de un sistema de coordenadas previamente establecido sobre el objeto. Dependiendo de la dirección de iluminación y la dirección de observación, pueden crearse sistemas experimentales sensibles en plano, fuera de plano y obtención de la derivada del desplazamiento. A continuación se describe brevemente el fundamento básico de la interferometría de moteado, así como los mecanismos de formación de franjas para sistemas con diferentes tipos de sensibilidad.

Interferometría de patrones de moteado (IPM)

El principio detrás de IPM requiere que para pequeños desplazamientos o deformaciones de la superficie, la intensidad del esparcimiento en el área de observación permanezca constante. Esto implica que la posición de cada mota permanece substancialmente en el mismo lugar. Por consiguiente, la fase de cada mota en el plano de la imagen (la retina del ojo o la película en una cámara fotográfica o el fotosensor de una cámara CCD) contiene información debido al movimiento de la superficie. Si un segundo frente de onda, mutuamente coherente, se suma al

patrón de moteado, éste actúa como una referencia de fase. La intensidad de cada mota es entonces una función de la relación de la fase (f) entre los dos frentes de onda que a su vez se relacionan con la deformación de la superficie. La deformación de la superficie puede verse entonces como una diferencia en intensidades de moteado, esto es, la diferencia entre dos patrones de moteado, uno registrado antes de la deformación y el segundo registrado después de la deformación. En regiones donde la superficie no se ha movido, las motas mantienen su intensidad original; en otra parte la intensidad de la mota varía. Los dos patrones de moteado normalmente se comparan (o correlacionan) mediante la suma o la sustracción de intensidades. Las diferencias entre los patrones de moteado son reveladas mediante franjas claras y oscuras que corresponden a los sitios de diferencia de la fase igual entre los dos frentes de onda. Esta diferencia de fase, f , se relaciona con la diferencia de camino óptico introducido por el movimiento de la superficie.

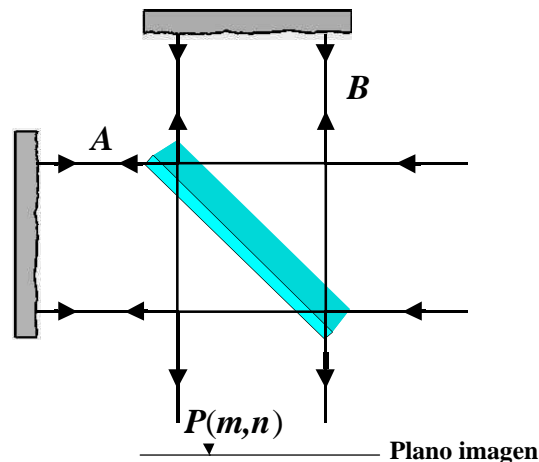


Fig. 1 Interferómetro tipo Michelson mostrando en el plano imagen la superposición de dos patrones de moteado.

Para describir el proceso, considérese un interferómetro de dos haces, como el mostrado en la Fig. 1, donde los dos haces interfiriendo son mutuamente coherentes, es decir, provienen de la misma fuente de luz láser. La intensidad de algún punto $P(m, n)$ en la superficie del detector (esto es, en el plano de la imagen) puede aproximarse por:

$$I_{ref}(m, n) = I_A + I_B + 2\sqrt{I_A I_B} \cos y. \quad (1)$$

Cualquier cambio de la fase relativo entre los dos frentes de onda en $P(m, n)$ causará que la intensidad cambie a:

$$I_{def}(m, n) = I_A + I_B + 2\sqrt{I_A I_B} \cos(y + f), \quad (2)$$

donde los subíndices A y B denotan los dos haces, I es la intensidad, y y es la diferencia de la fase entre los haces. La diferencia de la fase adicional f puede ser introducida por deformación o desplazamiento de la superficie del objeto bajo prueba. Se supone aquí que y y f no varían con el tiempo, esto es, que el objeto es estático y sufre desplazamiento estático. Para el interferómetro clásico I_A , I_B , y y generalmente varían continuamente en el plano de la imagen en la posición (m, n) . En interferometría de moteado, I y y para uno o ambos haces, varían al azar con la posición. Así las franjas de interferencia debido a f no aparecen directamente, y las medidas deben hacerse observando el cambio en la intensidad del moteado. Es posible conseguir la formación de las franjas de correlación que se obtienen mediante *correlación por sustracción*, esto se obtiene por medio de la sustracción de las ecuaciones (1) y (2), dando la siguiente relación:

$$I(m, n) = \left| I_{def} - I_{ref} \right|$$

$$= 4 \sqrt{I_A I_B} \cdot \left| \sin\left(\frac{2y + f}{2}\right) \sin(f/2) \right|, \quad (3)$$

y la *correlación por adición*, obteniéndose mediante la suma de las ecuaciones (1) y (2), produciendo:

$$I(m, n) = I_{def} + I_{ref}$$

$$= 2(I_A + I_B) + 2\sqrt{I_A I_B} \cos\left(\frac{2y + f}{2}\right) \cos(f/2). \quad (4)$$

Inicialmente, estas correlaciones se hicieron mediante registros fotográficos [6]. En aplicaciones posteriores, una cámara de televisión reemplazó la película fotográfica, y la correlación fue realizada electrónicamente. Así es cómo la técnica de Interferometría Electrónica de Patrones de Moteado (ESPI) trabaja, con la señal del módulo en la ecuación (3), eliminando cualquier valor negativo en el signo de la señal de televisión [7]. La Ec. (3) contiene dos términos que son funciones moduladas entre sí: la primera a frecuencia espacial alta, el ruido de moteado y el segundo a una frecuencia espacial más baja (las franjas de correlación). Un mínimo de la franja aparece siempre que $f = 2Np$, donde $N = 0, 1, 2, \dots$, es decir, dondequiera que la intensidad del patrón de moteado ha regresado a su valor original. En el caso de correlación por adición los mínimos de franja ocurren cuando $f = (2N + 1)p/2$, esto es,

cambiado por $p/2$ radianes la ecuación (4). También nótese que el término DC en la Ec. (4), $2(I_A + I_B)$, reduce la visibilidad de las franjas.

Relación entre fase y desplazamiento

Un interferómetro es sensible a una componente espacial del vector desplazamiento en cualquier punto en el espacio del objeto. La dirección de sensibilidad puede ser definida por un vector unitario \mathbf{n} llamado vector de sensibilidad. Este vector está dado por $\mathbf{n} = \mathbf{n}_i - \mathbf{n}_o$, donde \mathbf{n}_i y \mathbf{n}_o son los vectores unitarios en la dirección de iluminación y observación, respectivamente. Si el vector desplazamiento de cada punto del objeto es $\mathbf{d}(x, y, z)$, entonces el interferómetro será sensible a la componente d_n a lo largo del vector sensibilidad:

$$d_n = \hat{\mathbf{n}} \cdot \mathbf{d}. \quad (5)$$

El cambio de fase óptica por unidad de desplazamiento es determinado por el número de onda $k = 2p/l$ (donde l es la longitud de onda de la luz de iluminación). El cambio de fase en el plano imagen debido al cambio de fase unitario en el espacio objeto puede definirse como un factor de sensibilidad de franja, Γ , que determina cuántas franjas corresponden a un desplazamiento de la superficie dado. Γ también es una función del tipo de iluminación y el desplazamiento de la superficie, entonces:

$$f = k\Gamma d_n, \quad (6)$$

Γ y \mathbf{n} son determinados por la geometría óptica del interferómetro, y son funciones de (x, y, z) . Las figuras 2 (a), (b) y (c) muestran tres esquemas interferométricos típicos: sensible fuera de plano, en plano, y desplazamiento lateral, respectivamente.

ALGUNAS APLICACIONES

Aunque existe una gran variedad de maneras de excitar los objetos para analizar los microdesplazamientos que sufre una superficie, en el presente reporte solo se muestran los resultados cuando la superficie se somete a carga mecánica.

Análisis de fractura

La técnica de corrimiento de fase es empleada para extraer el mapa de fase a partir de cuatro interferogramas (Fig. 3a) [8]. Una vez analizados digitalmente los interferogramas de moteado para extraer la fase y, por ende, los desplazamientos que sufre un objeto, se puede determinar la magnitud física que se desea medir. En la Fig. 3 se muestran los resultados

experimentales de la medición de una fractura superficial en una placa metálica de 15X4X3 cm, la cual se somete a una carga puntual. Esta carga puntual es proporcionada por un tornillo sujeto a un marco fijo, de tal forma que al girarlo, éste entrega la carga mecánica a la placa.

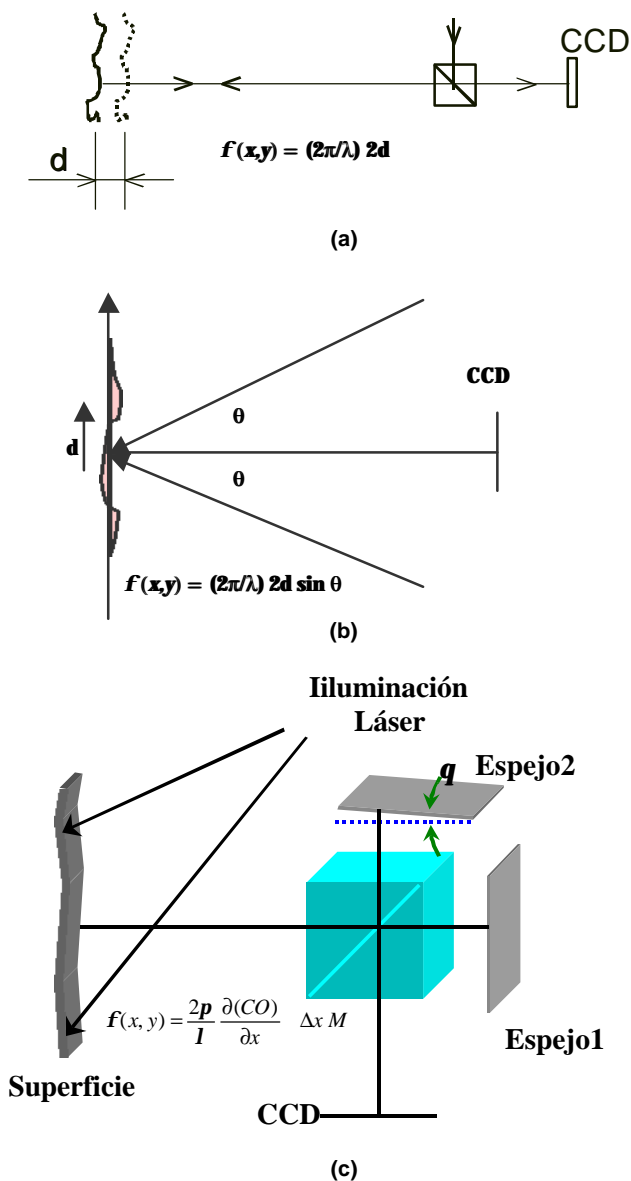


Fig. 2 Diferentes arreglos experimentales con diversas sensibilidades. Cada uno incluye la relación de fase con el desplazamiento. (a) Sensible fuera de plano, (b) sensible en plano y, (c) desplazamiento lateral. En éste último, la fase es una relación lineal con la derivada respecto a x de la diferencia de camino óptico (CO) en cada punto del objeto debido al desplazamiento.

El objeto es analizado mediante un interferómetro sensible fuera de plano, como el mostrado esquemáticamente en la Fig. 2a. Mediante un objetivo de cámara zoom, el área de la placa observada es de 60 X 60 mm². La carga se aplica en la dirección del eje óptico de observación, por la parte

posterior de la placa. Como puede observarse en la figura 3b, el desplazamiento máximo obtenido debido a la carga (no cuantificada) en que se “abre” la fractura de modo III es del orden de 65 μm, concordando con resultados de la literatura [2].

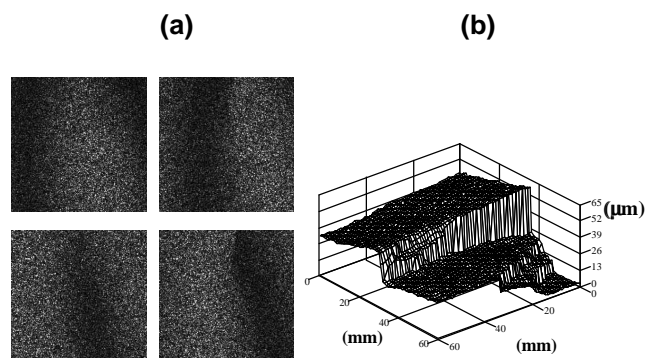


Fig. 3 Resultados experimentales de la medición de una fractura. (a) Franjas de moteado y (b) isométrico de la medición de fractura.

Análisis de torsión

Con la finalidad de analizar torsión en una barra de acero se empleó un interferómetro de desplazamiento lateral, como el mostrado en la Fig. 2c. Este interferómetro forma la imagen del objeto, con una amplificación M en el CCD debido al espejo 1. Cuando el espejo 2 se gira un pequeño ángulo q se forma en el CCD una segunda imagen desplazada una cantidad Δx respecto a la proporcionada por el espejo 1 [9]. Como resultado, se tiene un campo en donde se superponen dos imágenes: la original y la desplazada una cantidad Δx . En este momento se digitaliza una imagen que vendría siendo la referencia, Ec. (1). Después se somete a torsión la barra y se digitaliza la imagen para tener la Ec. (2). Correlacionando por sustracción estas imágenes tendremos un patrón de franjas cuya fase es proporcional a la derivada (en la dirección del desplazamiento lateral de la imagen) de la diferencia de camino óptico (CO), producto del desplazamiento en cada punto de la imagen del objeto bajo prueba. Para poder tener información del desplazamiento (en este caso, en la dirección x) en cada punto del objeto se tiene que llevar a cabo una integración numérica en la imagen de fase [10]. Este interferómetro tiene la ventaja de ser más robusto y puede incrementar su inmunidad a vibraciones mecánicas, en comparación con los de las Figs. 2a y 2b. Esto justifica su uso en medios ambientes industriales.

Si deseamos tener las tres componentes, (x,y,z) , del vector desplazamiento, con un interferómetro de desplazamiento lateral, es necesario contar con tres haces de iluminación. En nuestro caso, para la medición de torsión empleamos un interferómetro de este tipo modificado para proporcionar los tres haces de iluminación de manera consecutiva [11]. El arreglo

experimental es el mostrado fotográficamente en la Fig. 4. Cada uno de los brazos entrega el campo de iluminación al objeto consecutivamente, desde una misma distancia y a ángulos iguales. Dicha iluminación se hace a través de un servomecanismo automatizado y controlado por medio de una computadora.

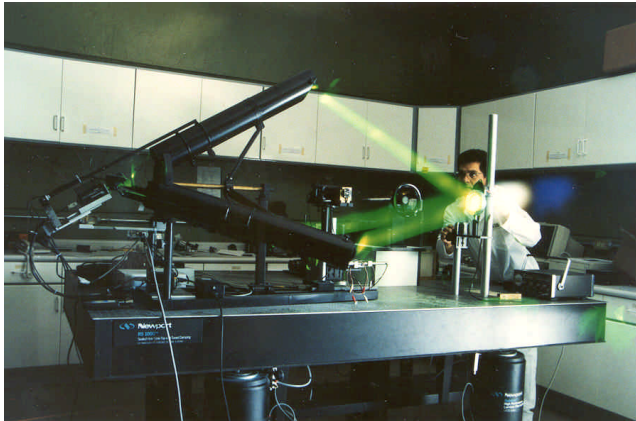


Fig. 4 Interferómetro de desplazamiento lateral de tres brazos.

El interferómetro usa un láser de Nd:YAG de 50 mW, y el cabezal cuenta con un divisor de haz no polarizable 50/50 y espejos planos aluminizados por el frente. La cámara utilizada es una Cohu 4815 cuya salida alimenta a una tarjeta digitalizadora Matrox Meteor II alojada en el interior de una PC Pentium II, 300 MHz.

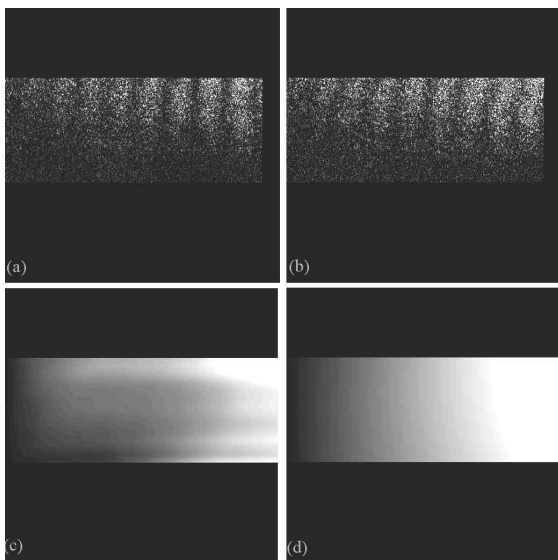


Fig. 5 (a) y (b) Patrones de franjas y (c) y (d) mapas de fase, para diferentes condiciones de carga de una flecha de automóvil sometida a torsión.

Como se explicó previamente, un interferograma de moteado se correlaciona restando digitalmente la video-imagen generada por el objeto deformado del almacenado antes de la deformación. Para llevar a cabo la medición se capturan consecutivamente seis

imágenes, dos para cada brazo del interferómetro (antes y después de la deformación). Previo a la excitación del objeto, se mueve una lente convergente (que sirve además para expandir el haz del láser) linealmente de manera automática, para introducir portadora a los contornos de desplazamiento [11]. Esta lente convergente se localiza antes de llegar a los tres brazos del interferómetro. Para calibrar el interferómetro, se diseñó y construyó una montura mecánica especial, la cual aplica solo rotación a una barra cilíndrica de 24.5 mm de diámetro y 35 cm de longitud. El área de observación de la barra fue de $4 \times 4 \text{ cm}^2$.

La figura 5 muestra los resultados experimentales, para dos diferentes cargas de torsión sobre la barra, los resultados cuantitativos que se obtienen a partir del mapa de fase de la Fig. 5c, se muestra en la Fig. 6. Con la finalidad de corroborar estos resultados, un paquete de Elementos Finitos fue usado. Los resultados del modelo se muestran en las imágenes de la Fig. 7. Las magnitudes dimensionales mostradas en esta figura 7a son en metros, lo que muestra la alta sensibilidad del sistema ESPI.

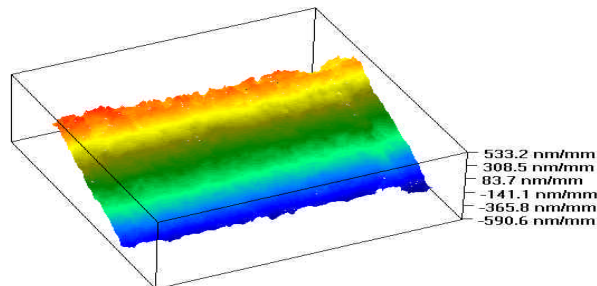


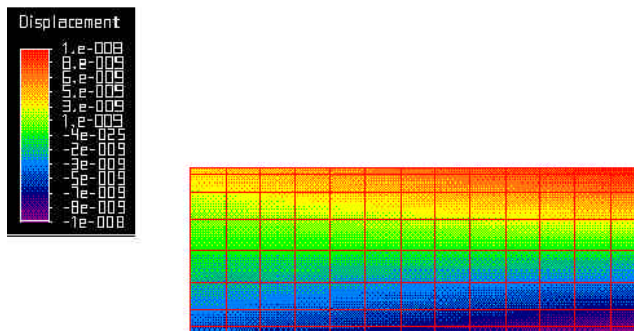
Fig. 6 Isométrico de los resultados experimentales de la barra bajo torsión, obtenido a partir del mapa de fase de la Fig. 5c.

CONCLUSIONES

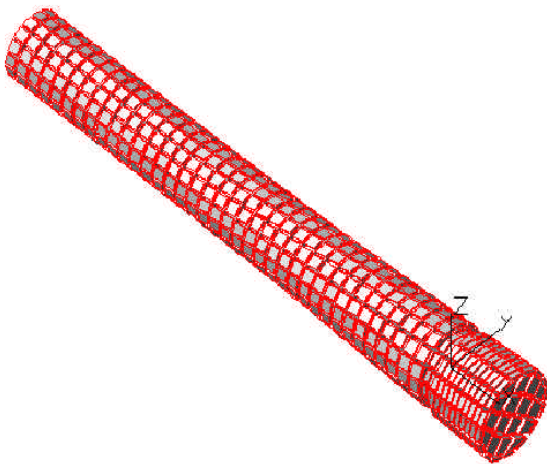
Se ha mostrado la posibilidad de usar la interferometría de moteado (ESPI) para análisis de pequeñas deformaciones. El potencial de ESPI se mostró midiendo una fractura superficial en una placa metálica rígida. El arreglo experimental empleado fue un sistema sensible fuera de plano. Pudimos medir con este arreglo variaciones de desplazamiento desde fracciones hasta varias decenas de micras. Esto es muy útil para evaluar condiciones mecánicas de estructuras de ingeniería.

Respecto a la medición de torsión, se usó un interferómetro ESPI de desplazamiento de tres brazos. Este interferómetro construido en el CIO tiene un gran potencial: puede medir las tres componentes del vector desplazamiento de manera automática. Todo el sistema mecánico de este interferómetro es

automatizado. El procesamiento digital de imágenes de moteado también se lleva a cabo de manera automática. Así que el software y hardware incluyendo los controladores mecánicos, permiten que este instrumento pueda llevarse a un medio ambiente hostil.



(a)



(b)

Fig. 7 Modelo numérico mediante el Método de Elementos Finitos, simulado bajo las mismas condiciones de carga de la barra bajo torsión. (a) mapa de desplazamientos en metros y (b) isométrico.

Finalmente, cabe resaltar que la alta sensibilidad de los esquemas experimentales de ESPI, muestran su gran atractivo para llevarse a plantas industriales y usarse en inspección. Uno de los inconvenientes y que haría el sistema caro, sería el uso de láseres pulsados [12] para congelar los microdesplazamientos en condiciones de cambios de temperatura y vibraciones severas.

RECONOCIMIENTOS

Los autores desean agradecer a CONACyT por el apoyo recibido. AM desea agradecer, además del CONACyT, al CONCYTEG por los apoyos económicos recibidos durante su doctorado.

REFERENCIAS

- [1] J.S. Epstein, Ed., *Experimental techniques in fracture*, VCH-SEM, New York, 1993.
- [2] A.S. Kobayashi, Ed., *Handbook of experimental mechanics*, SEM, New York, 1994.
- [3] R. Jones and C. Wykes, Second edition, *Holographic and speckle interferometry*, CUP, Cambridge, 1989.
- [4] R.K. Erf, Ed. *Speckle metrology*, Academic Press, New York, 1978.
- [5] R.S. Sirohi, Ed. *Speckle metrology*, Marcel Dekker, Inc., New York, 1993.
- [6] J.A. Leendertz, Interferometric displacement measurement on scattering surfaces utilizing speckle effect, *J. Phys. E: Sci. Instrum.* **3**, 1970, 214.
- [7] J.N. Butters and J.A. Leendertz, Holographic and videotechniques applied to engineering measurements, *J. Meas. Control* **4**, 1971, 349.
- [8] N. Alcalá Ochoa, R. Rodríguez-Vera y B. Barrientos, "Técnica de moteado para medición de fracturas en estructuras metálicas," *Rev. Mex. Fis.* **46**, 2000, 468.
- [9] J.A. Leenderz and J.N. Butters, "An image-shearing speckle-pattern interferometer for measuring bending moments," *J. Physics E* **6**, 1973, 1107.
- [10] R. Martinez-Celorio, A. Dávila, G.H. Kaufmann, and G. Mendiola, "Extention of the displacement measurement range for electronic speckle-shearing pattern interferometry using carrier fringes and temporal-phase-unwrapping method," *Opt. Eng.* **39**, 2000, 751.
- [11] A. Davila, G. Mendiola-Anda, F. Torres, and F.J. Casillas, "Deformation Analysis of a Shaft by a carrier method of speckle-shearing pattern interferometry, en *Interferometry in speckle Light. Theory and applications*, P.J. Jacquot and J.M. Fournier, Eds. Springer, 2000, 345.
- [12] A. Dávila, G.H. Kaufmann, and C. Perez-Lopez, "Transient deformation analysis by a carrier method of pulsed electronic speckle-shearing pattern interferometry," *Appl. Opt.* **37**, 1998, 4116.