

# Técnica de moteado para medición de fracturas en estructuras metálicas

N. Alcalá Ochoa, R. Rodríguez-Vera<sup>1</sup> y B. Barrientos

*Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.*

*Apartado postal 1-948, 37000 Len, Gto. Mexico*

*e-mail: <sup>1</sup>rarove@foton.cio.mx*

Recibido el 20 de marzo de 2000; aceptado el 4 de julio de 2000

Cuando un objeto rugoso es iluminado por luz coherente, la luz esparcida produce un efecto de moteado o centelleo luminoso aleatorio. Este efecto puede emplearse como una prueba óptica no destructiva para detección y medición de deformaciones superficiales. Esta técnica tiene su base en la interferometría holográfica, en la que se usan cámaras CCD como medios de registro. Por esta razón la técnica se convierte en una optoelectrónica. Así, la imagen de franjas que aparece por la superposición de dos frentes de onda provenientes del objeto bajo estudio, antes y después de su deformación, se registra digitalmente. Esta imagen es procesada computacionalmente para interpretar las deformaciones que sufre el objeto. Como resultado se puede estudiar, en campo completo, un objeto sometido a diferentes condiciones de carga sin necesidad de estar en contacto con éste. El presente trabajo muestra el potencial de las técnicas de moteado, extendiendo su aplicación hacia la detección y medición de fracturas en diferentes objetos metálicos. Se describen teóricamente las técnicas de moteado y se muestran los resultados experimentales de la medición de una fractura en una placa metálica sometida a una carga mecánica.

*Descriptor:* Metrología óptica; interferometría de moteado; mecánica de fracturas

When a rough object is illuminated by coherent light, the scattered light produces a random speckle effect or luminous twinkling. This effect can be used as an optical non-destructive test for detecting and measuring surface deformations. This technique is based on holographic interferometry, where CCD cameras are used as recording mean. For this reason the technique becomes an opto-electronic one. Thus, a fringe pattern that appears by overlapping two wavefronts coming from the object under study, before and after its deformation, is digitally recorded. This image is computer processed to interpret the deformations suffered by the object. As a result one can study, in full field, an object under different load conditions, with no necessity of being in contact. The present work shows the potential of the speckle techniques, extending its application towards the detection and measurement of fractures in different metallic objects. Speckle techniques are theoretically described and experimental results of a fracture measurements in a metallic plate under mechanical load are shown.

*Keywords:* Optical metrology; speckle interferometer; fracture mechanics

PACS: 06.20; 42.62.E; 62.20

## 1. 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, éstas 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 esta 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 amplia-

mente 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 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 fa-

vor 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 en la probeta metálica. Las técnicas de moteado se describen de una manera teórica de forma detallada, trazando con esto la parte fundamental del presente trabajo. 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.

## 2. 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 y fuera de plano. A continuación se describe el fundamento básico de la interferometría de moteado, así como los mecanismos de formación de franjas para sistemas con diferentes tipos de sensibilidad.

### 2.1. 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 entre los dos frentes de onda que a su vez se relacionan con la deformación de la su-

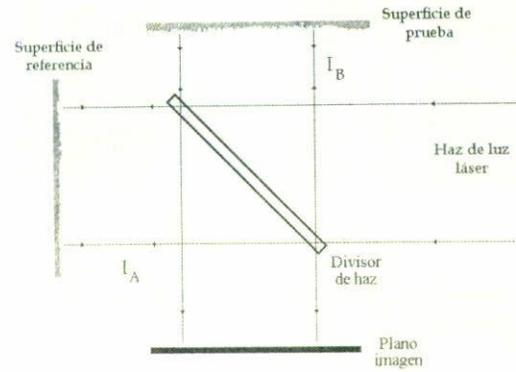


FIGURA 1. Diagrama original de un interferómetro de moteado.

perficie. 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 substracción 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 se relaciona con la diferencia de camino óptico introducido por el movimiento de la superficie.

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

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

Un patrón de moteado como el de la Ec. (1) se muestra en Fig. 2a. Cualquier cambio de la fase relativo entre los dos frentes de onda en  $P$  causará que la intensidad cambie a (ver Fig. 2b)

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

donde los subíndices  $A$  y  $B$  denotan los dos haces,  $I$  es la intensidad, y  $\psi$  es la diferencia de la fase entre los haces. La diferencia de la fase adicional  $\phi$  puede ser introducida por deformación o desplazamiento de la superficie del objeto. Se supone aquí que  $\psi$  y  $\phi$  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  $\psi$  generalmente varían continuamente en el plano de la imagen en la posición  $(m, n)$ . En interferometría de moteado,  $I$  y  $\psi$  para uno o ambos haces, varían al azar con la posición. Así las franjas de interferencia debido a  $\phi$  no aparecen directamente, y las medidas deben ha-

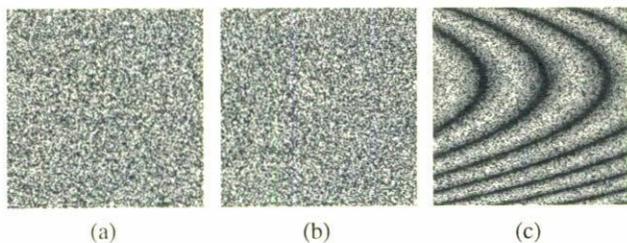


FIGURA 2. (a) y (b) patrones de moteado antes y después de la deformación. (c) Franjas de correlación entre los patrones (a) y (b).

cerse observando el cambio en la intensidad del moteado. La formación de las franjas de correlación mediante la observación del cambio en intensidad del moteado se describe enseguida.

## 2.2. Correlación por substracción

Con respecto a las Ecs. (1) y (2), la substracción da

$$I(m, n) = |I_{\text{def}} - I_{\text{ref}}| \\ = 2\sqrt{I_A I_B} |\cos(\psi - \phi) - \cos\psi|. \quad (3)$$

Este proceso fue originalmente llevado a cabo exponiendo y revelando un negativo del patrón de moteado del objeto sin deformar, y regresándolo a la misma posición en el interferómetro [6]. El negativo se usó como una máscara a través de la cual el objeto deformado podría verse. En aplicaciones posteriores, una cámara de televisión reemplazó la película fotográfica, y la substracción fue realizada electrónicamente. Así es cómo la técnica interferométrica de patrones de moteado (ESPI) trabaja, con la señal del módulo en la Ec. (3), eliminando cualquier valor negativo en el signo de la señal de televisión [7]. Note que la Ec. (3) puede ser reescrita como

$$I(m, n) = 4\sqrt{I_A I_B} \left| \sin\left(\frac{2\psi + \phi}{2}\right) \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \right|. \quad (4)$$

Esto describe dos ecuaciones moduladas entre sí: la primera a frecuencia espacial alta, el ruido de moteado en Fig. 2c, y el segundo a una frecuencia espacial más baja (las franjas de correlación). Un mínimo de la franja aparece siempre que  $\phi = 2N\pi$ , donde  $N = 0, 1, 2, \dots$ , es decir, dondequiera que la intensidad del patrón de moteado ha regresado a su valor original.

## 2.3. Correlación por suma

En este caso, de nuevo de las Ecs. (1) y (2)

$$I(m, n) = I_{\text{def}} + I_{\text{ref}} \\ = 2(I_A + I_B) + 2\sqrt{I_A I_B} \cos\left(\frac{2\psi + \phi}{2}\right) \cos\left(\frac{\phi}{2}\right). \quad (5)$$

Esta vez los mínimos de franja ocurren cuando  $\phi = (2N + 1)\pi/2$ , esto es, cambiado por  $\pi/2$  radianes de la Ec. (4). También nótese que el término DC,  $2(I_A + I_B)$ , reduce la visibilidad de las franjas. Las franjas de este tipo pueden ser

grabadas por doble exposición del medio de registro antes y después de la deformación de la superficie.

## 2.4. Ecuaciones fundamentales

Un interferómetro es sensible a una componente espacial de desplazamiento en cualquier punto en el espacio del objeto. La dirección de sensibilidad puede ser definida por un vector unitario  $\hat{n}$  llamado vector de sensibilidad. Si el vector desplazamiento de cada punto del objeto es  $\vec{d}(x, y, z)$ , entonces el interferómetro será sensible a la componente de  $d_n$  a lo largo del vector sensibilidad:

$$d_n = \hat{n} \cdot \vec{d}. \quad (6)$$

El cambio de fase óptica por unidad de desplazamiento es determinado por el número de onda  $k = 2\pi/\lambda$  (donde  $\lambda$  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,  $\Gamma$ , que determina cuántas franjas corresponden a un dado desplazamiento de la superficie. ( $\Gamma$  también es una función del tipo de iluminación y el desplazamiento de la superficie). Entonces

$$\phi = k\Gamma d_n, \quad (7)$$

$\Gamma$  y  $\hat{n}$  son determinados por la geometría óptica del interferómetro, y son funciones de  $(x, y, z)$ . El análisis tridimensional de la deformación requiere que la función de desplazamiento del objeto  $\vec{d}(x, y, z)$  sea determinada. El interferograma representado por la Ec. (3) se procesa para determinar  $\phi$  del que pueden calcularse  $d_n$  usando la Ec. (7) con valores conocidos de  $k$  y  $\Gamma$ . El  $d_n$  es sólo una de las componentes de  $\vec{d}$ , y por consiguiente, al menos deben obtenerse tres medidas de  $d_n$  diferentes para definir  $\vec{d}$  completamente en tres dimensiones. Un vector de sensibilidad diferente,  $\hat{n}$ , se requiere para cada medida. Idealmente deben usarse tres vectores de sensibilidad mutuamente perpendiculares porque esto obvia la necesidad de resolver ecuaciones simultáneas. Se describen dos configuraciones de IPM que satisfacen esta condición enseguida.

## 2.5. Sistema fuera de plano

Para un sistema IPM sensible fuera de plano, el objeto bajo prueba se ilumina y se ve en la dirección de la normal a su superficie, y la luz esparcida del objeto se combina con un frente de onda de referencia. Una configuración práctica se muestra en la Fig. 3. El objeto se ve a lo largo del eje  $z$ , y cualquier punto  $Q(x, y, z)$  en el espacio objeto se enfoca en un punto correspondiente  $P(m, n)$  en el plano imagen. El haz objeto se encuentra en el plano  $xz$  y forma un ángulo pequeño  $\theta$  respecto al eje de visión. Para un desplazamiento general  $\vec{d}$ , teniendo componentes  $u, v, w$  tal que  $Q(x, y, z)$  se mueve a  $Q'(x + u, y + v, z + w)$ , el cambio en longitud de

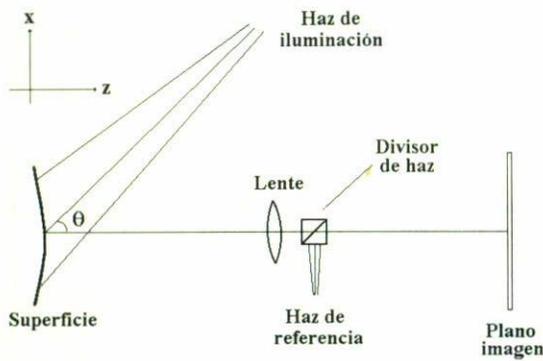


FIGURA 3. Sistema sensible a desplazamientos fuera de plano.

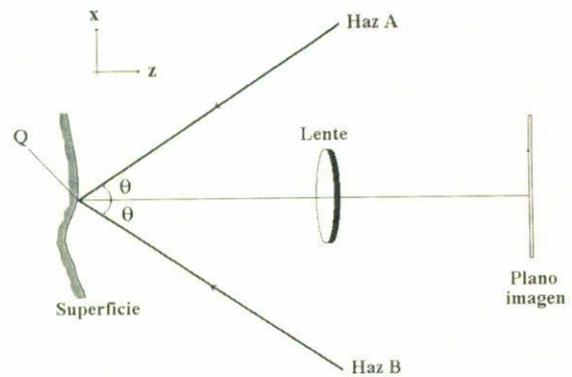


FIGURA 5. Sistema sensible a desplazamientos en plano.

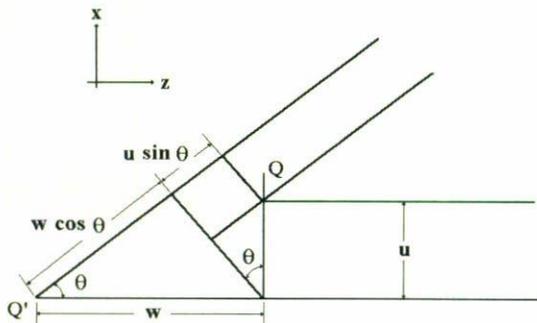


FIGURA 4. Diagrama para calcular  $\Delta l$ .

camino óptico  $\Delta l$  del haz objeto reflejado se muestra en Fig. 4 y está dado por

$$\Delta l = w(1 + \cos \theta) + u \sin \theta, \quad (8)$$

donde  $u$  y  $w$  pueden tomar valores positivos o negativos. Por consiguiente, el cambio de la fase total en el plano imagen es

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} [w(1 + \cos \theta) + u \sin \theta]. \quad (9)$$

Para  $\theta$  pequeños (típicamente  $< 5^\circ$ ) el término en  $u$  puede ignorarse con respecto al término en  $w$ , y el sistema sólo puede ser considerado sensible al movimiento de  $w$ . Por lo tanto,

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} w. \quad (10)$$

La comparación de las Ecs. (7) y (10) da el factor de sensibilidad de franja para esta configuración como  $\Gamma = 2$ , y el vector de sensibilidad es un vector unitario en la dirección de la observación,  $\hat{n} = \hat{k}$ .

### 2.6. Sistema sensible en plano

Un arreglo óptico común que es sensible en plano se construye iluminando la superficie con dos haces colimados simétricos respecto a la normal a la superficie, como se muestra en la Fig. 5. Ahora, de la Fig. 4, un desplazamiento general

pequeño  $\vec{d}$  causará cambios en la longitud de camino óptico dados por

$$\Delta l_A = w(1 + \cos \theta) + u \sin \theta \quad (11)$$

y

$$\Delta l_B = w(1 + \cos \theta) - u \sin \theta. \quad (12)$$

Esto produce un cambio de fase total en el plano imagen dado por

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (\Delta l_A - \Delta l_B) = \frac{4\pi}{\lambda} u \sin \theta. \quad (13)$$

Entonces el factor de sensibilidad de franja será  $\Gamma = 2 \sin \theta$ , y el vector de sensibilidad  $\hat{n} = \hat{i}$ . Para haces de iluminación rotados con respecto al plano  $yz$ , un análisis similar da que  $\Gamma = 2 \sin \theta$ , y  $\hat{n} = \hat{j}$ . Note que si la superficie no es plana, entonces esta configuración introduce errores por perspectiva en los puntos donde la normal a la superficie no es paralela al eje  $z$ . Los valores de  $\Gamma$  y  $\hat{n}$  son sólo constantes a través del objeto para frentes de onda de iluminación planos. Los frentes de onda esféricos causarán que el vector de sensibilidad rote y dé un poco de sensibilidad en  $z$ . También la sensibilidad a desplazamiento en plano decrece hacia el borde del campo de visión. Si haces divergentes se extienden desde un punto remoto, se minimizan estas variaciones en el vector de sensibilidad.  $\phi$  es independiente de la dirección de observación [Ec. (13)] y por tanto el único efecto de visión oblicua es cambiar la perspectiva de la imagen.

## 3. Pruebas de factibilidad del uso de ESPI para detectar fracturas

### 3.1. Métodos de excitación

Como se mencionó anteriormente, una posible desventaja de un sistema ESPI es su dependencia de someter a esfuerzos la muestra bajo análisis. Esto en realidad puede ser una ventaja, puesto que el medio excitador puede ser una parte del sistema del cual formará parte. Un sistema ESPI detecta desplazamientos que pueden ser de tres tipos: movimiento de cuerpo

rígido (de traslación y/o de rotación) y deformación. El tipo de desplazamiento que nos interesa es el de deformación sin influencia del primero, situación que no siempre es posible cumplir en la práctica, pero que se puede reducir a niveles tolerables. A continuación explicaremos algunos métodos de excitación, en los cuales debemos tener muy presente que ESPI requiere de dos estados del objeto: antes y después de la deformación.

#### *Presión*

Este modo es ideal para vasos y tubería en general y todas aquellas estructuras que puedan ser presurizadas. La imagen de referencia puede ser aquella que es capturada antes de iniciar el proceso de presión y las deformadas todas las demás; o bien, puede ser cualquiera del proceso intermedio y las deformadas cualquiera de las otras. La secuencia no es importante. Este tipo de excitación posee la importancia de que la concentración de deformaciones revela también concentración de esfuerzos que la tubería soportará en su funcionamiento natural y, por ende, las fracturas localizadas se podrán clasificar de acuerdo a su nivel de riesgo. Otra característica es que este modo de excitación no introduce movimiento de cuerpo rígido en proporciones intolerables.

#### *Vacío parcial*

Este modo de excitación es particularmente empleado en estructuras laminares, incluyendo llantas automotrices. Es útil para detectar delaminaciones. En esta prueba, el objeto y la óptica son colocadas en una cámara de vacío parcial. El vacío parcial es equivalente a una fuerza en tensión aplicada uniformemente a la superficie. Así, las irregularidades del objeto son detectadas por cambios en la uniformidad de la deformación; es decir, aparecerán picos o valles en aquellos lugares en donde existan irregularidades. Para objetos muy grandes que es impráctico introducir en una cámara de vacío, se puede producir vacío parcial localmente y seguir el mismo criterio anterior.

#### *Temperatura*

En este caso, la superficie del objeto es radiada con calor entre exposiciones. El gradiente de temperatura desarrollado induce tensiones térmicas en el objeto. Este modo de excitación es particularmente útil en la evaluación de uniones entre dos materiales diferentes. La diferencia en coeficientes de expansión térmicos entre las dos fronteras introducirá diferentes deformaciones, mismas que pueden ser medidas con ESPI.

#### *Vibraciones*

La excitación por medio de vibraciones mecánicas es otro estado plausible para detectar irregularidades. Es un medio dinámico de excitación. En la prueba, el objeto se excita por un transductor, como un piezoeléctrico o una bocina de sonido. Cuando la frecuencia del excitador coincide con la de

resonancia del objeto, se formarán modos de vibración. Esta forma de excitación es útil para estructuras laminares con una frontera rígida.

#### *Impacto*

El objeto de prueba es excitado con un golpe de ariete o un shock térmico. El impulso induce tensiones que se propagan a través del material. La presencia de una fractura interferirá con la onda viajera y causará una deformación detectable con ESPI. Pruebas con impacto requieren de un láser pulsado y electrónica de control de disparo y sincronización [8]. Un láser pulsado emite pulsos de luz de ultra corta duración, suficientemente cortos para seguir la onda viajera. El método de impacto generalmente no introduce movimiento de cuerpo rígido significativo y es aplicable a la prueba de estructuras grandes; sin embargo, el equipo necesario es muy caro y su uso requiere de personal capacitado.

#### *Deformación mecánica*

Deformación mecánica en tensión o compresión con una máquina universal es acompañada en general de movimiento de cuerpo rígido mayor al tolerable, aunque es posible su minimización a niveles tolerables.

### **3.2. Experimentos**

Con el fin de probar el potencial de ESPI en la detección y medición de fracturas se desglosa la parte experimental en las siguientes etapas: elección de los objetos de prueba, diseño del interferómetro, sistema de captura de datos y formación de franjas, métodos de excitación de muestras, análisis de franjas y cuantificación de las deformaciones.

Elegimos como objetos de prueba tres estructuras: un tubo metálico de 50 mm de diámetro, 200 mm de largo y 1 mm de grosor con una fractura muy visible de 20 mm; una placa metálica plana de 100 × 50 × 5 mm con una fractura externa en su parte superior de 3 mm; y finalmente una placa metálica de aluminio de 100 × 40 × 10 mm con un agujero longitudinal de 50 mm. La primera pieza contiene una fractura muy grande, similar a un corte con segueta, útil para especificar una posible limitación en fracturas grandes. La fractura de la segunda pieza no era fácilmente observable a simple vista y no atravesaba transversalmente a la placa. La tercera pieza fue un intento para simular una fractura o defecto interno. Se realizaron experimentos cualitativos en la primera y tercera pieza, empleando la segunda para la prueba de métodos cuantitativos.

#### *Elección del sistema óptico*

En ESPI, como ya se mencionó arriba, es posible diseñar el sistema óptico para que sea sensible a determinadas componentes del desplazamiento, como las deformaciones en el plano ( $u$  y  $v$ ) y fuera del plano ( $w$ ), a alguna de sus derivadas direccionales, o las tres componentes simultáneamente. Si el

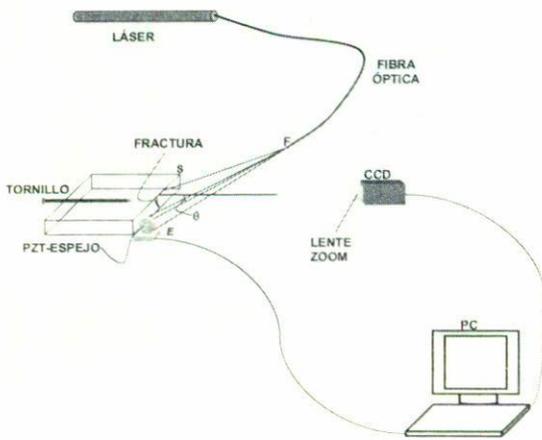


FIGURA 6. Arreglo ESPI sensible a la componente  $u(x, y)$  empleado en los experimentos.

sistema óptico se diseña para ser sensible a una componente, por ejemplo la  $u(x, y)$ , y la fractura se encuentra exactamente en la dirección de  $v(x, y)$  entonces ésta no será detectada hasta que las deformaciones introducidas cerca de la fractura sean suficientes en la dirección de esa sensibilidad. Una mejor alternativa es diseñar el sistema sensible a  $u$  y  $v$  simultáneamente y emplear métodos de procesamiento digital de imágenes para separarlas. El interferómetro que empleamos se muestra en la Fig. 6. Es un arreglo útil para analizar áreas pequeñas ( $100 \text{ cm}^2$ ) y funciona de la siguiente forma: un haz láser divergente, a la salida de una fibra óptica, F, se hace incidir sobre la superficie de prueba, S, y un espejo, E. El espejo se coloca perpendicular a la superficie y el haz láser se alinea para formar  $\pi/4$  rad con ambos ( $\theta$  es igual a  $\pi/4$ ). De esta forma, dos haces simétricos iluminan a la superficie y hacen que el interferómetro sea sensible únicamente a la componente  $u$  [Ec. (13)]. Un sistema de registro captura la luz que refleja el objeto.

#### Método de captura de datos

El método de captura de datos está relacionado con el método de excitación empleado. Su función es utilizar algún medio de registro, químico o electrónico, para grabar las reflexiones de la superficie. Empleamos un registro electrónico por su rapidez de respuesta, aunque posee la desventaja de tener baja resolución. El esquema se presenta en la Fig. 6: una cámara CCD con objetivo *zoom*, se conecta a una tarjeta digitalizadora en una computadora (PC). La resolución, o número de píxeles, de la CCD y de la tarjeta imponen una limitación a la precisión de la medición. Típicamente se trabaja con  $256 \times 256$  ó  $512 \times 512$  píxeles, que quiere decir que cualquier imagen almacenada en la computadora estará discretizada en ese número de puntos; o lo que es lo mismo, es el número de sensores ópticos sobre la superficie. Este sistema de captura nos permite realizar ciertas operaciones con las imágenes.

#### Método de excitación y formación de franjas

Ahora que se tiene diseñado el interferómetro y el sistema de captura de datos, es conveniente recordar que la luz reflejada por la superficie nos proporciona cambios de ésta en el tiempo. Si la superficie no cambia por sí sola es necesario algún método de excitación. De esta forma, el sistema de captura grabará dos imágenes en dos estados diferentes: antes y después de la excitación. La diferencia entre ambos se manifiesta como un patrón de franjas. Si la diferencia entre ambos estados se hace por sustracción electrónica (Sec. 2.2), entonces la intensidad desplegada,  $I(x, y)$  en 256 niveles de gris, en cada punto de coordenadas  $(x, y)$  se expresa de la siguiente forma [Ec. (4)]:

$$I(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\varphi(x, y)], \quad (14)$$

donde  $\varphi(x, y)$  es la función que se desea encontrar y que se relaciona con  $u(x, y)$  mediante la Ec.(13), con  $\theta = \pi/4$ . Las otras funciones  $A(x, y)$  y  $B(x, y)$ , son de alta frecuencia que no proporcionan información útil. La excitación de la placa la realizamos con un tornillo de avance (Fig. 6). Se grabó una imagen del objeto iluminado en el estado sin deformar y se giró el tornillo manualmente. La presión del tornillo ejercida sobre la placa modificó las reflexiones de la luz. Se restaron electrónicamente las dos imágenes y el patrón de franjas se expresó también por la Ec. (14). Otro método de excitación empleado fue el térmico. Se colocó, por algunos segundos, un caudín sobre la placa y posteriormente se retiró. Los gradientes de temperatura formados alrededor de la fractura hicieron que ésta se dilatara en forma peculiar. Igualmente grabamos antes y después y se obtuvo franjas también dadas por la Ec. (14).

#### Reducción de datos

Una vez que hemos obtenido franjas procedemos a calcular  $\varphi(x, y)$ . De la Ec. (14) observamos que  $I(x, y)$  contiene tres incógnitas:  $A(x, y)$ ,  $B(x, y)$  y  $\varphi(x, y)$ . Un método de solución es simplemente generar tres ecuaciones. Seguimos este camino y para generar las otras dos o más ecuaciones, empleamos un piezoeléctrico (PZT) de bajo voltaje, cuya función es expandirse cuando recibe voltaje. El PZT lo colocamos como soporte del espejo (Fig. 6). Los pequeños desplazamientos de este espejo hacen que se introduzca una función de fase conocida en el argumento de la Ec. (14). Así, debemos calibrar el PZT para saber qué valores de voltaje corresponden a cuáles valores de fase [9]. Por ejemplo, podemos obtener cuatro imágenes con diferente fase:

$$\begin{aligned} I_1(x, y) &= A(x, y) + B(x, y) \cos[\varphi(x, y)], \\ I_2(x, y) &= A(x, y) + B(x, y) \cos[\varphi(x, y) + \pi/2], \\ I_3(x, y) &= A(x, y) + B(x, y) \cos[\varphi(x, y) + \pi], \\ I_4(x, y) &= A(x, y) + B(x, y) \cos[\varphi(x, y) + 3\pi/2], \end{aligned} \quad (15)$$

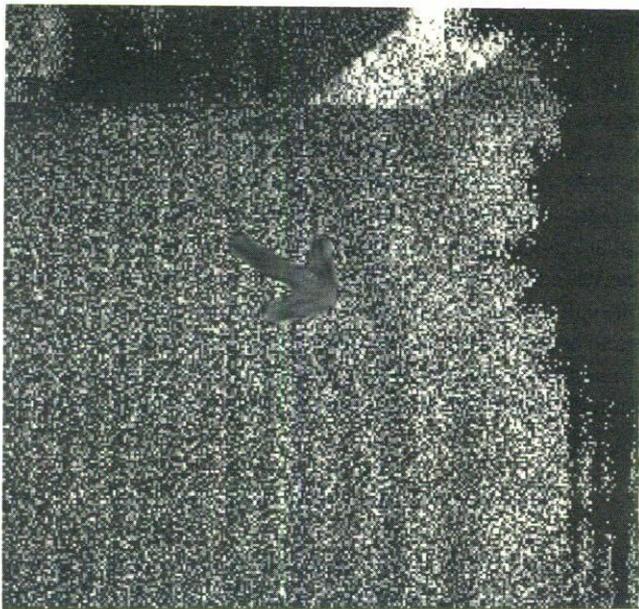


FIGURA 7. Patrón de franjas de un tubo en compresión. La flecha indica la discontinuidad de la franja y por consiguiente la zona de fractura.

cuya solución es simplemente

$$\varphi(x, y) = \arctg\left(\frac{I_4 - I_2}{I_3 - I_1}\right). \quad (16)$$

En este momento, aparentemente, ya está resuelto el problema; sin embargo, la función  $\arctg$  proporciona valores únicamente en el intervalo  $[-\pi, \pi]$ , que corresponde a una franja, y generalmente tenemos más de una. Ello implica que  $\varphi(x, y)$  posee discontinuidades cada  $2\pi$  rad. A la eliminación de estas discontinuidades se le conoce como *desenvolvimiento de fase (phase unwrapping)* y su solución general es un problema abierto todavía. Existen en la literatura algunos métodos de *desenvolvimiento*, que funcionan en la mayoría de los casos, y que hemos empleado aquí para una de las imágenes.

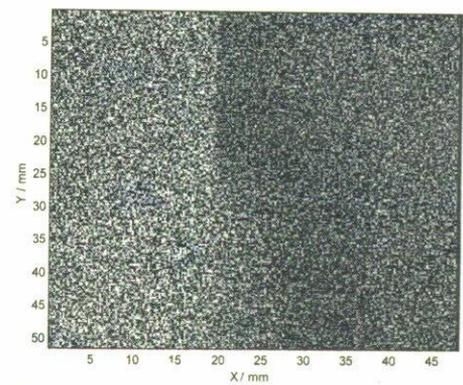
#### Cuantificación de la deformación

Posterior al *desenvolvimiento* de la fase, se procede a calcular  $u(x, y)$  con la expresión [Ec. (13)]

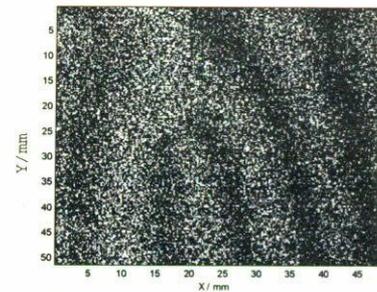
$$u(x, y) = \frac{\lambda}{4\pi \sin\theta} \varphi(x, y). \quad (17)$$

Númicamente  $\lambda = 0.63$  micras y  $\theta = \pi/4$ , con lo cual  $u(x, y)$  queda expresado en micras.

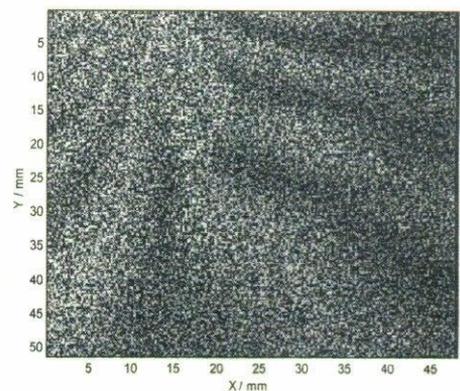
La Fig. 7 representa un patrón de franjas del tubo bajo compresión. La flecha marca una discontinuidad de una franja que indica la existencia de la fractura. Las Figs. 8a y 8b muestran las franjas de la segunda pieza de prueba, para diferentes presiones ejercidas. Las discontinuidades de las franjas muestran la existencia de la fractura. La Fig. 8c es un ejemplo de deformaciones de esta misma pieza debidas a carga térmica. Similarmente las irregularidades de las franjas dela-



(a)



(b)



(c)

FIGURA 8. Franjas en una pieza metálica plana. La discontinuidad de las franjas muestran claramente la fractura. (a) y (b) Diferentes deformaciones mecánicas y (c) Deformación debido a carga térmica.

tan la presencia de la fractura. En estos patrones de franjas podemos notar que existen varias franjas continuas y una sola discontinua. Las primeras se deben a la deformación global del cuerpo y las segundas a las deformaciones alrededor de la fractura. Así pues, se observa la necesidad de cuantificar puesto que podemos separar la deformación global de la local.

La Fig. 9 representa un conjunto de franjas, similares a las de la Fig. 8a, desplazadas en fase  $\pi/2$  rad como se especifica en la Ec. (15). La correspondiente fase envuelta obtenida de este conjunto de imágenes se muestra en la Fig. 10, la cual

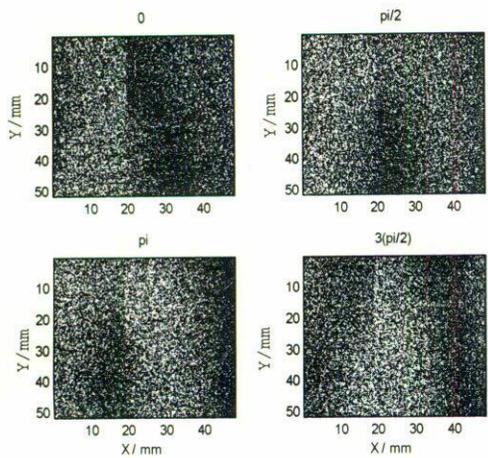


FIGURA 9. Conjunto de cuatro patrones de franjas desplazados en fase rad, obtenidos sobre la pieza metálica representada en la Fig. 8a sometida a esfuerzos.

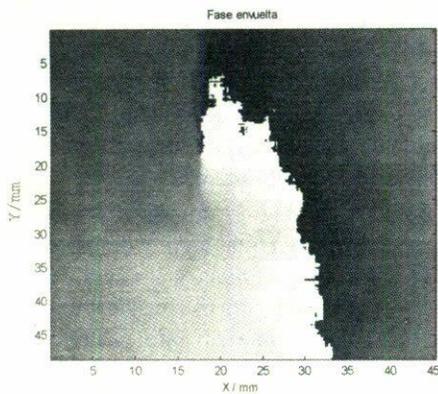
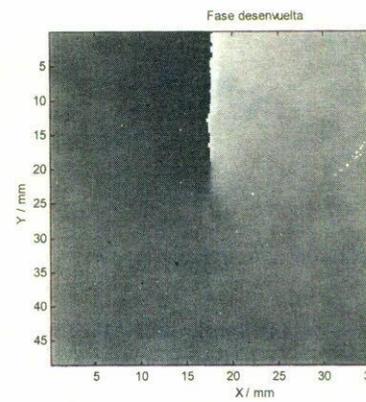


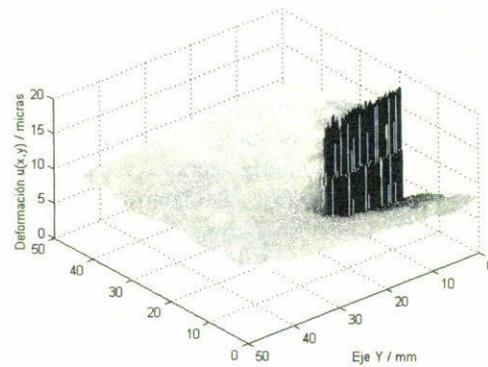
FIGURA 10. Mapa de fase correspondiente a las cuatro imágenes de la Fig. 9.

se obtiene después de aplicar la Ec. (16). El nivel de gris más brillante corresponde a los valores de  $\varphi(x, y)$  iguales a  $2\pi$  y el negro a cero. Después de desenvolver la fase de la Fig. 10 y eliminar el término de deformación del cuerpo nos queda la información correspondiente a la fractura, que representamos en niveles de gris (Fig. 11a), en 3-D (Fig. 11b) y curvas de nivel con un incremento de 0.05 micras entre ellas (Fig. 11c). Encontramos que el valor máximo de la deformación de la fractura en la dirección de  $u(x, y)$  fue de 0.44 micras. La representación 3-D que elegimos pudiera hacer pensar que la fractura es del tipo III, como se muestra en el Apéndice, sin embargo, hay que hacer notar que el eje  $z$  representa las magnitudes en la dirección de  $u(x, y)$ . De esta forma la fractura contiene al menos una componente del tipo I.

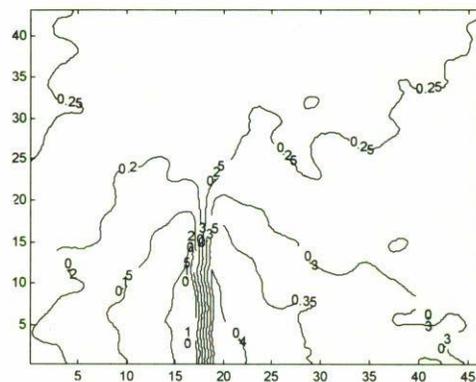
En las ecuaciones, presentadas en el Apéndice, se observa que si  $u(x, y)$ ,  $v(x, y)$ , y  $w(x, y)$ , o en coordenadas polares,  $u(r, \theta)$ ,  $v(r, \theta)$  y  $w(r, \theta)$ , se conocen para al menos un punto de coordenadas  $(r, \theta)$ , y como dato adicional se conoce también a  $G$  y  $\nu$ , entonces es posible calcular los tres factores



(a)



(b)



(c)

FIGURA 11. (a) Mapa de fase desenvuelto a partir de la Fig. 10, representado en niveles de gris. (b) Representación tridimensional de la magnitud del desplazamiento  $u(x, y)$  expresado en micras. (c) Representación en curvas de nivel de  $u(x, y)$ . La separación entre curvas es de 0.05 micras.

de intensidad de esfuerzos. Esto es claramente posible realizarlo con ESPI puesto que  $u$ ,  $v$ , y  $w$  se pueden calcular para todo  $r$  y  $\theta$ .

#### 4. Conclusiones

En este artículo se reporta un estudio de la técnica óptica, no destructiva, conocida como interferometría electrónica de patrones de moteado (ESPI) aplicada a la detección y medi-

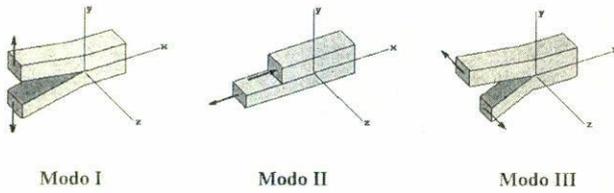


FIGURA A1. Modos básicos de fractura.

ción de fracturas. Se presentó, en detalle, la teoría de ESPI que nos permite evaluar fracturas a través de la medición de los diferentes componentes de la deformación que sufre una estructura metálica bajo análisis. Se explicó que ESPI detecta los diferentes componentes empleando arreglos ópticos diseñados para el caso particular que se desee analizar. Se realizaron pruebas cualitativas y cuantitativas en el laboratorio a luz ambiente. Se encontró que ESPI es una excelente herramienta para inspeccionar fracturas en materiales ópticamente rugosos de cualquier geometría, siempre y cuando sea posible iluminar la zona de análisis. Se demostró que cuantificar es un proceso más laborioso y complicado pero que es posible hacerlo. Se demostró que ESPI, al medir las componentes de deformación  $u$ ,  $v$ , y  $w$ , nos permite conocer los factores de intensidad de esfuerzos para los tres tipos básicos de fracturas. Para ello basta con conocer la razón de Poisson y el módulo de rigidez del material bajo análisis (mismos que se pueden medir en el laboratorio con ESPI también).

Finalmente, es deseable mencionar que la medición del avance de fractura es un trabajo de investigación futuro, pero que es posible ligarlo a la naturaleza de ESPI: se requiere grabar una imagen en dos tiempos diferentes y conocer la diferencia entre ellos. La solución dependerá fundamentalmente en que el avance de la fractura se manifieste en un cambio en la deformación del área que la rodea, en cualquiera de sus componentes.

**Agradecimientos**

Los autores desean agradecer a CONACyT y CONCYTEG por apoyos recibidos. Así mismo, se reconoce el apoyo técnico recibido por el Sr. Juan Antonio Rayas Alvarez.

**Apéndice. Teoría elástica de fracturas**

Una de las características esenciales del análisis de distribución de esfuerzos de estructuras corresponde a la inspección y evaluación de fracturas. La región muy cerca de la punta de fractura es la zona de estudio ya que es donde existe una mayor concentración de esfuerzos y por lo tanto donde la fractura empieza a crecer. Los campos de esfuerzo cercanos a la punta de la fractura pueden dividirse en tres tipos básicos, cada uno asociado a un modo local de deformación, Fig. A1. La superposición de estos tres modos es suficiente para describir la distribución de esfuerzos en cualquier tipo de fractura.

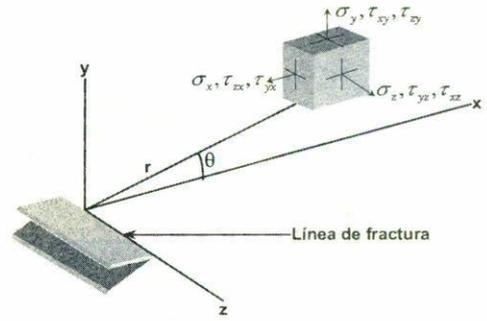


FIGURA A2. Sistema de coordenadas para la medición de campos de desplazamientos y esfuerzos.

El modo I de apertura se asocia con el desplazamiento local en el cual las superficies de fractura se mueven en oposición. El modo II de deslizamiento se caracteriza por desplazamientos en los cuales las superficies de fractura se deslizan una sobre la otra perpendicularmente a la línea de fractura, ver Fig. A2. En el modo III, de ruptura, las superficies de fractura se deslizan una respecto a la otra paralelamente a la línea de fractura. Los modos I y II se consideran como problemas plano-extensionales (deformación bidimensional) de la teoría lineal de elasticidad. El modo III se relaciona con deformación cortante pura (torsión).

Los campos de esfuerzo y desplazamiento para los tres modos se pueden obtener por medio de las ecuaciones de equilibrio de deformación plana y las relaciones esfuerzo-deformación [10]. Si la fractura es considerada como una discontinuidad en el plano complejo entonces existen funciones complejas que son válidas para las ecuaciones anteriores. Para una región muy cercana a la punta de la fractura (respecto a las dimensiones de la estructura y la longitud de la fractura), los esfuerzos y deformaciones están dados por [10]:

*Modo I:*

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right), \\ \sigma_y &= \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right), \\ \tau_{xy} &= \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}, \\ \sigma_z &= \nu(\sigma_x + \sigma_y), \quad \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0, \\ u &= \frac{K_I}{G} \frac{r}{(2\pi)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - 2\nu + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right), \\ v &= \frac{K_I}{G} \frac{r}{(2\pi)^{1/2}} \sin \frac{\theta}{2} \left( 2 - 2\nu - \cos^2 \frac{\theta}{2} \right), \\ w &= 0. \end{aligned}$$

Modo II:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= -\frac{K_{II}}{(2\pi r)^{1/2}} \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \left( 2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right), \\ \sigma_y &= \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{1/2}} \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}, \\ \tau_{xy} &= \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \operatorname{sen} \frac{3\theta}{2} \right), \\ \sigma_z &= \nu(\sigma_x + \sigma_y), \quad \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0, \\ u &= \frac{K_I}{G} \frac{r}{(2\pi)^{1/2}} \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \left( 2 - 2\nu + \cos^2 \frac{\theta}{2} \right), \\ v &= \frac{K_I}{G} \frac{r}{(2\pi)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} \left( -1 + 2\nu + \operatorname{sen}^2 \frac{\theta}{2} \right), \\ w &= 0. \end{aligned}$$

Modo III:

$$\begin{aligned} \tau_{xz} &= -\frac{K_{III}}{(2\pi r)^{1/2}} \operatorname{sen} \frac{\theta}{2}, \\ \tau_{yz} &= \frac{K_{III}}{(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2}, \\ \sigma_x &= \sigma_y = \sigma_z = \tau_{xy} = 0, \\ w &= \frac{K_{III}}{G} \left( \frac{2r}{\pi} \right)^{1/2} \operatorname{sen} \frac{\theta}{2}, \\ u &= v = 0, \end{aligned} \tag{18}$$

donde  $\nu$  es el coeficiente de Poisson,  $G$  es el módulo de rigidez y  $u, v, w$  los desplazamientos en las direcciones de los ejes  $x, y, z$  respectivamente. Los parámetros  $K_I, K_{II}$  y  $K_{III}$  son los factores de intensidad de esfuerzo, y no dependen de las coordenadas  $r, \theta$ . Por lo tanto, controlan la intensidad de los campos de esfuerzo pero no su distribución. Físicamente,

estos factores se interpretan como los parámetros que relacionan los cambios en la distribución del campo de esfuerzos cuando aparece una fractura, y en particular indican el modo y la magnitud de la fuerza transmitida a través de la línea de fractura. Los valores para los 3 factores de intensidad dependen de la geometría del espécimen y de las condiciones de carga [11]:

$$K = \gamma \sigma^\infty \sqrt{\pi c}, \tag{19}$$

donde  $\sigma^\infty$  es el esfuerzo aplicado,  $c$  es la mitad de la longitud de la fractura y  $\gamma$  es un término relacionado con la geometría del espécimen. La fractura ocurre cuando  $K$  alcanza un valor crítico,  $K_c$  (representativo del material), debido ya sea a un incremento en el esfuerzo aplicado, o a un crecimiento de la longitud de la fractura, o a ambos. Por lo tanto,  $K_c$  es un parámetro importante tanto para el especialista en materiales como para el diseñador y el usuario de materiales porque provee una evaluación cuantitativa de las condiciones de fractura para cierto material. El empleo de  $K_c$  implica el conocimiento de  $K$  y consecuentemente de  $\gamma$  para una cierta geometría. Esto ha originado el desarrollo de diversas soluciones analíticas. Para el caso más simple (una placa infinita bajo tensión uniaxial aplicada perpendicularmente a la línea de fractura) el término geométrico es la unidad. Para geometrías más realistas y por lo tanto más complicadas, los resultados varían considerablemente a los predichos por las ecuaciones de arriba. Debido a esto, se han desarrollado métodos más confiables, tales como procedimientos de colocación de fronteras, métodos de diferencias finitas, métodos de mapeo complejo de la teoría de elasticidad, etc. Sin embargo, frecuentemente la geometría y las condiciones a la frontera son de tal complejidad que el problema termina sobresimplificado, y las soluciones se apartan de la solución real. Consecuentemente, la evaluación experimental es de importancia considerable para las aplicaciones rigurosas de las técnicas de mecánica de fracturas.

1. J.S. Epstein, (editor), *Experimental techniques in fracture*, (VCH-SEM, New York, 1993).
2. A.S. Kobayashi, (editor), *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, (editor), *Speckle metrology*, (Academic Press, New York, 1978).
5. R.S. Sirohi, (editor), *Speckle metrology*, (Marcel Dekker, Inc., New York, 1993).
6. J.A. Leendertz, *J. Phys. E: Sci. Instrum.* **3** (1970) 214.
7. J.N. Butterns and J.A. Leendertz, *J. Meas. Control* **4** (1971) 349.
8. B. Barrientos *et al.*, *Appl. Opt.* **38** (1999) 5944.
9. N. Alcalá Ochoa and J.M. Huntley, *Opt. Eng.* **37** (1998) 2501.
10. P.C. Paris and C. Shi, *ASTM STO* **381** (1995) 30.
11. T.D. Dudderar and H.J. Gorman, *Exp. Mech.* **13** (1973) 145.