

NUEVO PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA EL CÁLCULO DE FACTORES DE INTENSIFICACIÓN DE TENSIONES A PARTIR DEL ANÁLISIS DE IMÁGENES FOTOELÁSTICAS

F.A. Díaz¹, A. García-Collado¹, P. Siegmann², E.A. Patterson³

¹ Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera
Universidad de Jaén, Campus las Lagunillas, Edif. A3,
23071 Jaén, España.
E-mail: fdiaz@ujaen.es, acollado@ujaen.es

² Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones
Universidad de Alcalá, Campus universitario,
28805 Alcalá de Henares (Madrid), España
E-mail: philip.siegmann@uah.es

³ Department of Mechanical Engineering,
Michigan State University,
2555 Engineering Building, East Lansing MI 48824-1226, USA
E-mail: eann@msu.edu

RESUMEN

En el presente trabajo se propone un nuevo método para el cálculo de factores de intensificación de tensiones a partir de datos isocromáticos. El método se basa en el cálculo del ángulo de retardo empleando exclusivamente dos imágenes fotoelásticas obtenidas para dos posiciones diferentes del polarizador y el analizador en un polariscopio de transmisión. El retardo experimental es comparado con el retardo teórico calculado mediante el modelo de Westergaard empleando un número discreto de puntos en la zona alrededor del vértice de la grieta. De esta forma, se evita la necesidad de hacer un desenvolvimiento de la imagen (unwrapping), eliminándose fuentes potenciales de error. Seguidamente, K_I , K_{II} y T-stress (σ_{ox}) son calculados mediante la minimización de una función de error. Para ilustrar el potencial y eficacia del método propuesto, se han obtenido valores de K a partir de imágenes fotoelásticas capturadas durante un ensayo de fatiga con una probeta tipo Center-Cracked-Tension (CCT). Los resultados muestran un extraordinario nivel de concordancia con los obtenidos a partir de simulaciones realizadas empleando el método de los elementos finitos, poniendo de manifiesto el potencial de la metodología propuesta.

KEY WORDS: Grieta por fatiga, factor de intensificación de tensiones, fotoelasticidad, procesado de imagen.

ABSTRACT

A novel experimental approach for the calculation of the stress intensity factor from the analysis of photoelastic images is presented. The method is derived from the six image phase-stepping method proposed by Patterson but only two images are used to obtain the retardation angle. The experimental retardation is compared with the theoretical one predicted by Westergaard's model using a discrete number of data points around the crack tip region. In this way, the necessity of unwrapping is avoided and a large potential source of errors is eliminated. Subsequently, K_I , K_{II} and T-stress (σ_{ox}) are inferred by minimizing an error function. To demonstrate the efficacy of the proposed approach, stress intensity values have been obtained from photoelastic images captured during fatigue tests conducted in polycarbonate Center-Cracked Tension (CCT) specimen. The results are very promising, showing a high level of agreement with those predicted from theory.

KEY WORDS: Fatigue crack, stress intensity factor, photoelasticity, image analysis.

1. INTRODUCCIÓN

La detección precisa de grietas así como la evaluación del daño ocasionado por fatiga en componentes industriales han centrado la atención de múltiples

investigadores durante mucho tiempo. En este contexto, la habilidad para medir tensiones y deformaciones de forma precisa en las cercanías de una grieta, son un aspecto fundamental en el estudio y análisis del proceso de fatiga.

Desde que Post y Wells [1, 2] mostraron inicialmente en los años 50 el potencial de la técnica de fotoelasticidad para el estudio de problemas de fractura han sido muchos los autores que han centrado su interés en aplicar la mecánica de la fractura al análisis estructural. Uno de los mayores avances en el cálculo del factor de intensificación de tensiones a partir del análisis de imágenes fotoelásticas fue el llevado a cabo por Sanford and Dally [3] con el método Multi-Point Overdeterministic (MPOD). Desde entonces, este procedimiento ha sido extensamente empleado para el análisis de diferentes problemas de fractura. Además, este método se ha extendido de forma satisfactoria a otras técnicas experimentales [4, 5], convirtiéndose en un procedimiento estándar para el cálculo de parámetros en problemas de mecánica de la fractura.

Aunque el MPOD es un método robusto y simple de utilizar, sin embargo tiene algunas limitaciones. Así, es necesario conocer el valor exacto del orden franja en todos los puntos empleados para el análisis. Ello implica tener que emplear puntos correspondientes a valores de orden de franja enteros o mitad obtenidos a partir de las posiciones del polarizador y analizador que proporcionan un polariscopio circular en campo claro y oscuro, con la consiguiente identificación manual de los órdenes de franja [6]. Otra posibilidad pasa por realizar un desenvolvimiento de la imagen (unwrapping) empleando algoritmos específicos de procesamiento de imágenes [7]. Este último procedimiento se ha hecho muy popular en los últimos tiempos. Sin embargo, ambos procedimientos pueden resultar difícil de implementar de forma satisfactoria en regiones con altos valores o gradientes de tensión y por consiguiente, gran densidad de franjas en los alrededores del vértice de grieta. Esto resulta especialmente problemático para grietas presentes en componentes industriales complejos, siendo necesario que el operador de la técnica posea experiencia previa y aptitudes para poder obtener de forma satisfactoria el factor de intensificación de tensiones.

Los continuos avances en la informática han hecho posible el desarrollo de nuevos métodos de procesamiento de imágenes dando lugar a lo que hoy día se conoce como fotoelasticidad digital (digital photoelasticity). Diferentes técnicas de procesamiento de imágenes han hecho posible la obtención de mapas de campo de completo de tensión/deformación en componentes mecánicos mediante el procesamiento de imágenes fotoelásticas [7]. En particular, los métodos de variación de fase (phase-stepping methods) son los más extensamente empleados en la extracción de la información relativa a la fase a partir de procesamiento de imágenes de franjas. Mediante el empleo de métodos de desenvolvimiento de la fase (unwrapping methods), es posible obtener mapas continuos de orden de franja a partir de distribuciones periódicas ángulo de retardo. De esta manera, las técnicas de desenvolvimiento de fase han incrementado enormemente el potencial y utilidad de método inicial propuesto por Sanford y Dally [3]. Así, los datos necesarios para aplicar el método MPOD

pueden ser empleados de cualquier parte de la imagen o incluso es posible emplear la imagen completa. Sin embargo, el empleo de algoritmos de desenvolvimiento de la fase previo al empleo del método MPOD implica un incremento en tiempo y complejidad en la evaluación del factor de intensificación de tensiones; por tanto sería ventajoso si directamente fuera posible utilizar las imágenes de retardo para el cálculo del factor de intensificación de tensiones directamente sin necesidad de realizar el proceso de unwrapping.

Con el presente trabajo se propone un nuevo método para el cálculo del factor de intensificación de tensiones basado en el análisis de imágenes isocromáticas. El método se basa en la determinación de la distribución del ángulo de retardo relativo mediante la combinación de dos imágenes fotoelásticas, y su posterior comparación con la distribución obtenida empleando modelos teóricos. De esta manera, se evita el proceso de desenvolvimiento de la fase como se ha comentado anteriormente, pudiéndose adquirir datos de toda la imagen. Los resultados muestran con claridad que el método propuesto es muy robusto y proporciona resultados precisos en tan solo unos segundos. Para mostrar el potencial del método, éste se ha empleado para calcular el factor de intensificación de tensiones en una probeta tipo CCT (Centered-Cracked-Specimen) fabricada en policarbonato con una grieta de 12.18 mm a la que se ha aplicado diferentes niveles de carga. Los resultados obtenidos con el método propuesto reproducen fielmente los obtenidos mediante el método de los elementos finitos, poniendo de manifiesto la viabilidad y el potencial de la metodología propuesta.

2. METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El procedimiento propuesto se basa en el cálculo del ángulo de retardo a partir del análisis de dos imágenes fotoelásticas. Las dos imágenes son capturadas para los estados de un polariscopio circular en campo oscuro y campo claro respectivamente. En estas dos configuraciones del polariscopio, la intensidad de la luz capturada por la cámara digital situada frente al polariscopio se puede describir según las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} I_1 &= i_m + i_v \cos(\alpha_{exp}) \\ I_2 &= i_m - i_v \cos(\alpha_{exp}) \end{aligned} \quad (1)$$

Donde i_v es la intensidad resultante cuando los ejes del polariscopio y la probeta son paralelos, i_m considera el término de luz fondo [8]. De acuerdo con la ecuación (1), el ángulo de retardo α_{exp} , se puede obtener experimentalmente restando las imágenes 1 y 2 como denota la ecuación (2).

$$\alpha_{exp} = \cos^{-1}\left(\frac{I_1 - I_2}{2I_v}\right) \text{ with } \alpha_{exp} = 2\pi N \quad (2)$$

Donde N denota el orden de franja.

Adicionalmente, es también posible calcular el ángulo de retardo, α empleando cualquiera de los modelos matemáticos que describen campo de tensiones den los alrededores e una grieta disponibles en la literatura [9]. En este caso se ha empleado para ilustrar el método el modelo de Westergaard [10, 11] mostrado en la ecuación (3).

$$\left(\frac{Nf^2}{t}\right) = \text{Function}(r, \theta, K_I, K_{II}, \sigma_{ox}) \quad (3)$$

Donde f representa la constante de franja del material, t la longitud del camino de la luz en el material fotoelástico, r y θ son coordenadas en un sistema polar centrado en el vértice de la grieta con x en la dirección de crecimiento de la misma.

En el método propuesto se lleva a cabo un ajuste matemático de la distribución teórica del ángulo de retardo, α_{theo} a los datos experimentales, α_{exp} . Como resultado del ajuste es posible obtener K_I , K_{II} y σ_{ox} . El método se ha dividido en seis pasos que se describen en las siguientes líneas.

Inicialmente, el ángulo de retardo experimental se obtiene combinando las imágenes 1 y 2 como se ha indicado previamente (paso 1). Seguidamente la posición del vértice de la grieta debe ser identificada mediante la inspección visual de la imagen resultante del paso 1 (paso 2).

Para asegurar la validez del modelo matemático adoptado basado en condiciones lineales elásticas, es necesaria la aplicación de una máscara a la imagen en la región cercana al vértice de la grieta y a lo largo de las caras de la grieta. El propósito perseguido es eliminar del análisis la zona plástica en los alrededores de la grieta. Posteriormente, se seleccionan una serie de puntos cercanos a la grieta con los que con posterioridad se llevará cabo el ajuste (paso 3). El tamaño de la región en la que se pueden asegurar la validez de los puntos capturados ha sido definido por Nurse y Patterson [6] como un anillo de radio interior igual a diez veces el radio de la grieta y radio exterior aproximadamente 0.4 veces la longitud de la grieta. Sin embargo en el presente trabajo se ha empleado un área rectangular comprendida entre estos límites.

Las coordenadas de los puntos capturados son empleadas para evaluar la ecuación (3) y obtener una imagen teórica del ángulo de retardo de acuerdo con el modelo de Westergaard (paso 4). Para ello, es preciso definir valores iniciales para K_I , K_{II} y σ_{ox} . La imagen obtenida es continua puesto que se obtiene a partir del

orden de franja teórico. Sin embargo, la imagen experimental está wrapeada, y por consiguiente, las dos imágenes no pueden ser directamente comparadas. Para evitar este problema la distribución teórica es wrapeada empleando una rutina escrita en Matlab (paso 5) basada en las matrices de Jones para simular un polariscopio virtual [12]. De esta manera, es posible obtener un mapa para α_{theo} , que puede ser directamente comparado con el obtenido experimentalmente, α_{exp} . Para calcular K_I , K_{II} y σ_{ox} es preciso definir una función error:

$$g = \alpha_{exp} - \alpha_{theo} \quad (4)$$

Para ello se lleva a cabo un ajuste por mínimos cuadrados (paso 6). Puesto que el sistema resultante de ecuaciones no es lineal, es preciso resolverlo de forma iterativa. Para la resolución se decidió emplear el método Downhill Simplex [13].

Finalmente, se obtienen loa valores de K_I , K_{II} y σ_{ox} . La calidad del ajuste es evaluada empleando dos parámetros estadísticos como son la media y la varianza de la diferencia entre los valores de ángulo retardo teóricos y experimentales para los puntos evaluados.

3. DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

Para comprobar la calidad de la metodología propuesta se llevaron a cabo un a serie de experimentos empleando una probeta tipo CCT de 2 mm de espesor fabricada en policarbonato con una entalla inicial de 10mm. Para generar la grieta se empleo una cuchilla (figura 1).

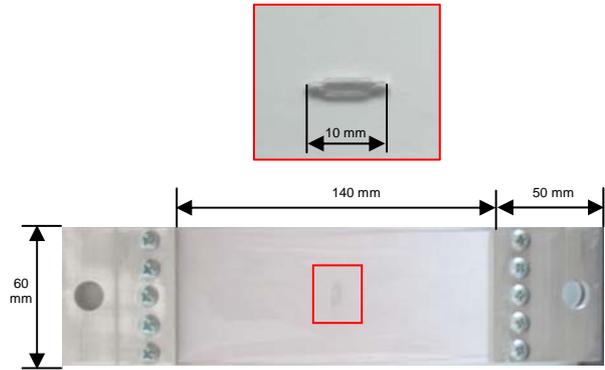


Figura 1. Ilustración que muestra la geometría y dimensiones de las probetas empeladas durante los ensayos.

Para aplicar la carga a la probeta se empleó una máquina universal de ensayo INSTRON 5567 con una capacidad de carga máxima de 30 kN (figura 2) controlada desde un PC de mesa (Dell - Pentium 4 Intel processor).

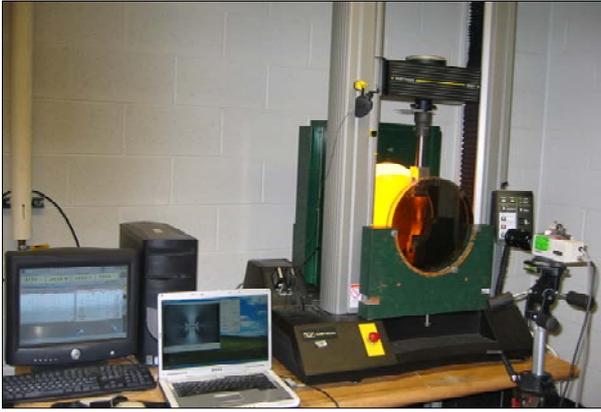


Figura 2. Foto ilustrativa del equipo y el montaje experimental empleado para los ensayos

Durante los ensayos se capturaron imágenes fotoelásticas a intervalos de carga 100 N para un rango de carga comprendido entre 0 y 700 N. La figura 3 muestra una imagen del mapa de retardo en escala de grises para una grieta de 12.18mm con una carga aplicada de 500 N.

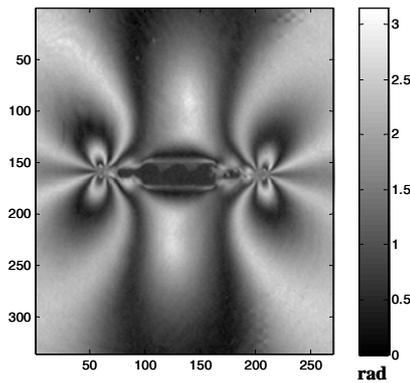


Figura 3. Mapa de ángulo de retardo calculado empleando la metodología propuesta. Imagen correspondiente a una grieta de longitud $2a=12.18\text{mm}$ con una carga aplicada de 500 N.

Para los ensayos, se empleó un polariscopio de transmisión con una fuente de luz monocromática. Para capturar las imágenes se utilizó una cámara CCD Panasonic VW-BP100 controlada por un ordenador portátil (DELL - Centrino Intel Mobile Technology processor) a través de una tarjeta de video (Imperx Inc. VCE-B5A01). Además, se utilizó una lente de zoom de 70-210mm (Tamron model 58A) para aumentar la resolución espacial en la región cercana al vértice de la grieta (figura 3).

Seguidamente, las imágenes fueron analizadas empleando un programa escrito en Matlab® que implementaba los pasos previamente descritos. Como resultado del programa se obtuvieron los valores de K_I , K_{II} y σ_{ox} . Los resultados experimentales se compararon con los obtenidos mediante un modelo de elementos finitos para la misma geometría y condiciones de carga ensayadas.

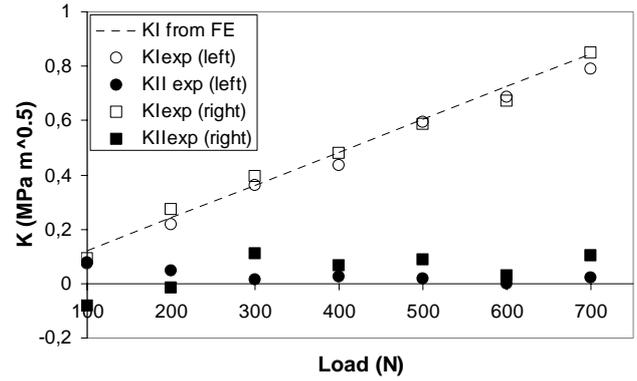


Figura 4. Resultados para K_I y K_{II} , empleando la metodología propuesta con una grieta de longitud 12.18mm para un intervalo de carga de 0 a 700 N.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las figuras 4 y 5 muestran los valores de K_I , K_{II} y σ_{ox} obtenidos a partir del análisis de imágenes fotoelásticas empleando la metodología propuesta. Los resultados experimentales han sido comparados con lo obtenidos mediante el método de los de elementos finitos.

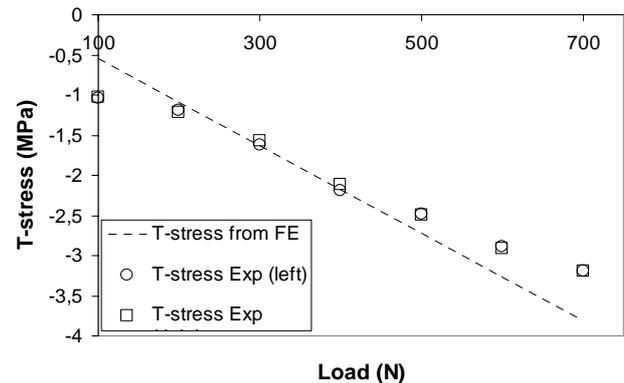


Figura 5. Resultados para σ_{ox} , empleando la metodología propuesta con una grieta de longitud 12.18mm para un intervalo de carga de 0 a 700 N.

Los resultados experimentales muestran un excelente nivel de concordancia con los obtenidos mediante el método de los elementos finitos (figuras 4 y 5). Existe una pequeña dispersión en los datos que puede ser atribuida a la presencia de ruido en las imágenes. Otra posible razón de esta dispersión en los resultados puede ser atribuida a errores cometidos durante la fase de localización del vértice de la grieta, puesto que la identificación de realizó manualmente mediante observación directa de la imagen de franjas. Sin embargo, en todos los casos las calidad del ajuste está avalada por valores muy pequeños del error medio normalizado (menor de 6.25×10^{-3}) y de la varianza (menor de 2.4×10^{-3}). Esto también se pone de manifiesto en la figura 6 en la que se muestra una comparativa entre el ángulo de retardo experimental y el obtenido empleando el modelo de Westergaard con los

valores de K_I , K_{II} y σ_{ox} obtenidos tras realizar el ajuste matemático. Como se puede observar ambas imágenes son prácticamente idénticas con muy pequeñas diferencias de forma localizada. Estas diferencias son razonables teniendo en cuenta que la solución analítica adoptada se basa en condiciones lineales elásticas y asume las condiciones de una grieta en una placa infinita.

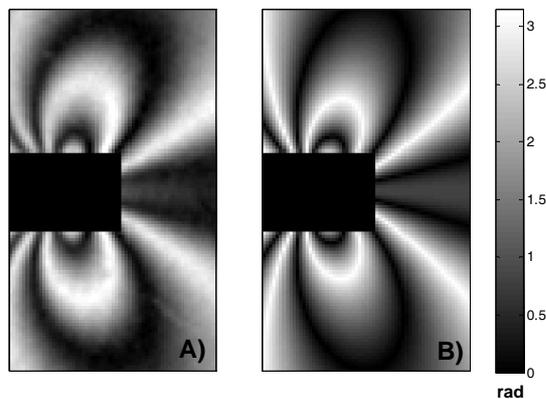


Figura 6. Comparativa entre mapas del ángulo de retardo para una grieta de 12.18 mm de longitud. a) retardo obtenido experimentalmente combinando las imágenes correspondientes a un polariscopio circular en campo claro y oscuro respectivamente y b) calculadas empleando el modelo de Westergaard tras realizar el ajuste matemático.

5. CONCLUSIONES

Con el presente trabajo se ha mostrado un nuevo método para el cálculo del factor de intensificación de tensiones a partir del análisis de imágenes fotoelásticas. Con el método propuesto es posible obtener resultados precisos en tan solo unos segundos capturando solo dos imágenes fotoelásticas correspondientes a dos posiciones diferentes del analizador. El nuevo método evita la necesidad de aplicar algoritmos de desenvolvimiento de la fase en el cálculo del factor de intensificación de tensiones, eliminando fuentes potenciales de error. El método ha sido ensayado con una probeta tipo CCT fabricada en policarbonato de 2mm de espesor. Los resultados muestran un extraordinario nivel de concordancia con los obtenidos mediante el método de los elementos finitos, mostrando el potencial del método propuesto para otras aplicaciones en ingeniería.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha llevado a cabo con la financiación de la Junta de Andalucía a través del proyecto de investigación de Excelencia TEP 2009-5177 y del proyecto del Plan Nacional del I+D del Ministerio de Educación y Ciencia MAT2009-09058. Los autores también quieren agradecer la generosidad del

Departamento de Ingeniería Mecánica de Michigan State University al poner a disposición de los autores sus instalaciones.

REFERENCIAS

- [1] Post, D. (1954), 'Photoelastic stress analysis for an edge crack in a tensile field', Proc. SESA, Vol. 12, no. 1, pp. 99-116.
- [2] Wells, A., Post, D. (1958), 'Dynamic stress distribution surrounding a running crack- a photoelastic analysis', Proc. SESA, Vol. 16, no. 1, pp. 69-92.
- [3] Sanford, R. J., Dally, J. W. (1979), 'A general method for determining the mixed mode stress intensity factor from isochromatic fringe patterns', Engineering Fracture Mechanics, 11, pp. 621-683.
- [4] Diaz, F. A., Patterson, E. A., Tomlinson, R. A., Yates, J.R. (2004), 'Measuring stress intensity factors during fatigue crack growth using thermoelasticity', Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 27, no. 7, pp. 571-584.
- [5] Lopez-Crespo, P., Shterenlikht, A., Patterson, E.A., Withers, P.J., and Yates, J.R., (2008), 'The stress intensity of mixed mode cracks determined by digital image correlation', J. Strain Analysis, 43(8):769-780.
- [6] Nurse, A. D., Patterson, E. A. (1993), 'Determination of predominantly mode II stress intensity factor from isochromatic data', Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 16, no. 12, pp. 1339-1354.
- [7] Patterson, E. A. (2002), 'Digital photoelasticity: Principles, practice and potential', Strain, Vol. 38, pp. 27-39.
- [8] Wang, Z. F., Patterson, E. A. (1995), 'Use of phase-stepping with demodulation and fuzzy sets for birefringence measurement', Optics, Lasers and Engineering, Vol. 22, pp. 91-104.
- [9] Ewalds, H. L. and Wanhill, R. J. H. (1989), 'Fracture Mechanics'. Published by Edward Arnold, Netherlands.
- [10] Westergaard, H. M. (1939), 'Bearing pressures and cracks', Journal of Applied Mechanics, Vol. 6, pp. 49-53.
- [11] Dally, J.W., Riley, W.F., 'Experiental Stress Analysis', 4th edition, Mc-Graw Hill, 2005.
- [12] Ramesh, K. (2000), 'Digital photoelasticity. Advanced techniques and applications', Springer, Berlin,
- [13] Nelder, J. A. and Mead, R. (1965), 'A Simplex Method for Function Minimization', The Computer Journal, Vol. 7, pp. 308-313