

# ESTUDIOS DE FOTOELASTICIDAD: DESARROLLOS Y APLICACIONES

Juan Carlos Briñez de León<sup>1</sup>, Alejandro Restrepo Martínez<sup>2</sup>, Francisco López Giraldo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>M.Sc (c) Automatización y Control Industrial. Grupo de Investigación en Automática y Electrónica, Instituto Tecnológico Metropolitano. Medellín – Colombia. Email: juanbrinez@gmail.com.

<sup>2</sup>Ph.D en Ingeniería de Sistemas. Grupo de Investigación en Automática y Electrónica, Instituto Tecnológico Metropolitano. Medellín – Colombia. Email: alejandromartinez@itm.edu.co.

<sup>3</sup>Ph.D en Física. Grupo de Investigación en Automática y Electrónica, Instituto Tecnológico Metropolitano. Email: franciscolopez@itm.edu.co. Calle 73 No 76A - 354 Vía al Volador, Medellín – Colombia.

## RESUMEN

En los últimos veinte años los estudios de fotoelasticidad han pasado de técnicas basadas en cálculos manuales a técnicas basadas en el procesamiento de imágenes, permitiendo de esta manera realizar la descripción de la distribución de esfuerzos sobre la superficie de un material birrefringente de forma semiautomática. La importancia que presentan los estudios de fotoelasticidad en el campo ingenieril da cabida a este trabajo, en el cual se presenta un artículo de revisión en esta temática, se describe de manera general el fenómeno óptico, los montajes implementados para la observación, las técnicas desarrolladas para la descripción de la distribución de los esfuerzos, los estudios desarrollados en fotoelasticidad digital, y finalmente se presentan algunas aplicaciones desarrolladas desde este tema de trabajo.

**Palabras clave:** Fotoelasticidad, polarización, polariscopio, birrefringencia.

Recibido: 2 de marzo de 2013.

Aceptado: 10 de Junio de 2013.

Received: March 2<sup>nd</sup>, 2013.

Accepted: June 10<sup>th</sup>, 2013.

## PHOTOELASTICITY STUDIES: DEVELOPMENT AND APPLICATIONS

### ABSTRACT

*In the last twenty years photoelasticity studies have passed from manual calculations techniques to image processing techniques, allowing a semiautomatic description of the stress distribution on a material's surface with anisotropic characteristics. The importance of photoelasticity studies presented in the engineering field explains the approach of this work, which is a review that describes the optical phenomenon, assemblies implemented for observation, techniques developed for the description of effort distribution, studies developed for digital photoelasticity, and finally presents some applications developed from this work item.*

**Keywords:** Photoelasticity, polarization, polariscope, birefringence.

## 1. INTRODUCCIÓN

La fotoelasticidad es una técnica experimental que permite el análisis y la descripción de la distribución de los esfuerzos en materiales birrefringentes sometidos a carga, para ello parten de los patrones de las franjas isocromáticas (describen la diferencia de tensiones principales), y de los patrones de franjas isoclínicas (describen la dirección de los esfuerzos principales) [1, 2].

Con el desarrollo de nuevas herramientas computacionales y aprovechando la versatilidad en configuración de los instrumentos ópticos para la observación del fenómeno, los trabajos en fotoelasticidad han pasado de técnicas manuales para el conteo de las franjas a técnicas semiautomáticas que logra la identificación y conteo a partir de técnicas para el procesamiento de imágenes [3-6].

En resumen se puede decir que los estudios de fotoelasticidad parten del efecto óptico que crea el retardo de fase generado cuando un rayo de luz polarizada viaja a través de un material birrefringente sometido a carga, observado a través de un montaje óptico de polarización [5-7].

Hasta el momento el panorama de trabajo en estudios de fotoelasticidad se ha dado generalmente por la forma o métodos en que las técnicas implementadas se ocupan de los problemas asociados de la medición de la intensidad de la luz, del cálculo del retardo de fase y del conteo de las franjas para lograr la descripción de la distribución de los esfuerzos en materiales birrefringentes, con espesor constante bajo la aplicación de cargas fijas [8, 9].

De la revisión bibliográfica se logra inferir que al momento no hay una estandarización de las técnicas y mucho menos una técnica completamente automática en estudios de fotoelasticidad, cada situación de análisis requiere de un conjunto específico de pasos que llevan a la descripción de la distribución de los esfuerzos en materiales birrefringentes sometidos a carga; teniendo en cuenta lo anterior, en este documento se presenta una revisión bibliográfica desde las técnicas implementadas para lograr la descripción de los esfuerzos principales en muestras birrefringentes. Finalmente se presenta una discusión y las conclusiones del trabajo.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO ÓPTICO EN ESTUDIOS DE FOTOELASTICIDAD

La observación a través de un montaje de polarización de un material birrefringente sometido a carga, revela la formación de patrones de franjas de color asociadas a los esfuerzos principales en el material. De manera general en la Figura 1 se presentan los conceptos y técnicas necesarias para el entendimiento del fenómeno óptico utilizado en estudios de fotoelasticidad.

En un montaje de polarización la fuente de iluminación emite rayos de luz no polarizada, las componentes de campo eléctrico de la luz pueden ser representadas a través de (1), donde 'A' es la amplitud de la onda, 't' el tiempo y 'ω' la frecuencia angular.

$$E = Ae^{i\omega t} \quad (1)$$

Cuando un rayo de luz atraviesa un medio específico se introduce un retardo relativo en la componente de campo eléctrico, tal retardo se expresa en (2).

$$\Delta = \frac{2\pi\delta}{\lambda} \quad (2)$$

Donde 'Δ' representa el cambio de fase relativo, en función del retardo de la onda 'δ' que se genera por la diferencia de los índices de refracción de los medios donde viaja la onda; 'λ' es la longitud de onda [10-11].

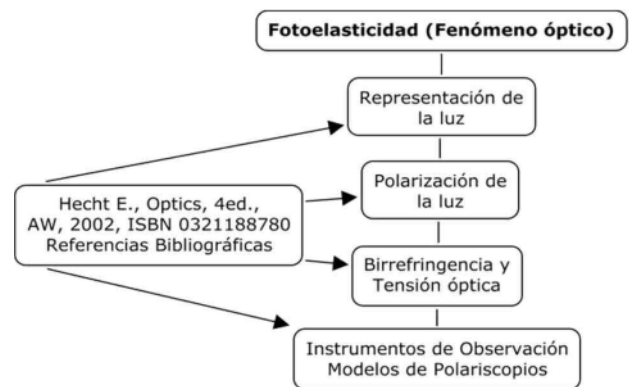


Figura 1. Representación de un rayo de luz

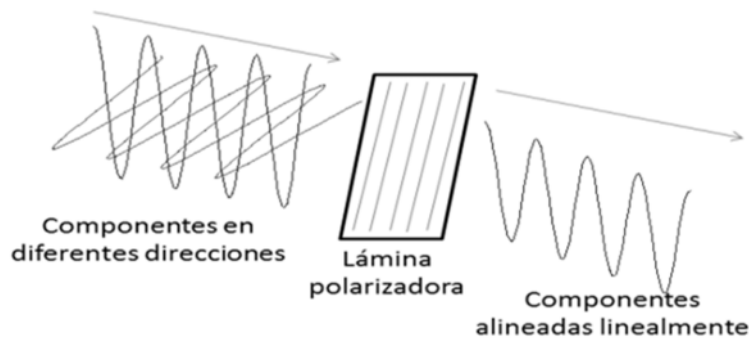


Figura 2. Representación de la polarización lineal de la luz

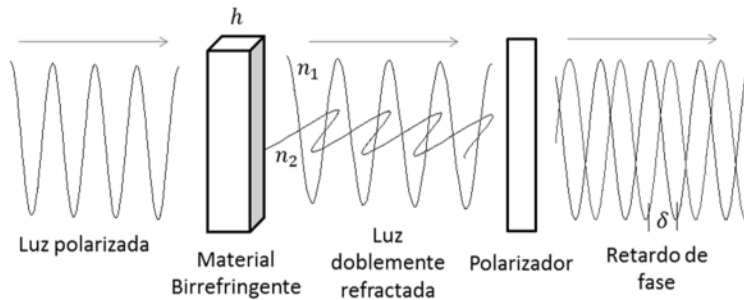


Figura 3. Representación de la luz a través de un material Birrefringente

Antes de que el rayo de luz emitido por la fuente de iluminación incida en el material birrefringente es polarizado a través de un instrumento polarizador; la polarización de la luz consiste en alinear las componentes de campo eléctrico en una dirección específica [12-14]. Dependiendo de la aplicación que se desee abordar se utiliza un tipo de polarización diferente (polarización lineal, polarización circular o polarización elíptica) [15]. En la Figura 2 se presenta un esquema de polarización lineal.

Cuando un rayo de luz polarizada pasa a través de un material birrefringente emergen de él dos componentes linealmente polarizadas, perpendiculares entre sí [16-18]; que al alinearlas nuevamente utilizando un segundo instrumento polarizador crean un retardo de fase ' $\delta$ ' entre ellas, que está asociado al espesor del material ' $h$ ' y sus índices de refracción ' $n$ ' como se expresa en (3).

$$\delta = h(n_1 - n_2) \quad (3)$$

En la Figura 3 se presenta un esquema del comportamiento del rayo de luz polarizado al entrar al material birrefringente, cuando sale de él y cuando sus componentes polarizadas son alineadas

nuevamente en el segundo polarizador, creando entre ellas un retardo de fase que da origen a la formación de las franjas de color asociadas al espesor, a los índices de refracción y a los esfuerzos aplicados sobre el material [19, 20].

Existen materiales que experimentan birrefringencia al ser sometidos a esfuerzos y deformaciones mecánicas, que al ser analizados con la ley de tensión óptica se logra hacer una asociación entre los esfuerzos del material ' $\sigma$ ', con los índices de refracción ' $n_1$  y  $n_2$ ' y el coeficiente de esfuerzo óptico ' $C$ ', como se presenta en (4) [21, 22].

$$\delta = hC(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (4)$$

Del análisis de la expresión (4) se puede inferir que manteniendo constantes los parámetros del experimento (espesor y carga), se pueden describir los esfuerzos principales con la medición del retardo de fase y el conteo de las franjas; es por ello que en su mayoría los trabajos en fotoelasticidad se ocupan de las técnicas para la medición y el cálculo de los parámetros antes mencionados.

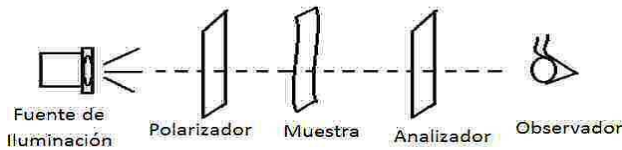


Figura 4. Esquema de un montaje de polariscopio plano

Al despejar las direcciones de esfuerzos principales en función del retardo de fase, la longitud de onda, el coeficiente de esfuerzo óptico y el espesor del material se obtiene la expresión (5), que permite asignar como orden de franjas 'N' a  $\frac{\Delta}{2\pi}$  y como valor de la franja  $\frac{\lambda}{c}$  a ' $\sigma_f$ '; tales expresiones permiten identificar los esfuerzos principales a partir del retardo de fase y del conteo de las franjas.

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{\Delta\lambda}{2\pi Ch} \quad (5)$$

Para la observación del fenómeno óptico y para el cálculo del retardo de fase en estudios de fotoelasticidad se implementan montajes de polarización basados en polariscopios; en síntesis un polariscopio recopila los pasos descritos en párrafos anteriores (Fuente de iluminación, polarización, muestra birrefringente y polarización nuevamente), permitiendo obtener una expresión para la intensidad de la luz que emerge del montaje, la cual está relacionada con el retardo de fase asociado al esfuerzo.

En la Figura 4 se presenta un esquema de un polariscopio plano, y en (6) se presenta la expresión de la intensidad de la luz en el montaje, donde  $I_m$  representa la intensidad máxima transmitida por la fuente de iluminación, ' $\theta$ ' es el ángulo de rotación entre los ejes de los polarizadores [23-25].

$$I = I_m [1 - \text{sen}^2(2\theta)\text{sen}^2(\frac{\Delta}{2})] \quad (6)$$

La variación del ángulo entre los ejes de los polarizadores introduce un patrón de franjas isoclínicas asociadas a la dirección de los esfuerzos principales [26-28]. Aunque el patrón isoclínico puede ser atenuado con la configuración del ángulo entre los ejes de los polarizadores, la descripción de los esfuerzos aún requiere del cálculo del retardo de fase y del conteo manual de las franjas.

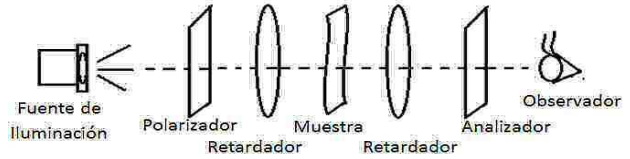


Figura 5. Esquema de un montaje de polariscopio circular.

A diferencia del montaje de polariscopio plano, el polariscopio circular introduce dos retardadores de cuarto de onda ubicados antes y después de la muestra birrefringente [29, 30], como se observa en la Figura 5.

La expresión para la intensidad de la luz se presenta de forma general si tener en cuenta la configuración de los instrumentos ópticos en (7).

$$I = I_m [1 - \text{sen}2(\gamma - \varphi)\text{cos}\Delta - \text{sen}2(\gamma - \theta)\text{cos}2(\gamma - \varphi)\text{sen}] \quad (7)$$

Donde  $\gamma$  es el ángulo entre los ejes del primer polarizador y el primer retardador de cuarto de onda,  $\varphi$  es el ángulo entre los ejes del segundo polarizador y el segundo retardador [31, 32]. La polarización circular se consigue cuando los ejes de los retardadores de cuarto de onda se ubican a 45 grados con respecto al eje de polarización, la expresión para la intensidad de la luz se muestra en (8); en esta última expresión se evidencia que la intensidad sólo presenta dependencia del retardo de fase y no del ángulo de rotación entre los ejes de los polarizadores, lo que disminuye el efecto del patrón isoclínico.

$$I = I_m \left[ \text{sen}^2 \left( \frac{\Delta}{2} \right) \right] \quad (8)$$

En la Tabla 1 se presenta una comparación entre las ventajas y desventajas de los dos montajes de polariscopios descritos anteriormente.

De lo anterior se puede inferir que los estudios de fotoelasticidad requieren de la implementación de un montaje de polarización para la observación del fenómeno óptico (formación de los patrones de franjas de color asociadas a los esfuerzos impregnados en el material birrefringente); las técnicas desarrolladas para el análisis de las franjas y la automatización del proceso depende de la aplicación que se requiera, y hacen parte de los desarrollos y aplicaciones en el tema.

Tabla 1. Comparación entre polariscopio plano y circular

Modelo de polariscopio plano
<p><b>Ventajas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Montaje simplificado</li> <li>- Menor uso de elementos ópticos</li> <li>- Poco susceptibles a la calibración</li> <li>- Modelo matemático simplificado</li> </ul>
<p><b>Desventajas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Combinación del patrón isoclínico con el patrón isocromático.</li> <li>- Dificultad para el cálculo del retardo de fase y el conteo manual de las franjas.</li> </ul>
Modelo de polariscopio circular
<p><b>Ventajas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Separación del patrón isoclínico con el patrón isocromático</li> <li>- Múltiple configuración para el conteo de las franjas</li> <li>- Sistemas de expresiones para la intensidad de la luz, una por cada configuración.</li> </ul>
<p><b>Desventajas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Uso de un mayor número de componentes ópticos en el montaje.</li> <li>- Mayor susceptibilidad a la calibración de los elementos ópticos.</li> <li>- conteo manual de las franjas</li> </ul>

### 3. DESARROLLOS Y APLICACIONES

#### 3.1 Fotoelasticidad Digital

El desarrollo de nuevas herramientas computacionales ha permitido que los estudios en fotoelasticidad pasen de técnicas convencionales soportadas en el conteo manual de las franjas, a técnicas semiautomáticas soportadas en el procesamiento de imágenes adquiridas a través de un montaje de polarización; tales técnicas son conocidas como fotoelasticidad digital [33-35]. La Tabla 2 presenta un conjunto de trabajos realizados en este tema.

Los primeros trabajos en fotoelasticidad digital alrededor del año 1970 fueron orientados a la ubicación del centro de las franjas, para ello desarrollaron una técnica llamada adelgazamiento de franjas, la cual consiste en tomar dos imágenes de las franjas de color sobre la misma muestra, una en campo oscuro y otra en campo claro, se realiza la resta entre las dos imágenes obteniendo una imagen con un mayor número de franjas y con un

Tabla 2. Relación de trabajos en fotoelasticidad digital con respecto al parámetro de medición

Autor	Medición	Técnica
-K. Ramesh. et al, 2005 -K. Ramesh. et al, 2007 -Venketesh, et al, 2009 -Simon B. et al, 2011	Medición de la intensidad de la luz	Fotoelasticidad de tercera franja
-K. Madhu. et al, 2007 -Ramesh K. et al, 2011	Medición de la intensidad de la luz, cálculo del retardo de fase	Fotoelasticidad RGB
-Liu Z. et al, 2010	Medición del retardo de fase	Estudios de contorno en seis fases
-Villa J. et al, 2008 -Kasimayan, et al, 2010 -Dijkstra, et al, 2010 Kihara T. et al, 2011	Medición del retardo de fase	Desarrollo de fase

grosor menor, mejorando la identificación de las franjas, pero el orden se obtiene de forma manual; como la técnica anterior se desarrollaron otras denominadas Skeleton y Multiplicación de franjas para realizar el conteo de las franjas [36, 37].

En las últimas tres décadas las técnicas de fotoelasticidad digital han centrado sus avances en la identificación de los campos de las franjas conocidos como mapas de fase, lo que permite detectar de forma continua el retardo de fase en un campo completo de esfuerzos; sin embargo en este tipo de técnicas se reduce el análisis de la cantidad de ordenes de las franjas, dejando de lado el análisis de los patrones isoclínicos de las franjas. La intensidad de la luz está asociada a la intensidad del pixel, es por ello que el sistema es susceptible al ruido por iluminación en el ambiente o por la calibración de los instrumentos ópticos.

Alrededor de los años 90 se introduce en los estudios de fotoelasticidad una técnica para la descripción de los parámetros isocromáticos de las franjas a partir de su comportamiento espectral, esta técnica recibe el nombre de fotoelasticidad de tercera franja, y permite detectar valores muy bajos y muy altos para el orden de las franjas, valores necesarios para la descripción de los esfuerzos,

valores que no son detectables a través del conteo manual [38, 39].

Ramesh en el año 1995 propone técnicas basadas en el análisis a color de las franjas, en la técnica RGB propone el desarrollo de un código de colores para asociar las franjas de color con las direcciones de los esfuerzos principales. Es de resaltar que la técnica anteriormente mencionada presenta dependencias con la calibración de los colores, los cuales son susceptibles a la iluminación del espacio, dificultad que fue abordada por Venketesh en el año 2009.

Aprovechando la múltiple configuración de los instrumentos ópticos en el montaje de polariscopio circular, la técnica de desenvolvimiento de fase o escalonamiento se basa en la adquisición de tres a seis imágenes que corresponden a diferentes configuraciones de los instrumentos ópticos en el polariscopio, y con ello resolver los parámetros fotoelásticos a partir del sistema de ecuaciones (Retardo de fase y diferencia de esfuerzos) para cada pixel de la imagen [40], sin embargo la implementación de la técnica requiere de inspección visual para definir el orden de la franjas.

Existen normas establecidas que proponen la estandarización de pruebas en estudios de fotoelasticidad, resaltando que la bibliografía revela que cada tipo de aplicación requiere de la implementación de un conjunto de pasos específicos. La Norma D4093-95: Método estándar para pruebas de mediciones de birrefringencia y tensiones residuales en materiales plásticos (Reaprobada en el año 2010), parte del concepto de polarización de la luz para realizar una prueba estándar para la caracterización de los esfuerzos principales, el método se basa en la medición del retardo de fase y la determinación de los esfuerzos principales, mediante la ecuación de la intensidad de la luz del montaje de polariscopio circular.

Un compensador de fase es utilizado para hacer las mediciones del retardo, las cuales se deben realizar dentro del sistema internacional de medidas (pulgada-libra); el factor de se determina dividiendo el retardo de fase entre el espesor del material. En síntesis la norma consiste en una prueba aplicando la expresión para la intensidad de la luz, sobre muestras de espesor constante bajo la aplicación de cargas fijas [41-43].

En los trabajos realizados en las últimas dos décadas se observa un esfuerzo de los autores por simplificar el problema de las múltiples configuraciones necesarias de los instrumentos ópticos del polariscopio para el cálculo del retardo de fase, con ello la descripción de la distribución de los esfuerzos [44-50]. Para el análisis de esfuerzos en materiales no birrefringentes existen otros tipos de técnicas basadas en el uso de recubrimientos birrefringentes y en la implementación del montajes de polarización por reflexión de la luz [51, 56].

### 3.2 Aplicaciones

Las aplicaciones en estudios de fotoelasticidad tienen que ver con la identificación y descripción de la distribución de tensiones en materiales sólidos y estructuras de soporte; para ello se describen los esfuerzos principales bajo la aplicación de recubrimientos hechos a partir de materiales birrefringentes.

En [53-56] se presentan trabajos orientados a la medición de las tensiones y grietas en estructuras de edificaciones aplicando técnicas para el estudio de las propiedades fotoelásticas en un material traslucido o polimérico, el sistema consiste en adherir el material birrefringente sobre la estructura y luego analizar las propiedades fotoelásticas del material y los patrones de las franjas, con ello se logra la descripción de la distribución de los esfuerzos.

La descripción de esfuerzos en prótesis humanas a partir de estudios de fotoelasticidad se logra en [57-60], el trabajo consiste en aplicar un recubrimiento birrefringente sobre la prótesis, con la descripción de los parámetros fotoelásticos se logra la distribución de esfuerzos. A nivel industrial en [61-63] se propone una metodología para la implementación de un sistema basado en la medición de las características fotoelásticas (descripción de los mapas de fase) para el control de calidad en sistemas de corte de materiales poliméricos.

### 2.9 Discusión

Aunque la revisión bibliográfica muestra que el desarrollo de las técnicas computacionales permite la descripción de los mapas de fase en forma semiautomática para un campo de esfuerzos, las técnicas aun son susceptibles al ruido introducido por la luz del fondo o del ambiente, y a los parámetros de configuración de los instrumentos

ópticos y de la cámara de captura de las imágenes; lo anterior se debe a que los algoritmos desarrollados parten del valor de la intensidad del pixel en la imagen, la cual es susceptible a cualquiera de los parámetros antes mencionados.

Las franjas asociadas a los esfuerzos del material birrefringente sometido a carga, observadas por medio de la imagen, no solo contienen información relacionada con la intensidad de la luz, también se observan otras características que aún no son contempladas en trabajos de fotoelasticidad, por ejemplo, estudio de formas, comportamiento de la saturación, análisis de tamaños, entre otras características que podrían en alguna medida disminuir el problema de calibración de la intensidad del pixel.

Existen materiales que experimentan birrefringencia al ser sometido a esfuerzos mecánicos y que presentan dificultades para mantener un espesor constante (Deformación de películas plásticas), casos donde la aplicación de las técnicas presentadas hasta el momento en estudios de fotoelasticidad no permiten la descripción de la distribución de los esfuerzos, donde el fenómeno óptico al igual que en estudios de fotoelasticidad es observable a través de montajes de polarización, casos que requieren de otro tipo de técnicas no implementadas para la descripción de los parámetros fotoelásticos.

### 3. CONCLUSIONES

El cálculo del retardo de fase a partir de la medición de la intensidad de la luz en estudios de fotoelasticidad permite la solución de una variedad de problemas relacionados con la distribución de los esfuerzos y el orden de las franjas en un material específico de espesor constante bajo la aplicación de cargas fijas.

La calibración de los instrumentos ópticos dentro del montaje de polarización modifican las intensidades percibidas y con ello los resultados de la descripción de la distribución de los esfuerzos; sin embargo, el problema ha sido tratado desde la calibración del color, la calibración de la cámara y a través del desarrollo de nuevos montajes de observación para la captura de cuatro intensidades de un mismo punto con configuraciones ópticas diferentes.

Las técnicas utilizadas en fotoelasticidad digital hacen parte del conjunto de herramientas utilizadas en la actualidad, cada aplicación tiene un requerimiento en particular donde los algoritmos empleados para el procesamiento de las imágenes facilitan la configuración de los parámetros dependiendo de las necesidades del problema y el análisis de múltiples punto de observación; sin embargo, problemas asociados a la intensidad del pixel podrían ser disminuidos con trabajos donde se consideren otras características observadas en la imagen.

Debido a que en estudios de fotoelasticidad las técnicas están enfocadas al uso de muestras de espesor constante bajo la aplicación de cargas fijas, se abre un campo de trabajos futuros encaminados a la aplicación de estudios de fotoelasticidad en muestras que experimenten cambios en sus propiedades ópticas durante la aplicación de la carga.

### 4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Wong C. F. Birefringence Measurement Using APhotoelastic Modulator. Applied Optics Vol. 18, No. 23, pp 3996-3999, 1979.
- [2] Achintya K. Bhowmik. Multiple-Reflection Effects Inphotoelastic Stress Analysis. Applied Optics, Vol. 40, No. 16, pp. 2687-2691, 2000.
- [3] Ainola Leo AndAbenHillar. On The Optical Theory of Photoelastic Tomography. Optical Society of America, Vol. 21, No. 6, pp 1093-1101, 2001.
- [4] Quiroga J. A. And González-Cano A. Phase Measuring Algorithm For Extraction Of Isochromatics Of Photoelastic Fringe Patterns. Applied Optics Vol. 36, No. 32, pp 8397-8402, 1997.
- [5] Ramesh K., Shivendu Gupta, Asish A. Kelkar. Evaluation of stress field parameters in fracture mechanics by photoelasticity-revisited, Engineering Fracture Mechanics, vol 56, pp 25-45, 1997.
- [6] LesniakJhon R., Zickel Michael. An Innovative Polariscopes ForPhotoelastic Stress Analysis. Spring, Vol. 44, No. 4, pp 1-4, 1997.
- [7] Ramesh K., Mangal S. K. Determination of Characteristic Parameters In Integrated Photoelasticity By Phase-Shifting Technique. Optics and Lasers in Engineering, Vol. 31, No. 4, pp 263-278, 1999.
- [8] Lesniak J., Zhang S. J. And Patterson E. A. Design And Evaluation Of The Poleidoscope: A

- Novel Digital Polaroscope. Society For Experimental Mechanics, Vol. 44, No. 2, pp 128-135, 2004.
- [9] Asundi Anand, Tong Liu And Gin Boay Chai. Dynamic Phase-Shifting Photoelasticity. Applied Optics, Vol. 40, No.22, pp 3654-3658, 2001.
- [10] Zhenkun Lei, Hai Yun, Dazhen Yun, Yilan Kang. Numerical analysis of phase-stepping interferometric photoelasticity for plane stress separation. Optics and Lasers in Engineering, vol 45, pp 77-82, 2007.
- [11] Saito Megumi, Sato Yoichi, Ikeuchi Katsushi, Kashiwagi Hiroshi. Measurement of Surface Orientations of Transparent Objects Using Polarization In Highlight. Journal Optical Society America, Vol. 16, pp 2286-2293, 1999.
- [12] Ramesh K., Tamrakar D. K. Improved Determination Of Retardation In Digital Photoelasticity By Load Stepping. Experimental Mechanics, Vol. 33, No. 6, pp 387-400, 2000.
- [13] Aben Hillar And Ainola Leo. Isochromatic Fringes In photoelasticity Journal Of The Optical Society Of America A - Optics Image Science And Vision, Vol. 17 No. 4, pp 750 – 755, 2000.
- [14] Ashokan K., Ramesh K. A novel approach for ambiguity removal in isochromatic phase map in digital photoelasticity, Measurement Science and Technology, vol 17, pp 2891-2896, 2006.
- [15] Gleyzes P. And Boccara A. C. Multichannel Nomarski Microscope With Polarization Modulation: Performance And Applications. Optical Society of America, Vol. 22, No. 20, pp 1529-1531, 1997.
- [16] Aben Hillar, Ainola Leo, Errapart Andrei, And Anton Johan. Photoelastic Tomography For Residual Stress Measurement In Glass. Spie, Vol. 44, pp 1-11, 2005.
- [17] Brock Neal, Hayes John, Kimbrough Brad, Millerd James, North-Morris Michael. Dynamic Interferometry. Spie, Vol. 14, No. 4, pp 26-41, 2005.
- [18] De Groot Peter. Optical Thickness Measurement of Substrates Using A Transmitted Wavefront Test At Two Wavelengths To Average Out Multiple Reflection Errors. Spie, Vol. 4777, pp 177-183, 2002.
- [19] Madhu K., Prasath R., Ramesh K. Colour adaptation in three fringe photoelasticity, Experimental Mechanics, vol 47, pp 271-276, 2007.
- [20] Millerd James E., Brock Neal J., Hayes John B. And Wyant James C. Modern Approaches In Phase Measuring Metrology. Spie, Vol. 5856, pp 14-22, 2005.
- [21] Flaherty Tony, O'connor Gerard. Application of Spectral Reflectivity To The Measurement Of Thin-Film Thickness. Spie, Vol. 4876, pp 976-983, 2003.
- [22] Palanisamy P. K., Mangaiyarkarasi D. And Ramalingam A. An Instrument For Online Measurement of Structural Orientation In Translucent Polymer Sheets. Springer, Vol. 23, No. 1, pp 23-26, 1999.
- [23] Ashokan K., Ramesh K. An adaptive scanning scheme for effective whole field stress separation in digital photoelasticity. Optics and Laser Technology, vol 41, pp 25– 31, 2009.
- [24] Kasimayan T., Ramesh K. Digital reflection photoelasticity using conventional reflection polariscope. Optics and Lasers in Engineering, vol 34, pp 45-51, 2010.
- [25] Luciano R.O. de Lima, Jose L. de F. Freire, Pedro C.G. da S. Vellasco, Sebastiao A.L. de Andrade, Jose G.S. da Silva. Structural assessment of minor axis steel joints using photoelasticity and finite elements. Journal of Constructional Steel Research, vol 65, pp 466–478, 2009.
- [26] Villa Jesus, Quiroga Juan Antonio, Pascual Eduardo. Determination of isoclinics in photoelasticity with a fast regularized estimator. Optics and Lasers in Engineering, vol 46, pp 236–242, 2008.
- [27] Ramji M., Ramesh K. Whole field evaluation of stress components in digital photoelasticity— Issues, implementation and application. Optics and Lasers , vol 46, pp 257–271, 2008.
- [28] Dijkstra Jelke, Broere Wout. New Method of Full-Field Stress Analysis and Measurement Using Photoelasticity. Optics and Lasers in Engineering, vol 33, pp 469-481, 2010.
- [29] Ajovalasit A., Pitarresi G., Zuccarello B. Limitation of carrier fringe methods in digital photoelasticity. Optics and Lasers in Engineering, vol 45, pp 631-636, 2007.
- [30] Pinit P., Umezaki E. Digitally whole-field analysis of isoclinic parameter in photoelasticity by four-step color phase-shifting technique. Optics and Lasers in Engineering, vol 45, pp 795–807, 2007.
- [31] Liu Z., Zhao F. M., Jones F. R. Six image phase stepped photoelasticity for the quantification of the stress field around 25  $\mu$  m reinforcing fibres. Constructional Steel Research, vol 70, pp 2039-2044, 2010.
- [32] Ramji M., Prasath R. G. R. Sensitivity of isoclinic data using various phase shifting techniques in digital photoelasticity towards generalized error sources. Optics and Lasers in Engineering, vol 49, pp 1153-1167, 2011.
- [33] Ramesh K., Sai Prasad V., Madhu K. R. Towards Effective Phase Unwrapping In Digital Photoelasticity. Experimental Mechanics, Vol. 42, No. 4, pp 421-436, 2004.



- [34] Ramesh K., Sanjeev S. Deshmukh. Three-fringe photoelasticity - use of colour image processing hardware to automate ordering of isochromatic fringes, *Strain*, vol 32, pp 79-86, 2005.
- [35] Ajovalasit Augusto, Petrucci Giovanni, Scafidi Michele. Phase shifting photoelasticity in white light. *Optics and Lasers in Engineering*, vol 45, pp 596-611, 2007.
- [36] Madhu K., Ramesh K. Noise removal in three-fringe photoelasticity by adaptive colour difference estimation. *Optics and Lasers in Engineering*, vol 45, pp 175-182, 2007.
- [37] Ramji M, Nithila E, Devvrath K, Ramesh K. Assessment of autonomous phase unwrapping of isochromatic phase maps in digital photoelasticity. *Springer, Sadhana Vol. 33*, pp 27-44, 2008.
- [38] Kale S., Ramesh K. Advancing frontscanning approach for three-fringe photoelasticity. *Optics and Lasers in Engineering*, Vol 51, pp 592-599, 2013
- [39] Simon B. Neethi, Ramesh K. Colour adaptation in three fringe photoelasticity using a single image. *Optics and Lasers in Engineering*, vol 35, pp 59-65, 2011
- [40] Simon B. Neethi, Kasimayan T., Ramesh K. The influence of ambient illumination on colour adaptation in three fringe photoelasticity. *Optics and Lasers in Engineering*, vol 46, pp 245-266, 2011
- [41] Kihara T. Measurement of Applied Stresses and Residual Stresses on a Residual Stress Model by Applying Two Different Loads. *Optics and Lasers in Engineering*, vol 51, pp 1275-1283, 2011.
- [42] D4093-95. Standard Test Method for Photoelastic Measurements of Birefringence and Residual Strains in Transparent or Translucent Plastic Materials. *ASTM*, marzo 28, 2011.
- [43] Frankovský P., Ostertag O., Ostertagová E. Automation of experiments in photoelasticity. *Procedia Engineering*, Vol 48 pp 153 - 157, 2012
- [44] Millerd James E., Brock Neal J., Hayes John B. And Wyant James C. Instantaneous Phase-Shift, Point-Diffraction Interferometer. *Spie*, Vol. 5531, pp 264-272, 2004.
- [45] Novak Matt, Millerd James, Brock Neal, North-Morris Michael, Hayes John, And Wyant James. Analysis of a Micropolarizer Array-Based Simultaneous Phase-Shifting Interferometer. *Applied Optics*, Vol. 44, No. 32, pp 6861-6868, 2005.
- [46] Kimbrough Brad, Millerd James, Wyant James, Hayes John. Low Coherence Vibration Insensitive Fizeau Interferometer. *Spie*, Vol. 6292, pp 1-12, 2006.
- [47] Yoneyama Satoru, Kikuta Hisao. Simultaneous Observation of Phase-Stepped Photoelastic Fringes Using A Pixelated Microretarder Array. *Spie*, Vol. 45, No. 8, pp 1-7, 2006.
- [48] Venketesh N. Dubey, Gurtej S. Grewal. Noise removal in three-fringe photoelasticity by median filtering. *Optics and Lasers in Engineering*, vol 47, pp 1126-1230, 2009.
- [49] Venketesh N. Dubey, Gurtej S. Grewal. Efficacy of photoelasticity in developing whole-field imaging sensors. *Optics and Lasers in Engineering*, vol 48, pp 288-294, 2010.
- [50] Chang Shih-Hsin Wu, Hsien-Huang P. Improvement of digital photoelasticity based on camera response function. *Optical Society of America*, vol 50, pp 5263-5270, 2011.
- [51] Compañ V., Lopez M. L., Andrio A., Lopez A. Determination of The Oxygen Transmissibility And Permeability Of Hydrogel Contact Lenses. *Applied Polymer Science*, Vol. 72, pp 321-327, 1999.
- [52] Deuschle H. Matthias, Falk K. Wittel, Gerhard Henry, Busse Gerhard, Kroplin Bernd-H. Investigation of progressive failure in composites by combined simulated and experimental photoelasticity. *Computational Materials Science*, vol 38, pp 1-8, 2006.
- [53] Ayatollahi MR., Mirsayar MM., Dehghan, M. Experimental determination of stress field parameters in bi-material notches using photoelasticity. *Optics and Lasers in Engineering*, vol 32, pp 4901-4908, 2011.
- [54] Shakerin Said, Jensen Daniel. Enhancement of Mechanics Education By Means of Photoelasticity And Finite Element Method. *Engineering Mechanics Education*, Vol. 29, No. 4, pp 307-319, 2000.
- [55] Moilanen Pasi. Measurement Of Local Bubble Size Distribution In Stirred Vissels Using Various Techniques. *European Structural Integrity Society*, Vol. 102, No. 2, pp 133-143, 2004.
- [56] Ortiz M., Rosakis A. J. 3d Modelling of Impact Failure In Sándwich Structures. *California Institute of Technology. European Structural Integrity Society*, Vol. 32, pp 527-537, 2003.
- [57] Fu-Jen Ko And Han-Ping David Shieh. High-Efficiency Micro-Optical Color Filter For Liquid-Crystal Projection System Applications. *Applied Optics*, Vol. 39, No. 7, pp 1159-1163, 2000.
- [58] Ueda Cristiane, Markarian Roberto Adrian, Sendyk Cláudio Luiz, Laganá Dalva Cruz. Photoelastic Analysis Of Stress Distribution On Parallel And Angled Implants After Installation Of Fixed Prostheses. *Braz Oral Res*, Vol. 18, No. 1, pp 45-52, 2004.

- [59] Chang C.W, H.S. Lien. Expansion stress analysis of ferroconcrete corrosion by digital reflection photoelasticity. *NDT&E International*, vol 40, pp 309–314, 2007.
- [60] Rodríguez Lelis J.M., AbúndezPliego A., Vargas Treviño Marciano, Navarro Torres J., Vela ArvizoDagoberto, Piña Piña G. A Qualitative Stress Analysis of a Cross Section of the Trabecular Bone Tissue of a Distal Femur by Photoelasticity. *IEEE*, vol 1, pp 422-425, 2007.
- [61] Zhenkun Lei, HaiYun, Yanru Zhao, Yongming Xing, Xuemin Pan. Study of shear transfer in Al/epoxy joint by digital photoelasticity. *Optics and Lasers in Engineering*, vol 47, pp 701–707, 2009.
- [62] Chang Che Way, Lien Hung Sheng, Lin Chen Hua. Determination of the stress intensity factors due to corrosion cracking in ferroconcrete by digital image processing reflection photoelasticity. *Optics and Lasers in Engineering*, vol 52, pp 1570-1575, 2010.
- [63] Rinaldi D., A. Ciriaco, M. Lebeau, N. Paone. Quality control on pre-serial Bridgman production of PbWO<sub>4</sub> scintillating crystals by means of photoelasticity. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, vol 615, pp 254–258, 2010.