Photoelasticity in plastic material Fotoelasticidad en materiales plásticos

A. I. Gómez-Varela^{1,S*}, A. Gargallo^{1,S}

1. Departamento de Física Aplicada (Área de Óptica), Universidade de Santiago de Compostela, Facultade de Óptica e Optometría (Campus Vida), 15782, Santiago de Compostela, Spain

(*) E-mail: anaisabel.gomez@usc.es

S: miembro de SEDOPTICA / SEDOPTICA member

Received / Recibido: 01/06/2015

Accepted / Aceptado: 15/06/2015

DOI: 10.7149/OPA.48.2.163

ABSTRACT:

This work illustrates the experimental technique known as photoelasticity and is demonstrated with a photograph taken in the classroom with secondary students. By means of a computer screen, a plastic material and a polarizer, we can build a simple system for stress analysis. The fringe pattern obtained with this basic polariscope is due to the fact that plastic media is subjected to stress or strain because of the fabrication process. Stress and strain in a plastic object also appear under the application of external forces. This fact allows for an accurate determination of stress states at specific weak points and in localized areas of a component.

Key words: photoelasticity, polarization, birefringence, educational experiments, optics education

RESUMEN:

Este trabajo trata la técnica experimental conocida como fotoelasticidad y es verificada mediante una fotografía tomada durante una clase práctica con alumnos de secundaria. Utilizando una pantalla de ordenador, un objeto de plástico y un polarizador es posible construir un equipo sencillo que permite el análisis de tensiones en el material. El patrón de franjas obtenido con este polariscopio de funcionamiento básico se debe a que el medio plástico sufre el efecto de tensiones o deformaciones por causa del proceso de fabricación. Estas tensiones y deformaciones también aparecen bajo la acción de fuerzas externas y este hecho permite el cálculo de puntos frágiles y zonas tensionadas de un material.

Palabras clave: fotoelasticidad, polarización, birrefringencia, experimentos educativos, educación en óptica

Fig 1. Demostración del fenómeno de fotoelasticidad en un material plástico: (a) patrón de franjas obtenido empleando un polarizador y una pantalla de un ordenador y (b) patrón de franjas obtenido usando el mismo polarizador pero rotado 90° con respecto al caso anterior.

REFERENCES AND LINKS / REFERENCIAS Y ENLACES

- [1] R. S. Sirohi, *Optical Methods of Measurement: Wholefield Techniques*. Second Edition, Boca Raton, CRC Press (2009).
<http://dx.doi.org/10.1201/9781420017762>
 - [2] A. Bhowmik, "Multiple-reflection effects in photoelastic stress analysis," *Appl Opt* **40**, 2687-2691 (2001).
<http://dx.doi.org/10.1364/AO.40.002687>
 - [3] E. Rincón, L. Castro, D. Iglesias, *Resistencia de materiales: determinación de tensiones y deformaciones*. España, Editorial Visión Libros (2006)
 - [4] MR. Ayatollahi, MM. Mirsayar, M. Dehghan, "Experimental determination of stress field parameters in bi-material notches using photoelasticity," *Opt Lasers Eng* **32**, 4901-4908 (2011).
<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2011.06.002>
 - [5] D. H. Matthias, F. K. Wittel, G. Henry, B. Gerhard, K. Bernd-H, "Investigation of progressive failure in composites by combined simulated and experimental photoelasticity," *Comp Mater Sci* **38**, 1-8 (2006).
<http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2005.12.029>
 - [6] E. Hecht, *Optics*. Madrid, Addison-Wesley Iberoamericana (2002).
 - [7] K. Madhu, R. Prasath, K. Ramesh, "Colour adaptation in three fringe photoelasticity," *Exp Mech* **47**, 271-276 (2007).
<http://dx.doi.org/10.1007/s11340-006-9012-x>
-

1. Introducción

La fotoelasticidad es una técnica experimental empleada para el análisis y el registro de tensiones mecánicas en materiales birrefringentes tales como vidrios o plásticos [1]. El análisis fotoelástico se utiliza frecuentemente en situaciones en las que se requiere información sobre tensiones o deformaciones de zonas amplias de una estructura. Dicho análisis proporciona evidencias cuantitativas de las regiones sometidas a mayor tensión sobre la superficie y puntos interiores de la estructura, así como también permite discernir zonas sometidas a niveles de estrés bajo. Esto último suele indicar que el material está siendo utilizado de forma ineficiente. Usando una luz polarizada es posible estudiar e investigar la distribución de las tensiones en materiales plásticos, como es el caso de este trabajo. Para ello se parte del estudio de los patrones de las franjas isocromáticas, que describen la diferencia de tensiones principales, y de los patrones de franjas isoclínicas, que describen la dirección de los esfuerzos principales [1-3]. La fotoelasticidad es particularmente útil en aquellos casos en los que el material que se pretende caracterizar presenta una geometría complicada y que no requiere de especificaciones ambientales rigurosas para su aplicación. En situaciones como estas, el uso de métodos analíticos (métodos matemáticos y computacionales) que suelen ser engorrosos y difíciles de manejar, no siempre es la opción más recomendable, resultando mucho más apropiadas y versátiles las metodologías experimentales.

El término fotoelasticidad refleja perfectamente la naturaleza de este método de análisis: mientras que "foto" implica el uso de radiación luminosa y técnicas ópticas, "elasticidad" se refiere al estudio de tensiones y deformaciones de un material.

Para el análisis de esfuerzos en materiales no birrefringentes existen otros tipos de técnicas basadas en el uso de recubrimientos birrefringentes (técnica del recubrimiento fotoelástico) y montajes de polarización por reflexión de la luz [4,5].

La técnica de fotoelasticidad se basa en la propiedad que exhiben algunos materiales conocida como doble refracción o birrefringencia. Las ondas electromagnéticas son ondas transversales: los vectores de campo eléctrico y magnético son ortogonales y vibran perpendicularmente a la dirección de propagación en vacío o en un medio isótropo. Cuando un material es birrefringente, el valor del índice de refracción depende de la orientación relativa del vector campo eléctrico de la onda respecto del material considerado. Algunos materiales cuando están libres de tensión presentan propiedades ópticas de carácter isótropo de forma que el índice de refracción es independiente de la dirección considerada en el medio. Sin embargo, cuando los citados materiales se encuentran sometidos a un estado tensional se vuelven anisótropos, presentando un índice de refracción que depende de cual sea la dirección considerada. Una vez dejan de estar

sometidos a tensiones, el fenómeno de doble refracción o anisotropía óptica desaparece. Este fenómeno fue observado por primera vez por Brewster y constituye la base de la fotoelasticidad.

La luz es una onda electromagnética que vibra en cualquier dirección contenida en un plano normal a la dirección de propagación. Sin embargo, cuando la orientación del campo eléctrico es constante dentro del plano normal a la dirección de propagación se dice que la onda está linealmente polarizada [6]. Cuando un haz de luz polarizada incide normalmente sobre un material fotoelástico de espesor d , emergen de él dos componentes linealmente polarizadas, perpendiculares entre sí [1] y que adquieren una diferencia de fase debido al diferente valor de los índices de refracción principales n_1 y n_2 del medio (anisotropía óptica). Dicha diferencia de fase viene dada por la expresión

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} |n_1 - n_2| d = \frac{2\pi C}{\lambda} (\sigma_1 - \sigma_2) d \quad (1)$$

El cambio de fase depende linealmente de la diferencia de tensiones principales en cada punto, σ_1 y σ_2 , del espesor y de una constante del material que recibe el nombre de constante fotoelástica del medio, C ; asimismo, es inversamente proporcional a la longitud de onda, λ . La relación anterior constituye la relación básica de la fotoelasticidad.

A efectos prácticos suele reescribirse la ecuación (1) como

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{mf_\sigma}{d} \quad (2)$$

donde $m = \delta/2\pi$ es el orden de la franja y $f_\sigma = \lambda/C$ es el valor de la franja para una longitud de onda determinada.

En los estudios de fotoelasticidad se implementan dispositivos como polariscopios. Existen diversos tipos de polariscopios pero, de forma general, consisten en una fuente de luz, un polarizador, un modelo (material a estudiar) y un segundo polarizador (analizador). Este montaje da lugar a la formación de las franjas de color asociadas al espesor, a los índices de refracción principales del modelo y a los esfuerzos aplicados sobre el material [7].

2. Así se hizo

2.a. Material

Para poder realizar este experimento simplemente se necesita:

- Una pantalla de ordenador o teléfono móvil.
- Un polarizador.
- Materiales plásticos transparentes: cubiertos, regla, papel de celofán, caja de cd, cubetas, etc.

2.b. Procedimiento

La realización de este experimento es muy sencilla y puede llevarse a cabo en cualquier lugar. En nuestro caso, fue realizado con alumnos de 3º y 4º de la ESO y de bachillerato de diferentes colegios de la Comunidad Autónoma de Galicia. En esta experiencia simplemente se utiliza la técnica experimental conocida como fotoelasticidad para poder determinar la existencia de esfuerzos y deformaciones en el material que se pretende estudiar. Para ello, sólo hay que situar el material entre la pantalla del ordenador y el polarizador. A continuación se rota el polarizador. A medida que se realiza esta rotación se puede observar como varía el patrón de franjas de colores en el material plástico. En la Figura 1b) el polarizador está girado 90° con respecto a la Figura 1a) para poder analizar el efecto de la extinción de la luz cuando dos polarizados están cruzados y cómo se invierten los colores en los patrones de franjas en cada caso.

Los patrones obtenidos en la figura 1 fueron fotografiados fácilmente utilizando una cámara réflex Nikon, modelo D3100, 14.2 Mp, objetivo de focal fija de 50 mm, f/4 y tiempo de exposición 1/80 s.

3. Resultado: las fotografías

Con materiales económicos y fáciles de conseguir y con un montaje muy sencillo, se ha conseguido ilustrar el fenómeno de la fotoelasticidad en materiales plásticos. Este experimento está al alcance de cualquiera y puede realizarse en el aula, o incluso en casa, y permite observar cómo en un material plástico pueden existir tensiones que a simple vista no serían apreciables. Además, con esta experiencia es posible introducir el concepto de polarización y birrefringencia en el aula de una forma bastante sencilla e intuitiva.

Como hemos visto, las ondas electromagnéticas como la luz pueden vibrar en cualquier dirección perpendicular a su dirección de propagación (luz natural). Un filtro polarizador es un material capaz de seleccionar onda que vibran en una dirección determinada eliminando todas las demás. Por tanto, se dice que la luz está polarizada cuando el vector eléctrico vibra en la misma dirección. La luz que proviene de la pantalla del ordenador con la que iluminamos el material está polarizada. Dicha luz polarizada es transmitida a través del material y analizada por el segundo polarizador. Los colores que aparecen en el medio material son debidos a las distintas intensidades y a la distribución de las tensiones en el objeto plástico que estamos analizando, ya que dichas tensiones degradan la “calidad” de la luz polarizada emergente.

En la Figura 1 podemos observar cómo a través de un material plástico, que a simple vista es transparente, aparece un patrón de franjas cuando lo situamos entre la pantalla del ordenador y un polarizador. Buena parte de los materiales plásticos son materiales en los que cambia su capacidad de polarizar la luz de un punto a otro muy cercano. De esta forma es posible analizar los puntos de inyección, fusión y unión de la propia pieza plástica. La técnica de fotoelasticidad permite a los fabricantes saber cuál es la zona más sensible (por donde es más fácil que se rompa) de la pieza que de otra forma sería imposible de ver.

4. Conclusiones

La experiencia mostrada en este trabajo permite ilustrar a través de la técnica conocida como fotoelasticidad algunos de los fenómenos más importantes en Óptica de una forma muy intuitiva, como son la polarización y la anisotropía óptica. La visualización del patrón de franjas de colores obtenidos a través de un polariscopio y registrado mediante una fotografía permite la verificación de la existencia de tensiones en el material.

Agradecimientos

Los autores agradecen el material facilitado por la Sociedad Americana de Óptica (The Optical Society of America, OSA).