

Desarrollo de un polariscopio portátil para visualización de deformaciones mecánicas en un ambiente académico

Dr. Ramsés Galaz Mendez, Juan Antonio Colín Ibarra, Luis Álvaro Pérez Murillo, Elia Guadalupe Garibay Lince, Luciano Ernesto Juárez Rivera
Tecnológico de Monterrey, Campus Sonora Norte
rgalaz@itesm.mx

Resumen

Se ha desarrollado un dispositivo portátil y de fácil manejo que permite a los alumnos visualizar deformaciones mecánicas mediante el uso de la técnica de fotoelasticidad. El dispositivo es un polariscopio fabricado a partir de diseños elaborados por alumnos de la carrera de Ingeniería Mecatrónica. Los criterios de diseño de este dispositivo es que sea fácil de fabricar y ensamblar, barato, replicable y que su funcionalidad sea la de adaptar distintos mecanismos para la visualización de los esfuerzos mecánicos a través de la técnica de fotoelasticidad. El resultado de este proyecto fue un dispositivo construido a base de piezas construidas en impresora tridimensional, filtros polarizadores, placas transparentes de policarbonato y otros componentes para su ensamble. El dispositivo permite utilizarse libremente en un ambiente académico por su portabilidad, facilidad de manejo y permite también adaptar varios mecanismos para la visualización de problemas clásicos de teoría de elasticidad y mecánica de sólidos continuos.

Palabras clave: polariscopio, fotoelasticidad, deformación mecánica.

1 Introducción

En los diferentes ambientes académicos existen cursos y disciplinas como la Ingeniería Mecánica, Civil y Biomédica que están relacionadas con el estudio de temas de mecánica estructural y de mecánica del sólido continuo. Algunas de estas disciplinas analizan los fenómenos de deformaciones y esfuerzos desde un punto de vista teórico y si la institución educativa cuenta con laboratorios de pruebas estructurales, estos fenómenos se validan con prácticas de laboratorio que incluyen pruebas de tensión y galgas extensiométricas.

Sin embargo, una de las deficiencias actuales de estas prácticas de laboratorio es que no se enfatiza en la visualización de las concentraciones de esfuerzo por medio de la técnica de fotoelasticidad, las pruebas de tensión o galgas sólo sirven para validar resultados macroscópicos y superficiales, mas no se hace énfasis en el comportamiento mecánico al interior de la pieza.

Este proyecto comprendió el diseño, fabricación y ensamble de un dispositivo para validar experimentalmente ejemplos clásicos de teoría de elasticidad mediante la visualización los patrones de concentración de esfuerzos mecánicos y así permitirle al alumno comprender entender qué es lo que ocurre en el interior de las piezas en términos de deformación mecánica y más importante, para validar experimentalmente los análisis estructurales desarrollados en clase.

2 Métodos

2.1 Diseño del polariscopio

El diseño del dispositivo se basó primordialmente en la construcción de un polariscopio simple y portátil que permitirá la visualización de las deformaciones mecánicas por el método de fotoelasticidad. Alumnos de la carrera de Ingeniería Mecatrónica utilizaron técnicas de diseño del producto, herramientas de software de diseño CAD y análisis estructural para los diseños preliminares. Se realizaron varias iteraciones de diseño antes de obtener el diseño final.

El polariscopio funciona con el principio de fotoelasticidad y éste consiste en pasar luz a través de un filtro polarizador y a su vez esta luz polarizada pasa por un objeto de material birrefringente, que es la propiedad de los materiales de tener un índice de refracción que depende de la polarización y dirección de propagación de la luz. Finalmente esta luz pasa una vez más por un último filtro polarizador y el resultado es una visualización de patrones de esfuerzos mecánicos derivados del fenómeno de fotoelasticidad (Figura 1). El principio de la fotoelasticidad parte de que el índice de refracción de los materiales birrefringentes cambia en función de los pequeños cambios de densidad y orientación de las moléculas que ocurren cuando estos materiales sufren una deformación mecánica [1]. Si la luz polarizada pasa a través de un objeto deformado y por lo tanto con un índice de refracción alterado, ésta luz se desviará y cambiará su sentido y por lo tanto podrá pasar el segundo filtro polarizador que está orientado a 90 grados con respecto al primer filtro [2].

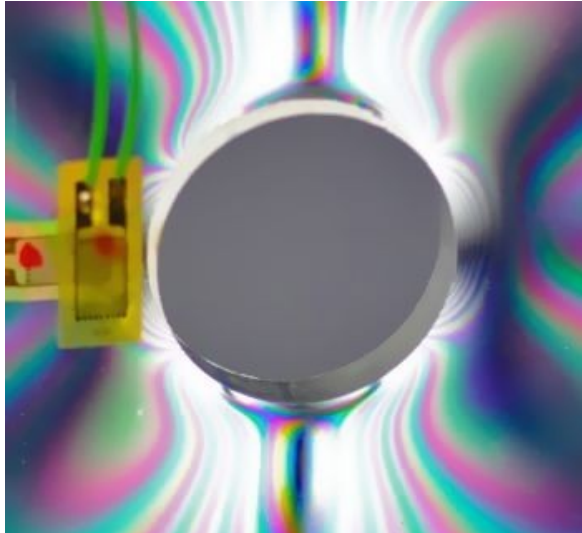


Figura 1. Visualización fotoelástica en un material birrefringente (Cortesía: Universidad de Pennsylvania)

Se seleccionaron los diseños y filtros polarizadores adecuados y un disco difusor de luz para una visualización homogénea. El diseño se realizó de una manera compacta y en forma circular para el fácil manejo del dispositivo y además para demostrar el comportamiento de la luz polarizada cuando ambos filtros están colocados en diferentes ángulos. El diseño se realizó de una manera que pudiera adaptarse a varios ejemplos de esfuerzo mecánico. En el contexto del desarrollo de este proyecto se optó por ejemplificar la versatilidad del dispositivo con dos ejemplos de teoría de elasticidad clásicos: disco bajo compresión diametral y ranura en “V” para la visualización de concentración de esfuerzos mecánicos bajo compresión. Estos ejemplos fueron sujetos a compresión para su visualización y validación con teoría de elasticidad clásica.

El resultado del diseño consistió en un dispositivo hecho de plástico ABS con filtros polarizadores circulares, un disco de acrílico difusor de luz algunos componentes de plástico y tornillos para la generación de los esfuerzos de tensión o compresión (Figura 2).

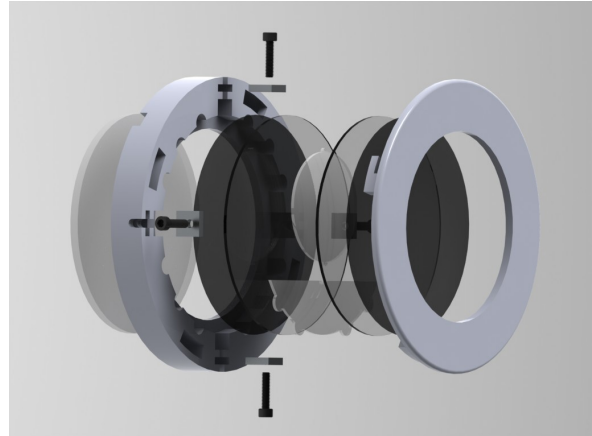


Figura 2. Diseño CAD del ensamblaje del polariscopio portátil. De izquierda a derecha: disco difusor, base de plástico ABS, filtro polarizador 1, vidrio de soporte (no birrefringente), cuerpo de análisis de policarbonato, vidrio de soporte, filtro polarizador 2 y tapa de plástico ABS. Adicionalmente se ven los tornillos y sus placas de retención que actuarán como los actuadores de esfuerzos de tensión y compresión en los especímenes.

2.2 Construcción del dispositivo

La construcción del dispositivo primordialmente fue desarrollada por los alumnos que desarrollaron el diseño. Las dos piezas principales de plástico ABS fueron construidas en una impresora tridimensional marca Stratasys modelo Fortus 250mc. Tanto los filtros polarizadores, especímenes de prueba y el disco difusor de acrílico fueron cortados en un equipo de corte láser CO2 de 100 Watts (Figura 3).



Figura 3. Equipo de alumnos que desarrolló el dispositivo.

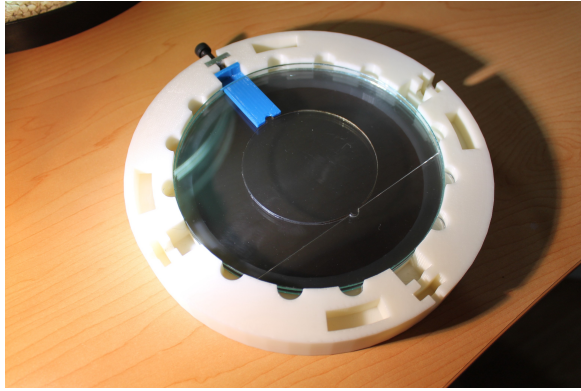


Figura 4. Ensamble de los componentes, la foto muestra el dispositivo a medio ensamble mostrando el arreglo específico para un ejemplo de teoría clásica de elasticidad: disco bajo compresión diametral.



Figura 5. Ensamble completo y listo para su uso en ambientes académicos.

3 Resultados

El dispositivo mostró una gran facilidad de uso con los alumnos y mostró claramente el fenómeno de fotoelasticidad para comprender los resultados de la teoría de elasticidad. Se probaron dos mecanismos como ejemplos de problemas clásicos de teoría de elasticidad: disco bajo compresión diametral (Figuras 6 y 7), y ranura en “V” para visualización de concentración de esfuerzos (Figura 8 y 9).

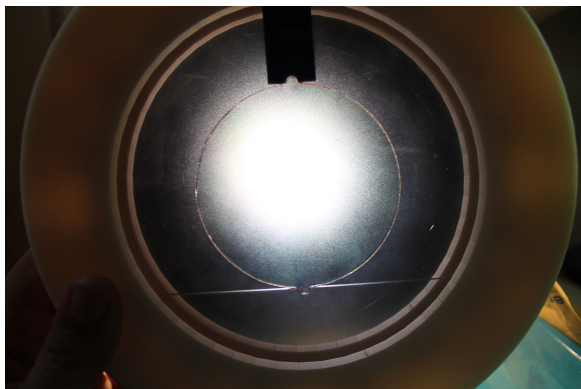


Figura 6. Disco bajo compresión diametral con filtros polarizadores alineados, no se observa el fenómeno de fotoelasticidad.

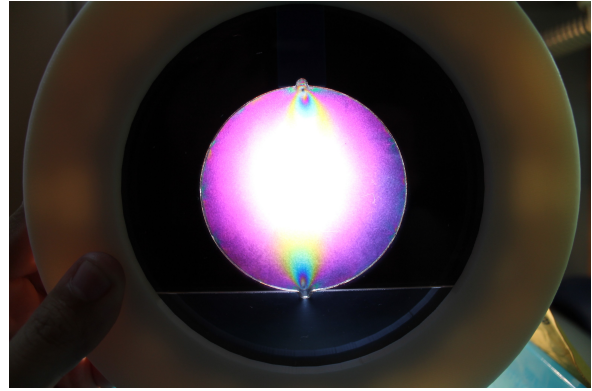


Figura 7. Disco bajo compresión diametral con filtros polarizadores alineados a 90 grados. El fenómeno fotoelástico es evidente. Se aprecian las dos cargas puntuales con patrones circulares de esfuerzo conocidas en teoría de elasticidad como “solución de flamant”.

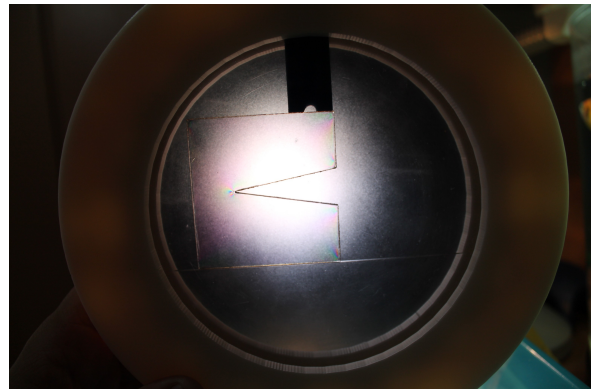


Figura 8. Especímen con ranura en “V” bajo compresión con los filtros polarizadores alineados, no se observa el fenómeno de fotoelasticidad.

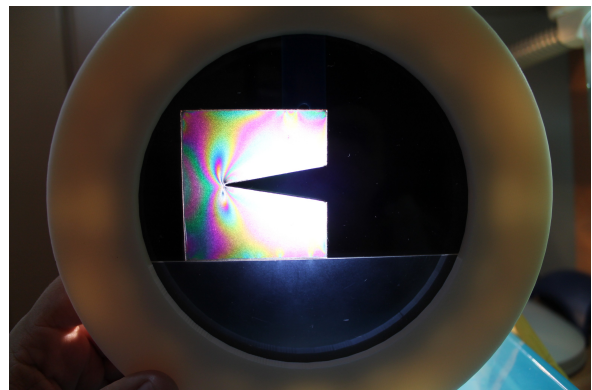


Figura 9. Especímen con ranura en “V” donde se aprecia claramente el fenómeno de fotoelasticidad una vez que los filtros polarizadores han sido alineados a 90 grados. Se observa una gran concentración de esfuerzos en la punta interna de la ranura de la pieza.

4 Validación teórica y numérica

Los fenómenos de fotoelasticidad deben de tener un patrón de esfuerzos similar a lo que dicta la teoría de elasticidad [3] y los modelos numéricos por computadora hechos con software de análisis de elementos finitos. Los alumnos desarrollaron y graficaron los resultados teóricos exactos y los modelos numéricos para estos dos casos (Figuras 10, 11, 12 y 13).

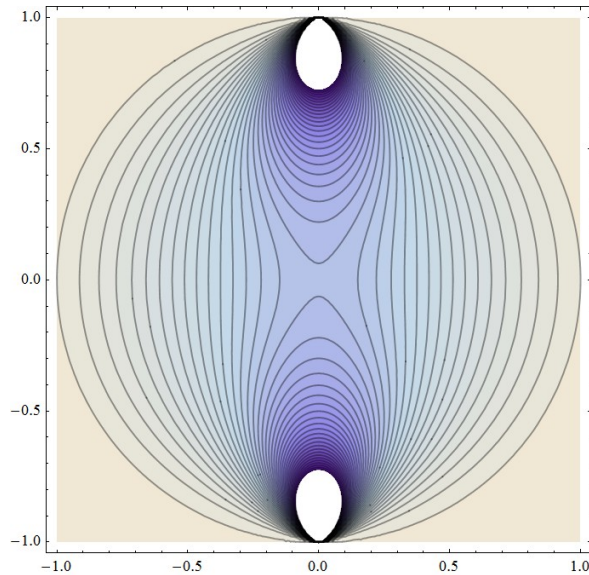


Figura 10. Gráfica realizada en Mathematica de comportamiento de esfuerzos mecánicos de un disco bajo compresión diametral. Nótese el patrón similar al de Figura 7. La gráfica fue basada en los esfuerzos de corte de la ecuación 1.

$$\tau_{xy} \max = \sigma_1 - \sigma_2 = \frac{2P}{\pi} \left[\frac{(R-y)^2 x}{r_1^4} - \frac{(R+y)^2 x}{r_2^4} \right]$$

Ecuación 1. Esfuerzos de corte máximo para un disco bajo compresión diametral. La ecuación es derivada de la teoría clásica de elasticidad con dos soluciones de flamant encontradas a 180 grados.

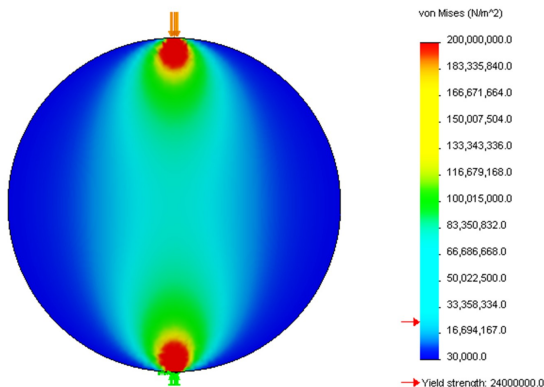


Figura 11. Validación numérica del fenómeno de disco bajo compresión diametral. Nótese el mismo comportamiento de Figuras 7 y 10.

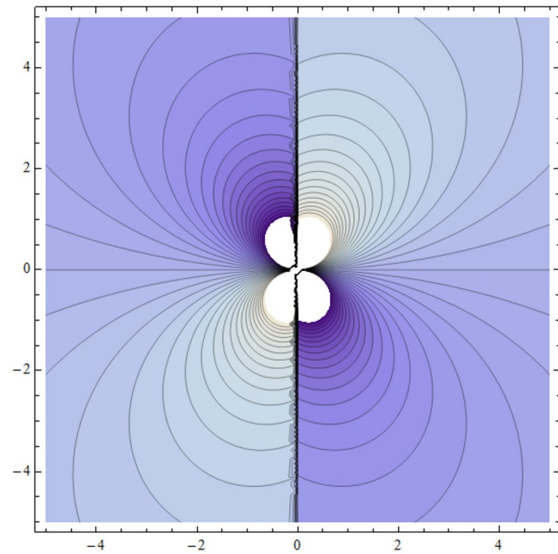


Figura 12. Gráfica realizada en Mathematica de comportamiento de esfuerzos mecánicos de un concentrador de esfuerzos en “V”. Nótese el patrón similar al de Figura 9. La gráfica fue basada en los esfuerzos de corte de las ecuaciones 2, 3 y 4.

$$\sigma_r = -\frac{3}{2} \frac{A}{\sqrt{r}} \cos \frac{\vartheta}{2} (3 - \cos \vartheta) - \frac{B}{2\sqrt{r}} \sin \frac{\vartheta}{2} (1 - 3 \cos \vartheta)$$

$$\sigma_\theta = -\frac{3}{2} \frac{A}{\sqrt{r}} \cos \frac{\vartheta}{2} (1 + \cos \vartheta) - \frac{3B}{2\sqrt{r}} \sin \frac{\vartheta}{2} (1 + \cos \vartheta)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{3}{2} \frac{A}{\sqrt{r}} \sin \frac{\vartheta}{2} (1 + \cos \vartheta) + \frac{B}{2\sqrt{r}} \cos \frac{\vartheta}{2} (1 - 3 \cos \vartheta)$$

Ecuaciones 2, 3, y 4. Esfuerzos radial, circunferencial y cortante (polar) del concentrador de ranura en “V”.

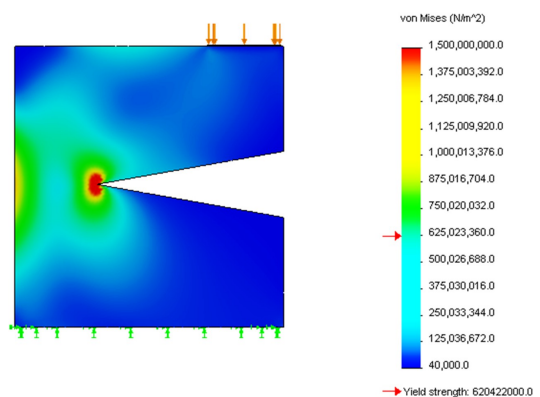


Figura 13. Validación numérica del fenómeno de concentración de esfuerzos en ranura en “V”. Nótese el mismo comportamiento de Figuras 9 y 12.

5 Conclusiones

En sí, la experiencia de los alumnos fue muy favorable ya que se les expuso a desarrollar habilidades de diseño mecánico, teoría de diseño del producto, software de análisis de elementos finitos, impresión tridimensional y más importante, se logró la comprensión clara por parte de los alumnos del objetivo principal del proyecto de aprender los fenómenos internos de esfuerzos mecánicos en piezas estructurales y que comúnmente no es un tema visto en clase. Los alumnos propusieron experimentos basados en modelos clásicos de teoría de elasticidad para validarlos analíticamente, numéricamente y experimentalmente. Desarrollaron habilidades de diseño y fabricación de prototipos funcionales y ahora se cuenta con una herramienta capaz de visualizar los fenómenos fotoelásticos de bajo costo y fácilmente replicable. El costo final de este dispositivo oscila alrededor de los 300 pesos y es altamente reproducible a más instituciones.

6 Agradecimientos

Se agradece y reconoce primero que nada al apoyo de esta iniciativa NOVUS del Tecnológico de Monterrey que aportó el recurso necesario para desarrollar la propuesta. También se agradece el apoyo del ITESM Campus Sonora Norte y su director, Dr. Francisco Javier Quezada Andrade y al equipo de colaboradores y alumnos que participaron en el desarrollo del proyecto.

7 Referencias

- [1] Hearn, EJ, "Photoelasticity" 1971, Merrow Publishing Company.
- [2] Nisida M, Kawata K, "Photoelasticity", Proceedings of the International Symposium on Photoelasticity, Tokyo, 1986. ISBN 978-4-431-68401
- [3] Landai LD, Lifshitz EM, "Theory of Elasticity", Pergamon Press 1970.