

## MATERIAL FOTOELASTICO PARA ESTUDIO DE ELEMENTOS REFORZADO CON ACERO

### Photoelastic materials for study of reinforced elements with steel.

#### RESUMEN

En este artículo, se muestra la aplicabilidad de una resina epóxica comercial para fabricar modelos fotoelásticos en los que se puede colocar una pieza de acero en su interior antes de su fraguado. El resultado obtenido es una pieza compuesta, en donde no existen esfuerzos residuales en la interfase acero-resina epóxica. Se evalúan los esfuerzos de adherencia para una viga simple reforzada, simulando al concreto armado, mediante fotoelasticidad y elemento finito.

**PALABRAS CLAVES:** Concreto reforzado, Elemento finito, Esfuerzos de adherencia, Fotoelasticidad, Resina epóxica.

#### ABSTRACT

*This paper present the applicability of a commercial resin to fabric photoelastic models in which can be placed a steel piece in their interior before their setting. The obtained result is a composed piece, in where residual stress in the interface steel-epoxy resin do not exist. The stress of adhesion for a reinforced simple beam are evaluated, simulating to the reinforced concrete structures, by means of photoelasticity and finite element.*

**KEYWORDS:** Epoxy resin, Finite element, Interfacial stress, Photoelasticity, Reinforced concrete.

#### JOSE H. CASTORENA GLEZ.

Ingeniero Civil, Ph.D.  
Profesor Titular B.  
Universidad Autónoma de Sinaloa  
jhcg@uas.uasnet.mx

#### FACUNDO ALMERAYA C.

Ingeniero Químico, Ph.D.  
Investigador Titular C.  
Centro de Investigación en  
Materiales Avanzados, CIMAV..  
facundo.almeraya@cimav.edu.mx

#### JORGE L. ALMARAL S..

Ingeniero Civil, Ph.D.  
Profesor Titular B.  
Universidad Autónoma de Sinaloa  
joorman@yahoo.com

#### JOEL A. CALDERÓN G.

Ingeniero Civil, Ph.D.  
Profesor Titular B.  
Universidad Autónoma de Sinaloa  
cajoel@yahoo.com.mx

#### ADÁN BORUNDA TERRAZAS

Ingeniero Químico, M. Sc..  
Técnico Académico Titular C.  
Centro de Investigación en  
Materiales Avanzados, CIMAV..  
adan.borunda@cimav.edu.mx

### 1. INTRODUCCIÓN

La fotoelasticidad es una técnica experimental muy versátil del análisis experimental de esfuerzos, además de ser muy simple. Se fabrica un modelo del elemento estructural que se va a analizar, y el cual se hace con un plástico transparente, y se coloca éste entre dos placas polaroid. Cuando al modelo se le aplica la carga se observa un patrón de franjas. Las franjas de mayor orden indican niveles de esfuerzos altos, mientras que las de menor orden representan áreas libres de esfuerzos. Si el espaciamiento de las franjas es pequeño indicara un gradiente alto de esfuerzos [1]. Con esta técnica es

posible determinar de manera rápida las áreas con mayor concentración de esfuerzos.

La mayoría de los materiales fotoelásticos son hechos a base de policarbonato o resinas epóxicas. Los materiales a base de policarbonatos exhiben poca dureza y fluyen antes de fracturarse, sin embargo son sensibles ópticamente a los esfuerzos y deformaciones, no presentan efectos de borde y el flujo plástico a temperatura ambiente es despreciable [2]. El inconveniente es que son difíciles de maquinar, ya que el calor generado en la maquila hace que el material se suavice y se deforme.

La resina epóxica como material fotoelástico se empezó a utilizar a mediados de 1950, cuando se emplearon principalmente para la fotoelasticidad tridimensional [1], pero de acuerdo a sus propiedades son adecuadas para utilizarse en una gran variedad de problemas bidimensionales. Estas resinas pueden colarse en láminas las cuales muestran una apariencia de color ámbar. Por lo general son caracterizadas como material frágil, pero más fácil de maquinar que los policarbonatos, y son susceptibles de sufrir efectos de borde.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La estructura química de una resina epóxica se expresa mediante la fórmula molecular de la figura 1 [3], donde  $\gamma$  es el grado de polimerización. Puede decirse que una resina tiene un comportamiento normal si  $\gamma$  no varía de molécula a molécula.

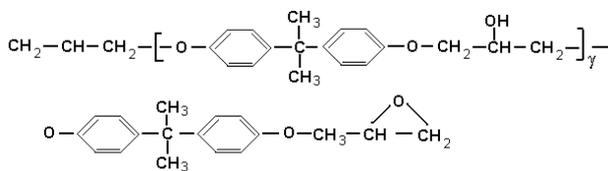


Figura 1. Estructura química típica de una resina epóxica.

El grado de polimerización es una característica muy importante en la resina, ya que es el que define la proporción del agente de curado y el tratamiento calorífico necesario para llevar a cabo la reacción química y que se unan las moléculas de la resina, para terminar finalmente en un producto sólido.

Los Anhídridos son los agentes de curado más usados para curar las resinas epóxicas, debido a su baja reactividad y, además, se puede controlar fácilmente la exotermicidad de la reacción de polimerización. Lo anterior, si bien tiene sus ventajas, trae como consecuencia que se requiera un ciclo térmico de curado bastante prolongado, y que pueda derivar en la presencia de esfuerzos residuales para aquellos modelos en los que incluir algún elemento adicional, como el acero por ejemplo.

Una resina con potencial para ser usada en la fabricación de material fotoelástico es la resina EPOXINE 200, que es utilizada para unir concreto nuevo a viejo. Dicha resina no requiere de calor para su fraguado.

## 3. EXPERIMENTACIÓN

### 3.1 Fabricación del espécimen tipo viga con material fotoelástico y reforzado con pieza de acero.

El procedimiento es directo y sencillo, puesto que el material no requiere de procesos de horneado para solidificar. La Epoxine 200 es un adhesivo epóxico termofijo poliaminico de dos componentes 100% sólidos, los cuales al mezclarse producen un líquido viscoso color ámbar y que al ser aplicado forma una película de gran

adhesividad. Esta resina es empleada para unir concreto viejo a concreto nuevo en la construcción, así como reparaciones estructurales de elementos como traves, columnas, muros de concreto, losas, etc. Viene en presentación de 1 litro, con dos partes: Parte A (resina), y la parte B (endurecedor), estos componentes se mezclan perfectamente (parte B en la parte A). Para fabricar una placa de ciertas dimensiones, se trabaja sobre una base de acrílico transparente, de espesor suficiente para que sea flexible. Sobre la placa de acrílico se marcan las dimensiones deseadas y sobre ellas se pegan con silicón piezas de aluminio de espesor igual al espesor del material fotoelástico que se desea. Se mezclan perfectamente las partes A y B del producto Epoxine 200 según la proporción deseada. Antes de vaciar dicha mezcla sobre el molde, es necesario cubrir éste con aceite, una pequeña capa, a fin de que la mezcla no se adhiera al molde. Se fabrica un modelo viga reforzada, de 2 cm. de peralte, 1 cm. de espesor y 20 cm. de longitud, como se muestra en la figura 2. La mezcla endurece en un tiempo aproximado de 24 horas, a temperatura ambiente

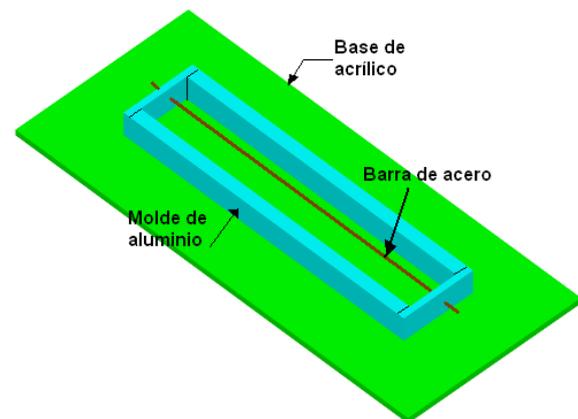


Figura 2. Molde y colocación del refuerzo para fabricar la viga.

### 3.2 Medición de sensibilidad del material fabricado.

Valorar la sensibilidad de material es obtener su constante de franja  $f\sigma$ , para ello se fabrica un disco con el mismo material utilizado para elaborar el modelo viga, y el cual será sometido a compresión diametral. La razón es que un disco circular es fácil de maquinar y cargar, además es posible para un solo estado de carga obtener varias medidas de calibración. La distribución de los esfuerzos a lo largo del diámetro horizontal, en  $y=0$ , viene dada por las ecuaciones (1).

$$\sigma_x = \sigma_1 = \frac{2P}{\pi h D} \left( \frac{D^2 - 4x^2}{D^2 + 4x^2} \right)^2$$

$$\sigma_y = \sigma_2 = -\frac{2P}{2\pi h D} \left[ \frac{4D^2}{(D^2 + 4x^2)^2} - 1 \right] \quad (1)$$

$$\tau_{xy} = 0$$

$D$  es el diámetro del disco,  $x$  es la distancia a lo largo del diámetro horizontal medida a partir del centro del disco,  $P$  es la carga aplicada y  $h$  es el espesor del disco [4]. La diferencia de esfuerzos principales  $\sigma_1 - \sigma_2$  esta dada por la ecuación (2):

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{8P}{\pi h D} \frac{D^4 - 4D^2 x^2}{(D^2 + 4x^2)^2} = \frac{Nf_\sigma}{h} \quad (2)$$

y de la ecuación (2) se obtiene la constante de franja, dada por ecuación (3).

$$f_\sigma = \frac{8P}{\pi D N} \frac{(D^4 - 4D^2 x^2)}{(D^2 + 4x^2)^2} \quad (3)$$

Una vez que se obtiene la constante de franja, se pueden calcular la diferencia de esfuerzos principales (Cortante) con la ecuación (2) para cualquier modelo fabricado con la misma mezcla de material fotoelástico.

**3.3 Condiciones de carga y apoyo para el modelo viga reforzada**

En la figura 3 se muestran las condiciones de apoyo y carga que se aplicarán a la viga en estudio.

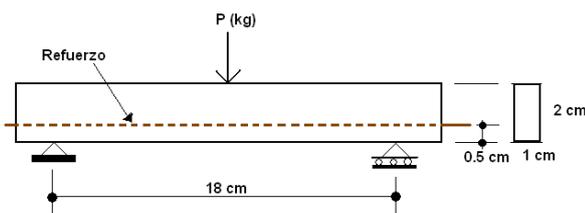


Figura 3. Condiciones de carga y apoyo para la viga reforzada.

**3.3 Modelo de elemento finito**

Para el modelado con elemento finito se utiliza el software comercial ANSYS [5]. Tanto para el material fotoelástico como para la barra de acero se utiliza el elemento estructural SOLID45, sin embargo, el modulo de elasticidad y poisson para el material fotoelastico es de 220,000 kg/cm<sup>2</sup> y 0.25 respectivamente, y de 2'100,000 kg/cm<sup>2</sup> y 0.35 para la barra de acero embebida. Aprovechando la simetría del sistema y condiciones (figura 3), se analiza un cuarto de la viga, con las condiciones de frontera dada en la figura 4.

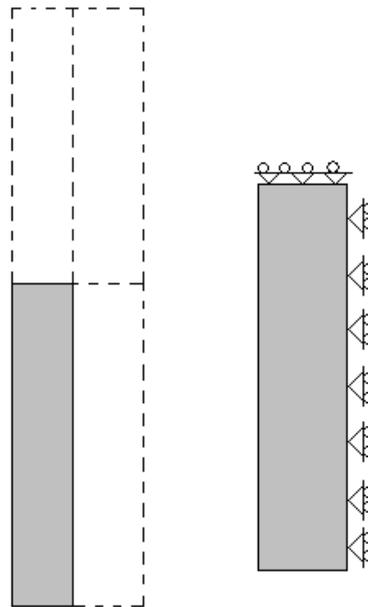


Figura 4. Condiciones de simetría para el análisis con elemento finito de la viga en estudio. No a escala.

Puesto que elemento finito es un método numérico cuyos resultados dependen, entre otras cosas, de la cantidad de elementos en que se divide el continuo, el análisis de convergencia realizado muestra que con 5340 sólidos es suficiente. La figura 5 muestra la malla utilizada.

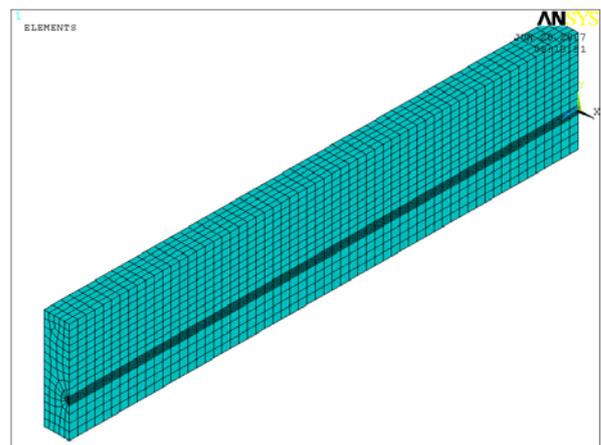


Figura 5. Mallado de elementos finitos para un cuarto de viga. La importancia de modelar con elemento finito, es que una de las hipótesis utilizada nos dice que existe una perfecta adherencia entre los elementos de la barra de acero y los elementos del material fotoelástico.

**4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Respecto a la constante de franja del material, la figura 6 muestra el disco cargado, así como el patrón de franjas generado.

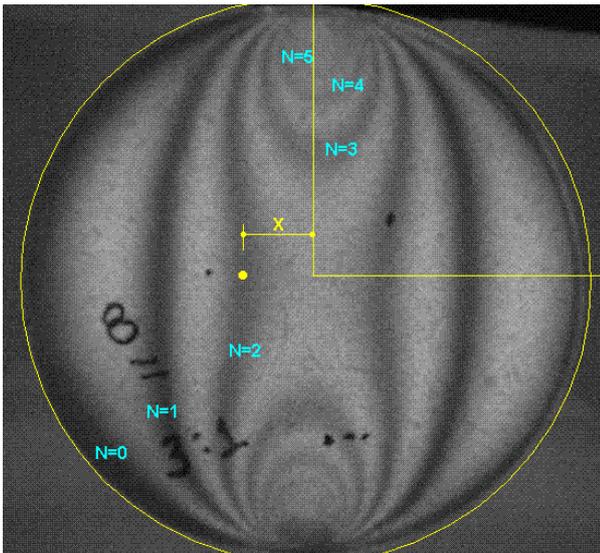


Figura 6. Patrón de franjas (tono de grises) para la obtención de la constante de franja.

El valor obtenido para la constante de franja es de  $7.908 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{cm}$ . Dicho valor es lo suficientemente sensitivo para poder utilizarlo en modelos estructurales. A manera de comparación, la Tabla 1 muestra valores de otros materiales fotoelásticos.

MATERIAL	$f_v$ ( $\text{kg/cm}^2 \cdot \text{cm}$ )
Catalin 61-893	15
Castolite	27
CR-39	15
Poliuretano	0.16
Policarbonato	11
<b>Epoxine 200</b>	<b>7.908</b>

Tabla 1. Propiedades ópticas de materiales fotoelásticos empleados comúnmente y el desarrollado en el presente trabajo (Epoxine 200).

La distribución de la diferencia de esfuerzos principales ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) obtenidos a través del polariscopio [6], para el modelo con condiciones de carga y apoyo de la figura 3, se muestra en la figura 7.

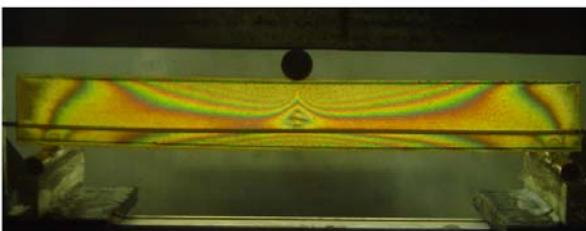


Figura 7. Patrón de franjas isocromáticas (campo oscuro), que muestra la diferencia de esfuerzos principales por flexión en un elemento reforzado.

La figura 8 muestra los resultados obtenidos con elemento finito. En estos se observa la similitud con la distribución de esfuerzos experimentales (figura 7), lo que comprueba que existe una perfecta adherencia entre la barra de acero y el material fotoelástico, no existiendo esfuerzos residuales debido al curado en la interfase acero-material resina.

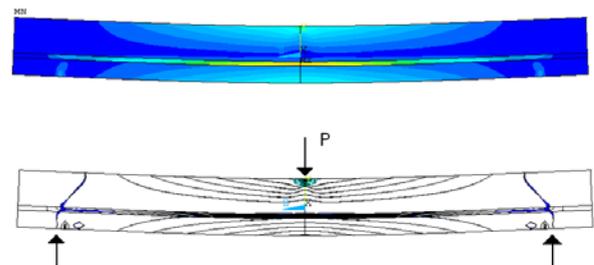


Figura 8. Distribución de la diferencia de esfuerzos principales ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) obtenidos con elemento finito. Aunque se utiliza un cuarto de la viga, el software permite mostrar la parte simétrica restante.

## 5. CONCLUSIONES

Mediante el desarrollo experimental y comprobación numérica con elemento finito, se ha mostrado que se puede utilizar la resina Epoxine 200 para fabricación de elementos a base de resinas reforzados con acero, que pueden ser utilizados en estudios fotoelásticos, ya que los efectos de curado no interfieren en el valor de la distribución de esfuerzos en la interfase de contacto acero-resina. Con ello, se pueden modelar como por ejemplo, elementos de concreto reforzado.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. J.W. Dally and W.F. Riley, *Experimental Stress Analysis*, International Student Edition, McGraw-Hill, Second Edition, 1978.
- [2]. A.J. Durelli and W.F. Riley, *Introduction to Photoelasticity*, Printice-Hall, 1965.
- [3]. J. Cernosek, "Material for Casting Threedimensional Photoelastic Model", *Experimental Mechanics*, Vol.30, No.3, 1990.
- [4]. R.G. Budynas, *Advanced Strength and Applied Stress Analysis*, McGraw-Hill, Inc., 1977.
- [5]. ANSYS, Theory Manual, Version 5.1.
- [6]. T. Shibuya, T. Koizumi, K. Takakuda and T. Maeno, "New Separation Method of Photoelastic Principal Stresses Using a Micro-computer", *Bulletin of JSME*, Vol.29, No.248 February, 1986.