

Análisis de esfuerzos en un bastidor de prensa tipo C mediante los métodos fotoelástico y numérico

Alejandro **Escamilla-Navarro**
Alfonso **Campos-Vázquez**
Miguel Ángel **Rodríguez-Fuentes**

Instituto Politécnico Nacional (IPN),
Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingenierías
y Tecnologías Avanzadas (UPIITA),
Av. Instituto Politécnico Nacional núm. 2580,
Unidad Profesional "Adolfo López Mateos",
Col. Barrio La Laguna Ticomán,
México, DF, CP 07340.
MÉXICO.

correo electrónico (email): aescamin@hotmail.com
ing_campos@hotmail.com
mian100@hotmail.com

Recibido 12-04-2012, aceptado 05-12-2012.

Resumen

Se han implementado diversas investigaciones con el objetivo de establecer el método más factible para el análisis mecánico de elementos con geometrías no prismáticas, con el fin de predecir si los elementos fallarán o no, al someterlos a las solicitaciones de carga, para lo cual fueron concebidos. De acuerdo con la historia de Stephen Timosenko [1], el estudio "analítico formal" de la resistencia de materiales inicia en el siglo XVII, con las aportaciones de Galileo Galilei. En las primeras décadas del siglo XX [2], se desarrollaron los métodos experimentales de análisis de esfuerzos y en la década de los cincuenta se aplican en la industria de la aviación los métodos numéricos (concretamente el de elementos finitos). Por otro lado, en el proceso del conformado de láminas metálicas se utilizan herramientas que dan forma a la lámina mediante fuerzas de impacto proporcionadas por prensas, en las cuales se monta la herramienta. Existen diversos tipos de prensas pero las de mayor uso son las denominadas comercialmente troqueladoras tipo C, por la forma de su bastidor semejante a una letra C; con relativa frecuencia dichos bastidores se frac-

turan. Debido a la forma irregular de dichos bastidores, no hay métodos analíticos simples para calcular las magnitudes de los esfuerzos, en este caso es conveniente usar métodos experimentales o numéricos. En el presente trabajo se analiza la concentración de esfuerzos en cuatro probetas, que modelan un bastidor de prensa tipo C, considerando radios cuyas magnitudes son de 1 mm, 2 mm, 4 mm, y 6 mm, en la zona donde normalmente se presenta la fractura del bastidor, aplicando los métodos fotoelástico y numérico (ANSYS).

Palabras clave: análisis de esfuerzo, fotoelasticidad, prensa troqueladora, elemento finito.

Abstract
(Analysis of Stress at a Press Frame Type C Using the Photoelastic and Numerical Methods)

Several studies have been implemented in order to establish the most feasible method for the mechanical analysis of elements with prismatic geometries to predict whether or not the elements fail, when subjected to the charge, for which they are designed. According to the story of Stephen Timosenko [1], the study "formal analytic" Strength of Materials begins in the seventeenth century, with the contributions of Galileo Galilei. In the twentieth century, in the early decades, developed the experimental methods of stress analysis and the fifties [2] was applied in the aviation industry numerical methods (specific, finite element). Furthermore, in the process of sheet metal forming, tools are used for shaping the sheet by impact forces provided by presses, which is mounted in the tool. There are many types of presses but the most used commercially are called press type C for the shape of your frame like a letter C, with relative frequency these frame are fractured in a specific area. Due to the complex shape of frames, there are not simple analytical methods to calculate stress magnitudes; in this case it is convenient to use experimental or numerical methods. This paper analyzes the concentration of stress on four specimens, that model a press frame type C, considering radios whose magnitudes are 1 mm, 2 mm, 4 mm, and 6 mm, in the area where the fracture occurs applying photoelastic and numerical methods (ANSYS).

Key words: stress analysis, photoelasticity, punch press, finite element.

1. Introducción

La mecánica de materiales es la rama de la mecánica aplicada, que trata el comportamiento de los cuerpos sólidos sometidos a diversos tipos de carga [3], su objetivo principal es determinar los esfuerzos, deformaciones unitarias y desplazamientos en elementos mecánicos y estructurales; si se pueden obtener estas cantidades para todos los valores de las cargas hasta que se produzca la falla, se obtendrá una representación completa del comportamiento mecánico de los elementos y estructuras. Entender el comportamiento mecánico es esencial para el diseño seguro de todos los tipos de componentes, en máquinas, motores, barcos, edificios, puentes, naves espaciales, etc [4]. Sin embargo, la aplicación de la teoría de la mecánica de materiales está limitada a barras prismáticas (elementos rectos de sección transversal constante). Cuando la configuración geométrica no es prismática es necesario aplicar la teoría de la elasticidad; cuyos métodos conducen a ecuaciones diferenciales de solución compleja. Otras alternativas de análisis de esfuerzo para elementos no prismáticos, son los métodos experimentales y los numéricos; los cuales utilizaremos en este trabajo, para el caso de los experimentales usaremos fotoelasticidad y para los numéricos el método de elementos finitos a través del paquete ANSYS.

La fotoelasticidad es una técnica experimental para determinación indirecta de esfuerzos utilizando un modelo, normalmente a escala, fabricado con material birrefringente, esto con el fin de examinar la distribución de esfuerzos dentro del modelo mediante la utilización de un polariscopio [5].

El fenómeno de la luz [5] ha sido estudiado desde la época de la grandeza griega, donde se consideraba como una emisión de pequeñas partículas emitidas por un cuerpo luminoso, las cuales entraban al ojo y retornaba al cuerpo; Aristóteles (384-322 a.C.) adiciona el tiempo de la trayectoria que recorre un haz de luz. Por más de 2000 años persistieron estas ideas, hasta el siglo ^{VII} se introducen los efectos asociados con películas, lentes y prismas. Luego, Newton propone la teoría corpuscular. En el ^{XIX} surge la teoría electromagnética de Maxwell [1831-1879], donde se establece la presencia de dos campos vectoriales uno eléctrico y otro magnético; con lo cual se concibió [6] la luz formada de ondas transversales de muy pequeña longitud de onda la cual se propaga a altísima velocidad (3×10^8 m/s), dependiendo de los valores de longitud de onda y frecuencia, se tiene el espectro de la luz visible de acuerdo con la tabla 1.

La luz blanca es el resultado de combinar simultáneamente todo el espectro de la tabla 1, composición conocida como luz monocromática. El brillo o intensidad de luz depende de la amplitud de la longitud de onda. Dos ondas pueden

Tabla 1. Espectro de luz visible [7].

Color	Longitud de onda (nm)	Frecuencia (10^{14} Hz)
Violeta	420.0	7.14
Azul	470.0	6.38
Azul-verde	500.0	6.00
Verde	530.0	5.66
Amarillo	589.3	5.09
Naranja	600.0	5.00
Rojo	660.0	4.55

tener la misma amplitud y longitud de onda pero diferente fase, la diferencia entre las dos fases es denominada retardación. La retardación en las componentes de una onda permiten observar ciertas franjas en un polariscopio, las cuales se pueden relacionar con los esfuerzos a que se somete un modelo fotoelástico.

De una fuente de luz surgen una infinidad de ondas transversales con orientaciones aleatorias, de las cuales mediante filtros, se pueden seleccionar determinadas orientaciones, con lo que se obtiene la denominada luz polarizada; esto es, sólo se exhiben planos preferenciales de vibración. Hay materiales que presentan diferentes índices de refracción en direcciones perpendiculares por lo que son llamados materiales birrefringentes. Más aún, hay materiales con la propiedad óptica de convertirse en birrefringentes cuando son sometidos a esfuerzos [8], situación que se describe en la figura 1.

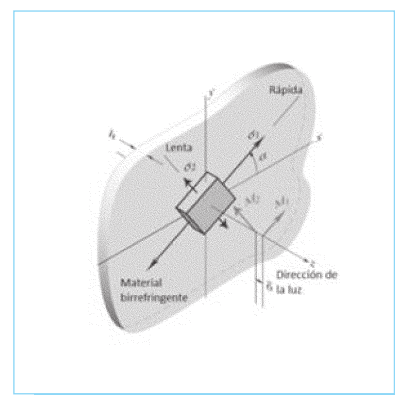


Fig. 1. Efecto birrefringente.

Maxwell desarrolló lo que se puede llamar la ley del "esfuerzo-óptico", que puede ser expresada en términos de la retardación relativa como sigue [5]:

$$\begin{aligned} n_1 - n_0 &= c_1 \sigma_1 + c_2 (\sigma_2 + \sigma_3) \\ n_2 - n_0 &= c_1 \sigma_1 + c_2 (\sigma_3 + \sigma_1) \\ n_1 - n_0 &= c_1 \sigma_3 + c_2 (\sigma_1 + \sigma_2) \end{aligned} \quad (1)$$

Donde n_1 es el índice de refracción, h el espesor del medio, c_1 es el coeficiente de esfuerzo-óptico relativo.

Cuando un haz de luz cambia del medio donde se traslada cambia su dirección, cambio medido por el índice de refracción el cual está ligado con el cambio de fase de acuerdo con la relación:

$$\sigma = c (t_2 - t_1) = h (n_2 - n_1) \quad (2)$$

Esta ecuación es de fundamental importancia en la teoría de la fotoelasticidad. Es usualmente escrita en términos del número de ciclos completos N , del retardo relativo, o equivalentemente, en términos de la diferencia de fase angular Δ , como sigue:

$$N = \frac{\Delta}{2\pi} = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{hc(\sigma_1 - \sigma_2)}{\lambda} = h \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{f_\sigma} \quad (3)$$

Finalmente, combinando las ecuaciones 1 y 2, queda la expresión que nos permite estimar la diferencia de esfuerzos principales, con el número franjas obtenidas al aplicar carga al modelo fotoelástico:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = N \frac{\lambda}{ch} = \frac{Nf_\sigma}{h} \quad (4)$$

y finalmente

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{Nc}{h} \quad (5)$$

Donde σ_1 y σ_2 son los esfuerzos principales, N es el orden de franja, h es el espesor del material y c es la sensibilidad (constante) de franja propiedad del material fotoelástico.

El conteo de número de franjas se hace de acuerdo con el orden presentado en la figura 2.

Metodología experimental

Se seguirá el método de Tardy [9], el cual requiere de un polariscopio circular (el arreglo de elementos en el polariscopio circular es aquel en la cual las placas de un cuarto de onda

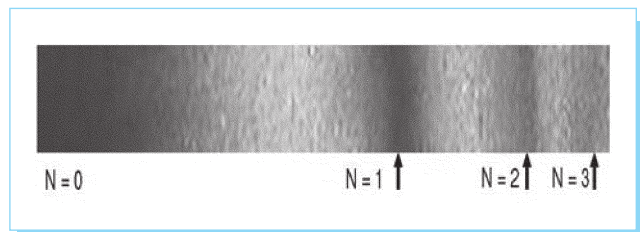


Fig. 2. Orden de franja.

permanecen perpendiculares y el analizador se alinea paralelo al polarizador), cuyo esquema se muestra en la figura 3.

Para determinar el orden de franja se coloca el modelo en el polariscopio y se siguen las siguientes fases:

1. Se determina la dirección de los esfuerzos principales, en la zona donde se concentran, rotando la placa analizadora del polariscopio, hasta la coincidencia de las líneas *isóclinas* (véase glosario) con un punto donde haya la concentración de esfuerzos.
2. Se insertan las placas cuarto de onda, para eliminar las *isóclinas* y solo queda la *isocromáticas* (véase glosario), colocando las direcciones de manera que se pueda realizar el conteo considerando el orden presentado en la figura 2.
3. Aplicación de la carga. Cada probeta se llevará a la máxima carga que permita el mayor número de órdenes de franja.
4. Por observación se cuenta tanto el número y como el orden de franjas.
5. Se aplica la ecuación 5 para determinar la diferencia entre los esfuerzos principales, en el punto de análisis.

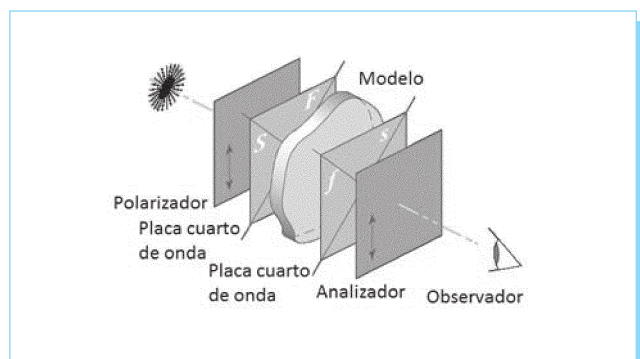


Fig. 3. Arreglo polariscopio circular.

Metodología numérica

El método de los elementos finitos (MEF) es un método numérico para la resolución aproximada de diversos problemas que surgen en diversas ramas de la ingeniería y de la ciencia. Actualmente el MEF es una de las herramientas más potentes en elementos de geometría complicada para su simulación y análisis por computadora [4][10]. Para la solución de problemas de análisis de esfuerzo y deformación, se establecen modelos que ayudan a resolverlos; si el modelado se puede llevar a cabo mediante un número bien definido de componentes o elementos, tal problema se denomina discreto. La base del MEF consiste en la representación de un cuerpo (o estructura) por ensambles contiguos de subdivisiones llamados elementos finitos, es decir, un continuo es dividido en un número finito de elementos, de manera que provean cálculos útiles. Este proceso es llamado discretización.

Los elementos deben estar interconectados en puntos llamados nodos. Se eligen funciones simples para aproximar la distribución o variación de desplazamientos reales sobre cada elemento finito; estas funciones se llaman funciones desplazamiento o modelos de desplazamiento, y el método en general es conocido como formulación de desplazamientos. Las magnitudes desconocidas de las funciones desplazamientos son los desplazamientos de los puntos nodales. Con estas ideas se establecen ecuaciones matriciales cuya solución es factible hacerla con computadora. Cualquier programa de elementos finitos cuenta con tres partes [11]:

1. *Preprocesador*. Se crea el modelo (propiedades geométricas), se establecen las propiedades mecánicas, condiciones de frontera (cargas, desplazamientos), y los elementos finitos.
2. *Solución*. Consiste de resolver el sistema de ecuaciones.
3. *Postprocesado*. Muestra los resultados ya sea tabulados o visualizados con colores para su respectivo análisis o comparación.

Caso de estudio

Una gran cantidad de productos de uso cotidiano son fabricados a partir de láminas metálicas, deformadas por fuerzas que son provistos por prensas troqueladoras [4], que proporcionan impactos sobre la lámina a través de herramientas que tienen la forma predeterminada que se dará a la lámina; en dichas prensas, en algunas ocasiones se presentan fracturas en sus bastidores, esto debido a la concentración de esfuerzos presentes en ciertas regiones de estas estructuras [12]. La figura 4 muestra una prensa troqueladora fabricada en una pequeña empresa, que tiene la inquietud de reducir

el peso del bastidor, sin que se reduzca la rigidez de la parte estructural de la máquina. Debido a la forma de los bastidores un método analítico sería algo complicado y no tendría soluciones simples para calcular las magnitudes de los esfuerzos, por lo tanto, la forma del bastidor presenta una oportunidad de un análisis de esfuerzos por el método fotoelástico, ya que se puede modelar a escala la placa con la que se forma la estructura fundamental de la máquina o un análisis por el método de elementos finitos, modelando y simulando su geometría.

Sobre la mesa de la troqueladora (véase figura 4) se coloca la herramienta que da la forma a la lámina y el ariete que está sujeto hasta el cigüeñal, proporciona el impacto necesario para conformar la lámina. La placa bastidor es la parte estructural resistente de la máquina.

Por simple inspección se infiere que la máxima concentración de esfuerzos se localiza en el radio inferior. En la figura 5 se observa que el radio inferior tiene mayor brazo de palanca, lo que genera el mayor el momento flexionante, en consecuencia los esfuerzos más altos. Esta situación se evidencia en las figuras de la 10 a la 13.

El objetivo fundamental de este trabajo es determinar y comparar el valor del esfuerzo máximo presente, en la zona crítica del bastidor de unas probetas con radios propuestos y establecer el

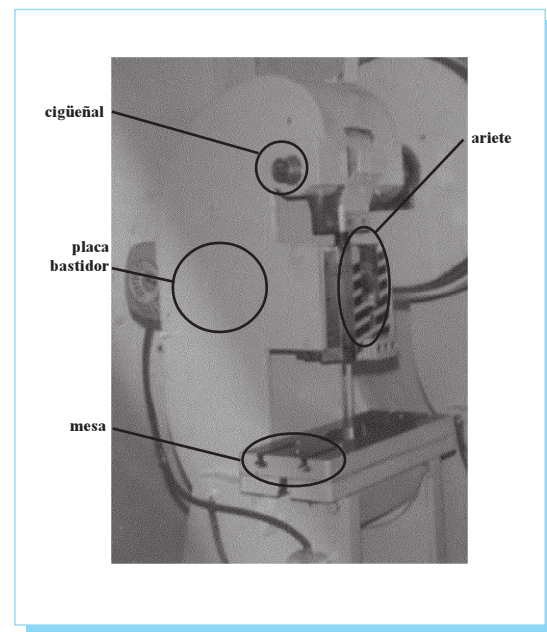


Fig. 4. Prensa troqueladora.

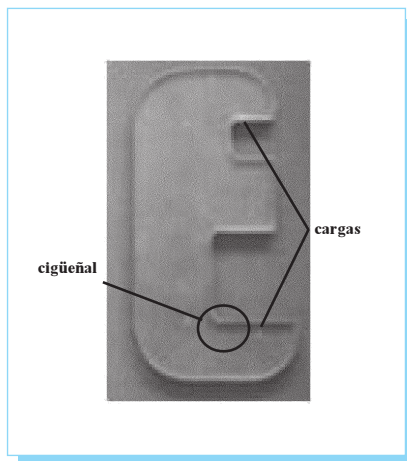


Fig. 5. Bastidor C de la prensa troqueladora en material fotoelástico. Las flechas cafés indican los puntos de aplicación de las cargas.

valor mínimo del radio que reduzca de manera significativa la concentración de esfuerzos. La determinación de esfuerzos se realiza utilizando el método fotoelástico y análisis numérico (elementos finitos) para comparar y validar los resultados obtenidos. Con esos valores se determina cuál es la geometría que nos asegura un óptimo trabajo del bastidor evitando una concentración de esfuerzo excesiva, además de definir las secciones del bastidor donde se puede eliminar material o reforzar las secciones críticas para reducir el peso de la estructura, lo que podrá hacerla más funcional. Aunado a lo anterior es de nuestro interés y se realiza en este trabajo, determinar las relaciones que guardan las magnitudes de esfuerzo, respecto al valor del radio y definir la relación existente entre los aumentos de radio y los decrementos de esfuerzo.

2. Desarrollo

Método experimental Fotoelasticidad

El material fotoelástico utilizado en la fabricación de los modelos es policarbonato (PSM1) con una constante de franja $c = 7013.76 \text{ N/m}$ (proporcionada por el fabricante [14]) y espesor de 6 mm. En la figura 6 se muestra la placa de policarbonato siendo cortada con una sierra cinta, para finalmente obtener los cuatro modelos fotoelástico con distintos radios en las zonas de concentración de esfuerzos (radio inferior mostrado en la figura 5), el primer modelo con radio de 1 mm, el segundo con radio de 2 mm, el tercero con radio de 4 mm y el cuarto con radio de 6 mm, los cuales se muestran en la figura 7.

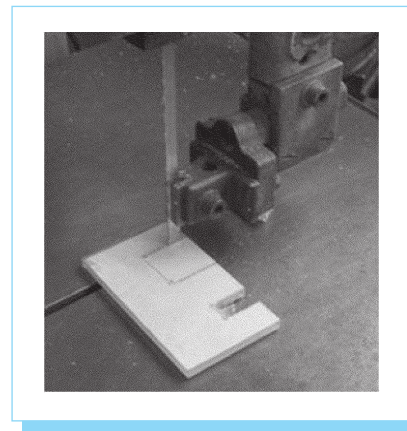


Fig. 6. Manufactura de probetas.

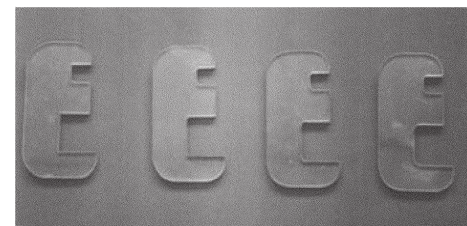


Fig. 7. Modelos fotoelásticos de bastidores de troqueladora tipo C.

El ensayo se realiza en una máquina universal de ensayos hidráulica, marca Shimatzu con capacidad de 50 toneladas (véase figura 8), a la cual se le adapta el dispositivo de carga diseñado para simular el mismo efecto de fuerzas que se desarrolla en la prensa troqueladora (véase figura 9).

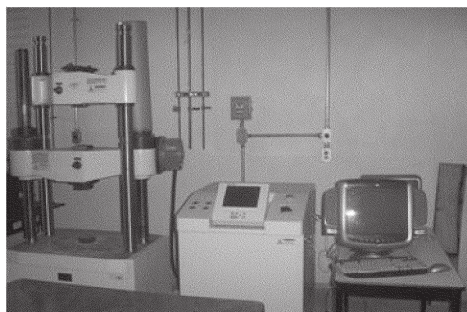


Fig. 8. Prensa universal utilizada.

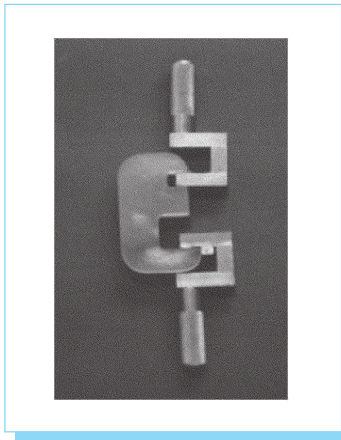


Fig. 9. Marco de carga.

Una vez colocados: marco de carga, modelo fotoelástico y polariscopio en la prensa universal, se realiza el ensayo (similar a un ensayo de tensión simple). Se aplica la carga gradualmente lo cual produce el surgimiento continuo del patrón de isocromáticas (véase figura 2), registrando la carga a la que surge cada orden de franja. Cabe mencionar que es conveniente realizar el ensayo en un cuarto oscuro para mejorar la visualización de los órdenes de franjas. Después de obtener el mayor número de órdenes de franjas bien definidas, se mantiene la carga para fotografiar el modelo esforzado. Las fotografías de los cuatro modelos estudiados se muestran en las figuras 10, 11, 12 y 13. Para una correcta lectura de los órdenes de franja, se requiere que el observador tenga experiencia en la aplicación del método fotoelástico, ya que identificarlas no es sencillo y se recomienda realizar varios ensayos con la misma probeta con el fin de obtener resultados certeros.

Fig. 10. Modelo 1.

Radio	1 mm
Carga	22 N
Esfuerzo	4.67 MPa

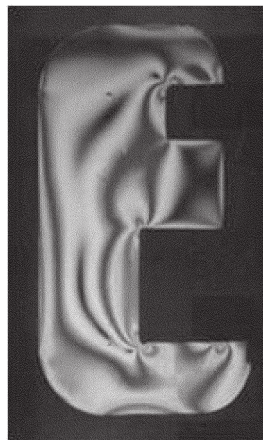


Fig. 11. Modelo 2.

Radio	2 mm
Carga	32 N
Esfuerzo	4.67 MPa

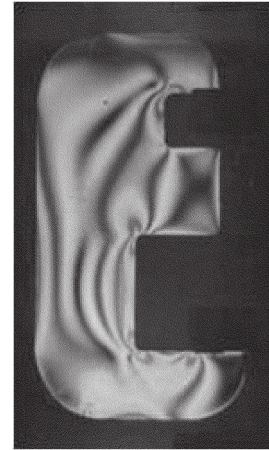


Fig. 12. Modelo 3.

Radio	4 mm
Carga	70 N
Esfuerzo	7.013 MPa

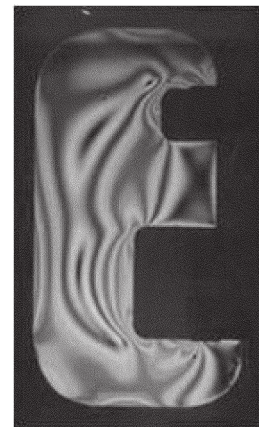
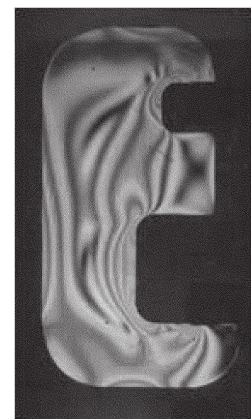


Fig. 13. Modelo 4.

Radio	6 mm
Carga	100 N
Esfuerzo	8.182 MPa



El procedimiento para determinar los esfuerzos principales (máximos) en la probeta fotoelástica consiste, primero en observar los patrones de colores que aparecen para una determinada carga aplicada, seguido del conteo en el orden de franjas [13] (esto quiere decir que un color ha aparecido nuevamente), luego se utiliza la ecuación 5. En las figuras 10, 11, 12 y 13, se indican los valores de radio en la zona evidente de concentración de esfuerzos, la carga con la que se obtuvo el patrón de franja mostrado y el respectivo valor de esfuerzo calculado.

Método numérico Elemento finito ANSYS

Se modelan los bastidores y con las mismas cargas aplicadas a los modelos fotoelásticos se realiza la simulación del sistema con las siguientes propiedades mecánicas, módulo de elasticidad $E = 2.5 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, módulo de Poisson $\nu = 0.38$, se aplican condiciones de frontera (véase figura 14) y se resuelve el sistema obteniéndose los esfuerzos [14], los cuales son mostrados en las figuras 15, 16, 17 y 18.



Fig. 14. Modelado, cargas y restricciones.

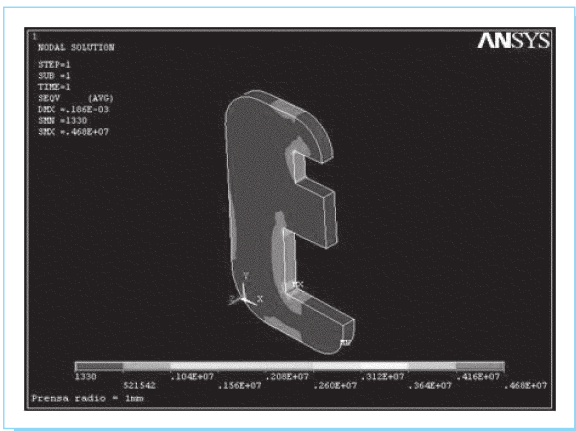


Fig 15. Bastidor de prensa tipo C con un radio de 1 mm, un máximo esfuerzo normal de 4.68 MPa con una carga de 22 N.

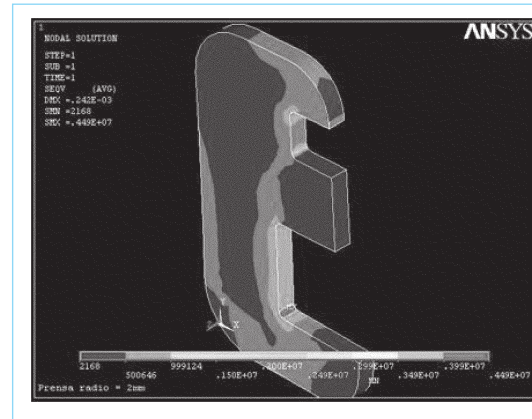


Fig 16. Bastidor de prensa tipo C con un radio de 2 mm, un máximo esfuerzo normal de 4.49 MPa con una carga de 32 N.

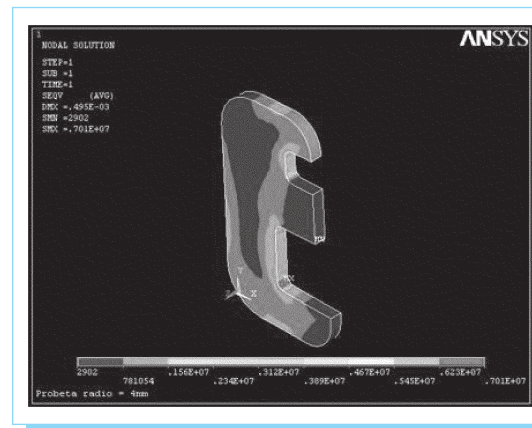


Fig 17. Bastidor de prensa tipo C con un radio de 4 mm, un máximo esfuerzo normal de 7.01 MPa con una carga de 70 N.

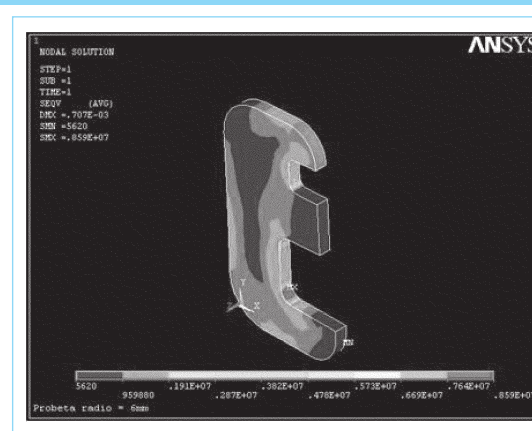


Fig 18. Bastidor de prensa tipo C con un radio de 4 mm, un máximo esfuerzo normal de 8.59 MPa con una carga de 100 N.

Tabla 2. Comparación de resultados.

Bastidor	Carga (N)	Análisis experimental (MPa)	Análisis numérico (MPa)	Porcentaje de error (%)
$r = 1 \text{ mm}$	22	4.670	4.68	0.5
$r = 2 \text{ mm}$	32	4.670	4.49	4.0
$r = 4 \text{ mm}$	70	7.013	7.01	1.0
$r = 6 \text{ mm}$	100	8.182	8.59	5.0

Resultados

La comparación entre el método experimental y el numérico se muestra en la tabla 2. La diferencia mayor es del 5%, la mínima de 0.5%, ambas diferencias se presentan en un solo caso. Dado que las diferencias entre los resultados experimental y numérico no son importantes, se consideran validados los valores de esfuerzos determinados.

Validados por dos métodos los esfuerzos obtenidos en la zona crítica, se establece el tipo de variación de la concentración de esfuerzos para cada radio ensayado; esto se muestra en la gráfica de la figura 19, en la cual se indica la respuesta del modelo para diferentes radios.

En el análisis por fotoelasticidad los resultados obtenidos en los modelos fueron a diferentes valores de carga, esto debido a que la intención es obtener patrones de franja lo más claros posibles y a una misma carga algunas de las probetas no presentaban patrones de franja claros.

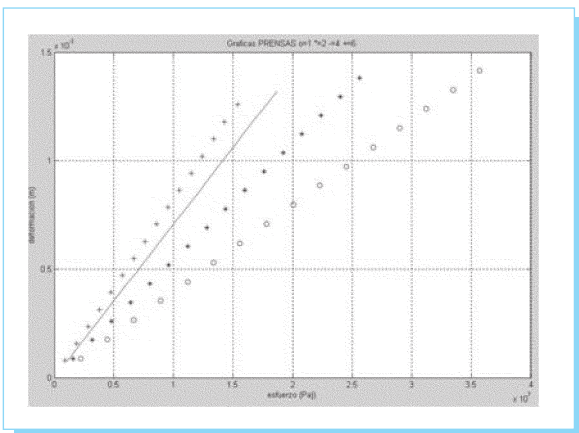


Fig 19. Gráfico comparativo del comportamiento mecánico de las probetas con diferentes radios.

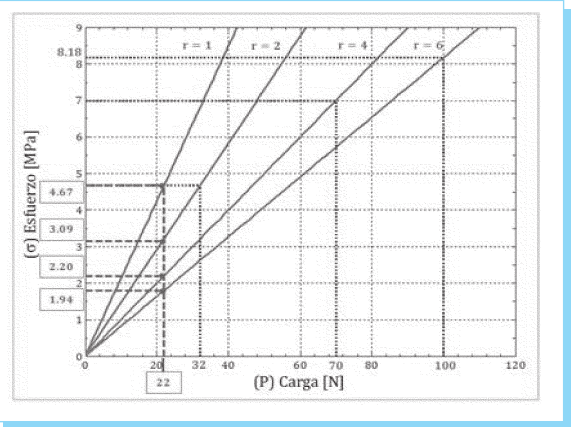


Fig 20. Gráfico $P-\sigma$, para la obtención de esfuerzos a una carga de 22N en las cuatro probetas.

Para definir la variación de esfuerzos en función del cambio de radio en las probetas, se obtienen los valores de esfuerzo, para un mismo valor de carga, por lo tanto en este caso se toma como referencia la carga del modelo con radio de 1mm, que es la menor de los cuatro modelos, es decir la de 22 N y se determinan los esfuerzos a dicha carga para todos los modelos, en la figura 19, se muestran la gráfica esfuerzo-deformación para cada modelo, donde claramente se observa que la respuesta mecánica es de tipo lineal, lo cual facilita la obtención de los esfuerzos de cada modelo como se muestra en la figura 20, donde se grafica la carga aplicada y el esfuerzo inducido de los comportamientos de las probetas.

En la tabla 3 se tabulan los valores de esfuerzo, relacionándolos con el radio todos para una carga de 22 N y en la figura 21 se muestra la variación de concentración de esfuerzos en función del radio.

Como se puede observar en la tabla 3 y la figura 21, la diferencia entre los esfuerzos en los radios de 1 mm y 2 mm es

Tabla 3. Esfuerzos generados a diferentes radios con una carga de 22 N.

Fuerza (N)	Radio (mm)	Esfuerzo (MPa)
22	1.000	4.670
22	2.000	3.090
22	4.000	2.203
22	6.000	1.940

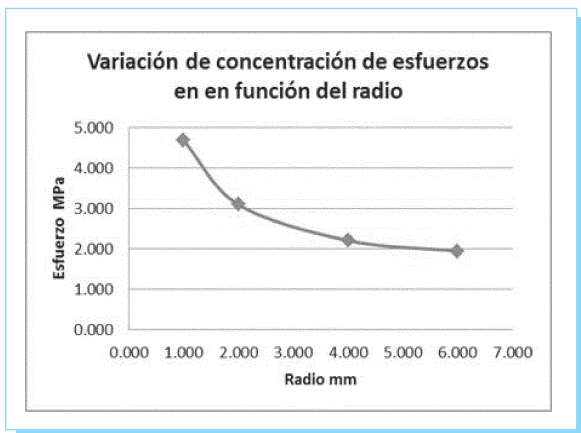


Fig 21. Gráfica del esfuerzo generado con un radio específico de 1 mm, 2 mm, 4 mm y 6 mm a una carga de 22 N.

más grande que la diferencia entre los esfuerzos de los radios de 4 mm y 6 mm, por lo tanto la variación crítica de esfuerzo se localiza en los radios más pequeños, en los radios más grandes, la variación de esfuerzo no es muy considerable, es decir si seguimos creciendo el valor del radio, las diferencias de esfuerzo empezarían a ser insignificantes.

3. Conclusiones

Al comparar los resultados obtenidos en los métodos experimental y numérico, pudimos validarlos y con lo anterior podemos afirmar que se siguieron los procedimientos de solución de forma adecuada.

El método fotoelástico ha probado su efectividad como método experimental de esfuerzos: pero además es una forma visual de argumentar a gente no experta en este tema, como varían las concentraciones de esfuerzos y como se puede eliminar material o proponer nueva geometría sin aumentar la concentración de esfuerzos.

Derivado del análisis de las figuras donde se representa la magnitud de esfuerzo en los dos métodos usados, podemos definir que existen regiones donde el esfuerzo es mínimo o nulo, por lo que para el caso de estudio se puede eliminar material en esas zonas, reduciendo peso al bastidor y por consecuencia a la troqueladora, lo anterior quedaría para un trabajo futuro, así como realizar el estudio de su comportamiento mecánico con esta nueva geometría.

Al determinar los valores de esfuerzo para cada variación del radio inferior en el bastidor de prensa troqueladora tipo C, se obtuvo que la probeta que presentó menor concentra-

ción de esfuerzos fue la de 6 mm de radio y la de mayor concentración de esfuerzo la de radio de 1 mm, pero observando las figuras anteriores notamos que con el radio estudiado de 6mm se presentan concentraciones de esfuerzo más altas en otras partes del elemento (radio superior), por lo que, se determinó que el radio óptimo es de 4 mm debido a que la concentración y distribución de esfuerzos en todo el bastidor es aceptable.

Otra solución, si es que se desea utilizar el radio estudiado de 1 mm o 2 mm, sería agregar un refuerzo sólo en el lugar de concentración de esfuerzos, y con esto disminuir su valor, lo anterior quedaría también para trabajo futuro.

Al determinar el esfuerzo en los cuatro casos estudiados para la misma carga (22 N), como lo muestra la figura 21, se observa que las diferencias de esfuerzos van disminuyendo al aumentar el valor del radio, por ejemplo, la diferencia del valor de los esfuerzos en el modelo con radio de 6 mm respecto al de radio de 4 mm es menor comparada con la diferencia del valor de los esfuerzos en el modelo de radio 2 mm respecto al de radio de 1 mm.

Anexo (Glosario)

Se incluyen algunas definiciones de términos, como son utilizados y entendidos por los autores de este trabajo:

Luz. Radiación electromagnética que afecta al ojo humano en un rango de espectro de visibilidad muy pequeño con longitudes de onda de alrededor de 550 nm.

Luz blanca. Surge de una fuente que emite un espectro continuo con rango de energía estrecho para cada longitud de onda emitida.

Luz polarizada linealmente o luz plana. Onda descrita por un "vector eléctrico" cuyo movimiento es restringido a una trayectoria sobre un plano simple.

Luz polarizada elípticamente. Luz cuya trayectoria puede representarse con una ecuación similar a la de una elipse.

Luz polarizada circular. Caso particular de la luz elíptica donde las amplitudes de onda de planos mutuamente perpendiculares son iguales.

Birrefringencia (o doble refracción). Es la descomposición de un vector luz en componentes ortogonales con velocidades diferentes.

Placa de onda. Elemento cuyas características ópticas le permite descomponer un vector luz en componentes ortogonales y transmitir cada componente a velocidades diferentes, por tanto este elemento tiene la propiedad e birrefringencia.

Placa cuarto de onda. Placa diseñada para realizar una retardación de valor igual a $\pi/2$.

Polariscopio plano. Sistema óptico que consiste de dos placas polarizadoras y una fuente de luz.

Material fotoelástico. Material que exhibe doble refacción temporal.

Isóclina. Término que describe una línea sobre la cual el valor de los esfuerzos principales es constante.

Isocromática. Término que describe una línea sobre la cual la diferencia entre el esfuerzo principal máximo y mínimo es constante, representa una banda de color constante.

Orden de franja isocromática. Banda de luz de color específico resultado de la retardación por la birrefringencia temporal.

Trayectoria de líneas isóclinas. Línea oscura que determina la dirección de los esfuerzos principales en un punto estresado del modelo fotoelástico.

Referencias

- [1] S. P. Timoshenko, *History of Strength of Materials*, Dover edition, NY: 1983, pp. 283.
- [2] S. Moaveni. *Finite element analysis, Theory and application with ANSYS*, 3ª ed., Pearson Prentice Hall, USA: 2007.
- [3] R.C. Hibbeler, *Mecánica de materiales*, 6ª ed., Pearson, México: 2006.
- [4] A. Escamilla, Diseño de una prensa hidráulica para extraer o introducir pernos y bujes de partes automotrices mediante el análisis matemático y el método del elemento finito, Tesis maestría, ESIME Zacatenco IPN, México 2006.
- [5] Dally/ Riley, *Experimental Stress Analysis*, 3ª ed., McGraw-Hill International, Singapore: 1991.
- [6] Khan/ Wang, *Strain Measurements and Stress Analysis*, Prentice Hall, USA 2001.
- [7] R. B. Heywood, *Photoelasticity for Designers*, Ed. Pergamon Press, New York: 1974.
- [8] W. C. Maxwell, On the equilibrium of elastic solids, *Trans. R. Soc. Edinburgh XX*, Parte 1, pp. 1853.
- [9] P. Rastogi, *Photomechanics (Topics in Applied Physics)*, Springer, New York: 2000.
- [10] Klaus-Jürgen Bathe, *Finite Element Procedures*, Prentice Hall, New Jersey USA: 1996.
- [11] Matías Domínguez. *El método del elemento finito mediante el software ANSYS*, México: 2009.
- [12] Walter D. Pilkey, *Peterson's Stress Concentration Factor*, 3ª ed., Wiley & Sons Inc., USA: 2008.
- [13] E. Martínez González, Determinación y análisis de distribución de esfuerzos por el método fotoelástico, Tesis de licenciatura, ESIME IPN, México, 1972.
- [14] <http://www.vishaypg.com/micro-measurements/photo-stress-plus/category/coating/?subCategory=materials>

Sistema de Información Científica Redalyc

Red de Revistas Científicas
de América Latina y el Caribe
España y Portugal

redalyc.org