

CONSTRUCCION DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA ENSAYOS DE FOTOELASTICIDAD



AUTORES:

David Palacio Restrepo

1088019899

Daniela Velásquez

1088321817

DIRECTOR:

Juan Felipe Arroyave Londoño

**Escuela de Tecnología Mecánica
Universidad Tecnológica de Pereira**

Tabla de contenido

Introduccion	3
Metodologia empleada	4
Objetivos	5
objetivo general	5
objetivos especificos.....	5
Capitulo 1	6
fotelasticidad	6
1. Esfuerzo-deformación	6
1.1 concentradores de esfuerzos.....	6
1.2 ¿Qué es la Fotoelasticidad?	8
1.2.1 Principio de la fotoelasticidad.....	8
1.3 El polariscopio.....	9
1.3.1. Funcionamiento del polariscopio	11
1.3.2 Elementos opticos	11
1.3.2. polarizador lineal.....	11
1.3.3. polarizador circular	12
1.4.placas de cuarto de onda	13
1.5. arreglos de los elementos ópticos del polariscopio	14
1.6.luz polarizada	15
1.7.patrones de franja	16
1.7.1. clasificacion de las franjas	16
1.7.2.identificacion de las franjas	16
1.7.3.Métodod de compensacion de tardy	17
1.7.4.interpretacion de la distribucion de los esfuerzos	17
1.7.5 propiedades de los modelos fotoelasticos	17
1.8.calibracion de los modelos fotoelasticos	18
Capitulo 2	19
DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL POLARISCOPIO Y MODELOS FOTOELASTICOS	19
2.1 Consideraciones a tener en cuenta en el diseño	19
2.2.elementos que confroman el polariscopio	19

2.3 Modelos fotoelasticos	19
2.4 Selección del material para los modelos fotoelasticos.....	
2.4.1. Transparencia.....	
2.4.2.Linealidad	20
2.4.3.Isotropía y homogeneidad.....	20
2.4.4.Sensibilidad	20
2.4.5.Alto módulo de elasticidad	20
2.4.6.Fácil maquinado	20
2.5. Material seleccionado para la prueba de fotoelasticidad.....	21
2.6.Diseño y figura de los modelos foto elásticos	25
2.6.1 probetas.....	26
Capitulo 3	28
DESARROLLO DE PRUEBAS FOTOELASTICAS.....	28
3.1 Realización de pruebas	28
CONCLUSIONES	36

INDICE DE FIGURAS

Figura 1	Deformación de una probeta.....	6
Figura 2	Concentrador de esfuerzos.....	8
Figura 3	Asociación color-frecuencia.....	12
Figura 4	Polarización lineal y circular de la luz.....	13
Figura 5	Polariscopio y sus principales elementos.....	19
Figura 6	Polariscopio y sus principales elementos.....	19
Figura 7	Estructura química del PET.....	23
Figura 8	Modelo fotoelastico básico.....	27
Figura 9	Modelo fotoelastico N°1.....	28
Figura 10	Modelo fotoelastico N°2.....	28
Figura 11	Modelo fotoelastico N°3.....	29
Figura 12	Modelo fotoelastico N°4.....	29
Figura 13	Fotografía modelo fotoelastico básico.....	32
Figura 14	Análisis de esfuerzos modelo fotoelastico básico.....	32
Figura 15	Fotografía modelo fotoelastico N°1.....	33
Figura 16	Análisis de esfuerzos modelo fotoelastico N°1.....	33
Figura 17	Fotografía modelo fotoelastico N°2.....	34
Figura 18	Análisis de esfuerzos modelo fotoelastico N°2.....	34
Figura 19	Fotografía modelo fotoelastico N°3.....	35
Figura 20	Análisis de esfuerzos modelo fotoelastico N°3.....	35
Figura 21	Fotografía modelo fotoelastico N°4.....	36
Figura 22	Análisis de esfuerzos modelo fotoelastico N°4.....	36

INTRODUCCIÓN

La fotoelasticidad es una técnica experimental, con la cual podemos analizar esfuerzos y observar la distribución de tensiones en una pieza o un elemento que tengamos sometido a algún tipo de carga, en donde los métodos analíticos serían engorrosos a la hora de emplearlos.

En 1816, el científico escocés David Brewster realizó investigaciones en el campo de la óptica, descubrió el principio básico de la fotoelasticidad, utilizando una pieza de vidrio cargada y haciendo pasar por el vidrio luz polarizada, David observó el contorno de colores en una pieza, causado por la distribución de tensiones presentes en la pieza de vidrio.

La fotoelasticidad, permite el estudio de los esfuerzos y deformaciones en piezas o elementos de interés, por medio de rayos luminosos y técnicas ópticas, con las que podemos determinar los lugares críticos de una pieza o elemento, concentradores de esfuerzos y así poder conocer más a fondo, mejorar y elaborar alternativas de diseño para los elementos que en los diferentes campos de la ingeniería van a ser utilizados, evitando con ello desde una pronta finalización de la vida útil de un material o elemento que está bajo cargas, hasta la prevención de una falla catastrófica que pueda llevar a la colisión de una estructura que sea esencial en una industria, por ello es que el estudio de esta distribución de esfuerzos se hace indispensable tanto para el factor económico que puede representar para una industria, como para la vida misma del personal.

En este documento se encuentran definiciones y explicaciones sobre la teoría necesaria para entender los fenómenos implicados en la fotoelasticidad y los ensayos respectivos por medio de esta técnica, desde la polarización de la luz, como se produce este fenómeno, donde lo podemos ver reflejado, como se aprovechó este fenómeno para realizar estos ensayos y las técnicas empleadas durante todo el proceso.

En este trabajo se explica detalladamente el estudio de los conceptos básicos necesarios para realizar el diseño y construcción de un banco de pruebas que pueda realizar ensayos de fotoelasticidad, basado en el método de transmisión el cual utiliza materiales birrefringentes para la elaboración de los modelos que serán sometidos a estudio, al mismo tiempo se puede encontrar una breve descripción de la construcción del banco que se presenta en el trabajo.

OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un banco de ensayos de fotoelasticidad basado en el método de transmisión.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

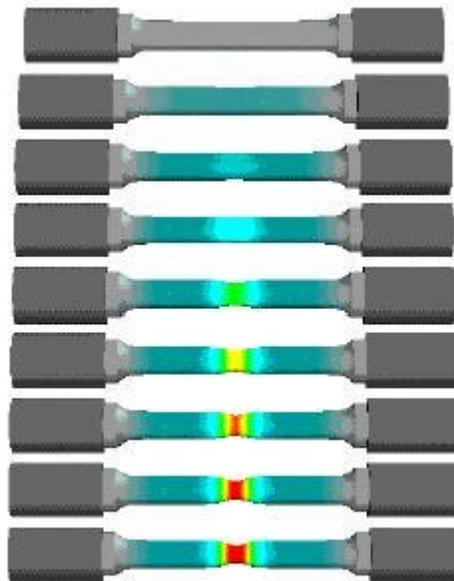
1. Estudiar y comprender el fenómeno de la polarización de la luz.
2. Diseñar y analizar las diferentes alternativas para generar la carga en la probeta.
3. Estudiar y comprender el funcionamiento de un polariscopio.
4. Diseñar y elaborar distintos modelos de probetas.

CAPITULO 1, ESFUERZOS Y FOTOELASTICIDAD

1.1 Esfuerzo y deformación

Los Conceptos fundamentales de esfuerzo y deformación pueden ejemplificarse, si se considera una barra prismática cargada con fuerzas axiales P en los extremos, como se muestra en la figura 1. Una barra prismática es un miembro estructural recto con sección transversal constante en toda su longitud. En este ejemplo, las fuerzas producen un alargamiento uniforme de la barra, por lo que se dice que se encuentra en tensión. Se distinguen dos direcciones para las fuerzas, las que son normales al área en la que se aplican y las que son paralelas al área en que se aplican. Si la fuerza aplicada no es normal ni paralela a la superficie, siempre puede descomponerse en la suma vectorial de otras dos que siempre resultan ser una normal y la otra paralela.

Figura 1 Deformación de una probeta.



Disponible en: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.co/2011/06/propiedades-mecanicas.html>

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Los esfuerzos con dirección normal a la sección, se denotan como σ (Sigma) y representa un esfuerzo de tracción cuando apunta hacia afuera de la sección, tratando de estirar al elemento analizado. En cambio, representa un esfuerzo de compresión cuando apunta hacia la sección, tratando de aplastar al elemento analizado. El esfuerzo con dirección paralela al área en la que se aplica se denota como τ (tau) y representa un esfuerzo de corte.

1.1.1 Concentradores de esfuerzos

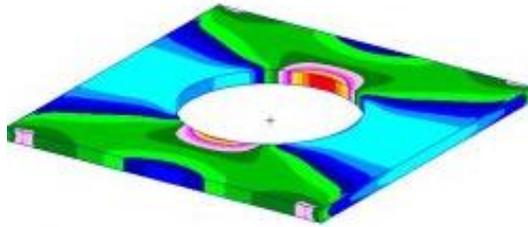
En piezas de maquinaria y estructurales, los mayores esfuerzos se presentan más a menudo en filetes, agujeros e irregularidades geométricas similares, estas discontinuidades en la superficie concentran e incrementan el esfuerzo superficial. Estas se llaman concentraciones localizadas de esfuerzos. La mayoría de las concentraciones localizadas de esfuerzos quedan en uno de los siguientes grupos:

1. Aquellas producidas por cambio en la geometría de una pieza, como agujeros, cajas de cuña, roscas, escalones o cambios en diámetro en ejes y cabezas de tornillos, etc.
2. Discontinuidades de la superficie, como muescas, ralladuras, marcas de maquinado, formación de agujeros, corrosión, etc.
3. Defectos inherentes en el material, como inclusiones no metálicas, fisuras pequeñísimas, huecos, etc.

Las concentraciones de esfuerzos primarios son generalmente del primer grupo y las del segundo y tercer grupo pueden desempeñar papeles relacionados como secundarios. Las marcas ordinarias de herramienta actúan como muescas que tienden a concentrar esfuerzos, sobre todo en la raíz de la muesca. Son especialmente dañinas cuando ocurren en una sección de discontinuidades como filetes bajo la aplicación de una carga estática, el metal sometido a un gran esfuerzo cede plásticamente en la raíz de una muesca o en la orilla de un agujero pasado, así los esfuerzos altos se transfieren a otras secciones hasta que ocurre la fractura; sin embargo bajo fatiga o cargas repetidas en que el esfuerzo es inferior al límite elástico, la cadencia se localiza mejor y una fisura puede empezar antes de que el patrón de esfuerzos cambie para eliminar la concentración de esfuerzos.

El análisis de los concentradores de esfuerzo es indispensable en piezas sometidas a fatiga. En un ensayo de tensión común no necesariamente produce un efecto cuantificable, ya que esa zona experimenta un aumento de resistencia por deformación plástica, pero es interesante observar que la fisura comienza precisamente en la discontinuidad. Este efecto se observa claramente en una barra sometida a tensión.

Figura 2 Concentrador de esfuerzos



Disponible en: <http://elopez.fime.uanl.mx/@academica/academica.htm>

El esfuerzo normal que actúa sobre la sección transversal a través del centro del agujero tiene la distribución ilustrada en la figura. El esfuerzo máximo $\sigma_{\text{máx}}$ ocurre en los bordes del agujero y puede ser considerablemente mayor que el esfuerzo nominal $\sigma = P/ct$ en la misma sección transversal. ("ct" es el área neta en la sección transversal que pasa por el agujero). La intensidad de una concentración de esfuerzos suele expresarse como la razón del esfuerzo máximo al esfuerzo nominal, llamada factor de concentración de esfuerzos K:

$$K = \sigma_{\text{máx}} / \sigma_{\text{nom}}$$

1.2 ¿Qué es la Fotoelasticidad?

La fotoelasticidad es una técnica empleada para el análisis de esfuerzos que nos resulta práctica y muy útil en el estudio de partes y materiales para estructuras y máquinas que posean una geometría más compleja, así mismo que estén sometidas a cargas las cuales convierten los métodos analíticos en un proceso más tedioso.

El principio básico de esta técnica, se debe al descubrimiento realizado por David Brewster en 1816, utilizando una pieza conformada de vidrio la cual sometió a una carga y a través de ella hizo pasar luz polarizada, allí David

observo el contorno coloreado que apareció, el cual se causó debido a las tensiones presentes dentro de la pieza.

La naturaleza de este método experimental se ve reflejada en el nombre de la técnica, en donde implicamos rayos luminosos y técnicas ópticas para el estudio de los esfuerzos y deformaciones de los cuerpos elásticos.

1.2.1 Principio de la fotoelasticidad:

La fotoelasticidad es una técnica muy utilizada en diferentes campos, con el fin de determinar con precisión las deformaciones superficiales, observando y analizando los esfuerzos en una parte individual o en un ensamblaje o estructura los cuales están sometidos a cargas ya sean dinámicas o estáticas.

Dentro de esta técnica, encontramos dos métodos para realizar el ensayo que son: transmisión y reflexión.

El método de transmisión consiste en la reproducción de la pieza individual, ensamblaje o estructura a estudiar, por medio de un material birrefringente.

El método de reflexión consiste en la adhesión de un plástico especial sensible a los esfuerzos, con el cual cubrimos la parte o estructura que vamos a someter al ensayo. Cuando aplicamos las cargas procedemos a la iluminación de la pieza con luz polarizada por medio de un polariscopio. Cuando observamos por el polariscopio podemos observar los esfuerzos a través de colores, se puede observar la distribución total de esfuerzos y se pueden determinar las áreas que presentan más altos esfuerzos. Por medio de transductores ópticos que sirven como compensador unido al polariscopio, el análisis de esfuerzos cuantitativos puede ser realizado de manera sencilla.

1.2.2 ¿Qué es la birrefringencia?

La birrefringencia es una propiedad en la cual está basado el método de foto elástico, la poseen ciertos materiales y consiste en descomponer un haz de luz en dos componentes ortogonales y transmitirlos a diferentes velocidades, se conoce como birrefringencia o doble refracción.

1.3 El polariscopio:

El polariscopio es el instrumento óptico de medición que se utiliza en los ensayos de fotoelasticidad, sacando provecho de las propiedades de la luz polarizada empleada por el mismo y que ayuda a medir los cambios en el índice de refracción. Existen dos tipos de polariscopios que se utilizan para el análisis de esfuerzos y son el polariscopio circular y el polariscopio plano,

que como hablamos en el anterior capítulo, tienen sus nombres debido a las características de la luz polarizada que emplean, recordando, la luz polarizada plana se obtiene por medio de polarizadores lineales y a luz polarizada circular, se obtiene por medio de unos elementos adicionales que son las placas cuarto de onda.

1.3.1 Funcionamiento del polariscopio:

El polariscopio es un instrumento óptico que nos sirve para evaluar tensiones y la calidad de un lente. Consiste esencialmente en dos polarizadores los cuales tienen sus centros ópticos ubicados perpendicularmente, de tal manera que la luz no puede atravesar el instrumento.

Existen dos tipos de polariscopio, el circular y el plano.

1.3.2 Elementos ópticos en el polariscopio:

Dentro del polariscopio nos encontramos con elementos ópticos que nos permiten la efectiva polarización de la luz y que podamos llevar a cabo el ensayo, teniendo en cuenta las diferentes disposiciones de cada elemento para hacer la respectiva polarización plana o circular. Para el polariscopio plano, utilizamos los polarizadores lineales y para el polarizador circular agregamos la disposición de las placas cuarto de onda que nos permiten la polarización circular de la luz, posterior a haber atravesado los polarizadores lineales y de nuevo realizar el mismo proceso antes de llegar al analizador que básicamente es otro polarizador lineal.

1.3.3 Polarizador lineal:

El polarizador plano o lineal no es más que un filtro con transmitancia selectiva a una determinada oscilación del campo eléctrico de una onda electromagnética como la luz. Cuando el haz de luz incide sobre el polarizador plano, obtenemos una onda con dos componentes perpendiculares entre sí. Tenemos un componente el cual es paralelo al eje de polarización y este componente es transmitido mientras que el componente perpendicular a este es absorbido. Los filtros polarizadores por lo general están fabricados de una película de polímero a base de lodo estirada y ubicada entre dos vidrios.

1.3.4 Polariscopio circular:

La luz producida por un foco luminoso se polariza a través de un polarizador lineal. La luz que es linealmente polarizada incide sobre una lámina cuarto de onda, cuyos ejes rápido y lento, forman un ángulo de 45 grados con respecto al eje del polarizador.

1.4 Placas cuarto de onda:

Las placas de onda son elementos ópticos que transforman vectores de luz en dos componentes perpendiculares entre sí, los cuales son transmitidos a diferentes velocidades. La placa cuarto de onda está constituida por un material birrefringente de grosor ajustado de manera muy cuidadosa, para que la luz asociada con el mayor índice de refracción se retarde una fase de 90° que equivale a un cuarto de longitud de onda, y que esta se retarde respecto a la luz que tiene un menor índice de refracción. El material es cortado de tal forma que el eje óptico sea paralelo a las superficies de la placa. Las placas cuarto de onda convierten la luz polarizada linealmente en luz polarizada circularmente y realizan el proceso contrario, convirtiendo la luz polarizada circularmente de nuevo en luz polarizada linealmente, este proceso se lleva a cabo ubicando plano de incidencia de la luz de modo que forme un ángulo de 45° respecto a eje óptico.

1.5 Arreglos de los elementos ópticos del polariscopio:

El arreglo más sencillo de los elementos ópticos en un polariscopio, es el arreglo de polarizadores lineales que consiste en dos polarizadores lineales que hacen de polarizador y analizador respectivamente y una fuente de luz. El polariscopio lineal es el utilizado para la construcción y ensayos en este proyecto. Los dos ejes de los polarizadores están siempre cruzados y el modelo foto elástico para las pruebas está ubicado en medio de los dos polarizadores (polarizador y analizador) y la luz no a traviesa al analizador debido al cruce de los ejes.

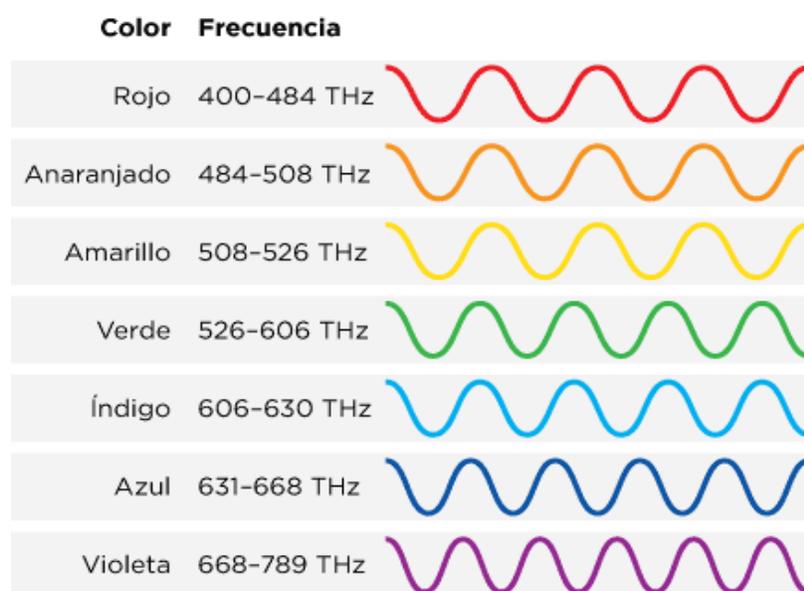
El otro arreglo de los elementos ópticos de un polarizador es el que nos da una configuración de modo tal que el haz de luz de la fuente es polarizado circularmente, este polarizador consta de cuatro elementos ópticos y la fuente de luz, los dos elementos que son agregados a este sistema son las placas cuarto de onda que juegan el papel de polarizadores circulares, el proceso empieza en la fuente de luz que hace a travesar el haz de luz por los polarizadores lineales posteriormente a la placa cuarto de onda y de allí a traviesa el modelo foto elástico volviendo a una placa cuarto de onda que hace el proceso inverso de la primera, convirtiendo la luz polarizada circularmente en luz polarizada linealmente de nuevo y llegando al analizador por donde podremos observar la distribución de deformaciones.

1.6 Luz polarizada

La luz es una onda electromagnética que provoca perturbaciones en el medio, las cuales son debidas a la oscilación en el valor del campo eléctrico y el campo magnético, los cuales entre si son perpendiculares.

Algunos materiales tienen una propiedad que los caracteriza por hacer que las vibraciones luminosas ocurran en un solo plano, esa luz se llama "luz polarizada". La luz atraviesa ciertos filtros, los cuales solo permiten el paso de la luz en cuyo plano de oscilación coincide con la dirección del filtro, allí ocurre la polarización de la luz. El color de la luz que observamos por el ojo es determinado por la frecuencia de la onda.

Figura 3 El color de la luz varía dependiendo de la frecuencia de onda.
Asociación color-frecuencia.



Disponible en: <http://lareconexionmexico.ning.com/profiles/blogs/por-que-exactamente-se-vera-la-luna-roja>

La luz consta de varios componentes, y estos componentes tienen una misma frecuencia, en ese momento, la luz se clasifica como monocromática, y el color de la luz depende de la frecuencia de la misma. Dicho lo anterior, debemos aclarar que los componentes pueden mostrar diferentes frecuencias y en ese momento los colores de los mismos son variados.

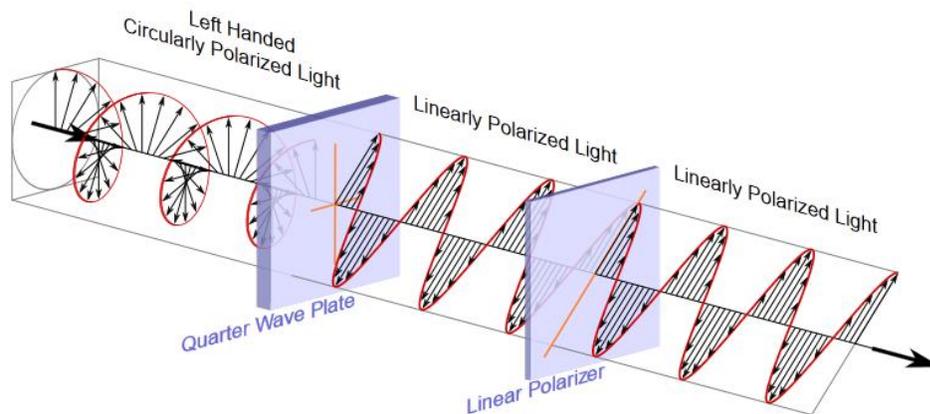
Básicamente la luz consiste en un vector y los componentes de dicho vector son perpendiculares a la dirección de propagación de la luz. Cuando dichos componentes muestran una dirección preferencial de propagación, es cuando podemos decir que la luz esta polarizada.

Normalmente la luz polarizada se consigue a través de un filtro óptico al cual se le suele llamar “polarizador”, y el cual es un elemento óptico que lo que hace es “controlar” la dirección de los componentes del vector luz.

Cuando observamos una fuente luminosa a través de un polarizador, podemos observar que al girar el polarizador en su propio plano, la intensidad de la luz no va a cambiar, pero si agregamos un segundo polarizador dejando fijo el primero, encontraremos que al girar este segundo polarizador la intensidad de la luz si va a sufrir un cambio. La intensidad es casi nula para las posiciones angulares 90° y 270° del segundo polarizador con respecto al primero.

En el método de fotoelasticidad se utilizan dos formas de polarización de la luz que son la polarización circular y la polarización plana.

Figura 4 Polarización lineal y circular de la luz, se observa cómo se comportan los vectores y su dirección preferencial cuando son polarizados circular y linealmente.
Ondas lineal y circularmente polarizadas



Disponible en:

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Linear.Polarization.Linearly.Polarized.Light_Linear.Polarizer_Passing.Left.Handed.Helix.View-de.svg

La luz polarizada plana o lineal se obtiene cuando todos los componentes del vector luz tienden a un plano, como lo podemos observar en la figura 1.2.

La luz polarizada circularmente se obtiene cuando todos los componentes del vector luz, describen una hélice circular, a los lados del eje de propagación.

En la figura podemos observar un elemento “Quarter wave plate” que es la denominada lamina cuarto de onda, que definiremos posteriormente. La lámina cuarto de onda se encarga de convertir la luz polarizada linealmente en luz polarizada circularmente. La luz polarizada circularmente elimina el patrón de franjas isóclinas y mantiene el patrón de franjas isocromáticas. Estos patrones son presentados simultáneamente, lo que sucede es que el patrón de isocromáticas es mucho más fácil de interpretar que el patrón de isóclinas, por esta razón el polariscopio de luz polarizada circularmente es utilizado con mayor frecuencia que el polariscopio de luz polarizada plana.

1.7 Análisis de los patrones franja:

Con la fotoelasticidad podemos concretar en los siguientes tipos de análisis y medidas:

- Una interpretación completa de los patrones de franjas, permitiendo el ensamble general de las magnitudes nominales de esfuerzos o deformaciones gradientes.
- En cuanto a medición cuantitativa las direcciones de las deformaciones y esfuerzos principales en la parte estudiada, además de la magnitud y esfuerzo del esfuerzo tangencial a lo largo de los bordes que llevan carga y en todas las regiones donde el estado del esfuerzo es uniaxial.
- En un estado de esfuerzos biaxial, la magnitud y el signo de la diferencia de las deformaciones y esfuerzos principales en cualquier punto seleccionado de la superficie de estudio, puede ser fácilmente analizados.

1.7.1 Clasificación de las franjas:

Cuando tenemos un modelo foto elástico, que es ubicado en un polariscopio y sometido a esfuerzos y deformaciones, podemos observar un patrón de franjas isocromáticas, en donde la diferencia entre los esfuerzos principales es igual a una constante, la cual nos va permitir conocer las magnitudes de dichos esfuerzos. También podemos obtener un patrón de franjas isóclinas, con las cuales obtenemos las direcciones principales en el modelo.

Dentro del efecto foto elástico se conoce que es causado por una interferencia alternativa, es conocida como construcción y destrucción de rayos de luz, entre los cuales existe un retardo relativo.

Utilizamos luz blanca, ya que esta se compone de todos los espectros de longitud de onda visibles, conocemos que el retardo que causa extinción de una longitud de onda (color), por lo general, no extingue otras longitudes de onda, es decir extingue un color en específico mas no a los otros colores. Cada color del espectro se extingue de acuerdo a su longitud de onda, nosotros a través del analizador observamos el color complementario y estos colores complementarios que nosotros podemos observar a través del analizador, son los que crean los patrones de franjas visibles con luz blanca, un patrón de isocromáticas.

1.7.2 Identificación de las franjas:

Cuando ubicamos frente al polariscopio un modelo que no está sometido a esfuerzos residuales, se puede observar el modelo uniformemente negro y conforme lo vamos cargando de una forma gradual, podemos observar la aparición de franjas de colores, empezando por el gris hasta llegar al color rojo. Dentro de este cambio y aparición de franjas de colores, se tiene el violeta que es considerado el color de transición, debido a que es bastante sensible a pequeños cambios en el nivel de deformación y desaparece con mucha facilidad.

Las franjas foto elásticas tienen características especiales de comportamiento, y estas características especiales son muy útiles para la interpretación de los patrones de franjas.

Las franjas tienen un orden que es dado por un aumento de números enteros ($N=1$, $N=2$, $N=3$... etc.).

Las franjas de orden cero son negras y tienen forma de mancha. Las franjas sin importar de que orden, nunca se intersectan ni pierden sus características propias.

Para la interpretación del patrón de franjas, es necesario determinar la relación que existe entre el esfuerzo aplicado y los efectos ópticos observados en el polariscopio. Un modelo foto elástico libre de cargas tiene un índice de refracción constante en todos los puntos y conforme lo vamos sometiendo a esfuerzos vamos a tener cambios ópticos en el modelo foto elástico.

Tendremos dentro de los diferentes modelos foto elásticos, franjas formando un conjunto muy cerrado de curva, debido al gradiente de deformación considerablemente grande, esta zona es lo que comúnmente conocemos como un concentrador de esfuerzos. Cuando se presenta una zona muy

amplia cubierta por un mismo color, nos indica que la deformación en toda esta zona es uniforme. Si existe una franja con valor igual a cero el color que la representa y que observaremos será negro, teniendo en cuenta que en los bordes de cualquier modelo foto elástico se presentara este color, debido a que los esfuerzos serán cero.

1.7.3 Método de compensación de Tardy:

Cuando vamos a determinar el orden de las franjas isocromáticas, tenemos que podemos encontrar hasta $\frac{1}{2}$ de orden, empleando los patrones de franja de campo oscuro y claro. Cuando se requiere de una mayor exactitud, debemos emplear métodos de compensación punto por punto que nos establezcan de forma más exacta y más clara el orden N de la franja.

El método más utilizado de compensación para encontrar el orden N de las franjas en cualquier punto del modelo foto elástico es el método de compensación de Tardy que consiste en girar el analizador un ángulo determinado y que es conocido como ángulo de compensación, cuando tenemos un polariscopio circular, es decir, cuando tenemos el polarizador y el analizador alineados con la dirección de las deformaciones, y los lentes de cuarto de onda están respectivamente a 45° , procedemos a girar el analizador. Luego de girar el analizador al ángulo de compensación en el polariscopio circular, se moverá la franja a la posición donde tendremos un orden fraccional el cual se sumara al orden de franja entero N que se tenga identificado, se sumara cuando el analizador gire en sentido de las manecillas del reloj, en caso de girar contrario a las manecillas del reloj, entonces se restara el orden fraccional encontrado al orden entero N identificado.

1.7.4. Interpretación completa de la distribución de esfuerzos:

La fotoelasticidad, además de la capacidad de obtener una medición precisa de las deformaciones nos provee otra capacidad que es de mucha importancia y utilidad para nosotros en el análisis de esfuerzos. Es la capacidad que nos da para reconocer las magnitudes nominales de las deformaciones, gradientes de deformación y en general la distribución de esfuerzos, en donde podemos observar las regiones donde se presentan bajos esfuerzos y las regiones donde tenemos sobre-esfuerzos. Este atributo de la fotoelasticidad se le es conocido como una interpretación completa y su exitosa aplicación depende del reconocimiento de los órdenes de franja por color y un entendimiento de las relaciones entre orden de franja y magnitud de deformación.

1.7.5 Propiedades de los materiales foto elásticos:

Dentro de los ensayos foto elásticos y el ámbito del análisis aprovechando dicha técnica experimental, se debe tener muy en cuenta el material a utilizar que debe ser apropiado para la elaboración de los modelos foto elásticos. Existen cantidades considerables de materiales apropiados, que cumplen con las propiedades para ser seleccionados, y todos ellos con propiedades diferentes, es trabajo del analista de esfuerzos seleccionar el adecuado teniendo en cuenta sus requerimientos. Las principales propiedades de los materiales adecuados para este fin son:

- Ser transparente a la luz que se emplea en el polariscopio, teniendo en cuenta que también existen algunos opacos para luz infrarroja y ultravioleta.
- El material debe ser suficientemente sensible a esfuerzos o deformaciones, lo cual viene indicado por el valor de la franja (f) y a menor valor f el material es más sensible.
- El material debe tener características lineales con respecto a: esfuerzo contra deformación, diferencia de esfuerzos principales contra el orden de franja y diferencia de deformaciones principales contra orden de franja.
- El material debe contar con isotropía mecánica, isotropía óptica y ser homogéneo.
- El material no debe escurrir excesivamente, con esto nos referimos a que el material no debe deformarse en el tiempo para cargas aplicadas constantes y además la recuperación debe ser lo más pronto posible.
- El material debe contar con un alto módulo de elasticidad y alto límite proporcional.
- La sensibilidad del material (f) no debe ser afectada por pequeños cambios de temperatura.
- Debe ser un material que con el tiempo no pierda sus características.
- El material debe contar con fácil maquinabilidad ya que de lo contrario el proceso de preparación de los modelos para las partes a estudiar se vuelve más costoso en caso de no serlo, además de que se puede producir distorsión en el espectro foto elástico debido a esfuerzos residuales ocasionados por maquinado.
- Como se explicó en el punto anterior, el material debe estar libre de esfuerzos residuales producidos probablemente por moldeo, maquinado, almacenamiento, entre otras. Estos esfuerzos son bastante difíciles de eliminar, ya que se debe realizar un tratamiento delicado.
- Y una de las propiedades más importante es poseer birrefringencia.

Los materiales que son utilizados para la elaboración de los modelos, partes o probetas fotoelásticas se fabrican comúnmente con resinas epóxicas, poliéster, poliuretano, las que pueden dosificarse con el fin de producir una

gran variedad del módulo de elasticidad y respuesta foto elástica, a diferentes deformaciones del material.

1.8 Calibración de materiales foto elásticos:

Los valores de la franja del material, que corresponde a la sensibilidad del material, dependen de factores como:

Cantidad de resina, temperatura, envejecimiento, espesor, entre otros. Debido a esto es recomendable calibrar el material acercándonos al tiempo en el que se le va a realizar la prueba. Para llevar a cabo esta calibración se emplean modelos de los cuales conocemos muy bien su distribución de esfuerzos teórica. Dicho modelo, deberá ser fácil de maquinar y simple de cargar. El modelo que se emplea para la calibración debe ser cargado en incrementos de carga y tanto las bandas de colores y las cargas deben ser anotadas y desde esta información se puede determinar los valores de f .

CAPITULO 2. DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL POLARISCOPIO Y DE LOS MODELOS FOTOELASTICOS

2.1 Consideraciones a tener en cuenta en el diseño:

Para el diseño y construcción del banco para ensayos de fotoelasticidad se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

Tipo de Carga axial

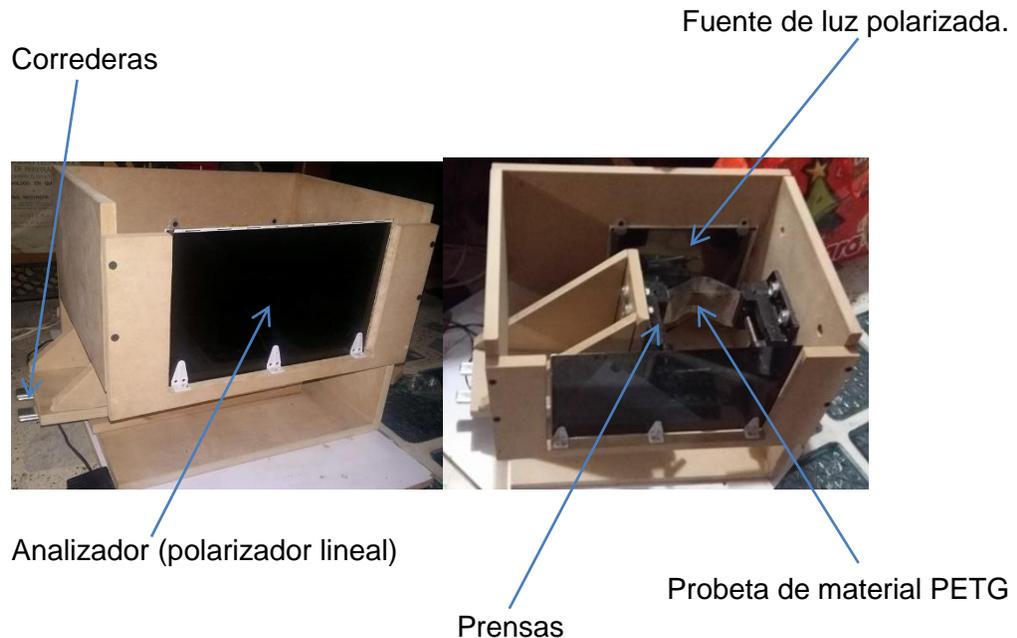
Banco modular muy compacto y sencillo de transportar.

Materiales ligeros

El polariscopio lineal

Fuente de luz polarizada linealmente.

Figuras 5 y 6. Muestran el polariscopio y señalan las principales partes



2.2 Descripción de los elementos principales que componen el banco

El banco está constituido por los siguientes elementos:

Analizador (polarizador lineal): Es un polarizador lineal el cual recibe las ondas que han atravesado el modelo fotoelástico y nos permite la correcta visualización de las franjas y la distribución de esfuerzos en el material.

Fuente de luz polarizada: Es una pantalla LCD de 24V, la cual tiene incorporada un polarizador lineal y lleva el haz de luz directo al modelo fotoelástico.

Prensas: Están ubicadas en la pared móvil y en la pared fija, su propósito es sujetar los modelos fotoelásticos para generar la carga a los modelos por medio del tornillo tensor.

Tornillo tensor: Está ubicado en las mismas paredes que las prensas, justo debajo de ellas, y por medio de unos cáncamos se encarga de ejercer la fuerza a las paredes para así generar una carga a el modelo fotoelástico el cual como se dijo anteriormente está sujeto a las prensas.

Correderas: Están ubicadas en la base del banco y están encargadas de deslizar la pared móvil.

2.3 Modelos foto elásticos:

Los modelos foto elásticos son elaborados en material birrefringente para poder realizar el análisis foto elástico y el ensayo como tal, estos modelos son elaborados con dimensiones normalmente a escala de la pieza que se quiere estudiar, aunque en casos donde las dimensiones de la pieza real nos permite elaborarla con sus respectivas dimensiones, en una escala 1:1, se realiza el ensayo con un modelo idéntico a la pieza pero elaborado en el material birrefringente para realizar un ensayo exitoso. Se busca que los modelos estén libres de esfuerzos residuales para un ensayo conciso y claro.

2.4 Selección del material para los modelos fotoelásticos:

En la selección del material se debe considerar el más adecuado para la elaboración de los modelos fotoelásticos, teniendo en cuenta sus propiedades esenciales, hay muchos tipos de materiales que son utilizados

para este ensayo, como el policarbonato, las resinas epóxicas, el plexiglás, entre otros, cada una con propiedades diferentes. Algunos materiales son mucho más adecuados que otros, todo dependiendo del tipo de ensayo y la geometría de los modelos fotoelásticos que serán empleados en la prueba, ya que algunos materiales poseen mayor facilidad de maquinado a comparación de otros. A continuación se mencionarán el tipo de propiedades principales que debe tener un material fotoelástico.

2.4.1 Transparencia: La razón principal por la que el material debe tener transparencia es porque en los ensayos fotoelásticos utilizamos luz visible para que con esta se visualicen los patrones de franjas y en ellos la distribución de deformaciones, debido a esto se debe utilizar un material que presente transparencia, ya que con un material opaco no sería posible la visualización de las franjas y tendríamos que utilizar luz ultravioleta o infrarroja la cual no es sensible a el ojo humano.

2.4.2 Linealidad: La mayoría de los polímeros presentan propiedades lineales de esfuerzo-deformación, en la proporción lineal, a grandes cantidades de esfuerzo el material tiende a comportarse de una manera no lineal, sin embargo los polímeros son buenos candidatos debido a su comportamiento para esfuerzos no muy grandes, la razón por la cual deben presentar propiedades lineales de esfuerzo-deformación es porque lo que se busca con los modelos foto elásticos es predecir los esfuerzos que ocurrirán en un prototipo de cualquier otro material.

2.4.3 Isotropía y homogeneidad: La importancia de esta propiedad en los materiales empleados en los ensayos foto elásticos se debe a que las moléculas del material deben estar orientadas aleatoriamente para un ensayo claro, una manera de comprobar si el material es isótropo y homogéneo es sometiéndolo al polariscopio y girando el polariscopio de tal manera de que si el modelo cambia de color a medida que lo giramos, significa que es un material que no presenta esta propiedad y por lo tanto no sirve para realizar el ensayo por que no tendríamos un ensayo claro debido a que dependiendo del posicionamiento del polariscopio algunos colores pueden cambiar y no tendríamos una lectura clara.

2.4.4 Sensibilidad: La sensibilidad es una propiedad muy importante en los ensayos foto elásticos, nos referimos a una sensibilidad respecto a los esfuerzos y deformaciones. Un material que cumpla con esta propiedad nos permite más facilidad para observar las franjas además de que observar un mayor número de franjas con cargas relativamente bajas, reduciendo así

también las posibilidades de sobrepasar el límite elástico del material. También se debe tener en cuenta que la temperatura puede introducir errores en el análisis foto elástico, ya que nos puede variar los valores de las franjas.

2.4.5 Alto módulo de elasticidad: El módulo de elasticidad es importante para la selección del material ya que debemos evitar al máximo una deformación considerable en donde la geometría de la frontera del modelo cambie, la solución foto elástica ya no sería la adecuada e incurrimos en errores de magnitud producidos por la distorsión del modelo.

2.4.6 Fácil maquinado: El material foto elástico en general es fácil de maquinar, se deben tener en cuenta consideraciones como la fuerza y las temperaturas que son empleadas durante el proceso de maquinado, debido a que buscamos obtener una pieza sin esfuerzos residuales, precisa a escala de la que queremos estudiar (en caso de ser a escala), en el maquinado de los modelos se utilizan altas velocidades y herramientas de corte de alta calidad.

2.5 Material seleccionado para la prueba de fotoelasticidad

Teniendo en cuenta las características y propiedades que debe poseer el material para la realización de la prueba de fotoelasticidad, se seleccionó polietileno tereftalato glicol (PETG) derivado del PET, el cual es un material de fácil de consecución y relativamente económico.

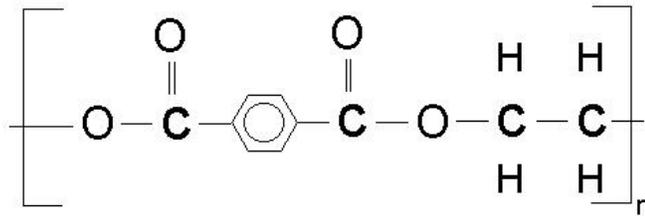
Este tipo de material termoplástico se caracteriza por ser rígido, brillante, incoloro transparente (excelente claridad óptica) y amorfo, tiene buena resistencia química y alto índice de sensibilidad.

PET:

El Tereftalato de Polietileno es un derivado del petróleo de la familia de los termoplásticos, sus características principales son: transparente, irrompible, ligero, maleable de fácil personalización, brillante y 100% reciclable. El PET se puede inyectar, extruir, laminar y soplar. Es uno de los plásticos favoritos en la industria, su utilidad primordial es en la fabricación de botellas, tarros y frascos para envasar bebidas, alimentos, productos cosméticos y farmacéuticos.

Su estructura química está dada por:

Figura 7. Estructura química del PET.



Disponible en:

http://engenhariadeproducaoindustrial.blogspot.com.co/2011_11_01_archive.html

Y su fórmula molecular es:

(C₁₀H₈O₄)_n

Existen dos tipos de PET, uno es el polietileno tereftalato que entra en la clasificación de los homopolímeros y son principalmente opacos, el segundo tipo es el polietileno tereftalato glicol (PETG) que se encuentra en la categoría de los copolímeros que tienen la característica de ser transparentes.

Polietileno tereftalato glicol (PETG): es un copoliéster polímero termoplástico amorfo con alta transparencia que puede ser moldeado por inyección o extrusión de lámina, tiene propiedades ópticas elevadas, es un material preparado para recibir impactos y diferentes agentes químicos.

Es un material con una amplia lista de aplicaciones

- Elementos de protección y seguridad (EPIS)
- Protecciones para maquinaria.
- Aplicaciones y accesorios para uso alimentario
- Rotulación, expositores, displays, publicidad, señalización, PLV.
- Letras para rotulación, protecciones neón.
- Termo conformados
- Urnas de varios formatos: rectangulares, redondas, cuadradas, grandes, pequeñas...

- Maquetas: urnas de grandes y pequeños formatos para arquitectura (anti vandálico).
- Vitrinas y armarios a escala para diferentes modelos de automóviles, barcos, trenes y artículos de coleccionismo en general.
- Aislamiento acústico con paneles de diferentes formatos.
- Acristalamientos anti vandálicos.
- Escaparates: estanterías, soportes productos, elevación productos (peanas), protección escaparates (anti vandálico), separadores...
- Acristalamientos de seguridad: mamparas para centros comerciales, colegios, gimnasios, zonas de paso, aeropuertos.
- Paredes divisorias, acristalamientos.
- Cubiertas y claraboyas.
- Protecciones industriales
- Muebles y decoración: estanterías, soportes para mesas, esculturas, peanas.
- Mobiliario urbano.
- Promociones, vending, dispensadores de folletos, carteles, displays.
- Pisapapeles, placas conmemorativas con gravados o impresión.
- Publicidad y elementos publicitarios: porta precios, portafotos, peanas con impresión, gravados

Ventajas:

- Ligeras.
- Alta transparencia y brillo.
- Buena resistencia a la rotura
- Excelentes características termoplásticas.
- Compatibles con aplicaciones alimentarias.
- Optima resistencia química.

A continuación se presentarán en las siguientes tablas las propiedades mecánicas, físicas, químicas, térmicas y eléctricas de este material.

Tabla 1. Propiedades mecánicas

Propiedades Mecánicas	
Alargamiento a la Rotura (%)	54
Dureza - Rockwell	R115
Módulo de Tracción (MPa)	2200
Resistencia a la Tracción (MPa)	50
Módulo de flexión (MPa)	2075
Resistencia a la flexión (MPa)	70

Fuente: catalogo empresa Baño lid,S.L

Disponible en: <http://www.plasticostecnicos.cat/pdf/productes/es/petg-plastico-tecnico.pdf>

Tabla 2. Propiedades físicas y ópticas

Propiedades Físicas o ópticas	
Transmisión luminosa	0,03
Densidad (g cm ⁻³)	1,27
Índice Refractivo	1,57
Índice de amarillento	<1
Resistencia a los Ultra-violetas	Aceptable
Absorción de agua (%)	0,2
Transmitancia de la luz(%)	86

Fuente: Catalogo empresa Baño lid,S.L

Disponible en: <http://www.plasticostecnicos.cat/pdf/productes/es/petg-plastico-tecnico.pdf>

Tabla 3. Propiedades químicas

Propiedades Química	
Ácidos – concentrados	Buena
Ácidos – diluidos	Buena
Álcalis	Buena
Alcoholes	Buena
Cetonas	Buena
Grasas y Aceites	Aceptable
Halógenos	Mala
Hidrocarburos Aromáticos	Aceptable

Fuente: catalogo empresa Baño lid,S.L

Disponible en: <http://www.plasticostecnicos.cat/pdf/productes/es/petg-plastico-tecnico.pdf>

Tabla 4. Propiedades eléctricas

Propiedades eléctricas	
Constante Dieléctrica 100 HZ	2,6
Factor de Disipación a 50 Hz	0,01
Resistencia Dieléctrica (kV mm ⁻¹)	16
Resistividad Superficial (Ohm/sq)	≥1016
Resistividad de Volumen a ^C (Ohmcm)	≥1015

Fuente: catalogo empresa Baño lid,S.L

Disponible en: <http://www.plasticostecnicos.cat/pdf/productes/es/petg-plastico-tecnico.pdf>

Tabla 5. Propiedades térmicas

Propiedades termicas	
Temperatura vikat (°c)	82
Temperatura de deformación A/B	72/68
Capacidad térmica especifica (J/gk)	1,1
Coefficiente de expansión termica lineal (Kx-10-5)	6,8
Conductividad térmica (W/m.k)	0,20
Temperatura de degradación (°c)	>280
Temperatura máxima de uso (°c)	70
Temperatura de moldeo (°c)	120-160

Fuente: catalogo empresa Baño lid,S.L

Disponible en: <http://www.plasticostecnicos.cat/pdf/productes/es/petg-plastico-tecnico.pdf>

2.6 Modelos foto elásticos

El diseño de las probetas está relacionado con el tipo de prueba que se va realizar, las tres pruebas comúnmente utilizadas para realizar estudios foto elásticos en cualquier tipo de material son: compresión, tensión y flexión, en este proyecto se considerarán las deformaciones según las fuerzas ejercidas solo en la prueba de tensión.

Definido el material, se procede a observar en el polariscopio que dicha material no tenga esfuerzos residuales, esto quiere decir que no haya sido sometido a esfuerzos anteriormente y no cumpla con una de las propiedades principales como es la homogeneidad. Cuando se tiene la certeza de que el material está libre de preexistencias y se puede utilizar se procede a:

- Diseñar las probetas a utilizar
- Dibujar sobre el material el diseño de las probetas
- Cortar los modelos
- Verificar las dimensiones

2.6.1 probetas

Figura 8. Modelo fotoelastico básico.



Figura modelada con la ayuda de herramienta computacional (Solidworks)

2.6.2 probetas con concentradores de esfuerzos

Figura 9. Modelo fotoelastico N°1



Figura modelada con la ayuda de herramienta computacional (Solidworks)

Figura 10. Modelo fotoelastico N°2

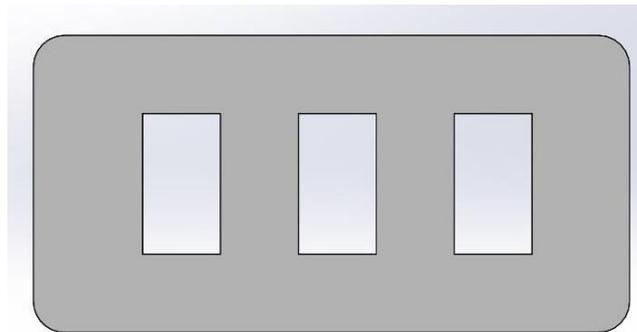


Figura modelada con la ayuda de herramienta computacional (Solidworks)

Figura 11. Modelo fotoelastico N°3.

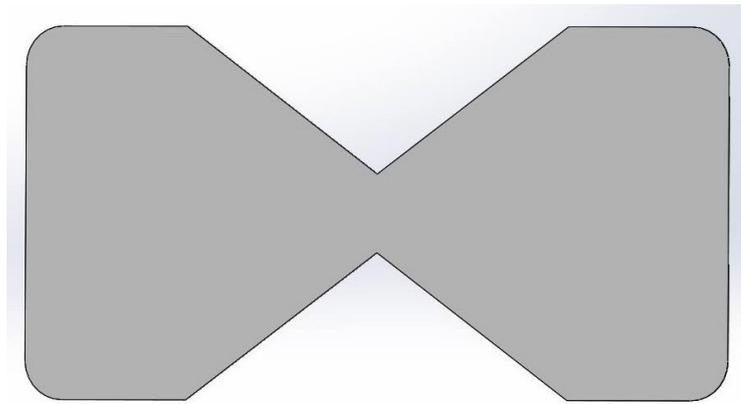


Figura modelada con la ayuda de herramienta computacional (Solidworks)

Figura 12. Modelo fotoelastico N°4

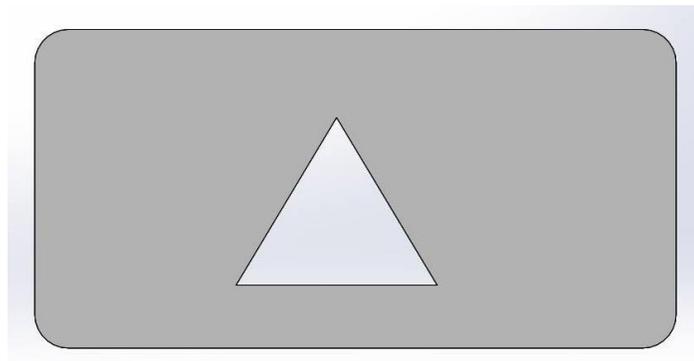


Figura modelada con la ayuda de herramienta computacional (Solidworks)

CAPITULO 3, PRUEBAS FOTOELASTICAS

Para certificar el funcionamiento del polariscopio se realizan pruebas con las probetas diseñadas y construidas.

3.1. Realización de pruebas:

Se debe realizar la calibración de las probetas ya que algunos materiales plásticos presentan variaciones en sus propiedades mecánicas y ópticas.

La calibración tiene como finalidad conocer el valor de franja (c) o coeficiente óptico, que es una medida de la sensibilidad birrefringente del material.

Las probetas son coladas en el polariscopio y son sometidas a esfuerzos de tensión simple, se le aplica una fuerza, en el momento que se les empieza a aplicar la carga, se nota las franjas que van apareciendo desde los bordes de la pieza hasta el centro de esta misma estos son los llamados ordenes de franja N, los valores de él orden de franja se determina por el color de las franjas que se van adquiriendo en la prueba y se apoya en la siguiente tabla:

Tabla 6. Color y orden de franja

Color	Retraso nm	Orden de franja N
Negro	0	0
Gris	160	0.28
Blanco	260	0.45
Amarillo	350	0.60
Naranja	460	0.79
Rojo	520	0.90
1ª franja de paso	577	1.00
Azul	620	1.06
Azul-verde	700	1.20
Verde-amarillo	800	1.38
Naranja	940	1.62
Rojo	1050	1.81
2ª franja de paso	1150	2.0
Verde	1350	2.33
Verde-amarillo	1450	2.50
Rosa	1550	2.67
3ª franja de paso	1730	3.0
Verde	1800	3.10
Rosa	2100	3.60

4ª franja de paso Verde	2300	4.00
	2400	4.13

Al obtener el orden de franja N, el esfuerzo axial inducido en la probeta a consecuencia de la carga se representa por la ecuación:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{C N}{b}$$

Se despeja la constante elástica del material

$$C = \frac{b(\sigma_1 - \sigma_2)}{N}$$

b: espesor del material.

σ_1 y σ_2 : esfuerzos principales en los dos planos.

N: orden de franja.

En el ensayo de tensión los esfuerzos principales son:

$$\sigma_1 = \frac{F}{A}$$

$$\sigma_1 = \frac{F}{a * b} \qquad \sigma_2 = 0$$

$$C = b \left(\frac{f}{a * b} \right) \div N$$

$$C = \frac{F}{a * N}$$

Figura 13. Fotografía modelo fotoelastico básico.

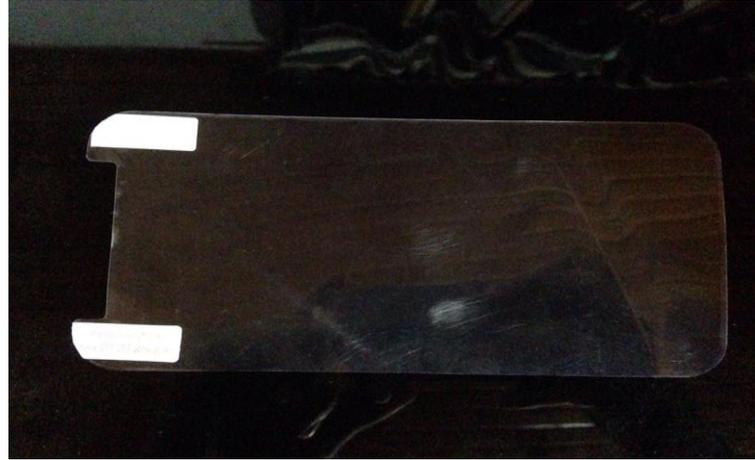


Tabla 7. Dimensiones del material

DIMENSIONES DEL MATERIAL FOTOELASTICO	
F (CARGA)	Aleatoria
ESPESOR	1 mm
ANCHO	77 mm
LARGO	154 mm

Se observa que cuando se le aplica una carga a un material como el PETG El color es azul-verde tiene un $N = 1.2$

Figura 14. Análisis de esfuerzos modelo fotoelastico básico.



Figura del análisis de esfuerzos en el modelo fotoelastico con la ayuda de herramienta computacional (Solidworks)

Figura 15. Fotografía modelo fotoelastico N°1



Tabla 8. Dimensiones del material

DIMENSIONES DEL MATERIAL FOTOELASTICO	
F (CARGA)	Aleatoria
ESPESOR	1 mm
ANCHO	77 mm
LARGO	154 mm

Figura 16. Análisis de esfuerzos modelo fotoelastico N°1

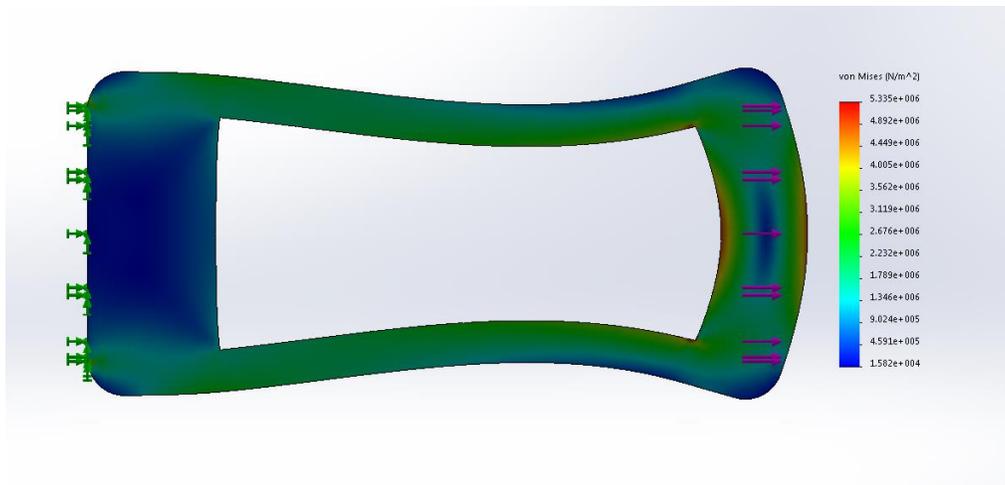


Figura del análisis de esfuerzos en el modelo fotoelastico con la ayuda de herramienta computacional (Solidworks)

Figura 17. Fotografía modelo fotoelastico N°2



Tabla 9. Dimensiones del material

DIMENSIONES DEL MATERIAL FOTOELASTICO	
F (CARGA)	Aleatoria
ESPEJOR	1 mm
ANCHO	77 mm
LARGO	154 mm

Figura 18. Análisis de esfuerzos modelo fotoelastico N°2

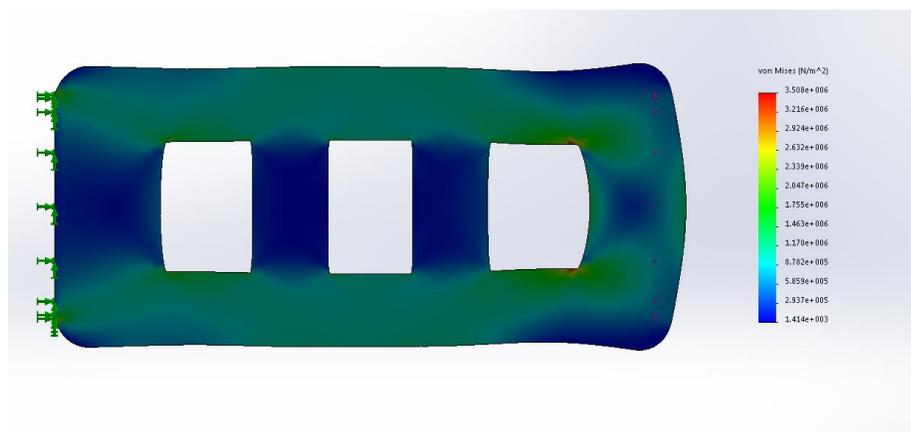


Figura del análisis de esfuerzos en el modelo fotoelastico con la ayuda de herramienta computacional (Solidworks)

Figura 19. Fotografía modelo fotoelastico N°3



Tabla 10. Dimensiones del material

DIMENSIONES DEL MATERIAL FOTOELASTICO	
F (CARGA)	Aleatoria
ESPESOR	1 mm
ANCHO	77 mm
LARGO	154 mm

Figura 20. Análisis modelo fotoelastico N°3

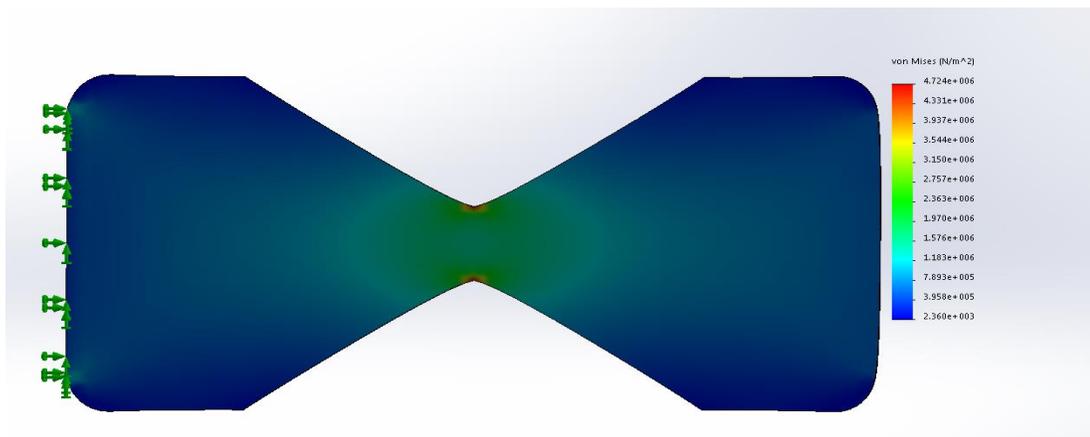


Figura del análisis de esfuerzos en el modelo fotoelastico con la ayuda de herramienta computacional (Solidworks)

Figura 21. Fotografía modelo fotoelastico N°4



Tabla 11. Dimensiones del material

DIMENSIONES DEL MATERIAL FOTOELASTICO	
F (CARGA)	Aleatoria
ESPESOR	1 mm
ANCHO	77 mm
LARGO	154 mm

Figura 22. Análisis modelo fotoelastico N°4

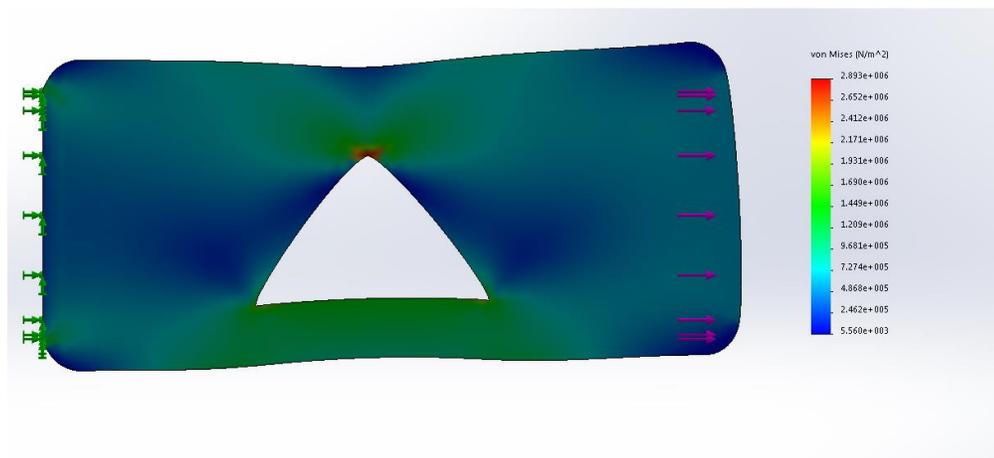
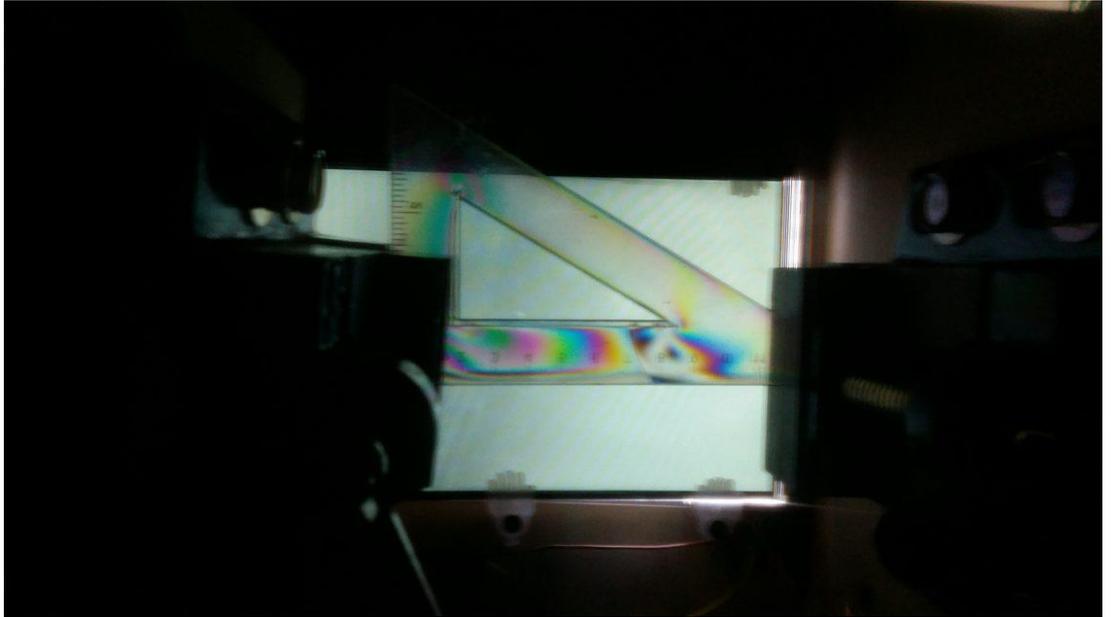
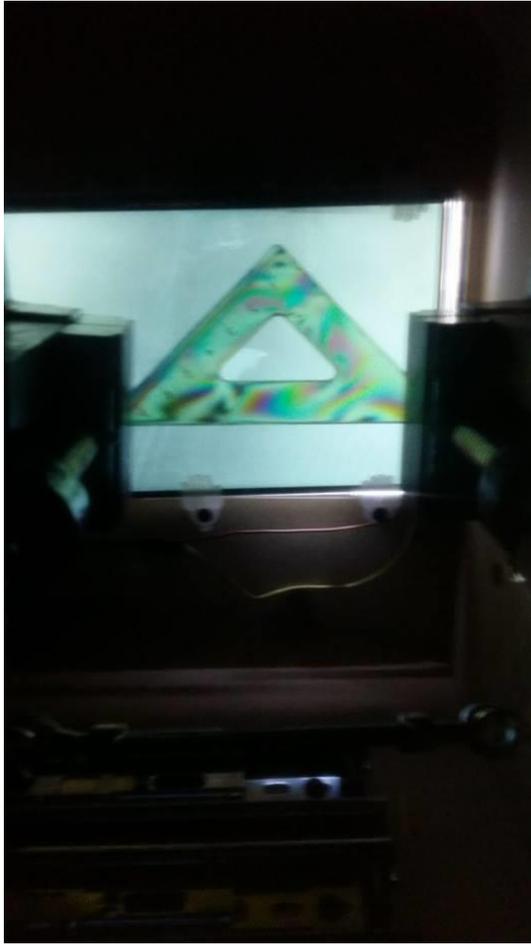


Figura del análisis de esfuerzos en el modelo fotoelastico con la ayuda de herramienta computacional (Solidworks)



Fotografía ensayo de fotoelasticidad



Fotografía ensayo de fotoelasticidad

CONCLUSIONES

1. El dispositivo permite comprender el fenómeno de la polarización de luz y su importancia al momento de visualizar la fotoelasticidad en los materiales.
2. Se demostró que el material_PETG es un material con una muy buena sensibilidad óptica para ese tipo de pruebas, ya que al aplicar la carga generó un campo amplio en la secuencia de colores.
3. Se demostró el método de la fotoelasticidad en materiales birrefringentes, es un método útil para estudiar la distribución de esfuerzos cuando son sometidos a diferentes tipos de carga.
4. El fenómeno de fotoelasticidad muestra de manera experimental el efecto que puede ocasionar los concentradores de esfuerzos en un elemento sometido a cargas.
5. El dispositivo a través de sus mecanismos proporciona cargas axiales de manera estática y constante, los resultados experimentales comparados con los simulados en el software presentaron buenas similitudes en el fenómeno fotoelástico.

Bibliografía

Esther Rincon Rincon, L. C. (2006). *Resistencia de materiales: Determinacion de tensiones y deformaciones*. Madrid : Vision net.

Gomez, J. (17 de Septiembre de 2014). *Prezi*. Obtenido de Prezi:
<https://prezi.com/wzeh8gomhpma/fotoelasticidad/>

Gunt. (3 de Febrero de 2005). *Gunt*. Obtenido de Gunt:
http://www.gunt.de/static/s3633_3.php#

Industriales, E. T. (s.f.). *Escuela Tecnica Superior de Ingeniros Industriales* . Obtenido de
http://www.eis.uva.es/~macromol/curso05-06/pet/propiedades_y_caracteristicas.htm

OCW. (s.f.). Obtenido de Introducción al analisis tensional: <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-mecanica/calculo-de-maquinas/material-de-clase-1/12Tema12.pdf>

Plasticos Tecnicos. (s.f.). Obtenido de Plasticos Tecnicos:
<http://www.plasticostecnicos.cat/pdf/productes/es/petg-plastico-tecnico.pdf>

Torres, I. J. (Octubre de Febrero de 2007). *Unet*. Obtenido de Unet:
<http://www.unet.edu.ve/~jtorres/matsoft/>