



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica

**LABORATORIO DE FOTOELASTICIDAD PARA LOS  
ESTUDIANTES DE INGENIERÍA MECÁNICA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS**

**Luis Manuel Sánchez Morales**

Asesorado por el Ing. Hugo Leonel Ramírez Ortiz

Guatemala, octubre de 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**LABORATORIO DE FOTOELASTICIDAD PARA LOS  
ESTUDIANTES DE INGENIERÍA MECÁNICA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**LUIS MANUEL SÁNCHEZ MORALES**

ASESORADO POR EL ING. HUGO LEONEL RAMÍREZ ORTIZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**INGENIERO MECÁNICO**

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



### **NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

### **TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Héctor Alexander Juárez Reyes
EXAMINADOR	Ing. Pablo Rodolfo Zúñiga Ramírez
EXAMINADOR	Ing. Carlos Humberto Figueroa Vásquez
SECRETARIO	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **LABORATORIO DE FOTOELASTICIDAD PARA LOS ESTUDIANTES DE INGENIERÍA MECÁNICA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 26 de enero de 2006.

Luís Manuel Sánchez Morales

## DEDICATORIA

<b>Mi Dios y Padre</b>	Por guiarme y sostenerme en toda mi vida y ser ese oportuno socorro en los momentos difíciles
<b>Mi madre</b>	Sofía Anabella Morales Herrera, por brindarme su amor y apoyo para seguir adelante y así culminar mi carrera
<b>Mi abuela</b>	Susana Herrera Chacon, por su amor y paciencia en todo momento y ser mi inspiración para triunfar.
<b>Mi hermano</b>	Erwin Ronaldo Sánchez Morales, por compartir las metas y anhelos de la vida
<b>Mi amigo y hermano</b>	Marco Vinicio López Pauu, por sus consejos y compartir mis alegrías, dificultades, eternamente agradecido
<b>Mis tíos</b>	Con mucho cariño
<b>Mis amigos</b>	Por su apoyo y amistad

## **AGRADECIMIENTOS A:**

### **El Grupo Evangélico Universitario**

Por formarme e instruirme en las cosas de Dios.

### **La Universidad de San Carlos de Guatemala**

Por ser una fuente de saber, conocimiento y agradables experiencias

### **Licda. Bárbara Anleu**

Por su orientación brindada

### **Al Ing. Hugo Ramírez**

Por su orientación y asesoría brindada

### **Al Ing. Guillermo Pérez**

Por su amistad

# ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b>	<b>IV</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	<b>VII</b>
<b>GLOSARIO</b>	<b>IX</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>XI</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>XII</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>XIII</b>
<b>1 MARCO TEÓRICO</b>	<b>1</b>
1.1 Esfuerzo y deformación	1
1.1.1 Efecto de las concentraciones localizadas de esfuerzos	6
1.2 Polimeros	7
1.2.1 Polimetacrilato	10
1.3 Refracción	13
1.4 Óptica	15
1.4.1 Los materiales ópticos	19
1.5 Polarización	21
1.6 Fotoelasticidad y leyes ópticas	25

1.6.1	Empleo del fenómeno de birrefringencia	26
1.6.2	Ley óptica de los esfuerzos	28
1.7	Franjas isoclinicas	29
1.8	Franjas isocromáticas	33
<b>2</b>	<b>EQUIPO E INSTRUMENTACIÓN DE LABORATORIO</b>	<b>37</b>
2.1	Antecedentes del polariscopio <i>Chapman</i>	37
2.2	Polariscopio <i>Chapman</i>	38
2.3	Componentes del equipo	39
2.4	Condiciones iniciales y mejoramiento del equipo	40
2.4.1	Cuerpo principal	41
2.4.2	Cámara fotográfica	43
2.4.3	Sistema hidráulico	44
2.4.4	Sistema eléctrico	45
2.4.5	Sistema de aplicación y obtención de lecturas de cargas	46
2.5	Ambiente óptimo del laboratorio	47
2.6	Mantenimiento del equipo	47
<b>3</b>	<b>PRÁCTICAS DE LABORATORIO</b>	<b>49</b>
3.1	Consideraciones de los dispositivos para aplicación de cargas	49
3.2	Comportamiento de esfuerzos a tensión	53
3.2.1	Generalidades	53
3.2.2	Procedimientos	55
3.2.3	Gráficas	56



3.2.4	Discusión	58
3.2.5	Conclusiones	62
3.3	Comportamiento de esfuerzos a compresión	64
3.3.1	Generalidades	64
3.3.2	Procedimientos	64
3.3.3	Gráficas	67
3.3.4	Discusión	68
3.3.5	Conclusiones	70
3.4	Comportamiento de esfuerzos a deflexión	72
3.4.1	Generalidades	73
3.4.2	Procedimientos	75
3.4.3	Gráficas	76
3.4.4	Discusión	77
3.4.5	Conclusiones	79
<b>CONCLUSIONES</b>		<b>81</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>		<b>83</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>		<b>85</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>		<b>87</b>
<b>ANEXOS</b>		<b>89</b>

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1	Tensión normal en una barra prismática	2
2	Análisis de esfuerzos en un pequeño trozo de una viga	3
3	Simplificación de los esfuerzos tridimensionales a bidimensionales	4
4	Gráfica deformación vrs esfuerzo de algunos polímeros	9
5	Analogía mecánica que explica la polarización de una onda transversal	22
6	Una onda longitudinal no puede ser polarizada	23
7	Prueba de que la luz puede ser polarizada cuando el analizador rota de 0 a 90 grados la intensidad de la luz transmitida se reduce	25
8	Franjas isoclinicas de un anillo redondo bajo compresión diametral obtenida por doble exposición holográfica	31
9	Reconstrucción holográfica de un anillo redondo simétrico radialmente a tensión. (a) Campo luminoso, (b) Campo oscuro	32
10	Curvas isocromáticas en una plancha con agujero puesta a tensión	34
11	Franjas isocromáticas experimentalmente derivadas de una viga de plástico reforzada con fibra de carbono	35
12	Franjas isoclinicas experimentalmente derivadas de una viga de plástico reforzada con fibra de carbono	35

13	Polariscopio <i>Chapman</i> y todos sus accesorios	38
14	Condiciones iniciales alrededor del lugar	41
15	Cuerpo principal vista izquierda	42
16	Cuerpo principal vista derecha	42
17	Cámara y sus componentes	43
18	Sistema hidráulico y sus componentes	44
19	Sistema eléctrico y sus componentes	45
20	Sistema de aplicación de carga y sus componentes	46
21	El aparato global se compone de la probeta de plexiglás y los sistemas siguientes	52
22	Área del polariscopio <i>Chapman</i>	52
23	Probeta en forma de triangulo con muesca para prueba de tensión	54
24	Forma de sujetar el modelo, prueba a tensión	56
25	Modelo sin carga	57
26	Modelo cargado a 80 psi	59
27	modelo cargado a 130 psi	60
28	Fractura del modelo a tensión a 160 psi	63
29	Probeta en forma de anillo para la prueba de compresión	65
30	Prueba a compresión vista completa del polariscopio	67
31	Ensayo a compresión con una carga de 230 psi	68
32	Falla de la probeta a compresión a 310 psi	71
33	Distribución de fuerzas y resultantes en una viga en deflexión	72
34	Probeta en forma de viga simple apoyada en sus dos extremos para la prueba de deflexión	73
35	Prueba de deflexión a 75 psi	76
36	Prueba a deflexión a 75 psi	77

## TABLAS

<b>I</b>	Propiedades y usos del Plexiglás	10
<b>II</b>	Propiedades de materiales fotoelasticos a temperatura ambiente	12
<b>III</b>	Índice de refracción para la luz amarilla de longitud de honda de 589 nm	14
<b>IV</b>	Valores de retraso y el color correspondiente para la fuente de luz transmitida en el polariscopio cruzado	18
<b>V</b>	Propiedades de algunos materiales polarizadores	20
<b>VI</b>	Costos de implementación para el polariscopio <i>Chapman</i>	94

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>A</b>	Área de acción constante
<b>C</b>	Velocidad de la Luz
<b>d</b>	Diámetro
<b><math>d_x, d_y, d_z</math></b>	Derivadas con respecto a los planos x, y, y z
<b>E</b>	Módulo de elasticidad (psi)
<b>P</b>	Fuerza, carga concentrada, fuerza concentrada
<b>p</b>	Presión
<b>n</b>	Índice de refracción
<b><math>n_L</math></b>	Índice de refracción lento
<b><math>n_R</math></b>	Índice de refracción rápido
<b><math>S_x, S_y, S_z</math></b>	Esfuerzos sobre planos perpendiculares a los ejes x, y, y z
<b>V</b>	fuerza cortante
<b>v</b>	Velocidad de la luz en un medio particular
<b><math>\tau</math></b>	Esfuerzo cortante
<b><math>\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}</math></b>	Esfuerzos cortantes sobre planos perpendiculares a los ejes x, y, y z y paralelos a los ejes y, z y x
<b><math>\sigma</math></b>	Esfuerzo normal
<b><math>\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z</math></b>	Esfuerzos normales sobre planos perpendiculares a los ejes x, y, y z

$\varepsilon$  Deformación unitaria

$\delta$  Deformación total

## GLOSARIO

<b>Anisotropía</b>	Propiedad que presentan ciertos cuerpos consistentes en la dependencia de sus propiedades de la dirección que en ellos se considere.
<b>Birrefringencia</b>	También llamada doble refracción, que consiste en que un haz luminoso, estrecho y monocromático, al penetrar en ciertos materiales da lugar simultáneamente a dos haces refractados distintos. Los medios que poseen esta propiedad se llaman birrefringentes. Los sólidos cristalinos, salvo los del sistema cúbico, son birrefringentes.
<b>Campo magnético</b>	La región del espacio situada en las proximidades de un imán o de una carga eléctrica en movimiento posee unas propiedades especiales.
<b>Deformación</b>	Es un término que se usa generalmente para indicar un cambio en la forma de un cuerpo que es causado por la aplicación de una fuerza, por causa térmica o por humedad.
<b>Efecto dual</b>	La energía radiante tiene una naturaleza dual, y obedece leyes que pueden explicarse a partir de una corriente de partículas o paquetes de energía se emplea para explicar las interacciones de la luz con la materia que producen un cambio en la forma de energía.

<b>Esfuerzo</b>	Es un término que se usa para expresar la resistencia que tiene un cuerpo, que soporta una fuerza por unidad de área.
<b>Espectro</b>	Serie de colores semejante a un arco iris, por este orden: violeta, azul, verde, amarillo, anaranjado y rojo, que se produce al dividir una luz compuesta como la luz blanca en sus colores constituyentes.
<b>Fotometría</b>	Medida de la intensidad luminosa de una fuente de luz, o de la cantidad de flujo luminoso que incide sobre una superficie. La fotometría es importante en fotografía, astronomía e ingeniería de iluminación.
<b>Fragilidad</b>	La fragilidad se da en aquellos materiales, que bajo cargas aplicadas no presentan ningún efecto de deformación.
<b>Imperfecciones</b>	Defectos de las materias primas que se producen en el proceso de fabricación cuidando la pureza también del mismo.
<b>Inclusiones</b>	Materiales no metálicas en una matriz sólida metálica.
<b>Isotropía</b>	Calidad de tener propiedades idénticas en todas las direcciones.



## RESUMEN

El laboratorio de fotoelasticidad ofrece la oportunidad de conocer más sobre los ensayos no destructivos a través de sesiones de laboratorio, y les presenta de una forma sencilla el comportamiento de los esfuerzos y deformaciones en elementos de máquinas sometidas a cargas de flexión, tensión, y compresión por medio del polariscopio *Chapman*. Es por ello que, es fundamental y adecuado a un nivel académico para los estudiantes de ingeniería mecánica.

El introducir al estudiante en el análisis experimental a través de fenómenos relacionados con óptica y la fotoelasticidad los prepara para entender la mecánica de sólidos y posteriormente a cursos profesionales como diseño de máquinas, metalurgia y metalografía, etc. Al profesional también reforzando sus criterios y conocimientos en dicha área

La escuela de mecánica contará con el laboratorio de Fotoelasticidad para realizar las pruebas y el funcionamiento, uso correcto del polariscopio *Chapman* esto nos lleva a la necesidad de realizar los laboratorios necesarios, para lograr una mejor enseñanza para aplicarlo en los ambientes de la industria e investigación adquiriendo de esta forma el conocimiento necesario sobre la mecánica de sólidos, cubriendo así una necesidad de la carrera de ingeniería mecánica.

## OBJETIVOS

- **General**

Definir el Laboratorio de Fotoelasticidad con sus tres pruebas, una a tensión, otra a compresión y la última a deflexión, como también el uso correcto del polariscopio *Chapman* y mantenimiento de todos los sistemas que lo componen y de esta manera alcanzar un conocimiento profundo en esta materia, para los estudiantes de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

- **Específicos**

1. Identificar la importancia del Laboratorio de Fotoelasticidad, para los estudiantes de ingeniería mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.
2. Introducir al alumno en los principios básicos y avanzados de óptica experimental.
3. Desarrollar las técnicas básicas del manejo del equipo y accesorios por medio del Laboratorio de Fotoelasticidad.
4. Determinar la capacidad crítica de utilidad del polariscopio *Chapman* por medio del Laboratorio de Fotoelasticidad.
5. Determinar los componentes de las fuerzas y tensiones aplicados en un elemento de superficie.

## INTRODUCCIÓN

El laboratorio de Fotoelasticidad pretende introducir al estudiante de ingeniería mecánica a profundizar y ampliar sus conocimientos en el área de diseño de piezas sujetas a esfuerzos y análisis de los mismos. El presente trabajo de graduación da a conocer todo el funcionamiento básico del polariscopio *Chapman* y accesorios. Para posteriormente aplicar las técnicas de uso correcto del equipo completo.

Con fines didácticos el laboratorio ayuda a analizar el estado de esfuerzos o deformaciones de un elemento cargado a tensión, compresión y deflexión, como también el comportamiento del material en particular con el que están hechos los elementos sujetos a cargas, en el polariscopio *Chapman* sin necesidad de recurrir a ensayos destructivos.

Las técnicas utilizadas en el análisis experimental de esfuerzos en el polariscopio *Chapman*, son la fotoelasticidad bidimensional y fotoelasticidad reflectiva. Estos métodos pueden utilizarse tanto para el diseño, como para el rediseño de partes o elementos estructurales de maquinas, para evitar su falla optimizando su forma, peso y seleccionando el material adecuado, por medio de observación de la probeta cuando esta siendo afectada por una carga y de cálculos sencillos para determinar cómo y de qué forma se puede mejorar la absorción de dichas cargas en la pieza.

Todo esto permite analizar un gran número de conceptos tratados en las diversas disciplinas de la ingeniería y en particular la modelación de sólidos. Para todo ello es necesario revisar conceptos básicos de materiales bajo esfuerzos, deformaciones, óptica, fenómenos relacionados con la luz y propiedades inherentes como la refracción, difracción y dispersión de los materiales transparentes a utilizar en las pruebas como el vidrio, polímeros (plásticos), y baquelita.

Este tipo de ensayo es muy utilizado en el área de ingeniería mecánica y civil, para fines educativos, científicos e industriales como lo es la aeronáutica, marítima y construcción de estructuras para edificios y puentes.

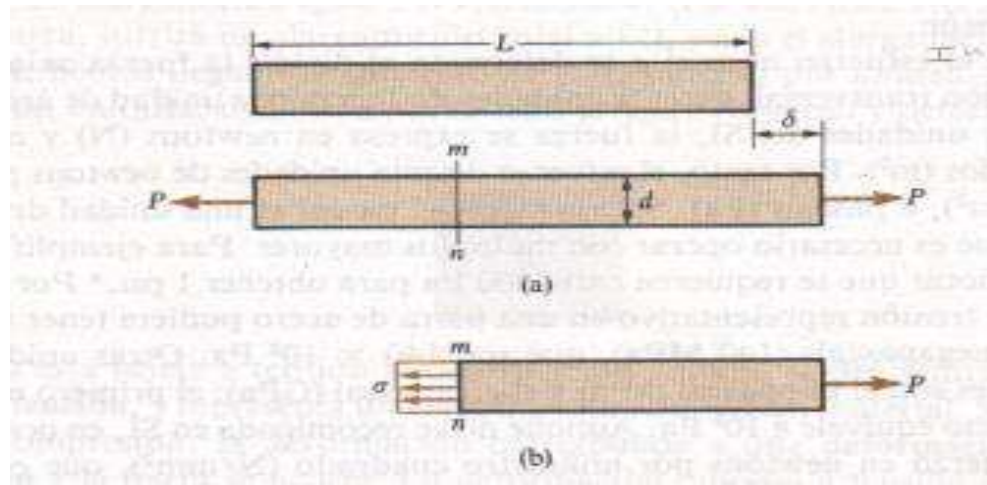
# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1 Esfuerzo y deformación <sup>1</sup>

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. Tensión normal en una barra prismática.**



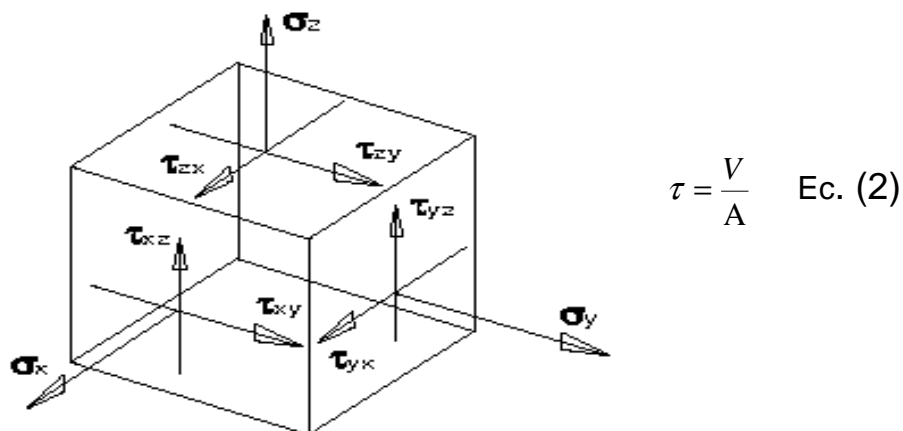
**Fuente: Editorial Iberoamericana. Mecánica de materiales. Pág. 3.**

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

Los esfuerzos con dirección normal a la sección, se denotan como  $\sigma$  (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  $\tau$  (tau) y representa un esfuerzo de corte.

Este esfuerzo, trata de cortar el elemento analizado, tal como una tijera cuando corta papel, uno de sus filos mueven el papel hacia un lado mientras el otro filo lo mueve en dirección contraria resultando en el desgarre del papel a lo largo de una línea. Las unidades de los esfuerzos son las mismas que para la presión, fuerza dividida por área, se utilizan con frecuencia: MPa, psi, Kpsi, Kg/mm<sup>2</sup>, Kg/cm<sup>2</sup>. Se analizará la situación de un trozo pequeño de material ubicado dentro de una viga u otro elemento estructural. Este cubo tiene seis caras y en cada una de ellas se considerará que actúan tres esfuerzos internos: uno normal y dos de corte. La notación utilizada es:  $S_x$  para el esfuerzo normal aplicado en la cara normal al eje x, de igual forma se definen  $S_y$ ,  $S_z$ . Para los esfuerzos cortantes, la notación es  $t_{ab}$  que denota el esfuerzo de corte que actúa en la cara normal al eje 'a' y que apunta en la dirección del eje 'b'. El esfuerzo cortante se determina dividiendo la fuerza cortante V entre el área A.

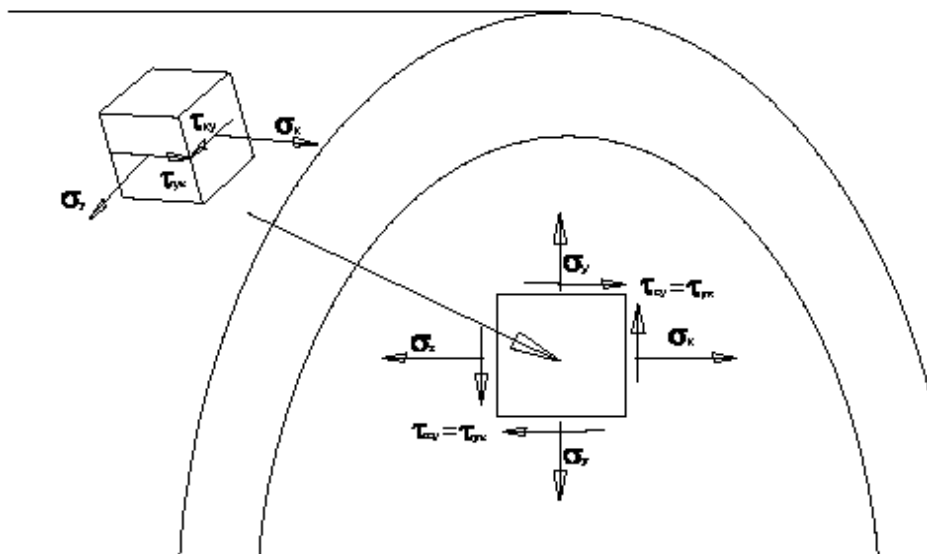
**Figura 2. Análisis de esfuerzos en un pequeño trozo de una viga.**



Fuente: [www2.inq.puc.cl/~icm2312/apuntes/circulo/planos.html](http://www2.inq.puc.cl/~icm2312/apuntes/circulo/planos.html).

Al interior de un elemento bajo carga cada punto del cuerpo tiene valores particulares para estas 18 variables (cada cara del cubo  $dx$   $dy$   $dz$  tiene tres esfuerzos, uno normal y dos de corte), al analizar un punto vecino el valor de las variables cambia. Si se analizan las superficies exteriores de un elemento estructural bajo carga, se encuentra que sobre estas caras los esfuerzos internos no existen, esto anula tres esfuerzos pero por equilibrio de fuerzas se anulan 5 esfuerzos, por lo tanto, se puede simplificar el modelo tridimensional a uno bidimensional que contiene solo tres variables,  $s_x$   $s_y$   $t_{xy}$ , las cuales describen el estado de tensiones de un punto sobre la superficie exterior de un cuerpo bajo carga. Este grupo de esfuerzos actuando sobre un punto es el estado de tensiones del punto.

**Figura 3 Simplificación de los esfuerzos tridimensionales a bidimensionales**



Fuente: [www2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/circulo/planos.html](http://www2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/circulo/planos.html).



En el movimiento como sólido rígido, dichas posiciones permanecen estables. Cuando se aplican fuerzas exteriores a un cuerpo, la posición de cada punto, en general, se modifica. La variación total en longitud se denota por la letra griega  $\delta$  (delta), y se muestra en la figura 1.

Para una barra sujeta a tensión. Este alargamiento constituye el resultado acumulativo del estiramiento del material sobre la longitud  $L$  de la barra. Debido a que la deformación unitaria normal  $\varepsilon$  (epsilon) es el cociente de dos longitudes, constituye una cantidad adimensional. En la practica, las unidades originales de  $\delta$  y  $L$  suelen vincularse a la deformación unitaria misma y entonces la deformación unitaria se denota en formas tales como mm/mm, m/m y Plg/Plg. En esta misma barra Figura 1. Si las fuerzas  $P$  actúan en el centroide de la sección transversal, el esfuerzo uniforme en la barra para secciones alejadas de los extremos se determina mediante la fórmula  $\sigma = P / A$ , donde  $A$  es el área de la sección transversal (véase Ec. 1). Además si la barra está constituida de material homogéneo, la deformación (unitaria) axial es  $\varepsilon = \delta / L$ , donde  $\delta$  es el alargamiento total producido por las fuerzas axiales de la siguiente ecuación.

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \quad \text{Ec. (3)}$$

Ahora, supongamos que el material es linealmente elástico de tal modo que se cumple la ley de Hooke ( $\sigma = E \varepsilon$ ). Entonces las expresiones anteriores para  $\sigma$  y  $\varepsilon$  pueden combinarse para establecer la siguiente ecuación del alargamiento de la barra.

$$\delta = \frac{Pl}{AE} \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde la constante E es el (módulo de elasticidad) o módulo de *Young* del material. Tiene las dimensiones de una tensión, los valores de E varía para los materiales más frecuentemente empleados.

### 1.1.1 Efecto de las concentraciones localizadas de esfuerzos <sup>4</sup>

En piezas de maquinaria y estructurales, los mayores esfuerzos se presentan más a menudo en filetes, agujeros e irregularidades geométricas similares que concentran e incrementan el esfuerzo superficial. Estos 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, aunque las del segundo y tercer grupos pueden desempeñar papeles relacionados secundarios. Aun 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.

## **1.2 Polímeros<sup>5</sup>**

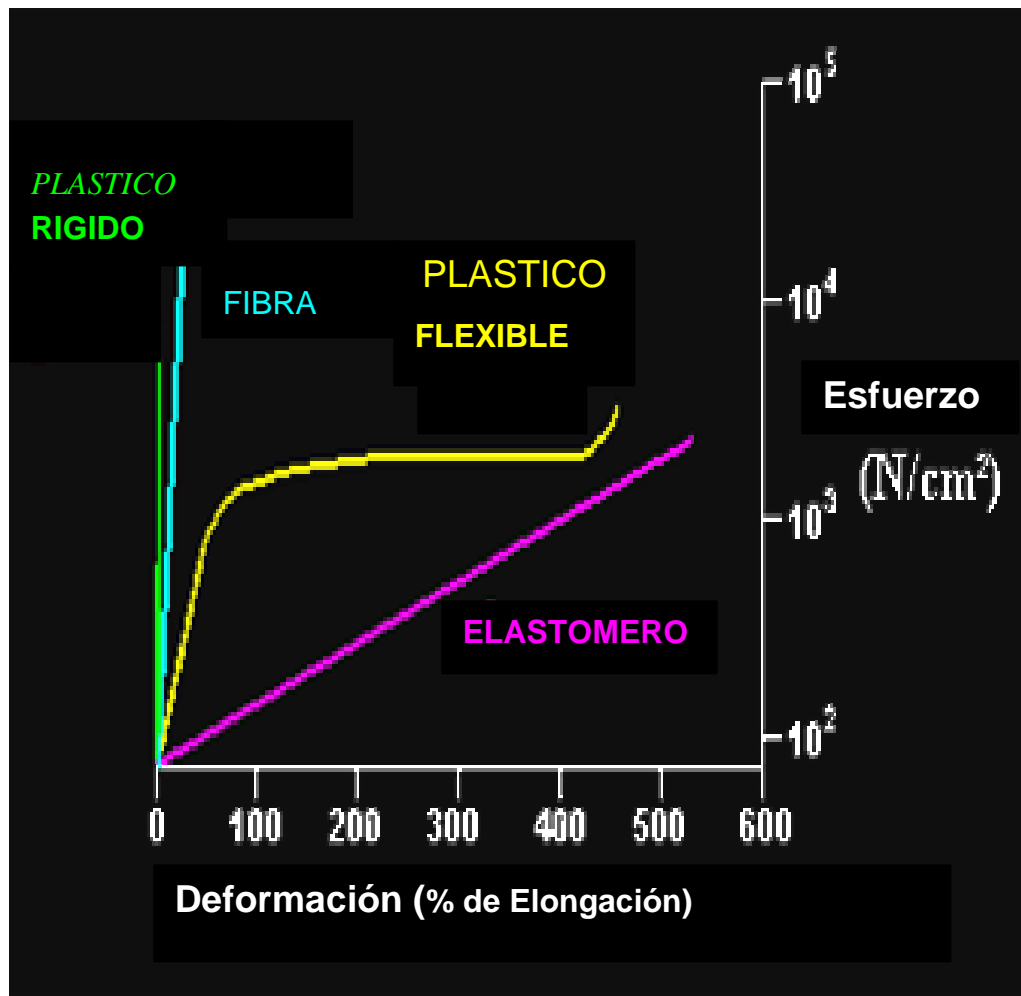
Todos estos análisis y deducciones de esfuerzos y deformaciones también se pueden aplicar a los polímeros. Sus propiedades mecánicas reales y características, es decir, qué polímeros son resistentes, cuáles son duros, etc.

El estiramiento para diferentes clases de polímeros, Puede verse en la figura 4, las curvas representan sus características. También para plásticos rígidos como el poli estireno. Compara curvas típicas tensión-deformación, el polimetacrilato y los poli carbonatos pueden soportar una gran tensión, pero no demasiada elongación antes de su ruptura. No hay una gran área bajo la curva. Decimos entonces que estos materiales son resistentes, pero no muy duros. Además, la pendiente de la recta es muy pronunciada, lo que significa que debe ejercerse una considerable fuerza para deformar un plástico rígido. De modo que resulta sencillo comprobar que los plásticos rígidos tienen módulos elevados. Resumiendo, los plásticos rígidos tienden a ser resistentes, soportan la deformación, pero no suelen ser duros, es decir, son quebradizos.

Los plásticos flexibles como el polietileno y el polipropileno difieren de los plásticos rígidos en el sentido que no soportan tan bien la deformación, pero tampoco tienden a la ruptura. El módulo inicial es elevado, o sea que resisten por un tiempo la deformación, pero si se ejerce demasiada tensión sobre un plástico flexible, finalmente se deformará. Usted puede comprobar esto en su casa con una bolsa plástica.

Si la estira será difícil al comienzo, pero una vez que la ha estirado lo suficiente, lo hará cada vez con mayor facilidad. Como conclusión, podemos decir que los plásticos flexibles pueden no ser tan resistentes como los rígidos, pero son mucho más duros.

Figura 4. Gráfica esfuerzo-deformación para algunos polímeros.



Fuente: [www.pslc.ws/spanish/styrene](http://www.pslc.ws/spanish/styrene).

### 1.2.1 Polimetacrilato

Este material se comercializa bajo los nombres comerciales de *Plexiglás* o *Lucite* en Alemania, Estados Unidos, y *Perspex* en el Reino Unido. Puede comprarse a un costo bajo en forma de plancha de diferentes medidas, etc. Con superficies favorablemente pulidas y en una variedad de espesores. El material es muy transparente, y libre de tensión inicial. Exhibe prácticamente ningún efecto de arrastre.

**Tabla I. Propiedades y usos del Plexiglás.**

Propiedades Claves		Usos principales
Densidad, g/cm <sup>3</sup>	1.17-1.20	Cristales para automóviles, vidrios conformados, rótulos.  Micas para automóviles, paneles.
Resistencia a la tracción Lb/pulg <sup>2</sup>	7000-11000	
Modulo de tracción Lb/pulg <sup>2</sup> x 10 <sup>-5</sup>	4.5	
Temp. Máx. en uso continuo, °F	140-190	
Temp. De moldeo, °F	300-500	
Resistencia dieléctrica, volts/mil	350-400	
Constante dialéctica, 1000 Hz	3.0-3.5	
Factor de disipación, 1000 Hz	0.03-0.05	
Absorción de agua en 24 horas	0.3-0.4	

**Fuente: Manual del Ingeniero Mecánico, Marks, 9ª edición. Tomo 1. Pág. 6-195.**

La sensibilidad óptica del *Plexiglás* es muy baja y el orden es el mismo para con el vidrio. Esto evita su uso para la determinación de las franjas isocromáticas. Por otro lado, la ausencia virtual de formación de franjas isocromáticas hace que el material sea particularmente conveniente para la determinación de franjas isoclinas. Su sensibilidad óptica baja también puede ser aprovechada como una ventaja en investigaciones de tensiones, por el método de la fotometría.

En temperatura ambiente el coeficiente tensión-óptico de *Plexiglás* es negativo como se informa en la tabla 2; cuando se usa junto con otro material de un coeficiente positivo, por el método de la dos-hojas, resulta un efecto óptico aumentado y se puede aprovechar para cualquier investigación. El *Plexiglás* se acostumbra usar sólo para la investigación especial de determinación de tensión debido a su resistencia no se usa en estructuras.

**Tabla II. Propiedades de materiales fotoelasticos a temperatura ambiente.**

Tipo de Material	Nombre comercial	$C \times 10^7$ Pulg <sup>2</sup> / bf	$f^*$ lbf /pulg fr	E Lbf/ pulg <sup>2</sup>
Resina epoxica	Araldite CT200 30pph phthalic	3.94	58.8	455,000
	Araldite 6020 50pph phthalic	3.98	58.2	450,000
	Bakelita ERL 50pph phthalic	4.0	57.8	475,000
	Estándar HEX Phthalic	3.66	63.0	475,000
Allyl diglycol	C.R.- 39	2.4	96.0	284,000
Polimetacrilato	Perspex	-0.33	-700	398,00
	Plexiglas	-0.31	-730	427,000
Policarbonato	Makrolon	5.5	42	370,000
Celulosa de nitrato	Celuloide	0.14-1.4	170	284,000
			1700	356,000
Vidrio			-0.14	-1700
			0.10	2200
Poliuretano	Fotoflex	240	0.97	100
Caucho				500
*Valores para la luz de mercurio verde (5461 Å).				
f = Valor de las bandas del material				
C = Coeficiente óptico de los esfuerzos				

**Fuente: Photoelastic stress análisis. Kuske-Roberston. A Wiley. Pág. 153.**



### 1.3 Refracción <sup>2</sup>

La luz se propaga en línea recta con velocidad constante en un medio uniforme; si cambia el medio, cambiara la velocidad y la luz se propagará en línea recta a lo largo de una nueva trayectoria.

La desviación o cambio de dirección de un rayo de luz, cuando pasa oblicuamente de un medio a otro, se conoce como *refracción*.

La refracción es la responsable de la distorsión o deformación de imágenes. La velocidad de la luz en una sustancia o material generalmente es menor que la que desarrolla en el espacio vacío o en el aire, que es  $3 \times 10^8$  m/s.

En el vidrio es de dos tercios de su velocidad el aire aproximadamente  $2 \times 10^8$  m/s. La razón de la velocidad de la luz  $C$ . En el vacío o en el aire a la velocidad  $V$  en un medio particular se llama índice de refracción  $n$  para dicho material. El índice de refracción  $n$  de un material particular es la razón de la velocidad de la luz en el vacío respecto a la velocidad de la luz en el material.

$$n = C / V \quad \text{Ec. (5)}$$

El índice de refracción es una cantidad adimensional, y en general es mayor que la unidad. En la tabla III se da una lista de los índices de refracción de varias sustancias comunes.

**Tabla III. Índice de refracción para luz amarilla de longitud de onda de 589 mm**

SUSTANCIA	N	SUSTANCIA	n
Benceno	1.50	Glicerina	1.47
Disulfuro de carbono	1.63	Hielo	1.31
Diamante	2.42	Cuarzo	1.54
Alcohol etílico	1.36	Sal de roca	1.54
Vidrio <i>Crown</i>	1.52	Agua	1.33
Vidrio <i>Flint</i>	1.63	Circón	1.92

**Fuente: McGraw-Hill. Física 2. Tippes. Pág. 95**

Se conocen y se han observado dos leyes básicas de la refracción y se expresan de la siguiente manera.

- El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal a la superficie se encuentran en un mismo plano.
- La trayectoria de un rayo refractado en la entre cara de dos medios es exactamente reversible.

## 1.4 Óptica<sup>3</sup>

Óptica, rama de la física que se ocupa de la propagación y el comportamiento de la luz. En un sentido amplio, la luz es la zona del espectro de radiación electromagnética que se extiende desde los rayos X hasta las microondas, e incluye la energía radiante que produce la sensación de visión. El estudio de la óptica se divide en dos ramas, la óptica geométrica y la óptica física.

La luz tiene energía radiante y su naturaleza tiene un efecto dual, y obedece las leyes que pueden explicarse a partir de una corriente de partículas o paquetes de energía, los llamados fotones, o a partir de un tren de ondas transversales. El concepto de fotón se emplea para explicar las interacciones de la luz con la materia que producen un cambio en la forma de energía, como ocurre con el efecto fotoeléctrico o la luminiscencia. El concepto de onda suele emplearse para explicar la propagación de la luz y algunos de los fenómenos de formación de imágenes.

En las ondas de luz, como en todas las ondas electromagnéticas, existen campos eléctricos y magnéticos en cada punto del espacio, que fluctúan con rapidez. Como estos campos tienen, además de una magnitud, una dirección determinada, son cantidades vectoriales. Los campos eléctrico y magnético son perpendiculares entre sí y también perpendiculares a la dirección de propagación de la onda.

La onda luminosa más sencilla es una onda sinusoidal pura, llamada así porque una gráfica de la intensidad del campo eléctrico o magnético trazada en cualquier momento a lo largo de la dirección de propagación sería la gráfica de una función seno.

El número de oscilaciones o vibraciones por segundo en un punto de la onda luminosa se conoce como frecuencia. La longitud de onda es la distancia a lo largo de la dirección de propagación entre dos puntos con la misma 'fase', es decir, puntos que ocupan posiciones equivalentes en la onda. Por ejemplo, la longitud de onda es igual a la distancia que va de un máximo de la onda sinusoidal a otro, o de un mínimo a otro. En el espectro visible, las diferencias en longitud de onda se manifiestan como diferencias de color. El rango visible va desde 350 nanómetros (violeta) hasta 750 nanómetros (rojo), aproximadamente (un nanómetro, nm, es una milmillonésima de metro). La luz blanca es una mezcla de todas las longitudes de onda visibles. No existen límites definidos entre las diferentes longitudes de onda, pero puede considerarse que la radiación ultravioleta va desde los 350 nm hasta los 10 nm. Los rayos infrarrojos, que incluyen la energía calorífica radiante, abarcan las longitudes de onda situadas aproximadamente entre 750 nm y 1 nm. La velocidad de una onda electromagnética es el producto de su frecuencia y su longitud de onda. En el vacío, la velocidad es la misma para todas las longitudes de onda.

La velocidad de la luz en las sustancias materiales es menor que en el vacío, y varía para las distintas longitudes de onda; este efecto se denomina dispersión. La relación entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de una longitud de onda determinada en una sustancia se conoce como índice de refracción de la sustancia para dicha longitud de onda.

El índice de refracción del aire es 1,00029 y apenas varía con la longitud de onda. En la mayoría de las aplicaciones resulta suficientemente preciso considerar que es igual a 1. La óptica geométrica se ocupa de la aplicación de las leyes de reflexión y refracción de la luz al diseño de lentes y otros componentes de instrumentos ópticos.

La luz blanca al pasar por una tira uniforme cargada a tensión simple por un polariscopio se observa una serie de colores y mientras la carga se aumenta gradualmente estos cambian. Estas regiones de extinción de onda pueden reconocerse por medio del color y saber el retraso de esta. A continuación se dan algunos valores de estos retrasos en la tabla IV.

**Tabla IV. Valores de retraso y el color correspondiente para la fuente de luz transmitida en el polariscopio**

Retraso (nm)	Color transmitido	Retraso (nm)	Color transmitido
0	Negro	843	Amarillo verde
40	Hierro gris	866	Verde amarillo
57	Lavanda gris	910	Amarillo claro
158	Gris azul	948	Anaranjado
218	Gris	998	Anaranjado rojo brillante
234	Verde blanco	1101	Violeta rojo oscuro
259	Fuera de blanco	1128	Azul violeta luminoso
267	Amarillo blanco	1151	Índigo
275	Amarillo paja pálido	1258	Verde azul
281	Amarillo pálido	1334	Verde mar
308	Amarillo luminoso	1376	Verde brillante
332	Amarillo brillante	1426	Verde amarillo
430	Amarillo castaño	1495	Color carne
505	Rojo anaranjado	1534	Rojo
536	Rojo	1621	Púrpura embotado
551	Rojo profundo	1652	Violeta gris
565	Púrpura	1682	Gris azul
575	Violeta	1711	Verde mar embotado
583	Índigo	1744	Azul verde
664	Azul cielo	1811	Verde luminoso
728	Verde azul	1927	Verde gris luminoso
747	Verde	2007	Blanco verde
826	Verde luminoso	2048	Rojo carne

**Fuente: Photoelastic stress análisis. Kuske-Roberston. A Wiley. Pág. 107.**

### 1.4.1 Los materiales ópticos<sup>6</sup>

Se puede considerar entre los materiales de interés en óptica, tres tipos de materiales transparentes. Los materiales de índice de refracción y coeficiente de absorción isotrópicos como el vidrio.

Los materiales que tienen índices de refracción anisotrópicos. La velocidad con que se propaga la luz en estos materiales depende de la orientación del campo electro-magnético relativa a las direcciones preferenciales del material. Se nota una dirección de polarización rápida y una dirección de polarización lenta del material. Estos son los materiales birrefringentes. Para algunos de ellos, el índice de refracción depende de la tensión mecánica. Estos materiales llegan a ser birrefringentes cuando se les aplica esfuerzo mecánico.

Los materiales que presentan esta característica son llamados fotoelásticos. Los materiales que presentan coeficiente de absorción anisotrópico. Estos materiales absorben selectivamente la componente de la onda electromagnética en una orientación específica. A estos materiales se les llama polarizadores. Los materiales birrefringentes y algunos valores de los índices de refracción ( $n_r$ : índice rápido,  $n_l$ : índice lento) se dan en la tabla V:

**Tabla V. Propiedades de algunos materiales polarizadores.**

MATERIAL	nr	NI
Calcita	1.4864	1.6584
Cuarzo	1.5443	1.5534
Nitrato de Sodio	1.3369	1.5854
Hielo	1.309	1.313
Turmalina	1.638	1.669

**Fuente:** [www.physics.uq.edu.au//6d.G5-PolarizaciónAWEBa.doc](http://www.physics.uq.edu.au//6d.G5-PolarizaciónAWEBa.doc).

**Vidrio óptico:** La mayoría de las lentes que se utilizan en gafas (anteojos), microscopios, telescopios, cámaras y otros instrumentos ópticos se fabrican con vidrio óptico. Éste se diferencia de los demás vidrios por su forma de desviar (refractar) la luz.

La fabricación de vidrio óptico es un proceso delicado y exigente. Las materias primas deben tener una gran pureza, y hay que tener mucho cuidado para que no se introduzcan imperfecciones en el proceso de fabricación. Pequeñas burbujas de aire o inclusiones de materia no vitrificada pueden provocar distorsiones en la superficie de la lente. Las llamadas cuerdas, estrías causadas por la falta de homogeneidad química del vidrio, también pueden causar distorsiones importantes, y las tensiones en el vidrio debidas a un recocido imperfecto afectan también a las cualidades ópticas.



En la antigüedad, el vidrio óptico se fundía en crisoles durante periodos prolongados, removiéndolo constantemente con una varilla refractaria. Después de un largo recocido, se partía en varios fragmentos; los mejores volvían a ser triturados, recalentados y prensados con la forma deseada.

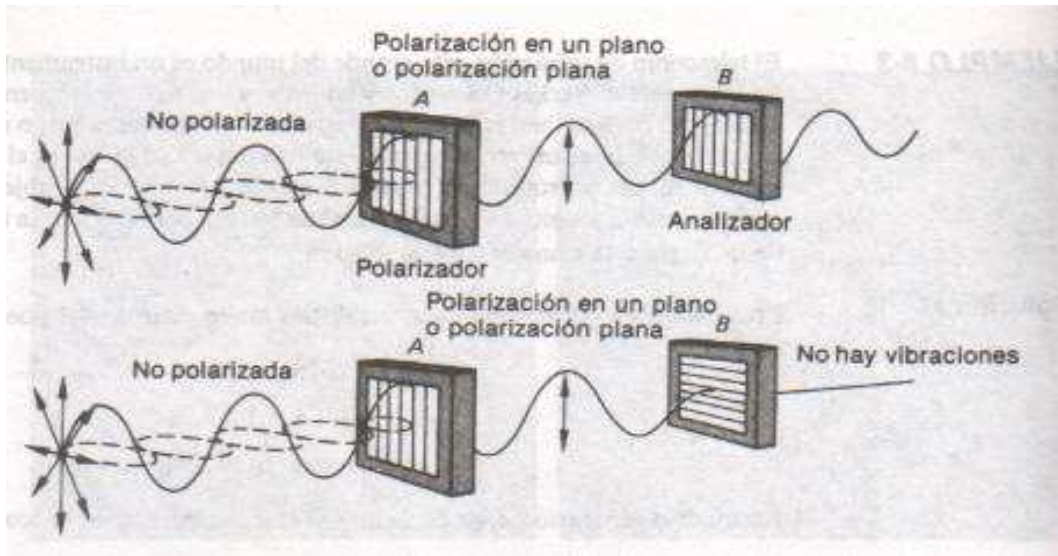
En los últimos años se ha adoptado un método para la fabricación continua de vidrio en tanques revestidos de platino, con agitadores en las cámaras cilíndricas de los extremos (llamadas homogeneizadores). Este proceso produce cantidades mayores de vidrio óptico, con menor coste y mayor calidad que el método anterior. Para las lentes sencillas se usa cada vez más el plástico en lugar del vidrio. Aunque no es tan duradero ni resistente al rayado como el vidrio, es fuerte y ligero y puede absorber tintes.

## **1.5 Polarización**<sup>2</sup>

Para poder explicar que es polarización es necesario tener un claro conocimiento de ondas transversales de la luz. A continuación se considera un ejemplo mecánico de ondas transversales en una cuerda vibrante. Si la fuente de la honda ocasiona que una de las partículas de la cuerda vibre hacia arriba y abajo en un mismo plano, las ondas están polarizadas en dicho plano.

Si se permite que la cuerda vibre en tal forma que cada partícula se mueva al azar en todas las direcciones posibles, las ondas no están polarizadas. Entonces polarización es el proceso por el cual las oscilaciones transversales de un movimiento ondulatorio están confinadas a un modelo definido.

**Figura 5. Analogía mecánica que explica la polarización de una onda transversal.**



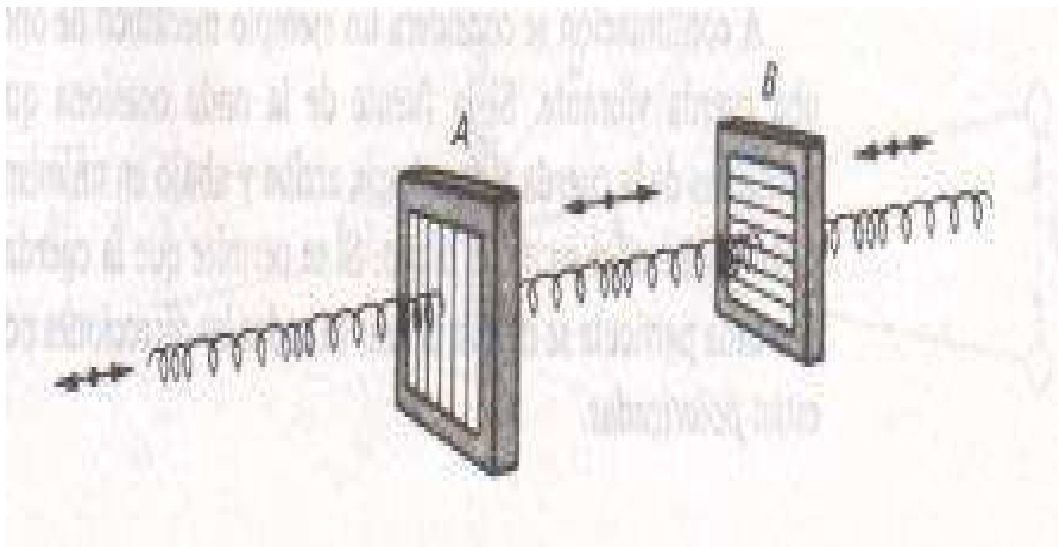
**Fuente: McGraw-Hill. Física 2. Tippes. Pág.144.**

A modo de ejemplo de la polarización de una onda transversal, considérese la cuerda que pasa a través de una rejilla como se muestra en la figura 5. Las vibraciones no polarizadas pasan a través de una rejilla A y emergen polarizadas en el plano vertical. A esta rejilla se le llama polarizador. Sólo las ondas con vibraciones verticales pueden pasar a través de la rejilla; todas las demás vibraciones se verán bloqueadas.

Al marco con rejilla B se le llama analizador, porque puede usarse para probar si las ondas incidentes están polarizadas en un plano. Si se gira el analizador de tal modo que las rejillas de B sean perpendiculares a las rejillas de A, todas las ondas que incidan serán bloqueadas. Estos pueden suceder solamente si las ondas que llegan a B están polarizadas en un plano perpendicular a las rejillas en B.

La polarización es una característica de las ondas transversales. Si la cuerda se sustituye por un resorte en el ejemplo que se ha considerado, como se muestra en la figura 6, las ondas longitudinales pasarían a través de las aberturas, independientemente de su orientación.

**Figura 6. Una onda longitudinal no puede ser polarizada.**



**Fuente: McGraw-Hill. Física 2. Tippes. Pág.144.**

Ahora bien, considérese ondas de la luz, de su naturaleza electromagnética. Recuérdese que una onda electromagnética consiste en campos eléctricos y magnéticos oscilantes, perpendiculares entre si y además a la dirección de propagación de la onda. Por consiguiente, las ondas de luz están formadas por campos oscilantes más que por partículas vibrantes, como el caso de las ondas producidas en una cuerda. Si puede demostrarse que estas oscilaciones pueden polarizarse, es posible establecer, en forma concluyente, que las oscilaciones son transversales.

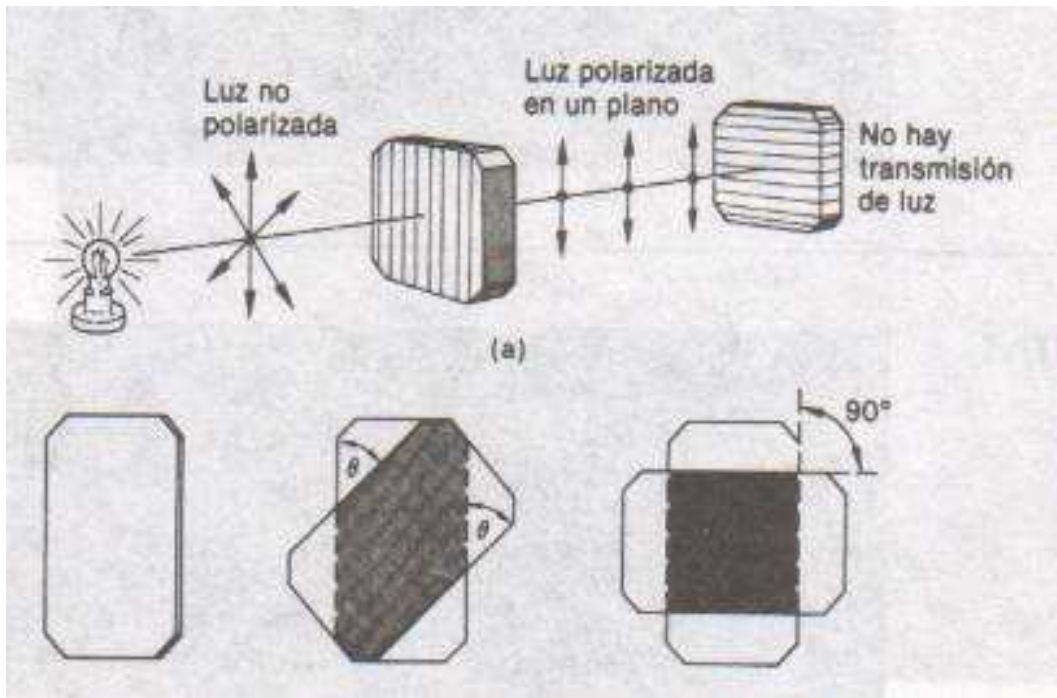
Cierto número de materiales ópticos como ya vimos en la tabla V exhiben diferentes índices de refracción para luz con distintos planos de polarización relativos a su estructura cristalina. Con estos materiales pueden construirse placas que únicamente transmitan la luz en sólo un plano particular de oscilación.

En consecuencia, pueden utilizarse como polarizadores de luz incidente cuyas oscilaciones estén orientadas caóticamente. Análogamente a la cuerda vibrante que pasa por las rejillas, pueden utilizarse dos placas polarizadoras para determinar la naturaleza transversal de las ondas de luz.

La luz emitida por la mayor parte de las fuentes no está polarizada, como puede observarse en la figura 7. Al pasar la luz a través de una placa de turmalina (el polarizador), el haz luminoso que emerge estará polarizado en un plano, pero su intensidad habrá disminuido.

Otra placa servirá como analizador. A medida que esta placa gire con relación al polarizador, la intensidad de la luz que pase a través del sistema disminuirá en forma gradual hasta que relativamente deje de pasar luz a través del sistema. De aquí puede deducirse que las ondas de luz son transversales y no longitudinales.

**Figura 7. Prueba que la luz puede ser polarizada, cuando el analizador rota de 0 a 90 grados la intensidad de la luz transmitida se reduce.**



**Fuente: McGraw-Hill. Física 2. Tippes. Pág.145.**

## **1.6 Fotoelasticidad y leyes ópticas <sup>7</sup>**

Técnica experimental para medir las tensiones y deformaciones en los objetos materiales por medio del fenómeno de birrefringencia mecánica.

La fotoelasticidad es útil principalmente para el estudio de objetos de forma irregular y tensiones localizadas, como piezas de maquinaria con muescas o curvas, componentes estructurales con ranuras o agujeros y materiales con hendiduras. Proporciona un medio visual de observar sobre todo las características de las tensiones del objeto por medio de diagramas de luz proyectados sobre una pantalla o sobre una película fotográfica. Por simple observación se determina en general las regiones en que se concentran los esfuerzos. Sin embargo se necesita una técnica mas complicada para un análisis de precisión sobre la tensión, compresión, fuerzas de cizalladura y deformaciones en cualquier punto del objeto con tensiones en tres direcciones espaciales (triaxial). Para estudios biaxiales, con una lámina de sustancia transparente especial se construye un modelo geoméricamente análogo al objeto que se va analizar y se coloca en lugar de éste.

### **1.6.1 Empleo del fenómeno de birrefringencia**

Las sustancias que generalmente se usan para modelos en fotoelasticidad son baquelita, celuloide, gelatina, polímeros transparentes, resinas sintéticas, vidrio y otros productos que son sensibles óptimamente a las tensiones y deformaciones.

Los materiales deben tener la propiedad óptica de polarizar la luz cuando se les comprime (sensibilidad óptica) y de transmitirla en planos de tensiones principales con velocidades que dependen de las compresiones (birrefringencia o doble refracción).

Además han de ser transparentes, elásticos, homogéneos, óptimamente isótropos cuando no están sometidos ni a tensiones ni a deformaciones y bastante libres de deslizamiento, envejecimiento y deformaciones en las aristas.

La distribución de esfuerzos es independiente de la constante elástica del material. Los parámetros son forma y manera de cantidad de carga. Teorías de planos de tensión dan resultados adecuados cuando son aplicados a vigas simples, pero no dicen nada de lo que está sucediendo bajo una múltiple cantidad de carga en un punto. Las ecuaciones generales de equilibrio no representan generalmente mucha ayuda puesto que es casi imposible lograr integrar las complicadas formas.

Posibles preguntas cuando se analiza esfuerzos en piezas las cuales son contestadas por el método de fotoelasticidad:

- ¿Cuál es la naturaleza de un área imperfecta de soporte?
- ¿Dónde están los puntos de contra flexión en una complicada estructura?
- ¿Cuáles son los esfuerzos locales alrededor rajaduras y porosidades?

Estas preguntas son todas más allá de los alcances de la matemática.

No solamente se puede hacer la distribución de esfuerzos de la forma más complicada y ser representada en todo lujo de detalles, sino más importante es el patrón por refracción de luz foto elástico.

### 1.6.2 La ley óptica de los esfuerzos <sup>8</sup>

En una placa isotropica transparente, sujeta a un campo biaxial de esfuerzos dentro del límite elástico el retardo  $R_t$  entre las dos componentes producida por la doble refracción temporal es:

$$R_t = Ct (p - q) = n\lambda \quad \text{Ec. (6)}$$

En donde C es el coeficiente óptico de los esfuerzos, t el espesor de la placa, p y q son los esfuerzos principales, n el orden de las bandas (el número de bandas que han pasado por el punto durante la aplicación de la carga) y  $\lambda$  la longitud de onda de la luz monocromática usada.

$$\text{Así,} \quad (p - q) / 2 = \tau_{\max} = (n\lambda) / 2Ct = nf / t \quad \text{Ec. (7)}$$

Si se determina el valor de las bandas del material f con la misma fuente de luz (por lo general, una lámpara de vapor de mercurio que emite luz que tiene una longitud de onda de 5461 Å) como la que se usará en el estudio de los modelos, se determina directamente el esfuerzo cortante máximo, o un medio de la diferencia de los esfuerzos principales. La calibración consiste en obtener el valor de las bandas del material en lb / pulg<sup>2</sup> por banda por pulg.



Para el cálculo de esfuerzos máximos normales utilizaremos la siguiente ecuación:

$$\sigma = p / n \quad \text{Ec. (8)}$$

Donde:  $p$  = Carga aplicada total

$n$  = número de orden de franja

### **1.7 Franjas isoclínicas**

Usando luz blanca (clara) y sin dividir laminas, aéreas oscuras aparecen superpuestas en un brillante color patrón. Las áreas oscuras son líneas Isoclinas y están situadas en todos los puntos donde un esfuerzo principal es paralelo al plano de polarización.

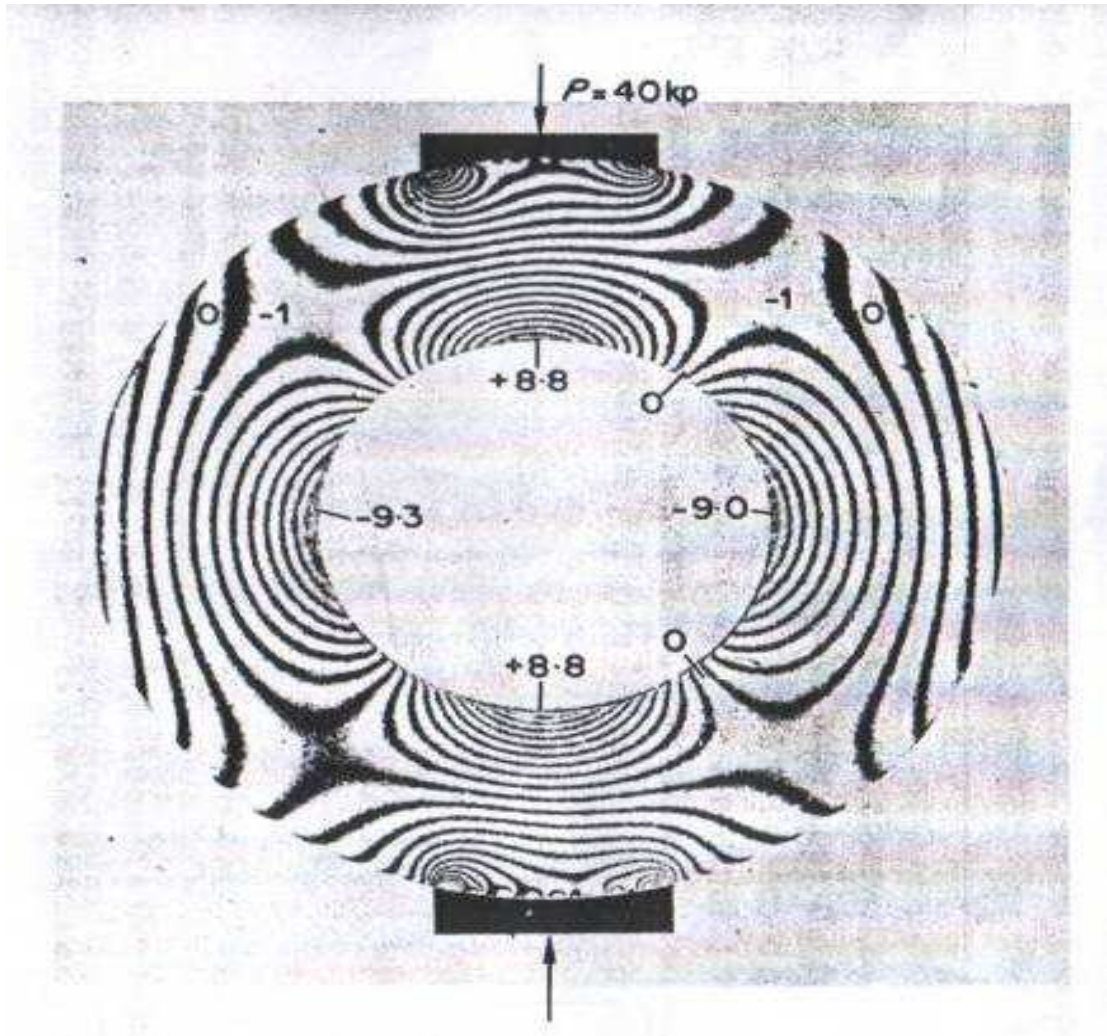
Cambiando el plano de polarización por rotación el polarizador y analizador moverá las áreas oscuras a otra posición, en la cual entonces es localizada una nueva serie de fotografías de estas áreas tomadas cada 15 grados cuando el polarizador y el analizador son rotados, la dirección de esfuerzos principales sobre el modelo entero pueden ser localizados.

### Características de las isoclinicas:

- Negras.
- Definidas menos nítidamente que las isocromáticas.
- A presión (tensión) constante, ellas varían cuando rotamos simultáneamente el polarizador y el analizador manteniéndolos cruzados a  $90^{\circ}$ .
- Con el polarizador y analizador mantenidos fijos ellos varían con la tensión.

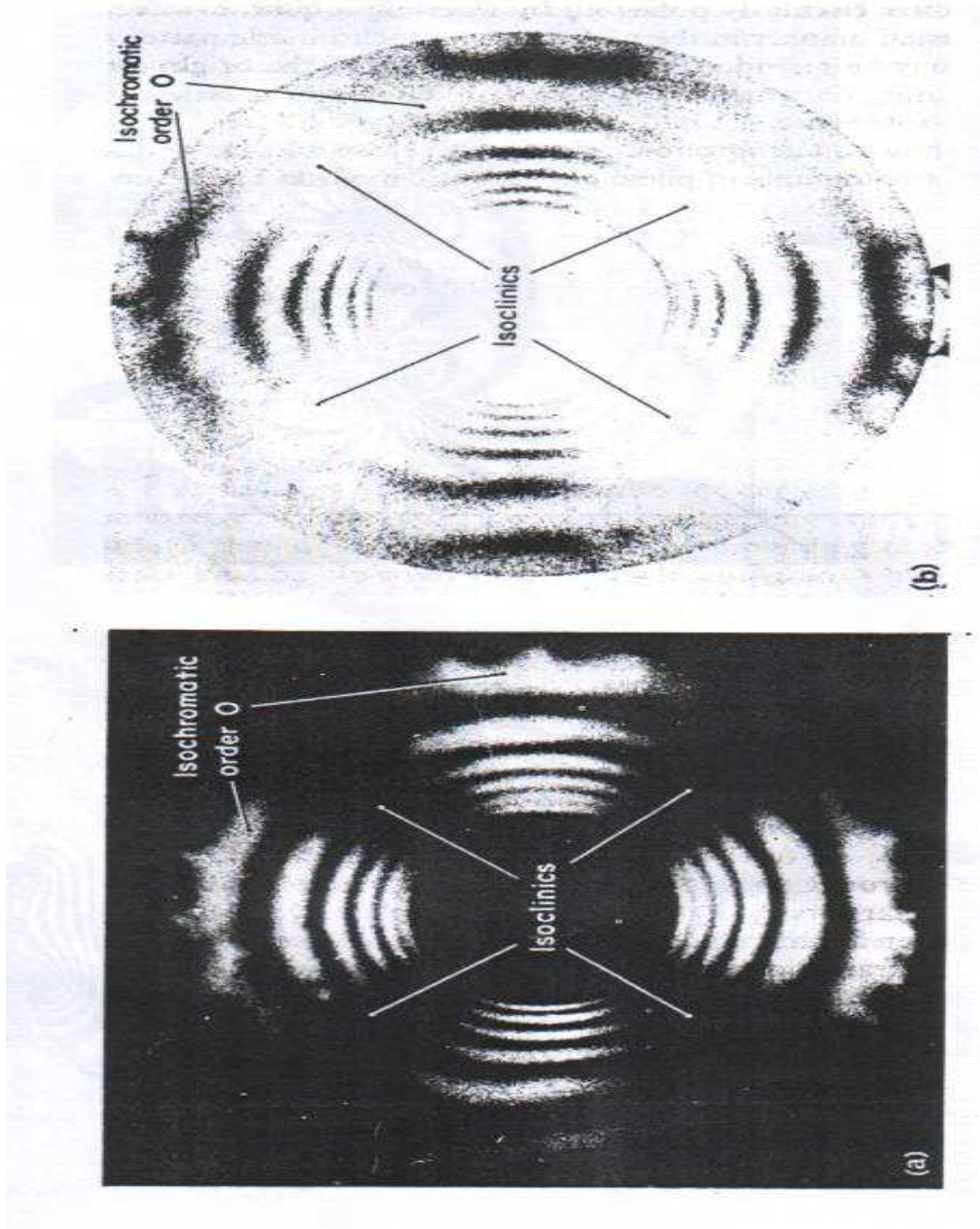
Se muestran en las figura 8 y 9 algunos ejemplos de modelos cargados y de las franjas isoclinicas correspondientes.

**Figura 8. Franjas isoclinicas de un anillo redondo bajo compresión diametral obtenida por doble exposición holográfica.**



**Fuente: Photoelastic stress analysis. Kuske-Roberston. A Wiley. Pág. 261.**

Figura 9. Reconstrucción holográfica de un anillo redondo simétrico radialmente a tensión. (a) Campo luminoso, (b) Campo oscuro.



Fuente: Photoelastic stress analysis. Kuske-Roberston. A Wiley. Pág. 260.

## 1.8 Franjas isocromáticas

La utilización de luz de arco de mercurio produce un campo polarizado. En donde las franjas isoclinicas se desvanecen, cuando el arco de mercurio con filtros monocromáticos se usa en ves de una luz blanca. El color brillante del patrón de las franjas monocromáticas con luz de mercurio, aparece ahora como líneas gravadas finamente que son llamadas isocromáticas. A cada línea se le puede asignar un valor máximo de corte por inspección.

Un eje neutral o coordenada puede estar presente donde los esfuerzos cambian de signo, este es un punto de referencia rápidamente determinado por inspección. Así pues los patrones de franja obscura o brillante pueden ser rápidamente enumerados con valores de corte, comenzando en los puntos conocidos y/o puntos de referencia.

Los esfuerzos de frontera son leídos directamente, mientras la separación de los esfuerzos principales de una información de corte máximo esta envuelta en el interior de la probeta, la componente normal desaparece y solamente el esfuerzo tangencial existe.

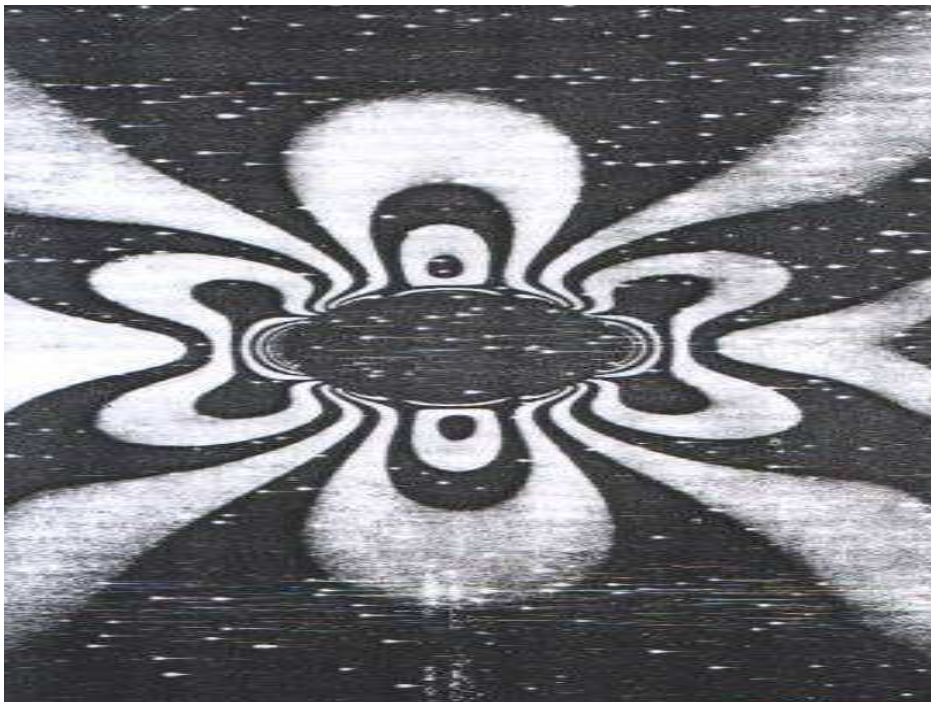
El esfuerzo tangencial principal es igual al máximo valor de corte asignado a una línea isocromática donde la intercepta la frontera. Gradiente de esfuerzos de frontera son rápidamente ploteados de esta importación y son extremadamente importante cuando el impacto de distribución de carga esta envuelto.

Características de las isocromáticas:

- Coloreadas, con excepción de las franjas de orden cero.
- Definidas más nítidamente que las isoclinas
- A tensión constante, ellas permanecen fijas cuando rotamos el polarizador y analizador manteniéndolos cruzados a  $90^{\circ}$ .
- Con el polarizador y analizador manteniéndolos fijos, ellas varían con la tensión.

Se muestra en las figura 10, 11 y 12 modelos cargados con sus respectivas franjas isocromáticas.

**Figura 10. Curvas isocromáticas en una plancha con agujero puesta a tensión.**



Fuente: Enciclopedia Salvat. Ciencia y tecnología. Tomo 6. Pág. 187.

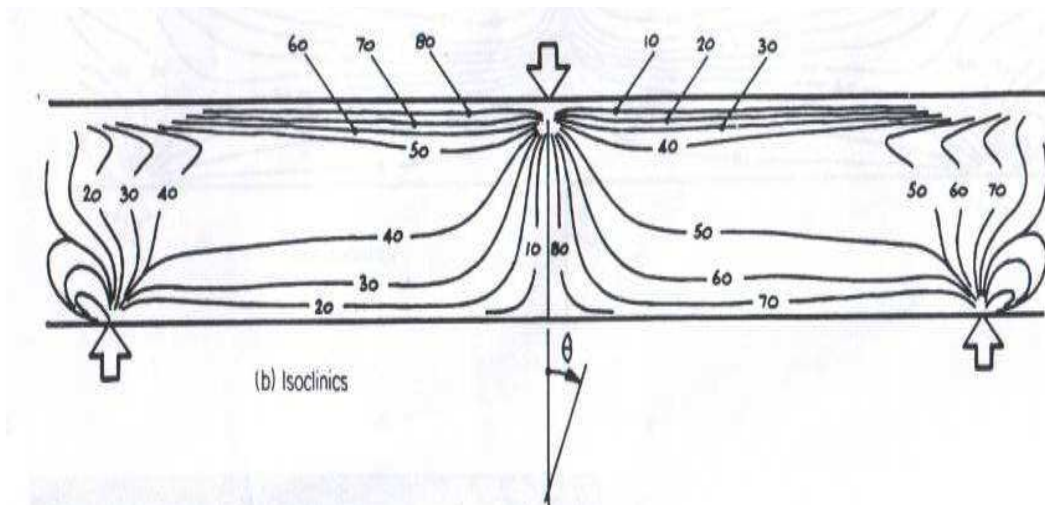
**Figura 11. Franjas isocromáticas experimentalmente derivadas de una viga de plástico reforzada con fibra de carbono.**



(a) Isochromatics

Fuente: Photoelastic stress analysis. Kuske-Roberston. A Wiley. Pág. 272.

**Figura 12. Franjas isoclinicas experimentalmente derivadas de una viga de plástico reforzada con fibra de carbono.**



Fuente: Photoelastic stress analysis. Kuske-Roberston. A Wiley. Pág. 272.





## 2. EQUIPO E INSTRUMENTACIÓN DE LABORATORIO

### 2.1 Antecedentes del polariscopio *Chapman*

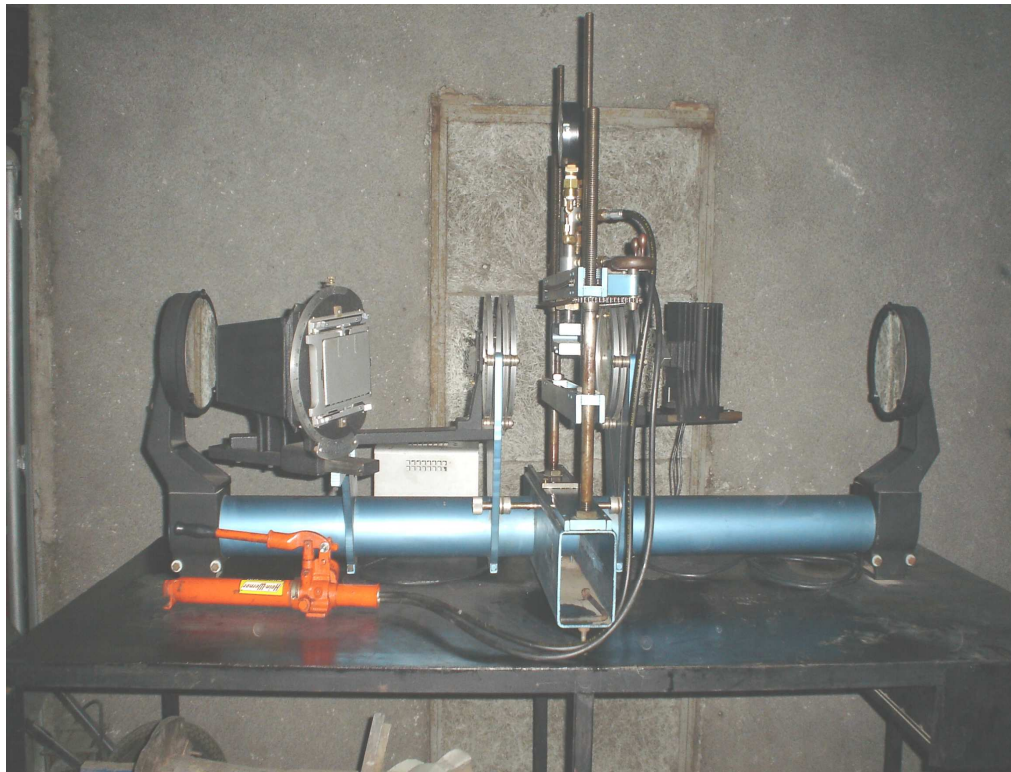
EL polariscopio *Chapman* fue donado por los Laboratorios *Chapman* de EEUU, de ahí el origen de su nombre, en el año de 1990. Este polariscopio es un equipo bastante antiguo pero con las condiciones de poder reconstruirlo y ponerlo a funcionar. Inicialmente el equipo se encontraba en el área de laboratorio del centro de investigación de ingeniería posteriormente paso a ser parte de la escuela de ingeniería mecánica donde se realizaron pruebas poniendo a funcionar el equipo y así constatando su funcionamiento. El proyecto se dejó por un lado y ya no se implemento como un laboratorio para el área científica y de aprendizaje para los estudiantes de ingeniería mecánica.

Actualmente esta enfrente del área de Metalurgia y Metalografía situado en el edificio T7, facultad de ingeniería, escuela de mecánica y no consta con un espacio adecuado para realizar las pruebas de laboratorio las cuales ya se realizan para investigación en el área pedagógica para poder implementarlo a los estudiantes de ingeniería mecánica.

## 2.2 Polariscopio *Chapman*

En la figura 13 se presenta el polariscopio *Chapman* con todo su equipo montado, el cuerpo principal es de color celeste, con sus demás sistemas de color negro y un banco de metal que lo soporta. Existen dos tipos de polariscopios uno lineal compuesto de un analizador lineal y un polarizador lineal y otro circular. El polariscopio *Chapman* es de este ultimo agregando entre los polarizadores de cada lado una lamina retenedora de  $\frac{1}{4}$  de honda.

**Figura 13 Polariscopio *Chapman* y todos sus accesorios.**



**Fuente: investigación de campo.**

## **2.3 Componentes del equipo**

El polariscopio es un instrumento con diferentes partes y cada una de estas sirve para una función específica para lograr el funcionamiento correcto del mismo, estas partes forman un todo de un sistema de los cuales tenemos:

### **Sistema del cuerpo principal**

Este es la parte de mayor peso y envergadura que es la base del polariscopio *Chapman* con un tubo y una viga, armadas para sostener todos los sistemas que se acoplan al cuerpo.

### **Sistema eléctrico**

Este es alimentado por una fuente de poder de 110 voltios de corriente alterna que alimenta un transformador que regula el voltaje y la corriente para emitir una determinada luz.

### **Sistema hidráulico**

Este es un gato hidráulico manual de 4 toneladas de doble acción marca *Hein-Werner* accionado por una palanca que se mueve hacia arriba y abajo, conectado a un cilindro de doble acción marca *Bimba*, proporcionando la carga que se aplica a la pieza en cuestión.

## **Sistema de espejos y cámara**

Este lo constituye dos espejos cóncavos hacia adentro, dos espejos planos aluminizados, dos analizadores, dos polarizadores y dos laminas de cuarto de onda, además una cámara de polaroid que sirve como pantalla y se puede tomar fotos en un momento dado de la pieza en cuestión.

### **2.4 Condiciones iniciales y mejoramiento del equipo**

Se observa en la figura 14 que cuenta con el lugar pero no con las condiciones adecuadas hay muchos objetos ajenos y chatarra, al equipo y al laboratorio que pueden golpear al polariscopio *Chapman* y arruinar piezas delicadas que son irremplazables. Para realizar las pruebas de laboratorio es adecuado construir un lugar donde el equipo este resguardado y con la ventilación e iluminación adecuada y con tomas de corriente eléctrica cercanas y apropiadas a las necesidades del equipo. Esto es algo de suma importancia si se quiere para fines de enseñanza y aprendizaje de los estudiantes de ingeniería mecánica y el costo de lograr el lugar adecuado no es elevado.

**Figura 14. Condiciones iniciales alrededor del lugar.**



**Fuente: investigación de campo.**

### **2.4.1 Cuerpo principal**

Se puede observar en las figura 15 y 16 lo que conforma el cuerpo principal del polariscopio. Este se encuentra en buen estado logrando así que todos los equipos restantes se puedan sujetar bien. Debe de estar anclado en un lugar donde la manipulación del equipo sea de fácil acceso para no deteriorar el equipo con malas maniobras de operación.

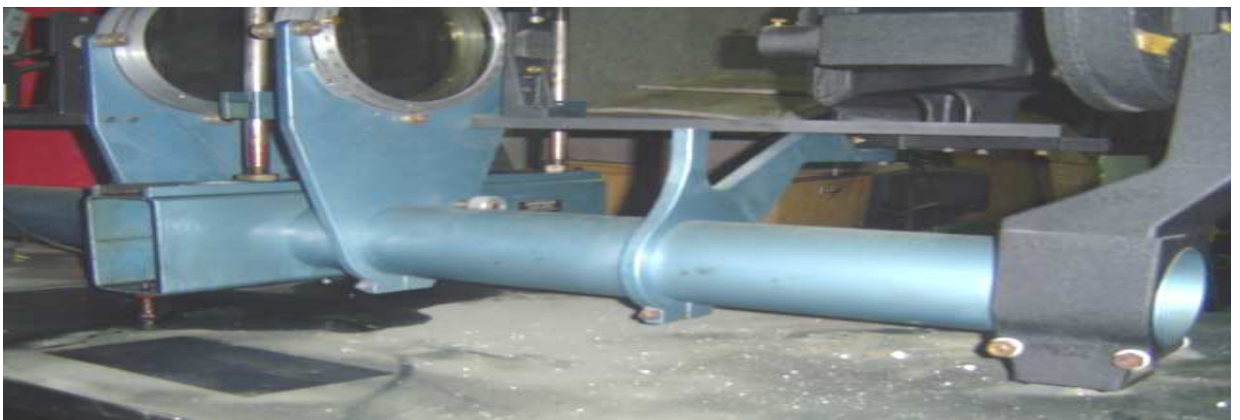
Es conveniente, que durante su instalación sea nivelado el cuerpo para que cuando se realicen las pruebas no se provoquen errores en el modelo o pieza ensayada al aplicarle las cargas en dirección incorrecta debido al desnivel que pueda tener.

**Figura 15. Cuerpo principal vista izquierda.**



**Fuente: Investigación de campo.**

**Figura 16. Cuerpo principal vista derecha.**

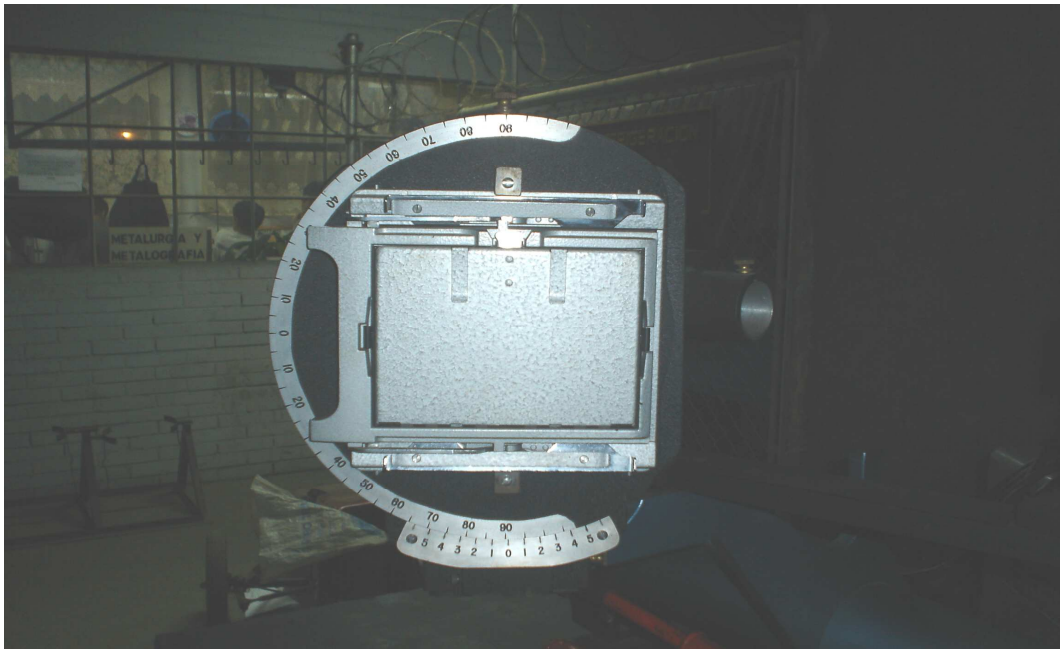


**Fuente: Investigación de campo.**

### 2.4.2 Cámara fotográfica

Se puede observar en la figura 17, que este equipo ya es muy antiguo y tenía como objeto captar un momento he imprimir del estado de las pruebas, el estado de la cámara ya es deficiente por el tipo de película polaroid que usa, ya no se existe en el mercado. Por este motivo se tiene como única alternativa observar la imagen en la pantalla interior de la cámara por lo tanto solo se puede analizar los resultados en el instante cuando se esta realizando la prueba. Es necesario implementar un sistema donde podamos obtener los resultados de la prueba impresa en una fotografía para posteriormente analizar con detalle para la interpretación y análisis correcto.

**Figura 17. Cámara y sus componentes.**



**Fuente: investigación de campo.**

### 2.4.3 Sistema hidráulico

Se puede observar en la figura 18, que las condiciones del equipo no son las adecuadas, el pistón que sirve para aplicar las cargas, no esta en buen estado no hay un manómetro que nos indique la presión aplicada, esto es de suma importancia par lograr una prueba de laboratorio exitosa y su interpretación correcta en el análisis de los esfuerzos en la pieza. Para lograr que el sistema funcione se reemplazo el pistón y se coloco un manómetro con un espan de 0 a 100 psi, con todos los accesorios necesarios de esta forma se espera que las pruebas se realices sin ningún problema.

**Figura 18. Sistema hidráulico y sus componentes.**



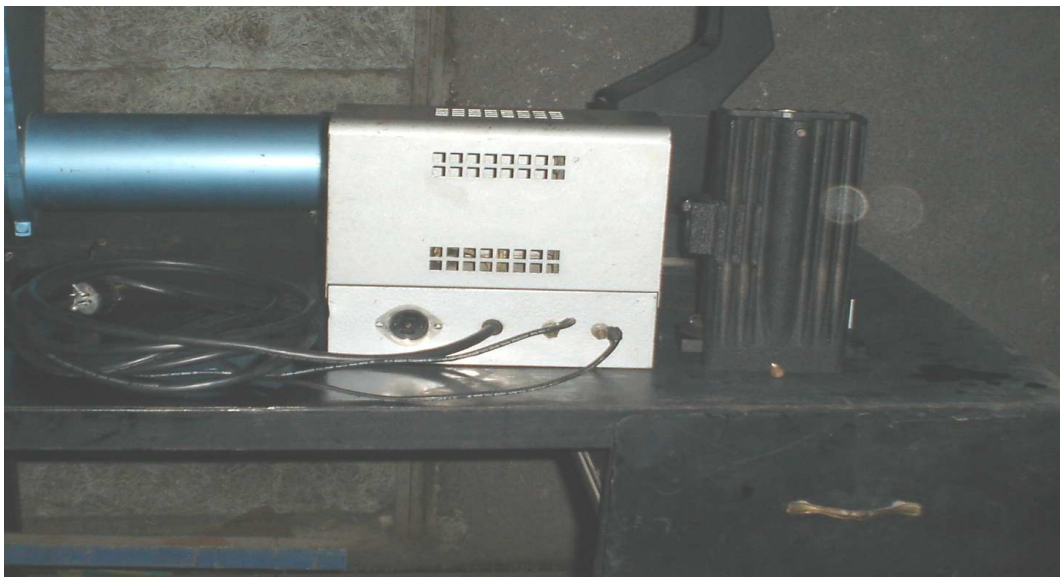
**Fuente: investigación de campo.**



#### 2.4.4 Sistema eléctrico

Como se muestra en la figura 19, es solo una caja la cual contiene un interruptor de tres posiciones con dos transformadores, el primero entra 110 v, salida de 6 v, para una bombilla que genera un tipo de luz suave, el segundo entra 110 v, salida 240 v, para una bombilla que genera un tipo de luz fuerte. Todo el alambrado del sistema se cambio por uno de mayor calibre ya que el anterior no era el adecuado y estaba en mal estado. Actualmente solo se cuenta con la luz suave ya que el equipo cuando se adquirió no contaba con el otro tipo de bombilla la cual nos proporciona la luz fuerte y además este tipo de bombilla no se encuentra en el mercado nacional. Pero con la luz suave se puede realizar las pruebas ya que esta bombilla es de mercurio. Seria importante tener repuestos de estas bombillas ya que su vida útil es reducida, debido a que la iluminación es indispensable para el funcionamiento del mismo.

**Figura 19. Sistema eléctrico y sus componentes.**

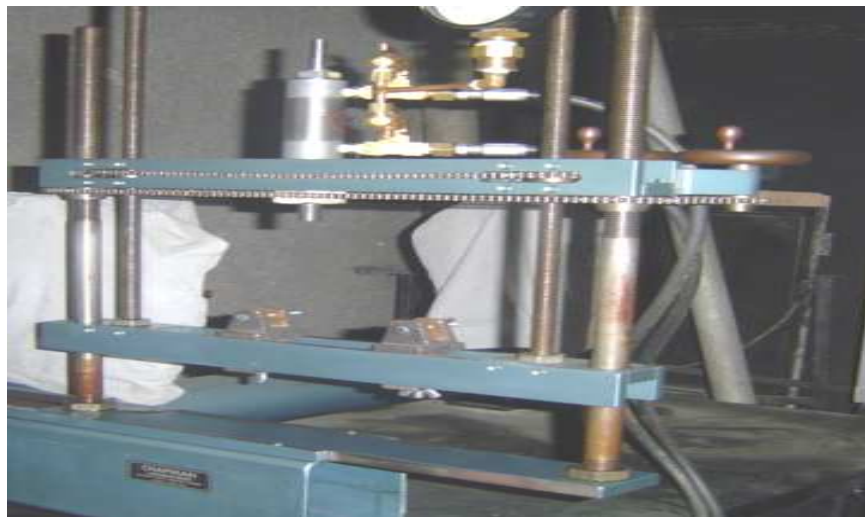


**Fuente: Investigación de campo.**

#### **2.4.5 Sistema de aplicación y obtención de lecturas de cargas**

Se muestra en la figura 20, el sistema que cuenta con una estructura sólida que puede moverse perpendicular al cuerpo principal para poner en posición adecuada al pistón y la base que soporta la probeta, además esta base se puede bajar y subir con manecillas acopladas a uno tornillos donde se desplazan, todo este mecanismo permite colocar en posición optima la probeta para hacer el ensayo, pudiendo realizarse a compresión, tensión y deflexión. Se cuenta con un deformometro que se encarga de comunicar al reloj comparador la cantidad de carga que se esta aplicando pero este reloj comparador no lo tenemos es necesario tener uno para confirmar las cargas aplicadas a la probeta, la teoría indica que por cada milésima de pulgada de deformación equivale a 8.2 psi de carga es necesario calibrar estos elementos para poder obtener lecturas reales.

**Figura 20. Sistema de aplicación de carga y sus componentes.**



**Fuente: Investigación de campo.**

## **2.5 Ambiente óptimo del laboratorio**

Para lograr un lugar adecuado de laboratorio es necesario tener buena iluminación, un lugar limpio y que este protegido de polvo y agua o cualquier otra sustancia, como de personas que no estén autorizadas a tocar todos los equipos para evitar el deterioro de los mismos. El lugar donde se encuentra los equipos es bastante adecuado solo requiere de modificaciones dentro de las cuales tenemos:

- Circular con paredes de madera o algo similar, colocar una puerta y una ventana.
- Llevar una toma corriente de 110 voltios.
- Colocar una lámpara fluorescente de 40 x 2.

## **2.6 Mantenimiento del equipo**

El laboratorio con todo su equipo es sumamente delicado ya que contiene elementos eléctricos, óptica e instrumentos de precisión y todos estos requieren un mantenimiento preventivo.

Limpieza superficial constante, es decir diaria con algún tipo de limpiador aplicado con un trapo para quitar polvo o cualquier otro tipo de impureza sobre todo en los espejos, analizadores, polarizadores y cámara.

Revisión del sistema hidráulico, las mangueras y todas las conexiones para evitar fugas y así se mantenga la presión constante al aplicarla a la probeta como también el cambio de aceite hidráulico cada cierto tiempo.

Lubricación de piezas en movimiento, como las cadenas de accionamiento vertical de la base donde se apoya la probeta, también las manecillas y ranuras donde corre el sistema de aplicación de cargas, algunas piezas que están descubiertas y tienden a oxidarse este lubricante puede ser una grasa numero 2 y un aceite 90 de cualquier marca.

Revisión del sistema eléctrico, los cables, transformadores, bombillas es necesario para evitar desperfectos que se puedan dar y nos evitaría la visibilidad correcta en la pieza al tener una luz que no sea la correcta.

Revisión de relojes, manómetros, probetas y piezas que están sometidas a las cargas de compresión, tensión y deflexión ya que estas de tanto uso o por alguna mala carga tienden a dañarse y hay que cambiarlas para seguir con los pruebas de laboratorio.

### 3. PRÁCTICAS DE LABORATORIO

#### 3.1 Consideraciones de los dispositivos para aplicación de cargas

Cualquier sistema o equipo que se utilice para un laboratorio con fines de enseñanza requiere un funcionamiento con un mínimo de errores en los resultados que se obtengan. Todos los controles de carga del polariscopio *Chapman*, movimientos de la probeta cargada y la sincronización de rotación del plano de polarización, están localizadas alrededor de la pantalla de la cámara, así como las ejecuciones necesarias para el estudio de los patrones de las franjas. Si es un sistema mecánico donde hay palancas balanzas o un instrumento de medición de deformaciones existen pivotes o puntos de apoyo, es necesario que operen sin fricción y sin pérdidas de movimiento.

El polariscopio consta con un fotograma de esfuerzos, que tienen una capacidad máxima de 1500 psi a tensión, compresión y deflexión. La carga puede ser aplicada excéntricamente dentro del espacio de la probeta. El espacio de la probeta es de 13 pulgadas de ancho y puede ser ajustado verticalmente desde 2 a 16 pulgadas por medio de controles de manecillas en forma de rueda operada con la mano que abre y cierra la distancia entre la parte de arriba o debajo de la viga en forma de cruz. El marco de carga se desliza horizontalmente y verticalmente también puede ser deslizada mas allá del campo óptico para montar el modelo sin necesidad de hacerlo en el espacio comprendido entre el analizador y el polarizador.

Después de que el modelo es arreglado, el marco entero es deslizado de regreso hacia la luz y posesionado al centro del punto de interés en el formato de la cámara. Los polariscopios de investigación usan superficies de espejos a través de luz en serie y tal sistema es completamente libre de aberraciones cromáticas. Cada longitud de espejo, es usado en la posición fuera del eje o coordenada en un ángulo de 4 grados que permite al haz de luz tener acceso a la cámara. Los ángulos de los ejes de las absisas están opuestos uno al otro y bajo esta condición las aberraciones son canceladas.

Todos los espejos están aluminizados con monóxido de silicón para que puedan ser limpiados sin daño de rayarse. Todos los polariscopios de investigación trabajan con una abertura de diafragma. Esto representa un compromiso óptimo entre la cantidad de luz a través del sistema para imágenes brillantes y los requerimientos que los ases de luz se mantengan para una correcta definición de los bordes del modelo. En esta apertura el campo esta plano sobre su diámetro entero a muy pequeñas tolerancias. El polariscopio es tan efectivo que el campo entero llenara las diagonales de 6 pulg. De los 4 x 5 pulg. Del formato de la cámara, los  $45^{\circ}$  isoclinas son mostrados superpuestos en los isocromáticas.

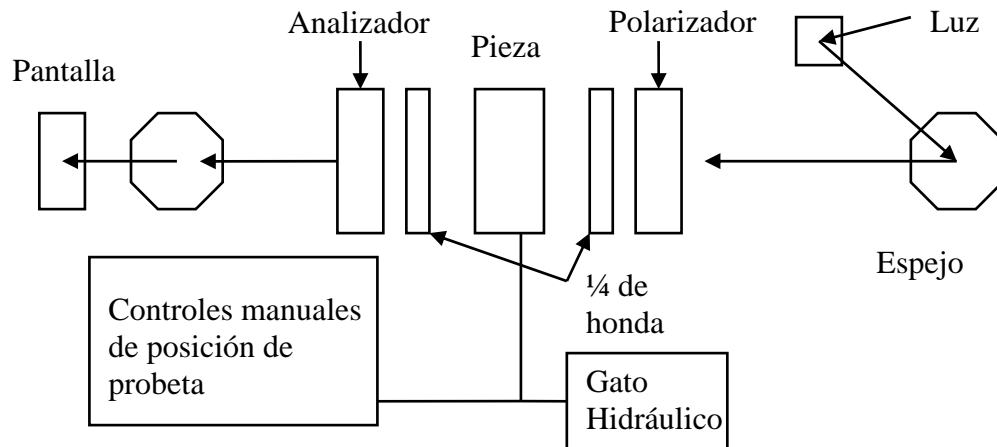
El vidrio laminado polarizado montado en aros rotativos en relación, y un aro intermedio, son acoplados a un eje del cual la perilla de control colocada en la parte inferior del cuerpo principal donde se puede girar todo el sistema de laminas, polarizador, analizador y  $\frac{1}{4}$  de onda, para la imagen en la cámara fotográfica.

El aro analizador esta dividido en un intervalo de incrementos de un grado y este ángulo es leído en la escala de vernier de un grado en el plano polarizado.

El plano es sujetado al aeropolarizador por dos tornillos, estando correctamente orientados. El segundo plano esta sujetado al aro de en medio por dos tornillos similares y a sido correctamente orientado, sin embargo el aro intermedio tiene cuatro hoyos tapados para los tornillos con  $90^{\circ}$  de separación. Así pues el segundo plano puede ser reemplazado una o dos posiciones,  $90^{\circ}$  uno al otro. En una se observan partes iluminadas y en otras oscuras.

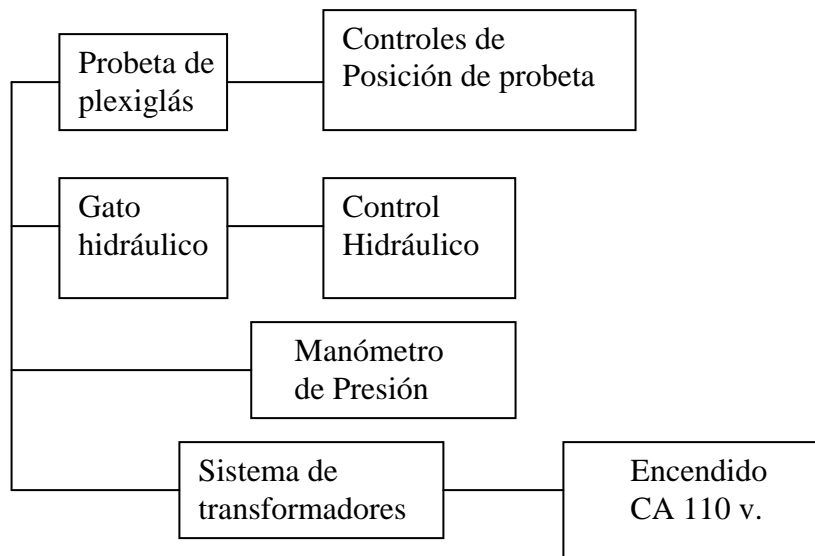
El aro analizador es acoplado a un aro intermedio por medio de un tornillo el cual si se quita libera este para poder rotarlo independientemente del polarizador y los platos. Esta característica permite la determinación de fracciones de franjas oscuras por medio del método *Tardy*. Las ubicaciones de las franjas oscuras por el método *Tardy*, las cuales consiste de alinear las isoclinicas bajo estudio con los platos fuera, reemplazando los platos y separadamente rotando el analizador puede ser medido a un grado en la escala gravada.

**Figura 21. Área del polariscopio *Chapman*.**



**Fuente: Investigación de campo.**

**Figura 22. El aparato global se compone de la probeta de plexiglás y los sistemas siguientes.**



**Fuente: Investigación de campo.**



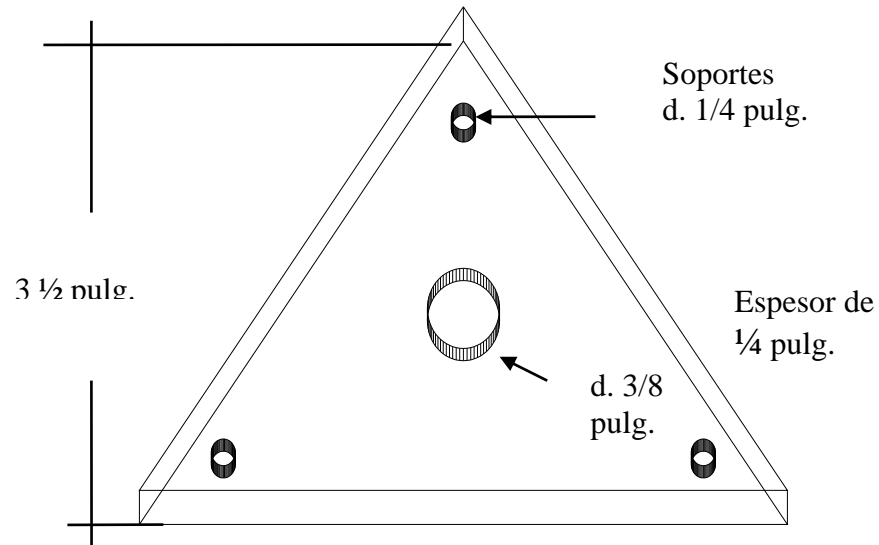
## **3.2 Comportamiento de esfuerzos a tensión**

El ensayo de tensión es el más utilizado en materiales, en el área de ingeniería no solo como base de determinación de la calidad del material sino para la evaluación del comportamiento del mismo, en relación a las cargas que soportan en servicio real y su característica de deformidad.

### **3.2.1 Generalidades**

La prueba de tensión por fotoelasticidad ilustra el comportamiento de los esfuerzos en una probeta de *Plexiglás* como se muestra en la figura 15. La importancia de la concentración de esfuerzos puede mostrarse en este ejemplo. Si ponemos la probeta de la figura 15, de un material elástico que tenga una muesca y que esta sometida a tensión axial el esfuerzo en la orilla del agujero alcanzara un máximo de tres veces el esfuerzo normal.

**Figura 23. Probeta con muesca para prueba de tensión.**



**Fuente: Investigación de campo.**

En donde influyen varios factores:

- Alineación de los soportes de la probeta misma para que quede dentro del fotograma de carga.
- Tamaño y forma de la probeta, especialmente no debe sobrepasar de 4 x 5 x 3/8 pulg. Por las bajas cargas que se aplicaran para alcanzar a ver las líneas de deformación isoclinicas e isocromáticas.
- Velocidad de carga tiene que ser lenta para lograr distinguir el progreso de las franjas de esfuerzos en la probeta y lograr el análisis adecuado.

- La temperatura a la que se realiza la prueba es la del ambiente para evitar que el material este sometido a otra clase de condición que afecte sus características mecánicas.
- La luz debe de estar en perfecta alineación con la probeta para abarcar toda el área que esta siendo afectada por la carga y así visualizar las franjas de esfuerzos.

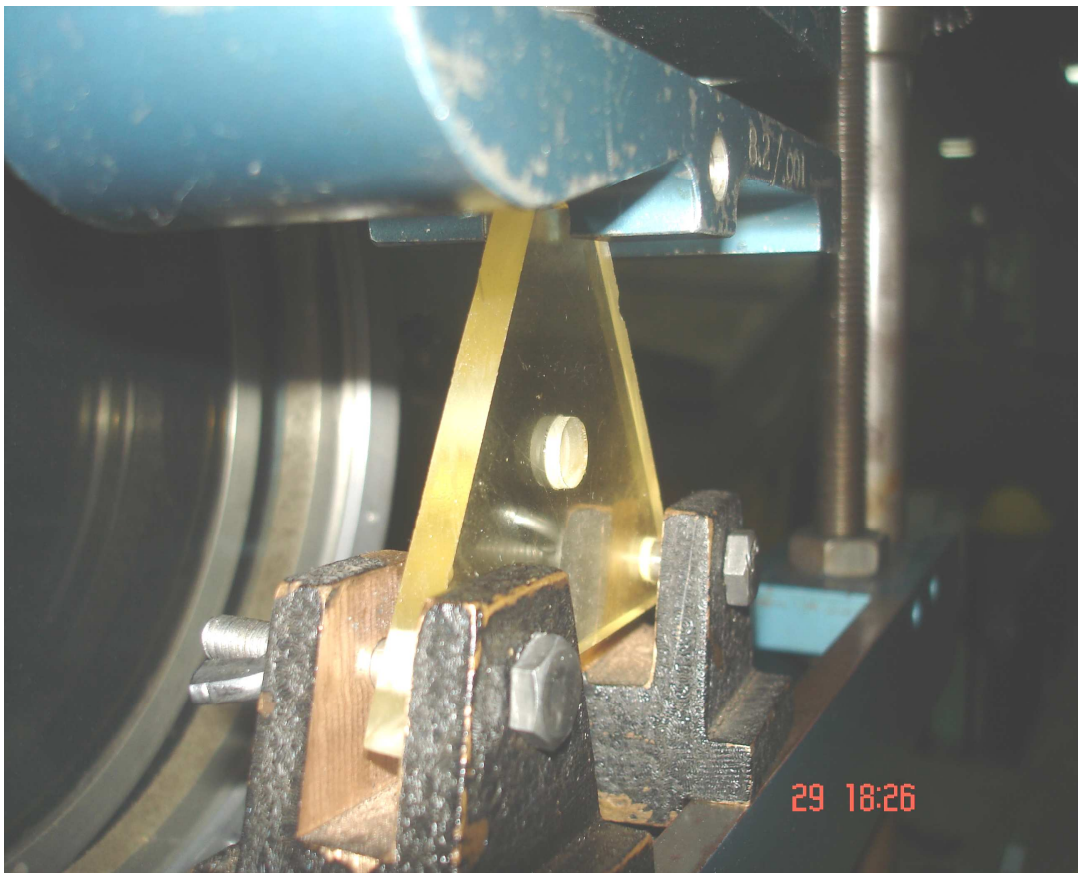
### **3.2.2 Procedimientos**

- Para el análisis fotoelastico en la prueba de tensión con la probeta ya descrita y los factores a tomar se procede de la siguiente manera.
- Se tiene ya la probeta semejante a un prototipo de un elemento de una estructura real, de plexiglás.
- Se toma el modelo con los dispositivos para dejarlo firme en una posición donde se pueda aplicar la carga en forma similar como normalmente se aplica en funciones reales
- Se le ilumina con luz polarizada circular monocromática colocándola dentro del espectro de luz
- Lentamente se incrementa la carga en el modelo, inmediatamente se observa una serie de franjas de colores que aparecen cada ves mas intensas y se prolongan a lo largo del modelo.

### 3.2.3 Gráficas

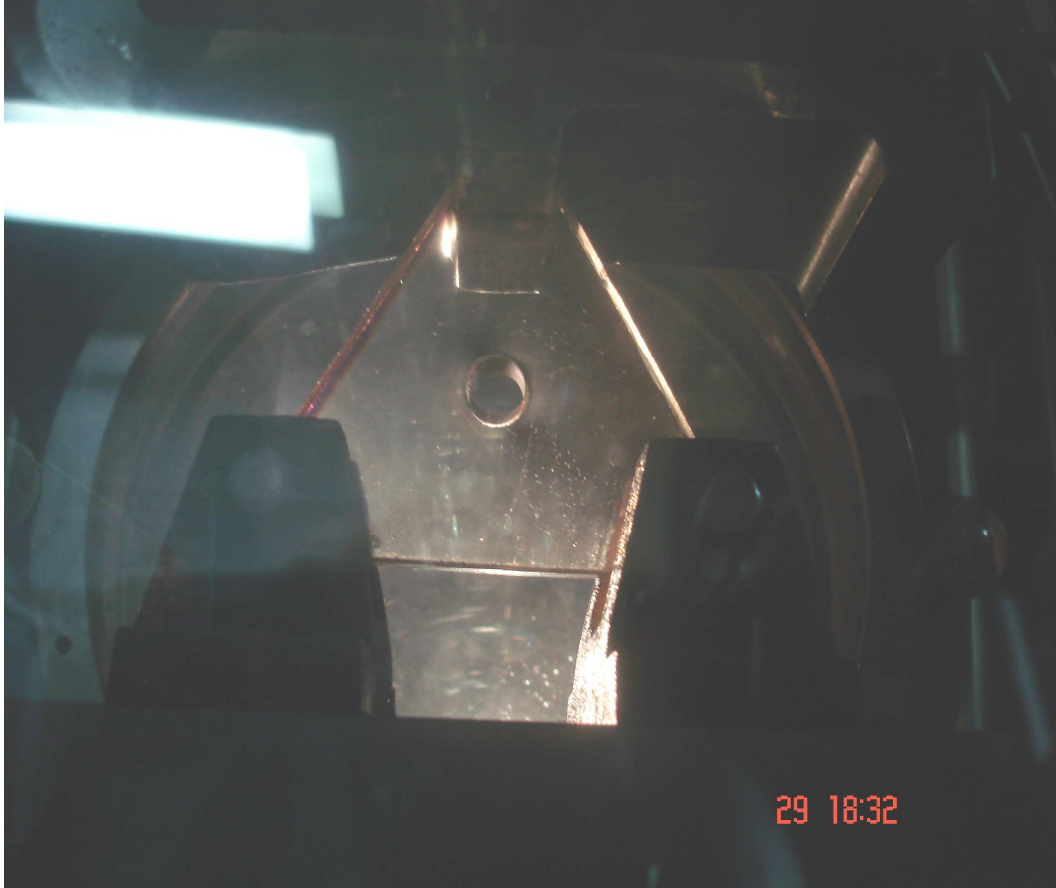
El modelo en forma de triángulo está sujeto en sus vértices para lograr que no sufra movimiento en la prueba, a la hora de aplicarle la carga y esta se da en forma uniforme como se muestra en la figura 24.

**Figura 24. Forma de sujetar el modelo, prueba a tensión.**



**Fuente: Investigación de campo.**

**Figura 25. Modelo sin carga.**



**Fuente: Investigación de campo.**

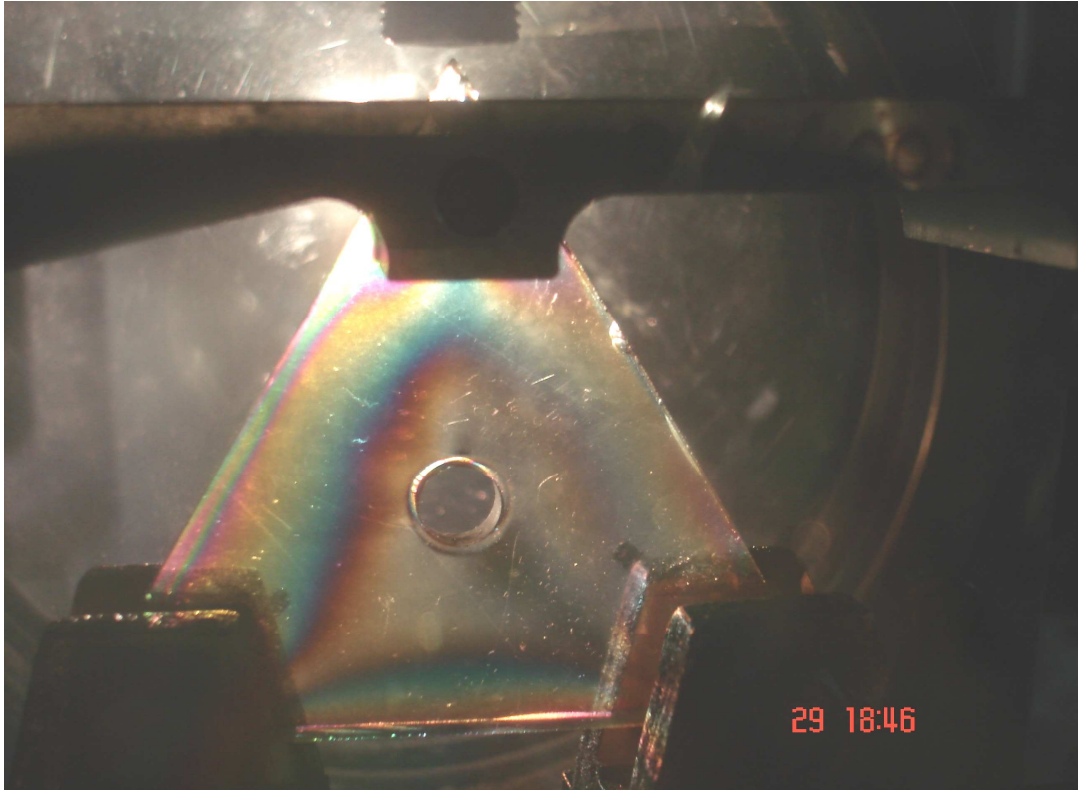
Como se muestra en la figura 25, el modelo está listo para ser puesto a prueba careciendo de carga, el manómetro marca cero en su escala. Por lo mismo el material transparente no ha sufrido ningún cambio con respecto a su doble refracción o sea que no ha parecido ninguna irregularidad, como lo sería una línea isocromática consecuencia de aplicar una carga, puesto que la luz monocromática ya está encendida por eso la fotografía se toma desde un ángulo determinado donde no afecte la imagen al tomarla.

### 3.2.4 Discusión

En la figura 26, a continuación se aplica una carga de 80 psi en el modelo podemos ver como aparecen las franjas de color rojo-violeta, amarillo, azul verde y negro. Todas estas franjas se distribuyen en la probeta a lo largo y ancho. Estas franjas comienzan a notarse que salen de los apoyos. Es de esperar, ya que los apoyos son muescas, que sirven para sujetar el modelo. Es de normal que, ese sector cerca de los agujeros se desarrolle la concentración de tensiones, donde esta localizada cada muesca es una parte débil porque esta casi en la periferia de la probeta exactamente en las aristas y no existe mucho material donde soporte la carga a tensión.

Estas muescas son un área potencial de fractura debido a su posición geométrica en el modelo y como son puntos de sujeción, estarán sometidas a esfuerzos grandes debido a la carga estática aplicada. Se logra ver que la muesca de en medio a penas esta siendo afectada por la carga ya que las franjas no bordean la superficie de ella. Los esfuerzos no se concentran en esta muesca y el análisis nos dice que esta no afecta al diseño o no es un punto crítico de esfuerzos localizados.

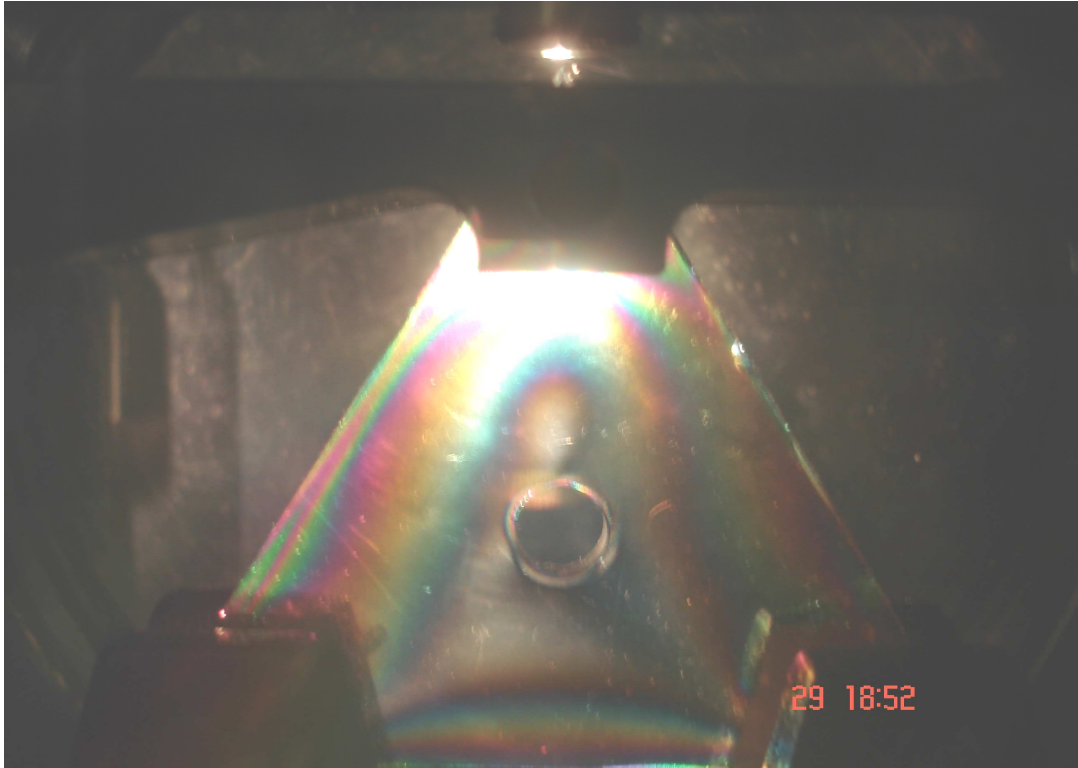
**Figura 26. Modelo cargado a 80 psi.**



**Fuente: Investigación de campo.**

Analicemos la figura 26, luego se aplica una carga de 130 psi esta carga hace que aparezcan mas franjas y las franjas existentes a 80 psi se pronuncien más y sean nítidas en su forma y desde luego abarquen todo el área del modelo cargado, llegando hasta la muesca del centro lográndose ver como las franjas negras bordear la superficie de esta muesca y las franjas que salen de donde se sujeta el modelo se junten.

**Figura 27 Modelo cargado a 130 psi.**



**Fuente: Investigación de campo**

Por inspección cuidadosa en la figura 27, contaremos la cantidad de franjas ya que será la última carga que se aplicara sin llegar a la fractura y donde tenemos una imagen nítida de las franjas isocromáticas para hacer los cálculos de nuestros esfuerzos máximos normales y de corte. Necesitamos tener un punto de referencia para lograr hacer el análisis numérico cuantitativo y partimos de la tangente en el modelo o la parte superficial donde los esfuerzos son cero o donde los esfuerzos se anulan y contamos el orden de las franjas hacia la parte de adentro hasta la muesca del centro, para poder saber el esfuerzo cortante máximo en lo largo de respectiva franja.



Tenemos 3 franjas bien claras que salen de los apoyos de la parte inferior hacia el apoyo superior, entonces aplicamos la ecuación 7.

Para la banda de orden 3 tenemos:

$$\tau_{\text{Máx.}} = nf / t$$

$$\tau_{\text{Máx.}} = 3 \text{ b.} \times 700 / .25 = 8400 \text{ lb / pulg}^2$$

Tenemos un esfuerzo de corte de 8400 psi a lo largo de la franja de orden tres.

Para la determinación de los esfuerzos máximos que están paralelos a las franjas isocromáticas se determina dividiendo la carga puntual total aplicada entre el numero de orden de banda que aparece a lo ancho de la probeta que se desea analizar. En esta prueba la carga máxima es de 130 psi, aplicamos la ecuación 8.

$$\sigma = p / n$$

$$\sigma = 130 / 3 = 43.3 \text{ psi}$$

Tenemos un esfuerzo máximo normal de 43.3 psi.

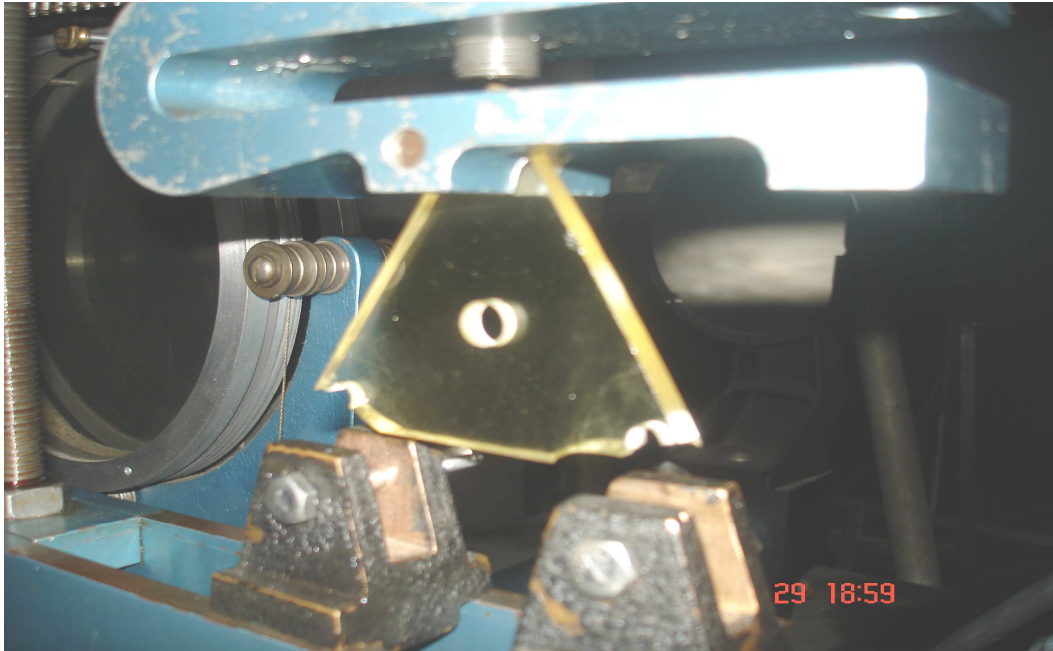
### 3.2.5 Conclusiones

Como se observa en las figuras, las diferentes etapas del modelo cargado a tensión muestran los cambios en las franjas isocromáticas y esto nos define, las características de resistencia mecánica que el material tiene y como se comporta. La forma geométrica propia de la probeta hace que los esfuerzos se distribuyan y comporten de una forma única.

Analicemos la figura 27 otra vez ya que esta nos permite visualizar mejor las franjas. Las franjas que se proyectan del punto izquierdo hacia el derecho en la parte inferior las franjas toman una forma curva de la parte de abajo hacia arriba, esto quiere decir que esta parte esta sufriendo un momento de flexión, donde las muescas son la causa de la concentración de esfuerzos de flexión que la carga ocasiona en esa área, indicando que esta a compresión en la parte de abajo y tensión en la parte de arriba en la muesca. La parte negra que se logra visualizar indica el esfuerzo máximo de corte perpendicular al plano del modelo.

En las partes laterales del triangulo especialmente en el centro se nota que las franjas toman una curva mas suave como en línea recta hacia la parte de arriba o arista superior, esto nos indica que esta sección de área esta a tensión pura. En la parte inferior y superior cerca de los apoyos se ve una pequeña curva indicando posible compresión y tensión de esfuerzos de flexión. Esta es la forma como las tensiones se comportarían en una pieza o elemento en funcionamiento en forma de triangulo con una muesca al centro y muescas en las aristas para sujetarla. Una muy buena muestra para lograr un análisis ideal para compararlo con lo real.

**Figura 28 Fractura del modelo a tensión a 160 psi.**



**Fuente: Investigación de campo.**

Como vemos en la figura 28, la probeta fallo en las muescas que es donde se concentraron los esfuerzos, logrando comprobar el análisis previo por medio de las franjas que nos indicaban una alta concentración de esfuerzos debido a la carga aplicada y forma geométrica y la disposición de sujeción de la probeta, la carga última aplicada fue de 160 psi.

Para lograr una mejor distribución de los esfuerzos y disminuir la concentración de ellos, es importante considerar para el rediseño de este modelo que las muescas de las aristas estén un poco mas metidas logrando así tener más material en esa área y la muesca del centro hacerla de un mayor diámetro para que las cuatro muescas asimilen de mejor forma los esfuerzos.

Con todos estos cambios se espera que el modelo soporte una carga mucho mayor sin llegar a fracturarse. Todo ello mejora también todas sus propiedades mecánicas, su forma geométrica y peso que es el fin del ensayo de fotoelasticidad.

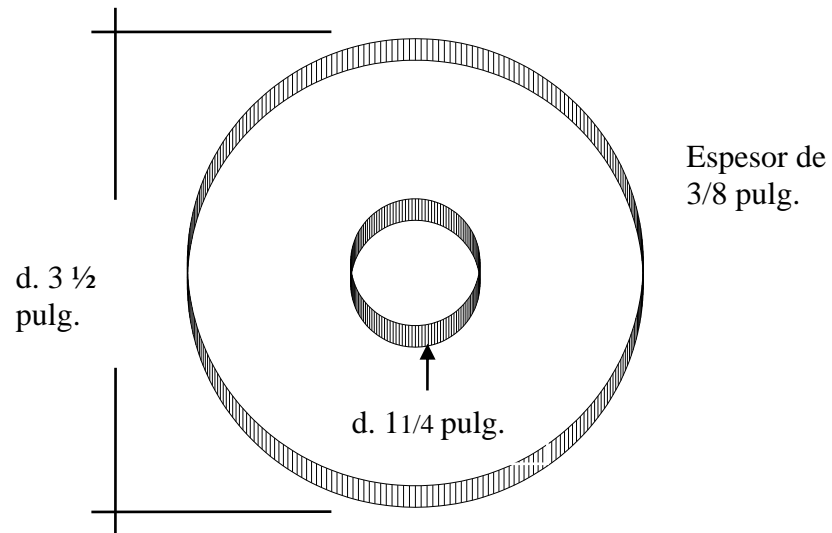
### **3.3 Comportamiento de esfuerzos a compresión**

La resistencia a compresión de un material es importante y como los esfuerzos se distribuyen es de especial interés en la prueba de fotoelasticidad, además la resistencia a tensión es solamente una fracción de su resistencia a compresión esta clase de ensayo se acepta generalmente como base de aceptación para materiales frágiles.

#### **3.3.1 Generalidades**

Los factores que afectan a las pruebas de compresión son similares a las que influyen a tensión por fotoelasticidad en una probeta de plexiglás como se muestra en la figura 29. La importancia de la concentración de esfuerzos puede mostrarse en este ejemplo. Si ponemos la probeta de la figura 29 de un material elástico que tenga una muesca y esta se somete a compresión diametral axial el esfuerzo en la orilla del agujero alcanzará un máximo de tres veces el esfuerzo normal.

**Figura 29 Probeta en forma de anillo para la prueba de compresión.**



**Fuente: Investigación de campo.**

Las cuales son:

- Alineación de los soportes de la probeta y probeta misma para que quede dentro del fotograma de carga.
- Tamaño y forma de la probeta, especialmente no debe sobrepasar de 4 x 5 x 3/8 pulg. Por las bajas cargas que se aplicaran para alcanzar a ver las líneas de deformación isoclinas y isocromáticas.
- Velocidad de carga tiene que ser lenta para lograr distinguir el progreso de las franjas de esfuerzos en la probeta y lograr el análisis adecuado.

- La temperatura a la que se realiza la prueba es la del ambiente para evitar que el material este sometido a otra clase de condición que afecte sus características mecánicas.
- La luz debe de estar en perfecto alineamiento con la probeta para abarcar toda el área que esta siendo afectada por la carga y así visualizar las franjas de esfuerzos.

### **3.3.2 Procedimientos**

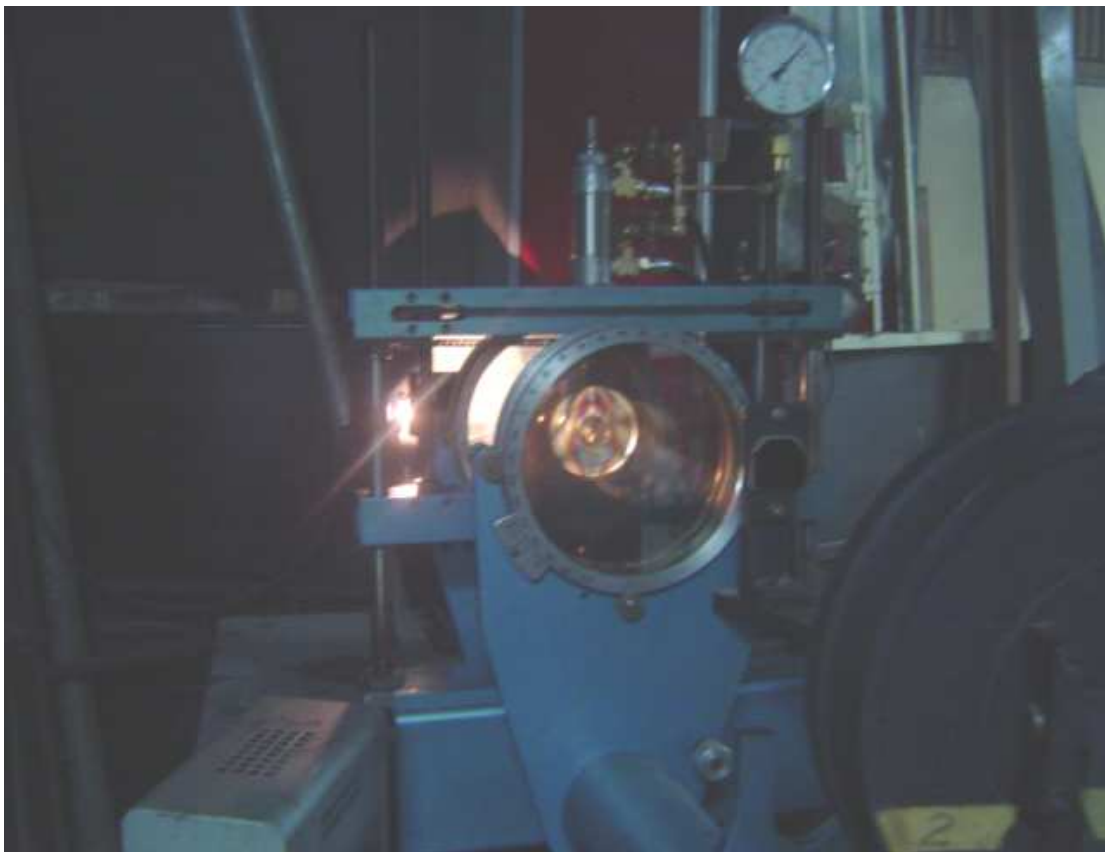
Para el análisis fotoelastico en la prueba de compresión diametral con la probeta ya descrita y los factores a tomar se procede de la siguiente manera.

- Se tiene ya la probeta semejante a un prototipo de un elemento de una estructura real, de plexiglás.
- Se toma el modelo con los dispositivos para dejarlo firme en una posición donde se pueda aplicar la carga en forma similar a como deberían aplicarse en funciones reales.
- Se le ilumina con luz polarizada circular monocromática colocándola dentro del espectro de luz
- Lentamente se incrementa la carga en el modelo, inmediatamente se observa una serie de franjas de colores que aparecen cada ves mas intensas y se prolongan a lo largo del modelo.

### 3.3.3 Gráficas

En la figura 30, vemos al polariscopio *Chapman* en una vista completa, como esta dispuesta la probeta y como la luz monocromática es emitida desde su fuente de luz, teniendo así una perspectiva de la manera como se realiza el ensayo a compresión por fotoelasticidad.

**Figura 30. Prueba a compresión vista completa del polariscopio.**



**Fuente: Investigación de campo.**

**Figura 31. Ensayo a compresión con una carga de 230 psi.**



**Fuente: Investigación de campo.**

### **3.3.4 Discusión**

Analicemos la figura 31, vemos el comportamiento típico de las franjas isocromáticas concentrándose alrededor del agujero del modelo. Esta región de concentración de esfuerzos nos alerta de una posible falla.



Aparecen a lo largo de todo el diámetro de la probeta, las franjas de color amarillo, azul, rojo y negras, estas últimas nos indican los esfuerzos de corte los cuales están relacionados con la diferencia de los esfuerzos normales máximos por la ecuación de franjas.

Las franjas negras se miran con gran nitidez, desde el punto de aplicación de la carga hasta la parte inferior donde esta apoyada la probeta, esta franja tiene partes curvas cerca del agujero y de esta misma región salen franjas de color negro las cuales se distribuyen en forma curva. La cantidad de franjas no se notan muy bien en la fotografía dejando un poco de duda sobre la existencia de la cantidad de ellas para los cálculos. Pero en el ensayo se pudo constatar que existen 6 franjas dos de las últimas que se alargan de punta a punta en todo el diámetro del modelo. Comenzando a contarlas desde el punto tangencial o punto de carga donde el esfuerzo es cero hacia el centro donde esta la muesca.

Para la banda de orden 6 tenemos:

$$\tau_{\text{Máx.}} = nf / t$$

$$\tau_{\text{Máx.}} = 6 b. \times 700 / 0.375 = 11,200 \text{ lb / pulg}^2$$

Tenemos un esfuerzo de corte máximo de 11,200 psi a lo largo de la franja de orden seis.

Para la determinación de los esfuerzos máximos que están paralelos a las franjas isocromáticas se determina, dividiendo la carga puntual total aplicada entre el número de orden de banda que aparece a lo ancho de la probeta que se desea analizar. En esta prueba la carga máxima es de 130 psi, aplicamos la ecuación 8.

$$\sigma = p / n$$

$$\sigma = 270 / 6 = 45 \text{ psi}$$

Tenemos un esfuerzo máximo normal de 45 psi.

### **3.3.5 Conclusiones**

En el anillo se logra ver una forma única debido a su forma geométrica, la distribución de esfuerzos que se da en el modelo es muy particular similar a la que sufriría un engrane con una carga a compresión, es una forma de asemejarlo a una pieza de elemento de una máquina claro que cambia en muchas características pero es una forma útil de saber como se comportaría un engrane a una carga aplicada a compresión y como esta lo asimilaría en un instante dado.

En la figura 32, el modelo se carga a 310 psi sufriendo una fractura en su sección transversal se logra ver una parte de color más clara ya que el material sufrió un corte cambiando el color normal de la probeta, como era de esperarse la falla esta localizada desde la parte superior donde se aplica la carga estática hasta el agujero, comprobando que el agujero es una parte débil y alta en concentración de esfuerzos. El esfuerzo cortante es el causante de que los elementos fallen. Cuando las piezas están en constante rotación las fallas por fatiga constituyen probablemente un 90 % de todas las fracturas comunes y se desarrollan después de un número de aplicaciones de carga generalmente a un nivel de esfuerzo inferior a la resistencia de cadencia del material.

**Figura 32 Falla de la probeta a compresión a 310 psi.**

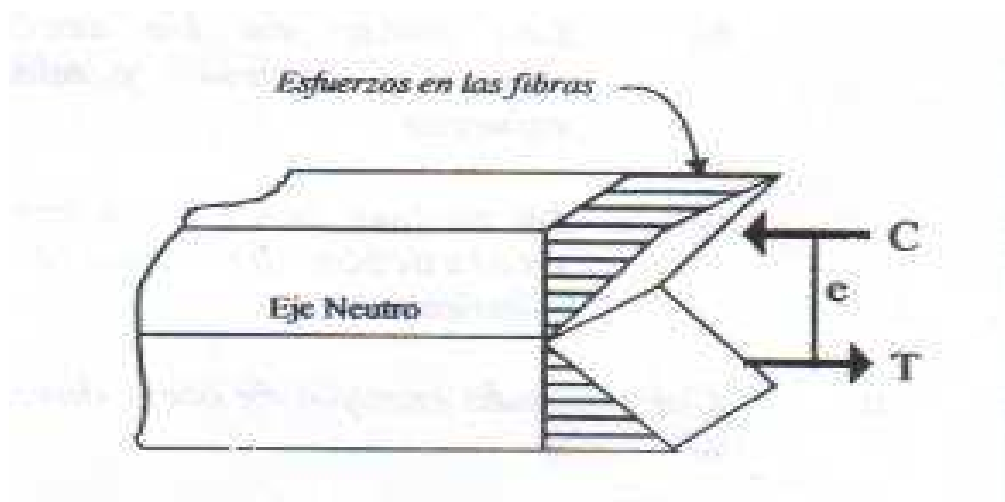


**Fuente: Investigación de campo.**

### 3.4 Comportamiento de esfuerzos a deflexión

Los esfuerzos de una viga que se carga se muestra en la figura 33, en su eje longitudinal inicialmente recto se deforma en forma curva, llamada curva de deflexión de la viga. Al cargar una viga en deflexión esta indicara compresión en una parte de la sección transversal y tensión en la restante. También surgen momentos flexionantes o pares de fuerzas resultantes. En elementos de maquinas y de estructuras es normal que la fuerza de flexión vaya acompañada de esfuerzos directos de tensión, compresión y corte transversal, longitudinal y de torsión.

**Figura 33 Distribución de fuerzas y resultantes en una viga en deflexión.**



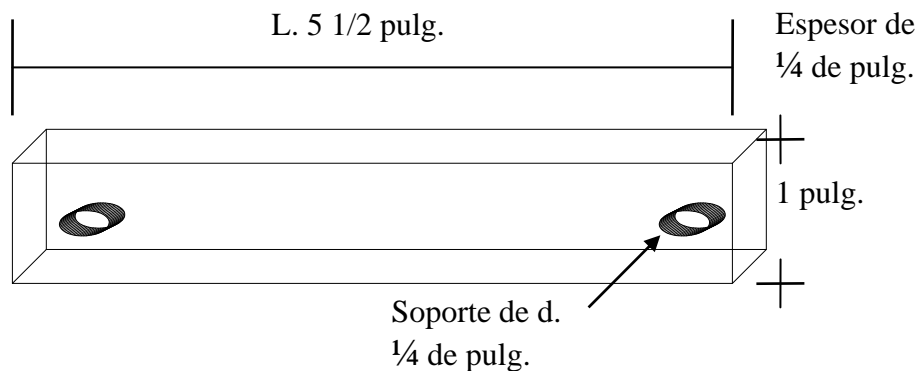
Fuente: Laboratorio de resistencia de materiales 1. Ing. Carlos E. Zeceña Girón.

Pág. 31.

### 3.4.1 Generalidades

Por conveniencia en situaciones donde surge el diseño de edificaciones donde existen deflexiones se idealiza y se supone que las cargas actúan en un plano de simetría de modo de no provocar torsión o flexión transversal y que las deflexiones son paralelas a la acción de las cargas. En el análisis fotoelástico la evaluación de comportamiento de esfuerzos en un material plástico se semeja a la evaluación de materiales comúnmente usados en la industria. Se someterá una viga de claro simple a una carga puntual, este modelo se ilustra en la figura 34. La importancia de la concentración de esfuerzos puede mostrarse en este ejemplo. Si ponemos la probeta de la figura 18 de un material elástico que tenga una muesca y esta se somete a deflexión el esfuerzo en la orilla de los agujeros alcanzará un máximo de tres veces el esfuerzo normal.

**Figura 34. Probeta en forma de viga simple apoyada en sus dos extremos para la prueba de deflexión.**



**Fuente: Investigación de campo.**

Esta prueba en particular se tomará algunos factores importantes los cuales son:

- Alineación de los soportes de la probeta misma para que quede dentro del fotograma de carga.
- Tamaño y forma de la probeta, especialmente no debe sobrepasar de 4 x 5 x 3/8 pulg. Por las bajas cargas que se aplicaran para alcanzar a ver las líneas de deformación isoclinicas e isocromáticas.
- Velocidad de carga tiene que ser lenta para lograr distinguir el progreso de las franjas de esfuerzos en la probeta y lograr el análisis adecuado.
- La temperatura a la que se realiza la prueba es la del ambiente para evitar que el material este sometido a otra clase de condición que afecte sus características mecánicas.
- La luz debe de estar en perfecta alineación con la probeta para abarcar toda el área que esta siendo afectada por la carga y así visualizar las franjas de esfuerzos.

### 3.4.2 Procedimientos

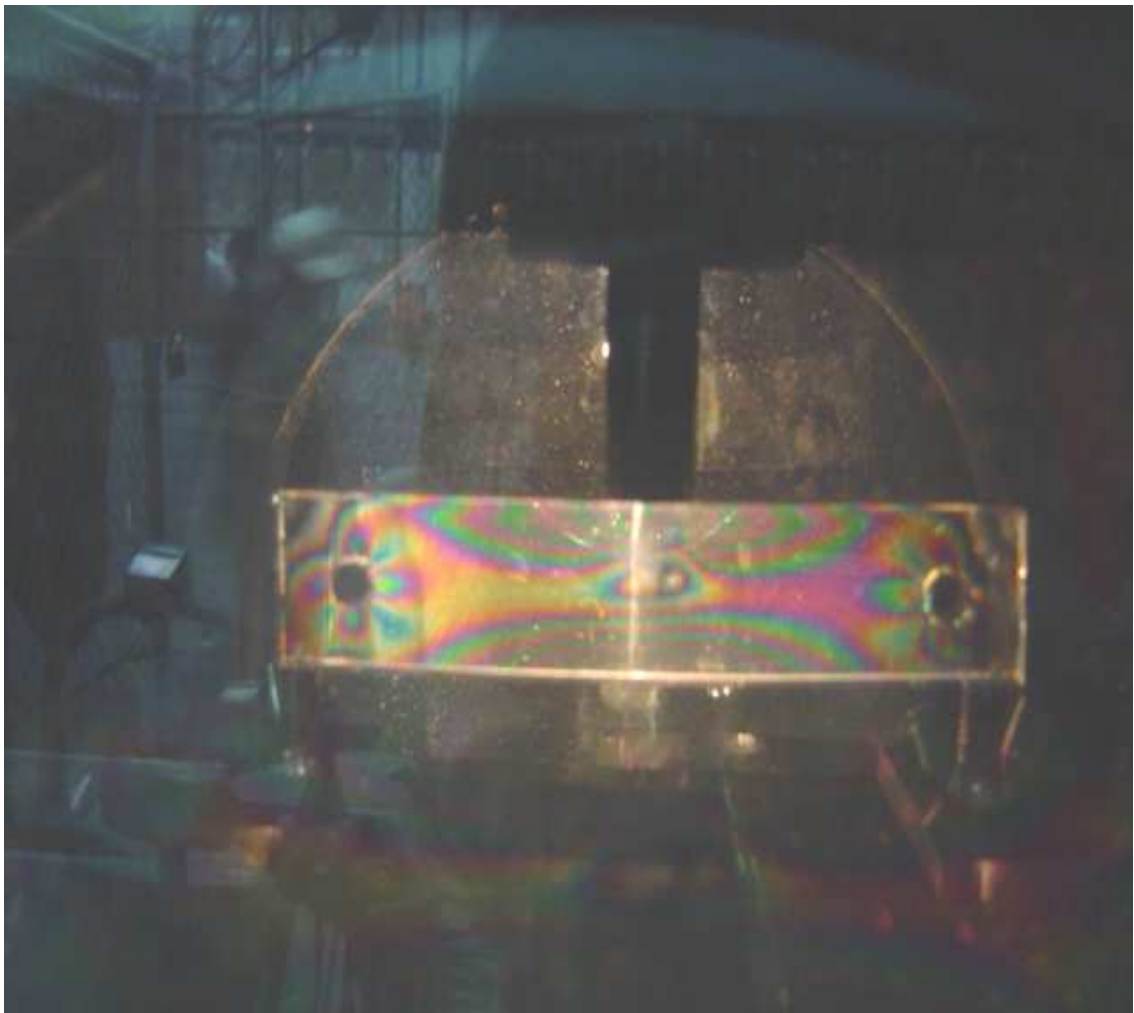
Para el análisis fotoelástico en la prueba de deflexión, con la probeta ya descrita y los factores a tomar se procede de la siguiente manera.

- Se tiene ya la probeta semejante a un prototipo de un elemento de una estructura real, de plexiglás.
- Se toma el modelo con los dispositivos para dejarlo firme en una posición donde se pueda aplicar la carga en forma similar a como deberían aplicarse en funciones reales.
- Se le ilumina con luz polarizada circular monocromática colocándola dentro del espectro de luz
- Lentamente se incrementa la carga en el modelo, inmediatamente se observa una serie de franjas de colores que aparecen cada vez más intensas y se prolongan a lo largo del modelo.

### 3.4.3 Gráficas

En la figura 35, vemos como la probeta en forma de viga simple esta puesta en dos apoyos con una carga puntual simulado de esta forma una aplicación real en la rama de la construcción donde son muy utilizadas.

**Figura 35 Prueba de deflexión a 75 psi.**



**Fuente: Investigación de campo.**



**Figura 36 Prueba a deflexión a 75 psi.**



**Fuente: Investigación de campo.**

#### **3.4.4 Discusión**

Analizando la figura 36, vemos las franjas o bandas isocromáticas como aparecen y la dirección que toman, dándonos información de los esfuerzos de corte y donde se concentran. Estas franjas del color del espectro de la luz que van del negro al amarillo aparecen a lo largo de la viga, comenzando del punto donde la carga es aplicada y se distribuye hasta dar en la muescas y apoyos fijos de la viga.

Se logra ver un punto negro en la parte central de la viga, este punto marca una banda de orden cero, como sucede en los bordes de la carga concentrada y los apoyos excepto en la vecindad de estos mismos.

El punto del centro, que permanece oscuro durante toda la aplicación de la carga, es un punto isotropico (diferencia cero de esfuerzos y los esfuerzos normales son iguales en todas las direcciones).

Este Punto oscuro nos da un punto de referencia para determinar nuestro esfuerzo máximo de corte en cada banda contando hacia fuera desde este punto hacia donde esta siendo aplicada la carga a lo largo de la ella, con una inspección cuidadosa. Aplicamos la ecuación 7.

Para la banda de orden 2 tenemos:

$$\tau_{\text{Máx.}} = nf / t$$

$$\tau_{\text{Máx.}} = 2 b. x 730 / .25 = 5840 \text{ lb / pulg}^2$$

Tenemos un esfuerzo de corte máximo de 5840 psi a lo largo de la franja de orden dos.

Para la determinación de los esfuerzos máximos que están paralelos a las franjas isocromáticas se determina dividiendo la carga puntual total aplicada entre el número de orden de banda que aparece a lo ancho de la probeta que se desea analizar. En esta prueba la carga es de 50 psi, aplicamos la ecuación 8.

$$\sigma = p / n$$

$$\sigma = 50 / 2 = 25 \text{ psi}$$

Tenemos un esfuerzo máximo normal de 25 psi.

### **3.4.5 Conclusiones**

Con la prueba de deflexión por fotoelasticidad hemos podido evaluar como se comportaría una viga simple a una carga puntual real, colocando una probeta con las mismas características y simulando las condiciones que pudiera tener para un análisis ideal, esta viga simple nos brinda información sobre los esfuerzos que se distribuyen y con simples cálculos determinar los esfuerzos de corte y esfuerzos normales a tensión y compresión que van desde el apoyo izquierdo al derecho con franjas que se curvan, esto es típico de una viga simple puesta a deflexión pura.

Esto nos dice que el centro de la viga y las muescas son áreas potenciales donde la pieza puede fallar ya que las líneas se concentran en dichas áreas o mejor dicho las líneas terminan y comienzan en esos puntos.

Los colores de la franjas nos dicen el retraso que la luz tiene al pasar por el modelo que esta sujeto a flexión, por ejemplo la luz roja existe un retraso de 536 nm y un anaranjado de 948 nm.

Los valores obtenidos durante la prueba por medio de la observación nos da una idea de la forma como una viga soporta dicha carga y mejor a un de cómo el esfuerzo de corte y normal se comporta y como la viga absorbe la carga distribuyéndola por todo el ancho de ella. Por lo tanto, la forma geométrica de la viga nos proporciona una estructura estable y confiable a la hora de implementarla en la construcción solo dependerá de la aplicación factores de seguridad.

## CONCLUSIONES

1. Para comprender y posteriormente realizar un análisis de un ensayo por fotoelasticidad es necesario un estudio de varios conceptos básicos de deformación, esfuerzos normales, de corte y como estos se concentran debido a la forma geométrica e irregularidades de la pieza, como muescas y cambios de diámetros en ejes. Esta técnica se trata a base de revisar muestras de plásticos birrefringentes que tiene la propiedad de modificar sus cualidades ópticas proporcionalmente a las deformaciones que le producen a las sollicitaciones mecánicas, de tal forma que, al ser deformados pueden observarse, mediante algunos arreglos de polarización de la luz, franjas de colores isocromáticas que se suceden siempre a incrementos constantes de deformación y por ende, de esfuerzos, de modo que basta con contar el número de franjas que aparecen en la probeta de ensayo, en un cierto punto para que, multiplicándolo por el factor de concentraciones de esfuerzos obtengamos el esfuerzo a que trabaja ese punto.
2. La operación del equipo del polariscopio *Chapman* no representa gran complicación para realizar los ensayos, ya que los componentes son fáciles de identificar y la maniobrabilidad es sencilla. Con una breve explicación de cada uno de los sistemas y una correcta posición de la probeta se obtienen las lecturas de las cargas.

3. La fotoelasticidad es una técnica muy precisa y con una enorme ventaja de presentar el estado de esfuerzos en toda la pieza instrumentada, permite además trabajar con modelos a escala elaborados a base de polímeros transparentes, como el *plexiglás*. El laboratorio de fotoelasticidad guía al diseño y rediseño para la reducción real de los esfuerzos en elementos hechos de material comúnmente usados como el acero.
  
4. Con los ensayos de tensión, compresión y deflexión se pudo evaluar el método de fotoelasticidad para los ensayos correspondientes, para determinar las tensiones de una carga en una estructura. Los valores obtenidos durante los ensayos son de beneficio para la comprensión de cómo está siendo afectado dicho elemento por las tensiones y no sólo poder hacerlo por medio de cálculos que son menos demostrativos y no ayudan a tener un conocimiento más profundo como lo brinda el ensayo por el método de fotoelasticidad por medio del polariscopio *Chapman*.

## RECOMENDACIONES

1. Es necesario profundizar sobre los conceptos básicos de óptica, polarización y propiedades mecánicas del polimetacrilato, ya que el presente trabajo sólo presenta un repaso de estos conceptos que son importantes. La implementación de otro material como la baquelita para fabricar una probeta con formas geométricas más reales aplicadas en máquinas, que nos permite una mejor resolución de las líneas isocromáticas sería adecuado para la innovación de nuevas formas de análisis de los esfuerzos, por medio del laboratorio de fotoelasticidad
2. Es importante el cuidado de todos los sistemas del polariscopio *Champan* a través de un mantenimiento. Revisándolo y limpiándolo periódicamente y también proveerle un lugar óptimo para desarrollar y promover el laboratorio de fotoelasticidad a los estudiantes de ingeniería mecánica.
3. Dentro de los ensayos hechos se usaron ecuaciones sencillas para el análisis de los esfuerzos, ya que sólo se cuenta con datos de presión y de las franjas isocromáticas, pero es preciso mejorar los ensayos por medio de la implementación de un deformómetro que nos proporcione datos de deformación. Logrando de esta forma implementar ecuaciones que nos proporcionen datos consistentes, donde podamos diferenciar entre un problema ideal y un problema que se da en la práctica como es la construcción de cualquier estructura industrial por medio del laboratorio de fotoelasticidad.





## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Gere-Timoshenko. **Mecánica de materiales**. Grupo Editorial Iberoamericana 2<sup>da</sup> ed. México D. F., 1986. Pág. 3-5
2. Paul E. Tippens. **Física 2**. MxGraw-hill. Colombia, 1996. Pág. 93-96, 143-145.
3. **Biblioteca de Consulta Microsoft ® Encarta ® 2005**. © 1993-2004 Microsoft Corporation. Reservados todos los derechos.
4. Sydney H. Avner. **Introducción a la Metalurgia Física**. McGraw-Hill 2<sup>da</sup> ed. México D. F. 1994. Pág. 637-637
5. **Propiedades mecánicas de los polímeros**  
[www.pslc.ws/spanish/styrene](http://www.pslc.ws/spanish/styrene)  
(Enero 2006)
6. **Polarización**  
[www.physics.uq.edu.au/ph128/6d](http://www.physics.uq.edu.au/ph128/6d).  
(Septiembre 2004)
7. Enciclopedia Salvat. **Ciencia y Tecnología**. Salvat editores, S.A. tomo 6 1<sup>ra</sup> ed. Barcelona 1964. Pág. 186
8. Avallone Eugene A; Baumeister III Theodore. **Marks Manual Del Ingeniero Mecánico**. McGraw-Hill 9<sup>na</sup> ed. Tomo 1. México D. F., 2003. Pág. 5-61.



## BIBLIOGRAFÍA

1. Ing. Carlos E. Zeceña Girón. Introducción a las prácticas de laboratorio de Resistencia de Materiales 1. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.
2. Avallone Eugene A; Baumeister III Theodore. **Marks Manual Del Ingeniero Mecánico**. McGraw-Hill 9<sup>na</sup> ed. Tomo 1. Mexico D.F., 2003. Pág. 5-61.
3. Albrecht Kuske, George Robertson. **Photoelastic Stress Análisis**. A Wiley Ltd. Great Britain, 1974.
4. **Análisis del esfuerzo mecánico**  
[www.2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/circulo/planos](http://www.2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/circulo/planos)  
(Enero 2006)



## **ANEXOS**

### **Guía de laboratorio de fotoelasticidad**

#### **Objetivo**

Determinar la distribución de esfuerzos en un modelo cargado a tensión, compresión y Deflexión por medio del método de fotoelasticidad.

#### **Introducción**

El problema de determinar la resistencia mecánica en un elemento, es importante en el proyecto de piezas de maquinaria cualquiera que sea su aplicación. Por lo general, las ecuaciones de equilibrio son aplicables a los materiales ideales sometidos a fuerzas, pero estas no dicen como están siendo afectados los elementos por las tensiones y como se distribuyen para mejorar su forma para evitar tanto como sea posible la concentración de esfuerzos en puntos sometidos a cargas grandes. Es esta falta de conocimiento o apreciación del comportamiento de tensiones en los materiales en las condiciones reales de servicio las que llevan a costosos fracasos en la rama ingenieril. Aprovechando el método de fotoelasticidad una forma sencilla para el análisis de concentración de esfuerzos localizados llegamos a un conocimiento amplio de este tema importante para el ingeniero mecánico y llenar el vacío con información valiosa. Para todo ello revisaremos temas básicos de esfuerzos y óptica para llegar al ensayo de fotoelasticidad y poder asimilarlo de la mejor forma.

**Puntos teóricos básicos:**

¿Que es esfuerzo normal y de corte?

Ref. 1.1 (Pág. 1)

¿Cuales son los efectos de las concentraciones de esfuerzos?

Ref. 1.1.1 (Pág. 6)

¿Qué es Polimetacrilato?

Ref. 1.2.1 (Pág. 10)

¿Que es Refracción y polarización?

Ref. 1.3 (Pág.13) Ref. 1.5 (Pág.21)

¿Que es Fotoelasticidad?

Ref. 1.6 (Pág. 25)

¿Que es la ley óptica de los esfuerzos?

Ref. 1.6.2 (Pág. 28)

¿Que es el Polariscopio *Chapman*?

Ref. 2.2 (Pág. 38)

¿Cuales son los componentes del polariscopio *Chapman*?

Ref. 2.3 (Pág. 39)

**Precauciones de seguridad especiales:** Mantenga sus manos lejos de las partes del marco carga y los elementos en movimiento.

**Nota:** Verifique el desplazamiento en la carga y leer la presión en el manómetro antes de empezar cada parte del experimento.

## **Procedimiento**

### **A. Método de fotoelasticidad:**

Para el análisis fotoelástico los factores a tomar se proceden de la siguiente manera.

1. Se tiene ya la probeta semejante a un prototipo de un elemento de una estructura real, de plexiglás.
2. Se agarra el modelo con los dispositivos para dejarlo firme en una posición donde se pueda aplicar la carga en forma similar a como deberían aplicarse en funciones reales.
3. Se le ilumina con luz polarizada circular monocromática colocándola dentro del espectro de luz
4. Lentamente se incrementa la carga en el modelo, inmediatamente se observa una serie de franjas de colores que aparecen cada vez más intensas y se prolongan a lo largo del modelo.

### **B. Método de orden de bandas:**

1. Antes de cargar el modelo (probeta), encender el polariscopio *Chapman* y observar el modelo.
2. Incrementar de 20 en 20 psi y observar el despliegue de las isocromáticas en el modelo.

3. Mida las direcciones de las tensiones principales en puntos arbitrarios que son marcados en la capa del modelo fotoelastico.
  - a. Oriente el polarizador/analizador, para que su eje de la referencia sea  $90^0$  a la dirección de carga.
  - b. Desconecte el analizador, mueva la perrilla totalmente a la izquierda. Observe las isoclinicas de color negro. Ellas corresponden a los ejes de tensión principal que son paralelo al eje de la referencia.
  - c. Ruede el polarizador y analizador juntos con la perrilla, hasta que las isoclinicas negras crucen el punto de referencia. Aclare el ajuste para que la porción más oscura de la isoclinica cubra el punto. Marque esta dirección.
4. Repita esto para cada prueba a realizar.

### **Reducción de datos**

- Use el coeficiente de esfuerzo óptico ( $f = -700 / \text{franja}$ ) en cada punto marcado.
- Use las ecuaciones de la 1-8 para los cálculos de análisis



## Discusión

1. Determine el esfuerzo de corte máximo por el método del orden de franjas
2. Determine el esfuerzo principal normal
3. Determine la dirección de los esfuerzos principales para los ángulos de  $75^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ ,  $25^{\circ}$ , con respecto al eje de referencia a  $90^{\circ}$ .

## PROFORMA PARA IMPLEMENTACIÓN DEL POLARISCOPIO CHAPMAN PARA EL LABORATORIO DE FOTOELASTICIDAD

Para poder realizar los laboratorios de fotoelasticidad en el polariscopio *Chapman* se reparo algunos sistemas que estaban dañados por la misma antigüedad del equipo que son propios del polariscopio y que lo hacen funcionar correctamente, como lo es el sistema eléctrico, neumático y piezas de sujeción para las probetas a utilizar. Dentro de esta misma proforma también se considero la hecha de las probetas, ya estas tienen una forma geométrica determinada, para esto se mando a maquinarse en torno y fresadora. Todo este tipo de reparaciones tiene un costo. A continuación se detalla el costo de material usado en la siguiente tabla.

**Tabla VI. Costos de implementación para el polariscopio *Chapman*.**

Cantidad	Descripción	Precio	
		Unitario	Total
1	Embolo de doble acción (BIMBA)	Q 936.00	Q 936.00
3	Probetas trabajos de maquinado	Q 160.00	Q 160.00
2	Tee 1/4* de cañería	Q 29.15	Q 58.30
1	Reductor de 1/2* a 1/4*	Q 52.75	Q 52.75
2	Conector codo 906 1/4' x 1/4'	Q 25.62	Q 51.24
2	Codo hembra 1/4* a 1/4*	Q 25.56	Q 51.12
4	Metros de cable TSJ 3x12	Q 9.96	Q 39.85
2	Niple reductor 1/4* x 1/8*	Q 9.27	Q 18.54
2	Reductor de 1/2* a 1/8*	Q 4.03	Q 8.06
1	Tuerca de un 1/4*	Q 2.60	Q 2.60
0.25	Pie de tubo de cobre 1/4*	Q 1.96	Q 1.96
1	Gollete de un 1/4*	Q 0.67	Q 0.67
<b>Costo Total</b>		<b>Q 1,381.09</b>	

**Fuente:** Investigación de campo.

El costo total es Q1381.09, para poder habilitar el Polariscopio *Chapman* y de esta manera poder realizar los ensayos para el laboratorio de Fotoelasticidad se detalla en la tabla VI.

## **IMPORTANCIA DE LA FOTOELASTICIDAD EN EL ÁREA DE INGENIERÍA CIVIL**

La fotoelasticidad se ocupa en el área civil de una infinidad de análisis. Cuando se diseña estructuras propuestas o estructuras ya existentes a menudo se requiere determinar los esfuerzos máximos que están afectando a la estructura, el ensayo por fotoelasticidad determina no solo los esfuerzos si no vemos en el polariscopio como estos esfuerzos se distribuyen.

Diseñar una estructura requiere invariablemente que se realicen análisis de la misma a menudo más de una vez, y otro término a considerar es la optimización que es parte del diseño. Optimización es la tarea de diseñar la estructura para un fin particular, como por ejemplo la estructura de peso mínimo. Así el laboratorio de fotoelasticidad representa una ayuda importante para el ingeniero civil en el área de la práctica para diseñar y rediseñar estructuras, como por ejemplo puentes, edificios o cualquier proyecto donde estén involucrados elementos sometidos a compresión, tensión y deflexión.