



**Universidad del Azuay**

**Facultad de Ciencia y Tecnología**

**Escuela de Ingeniería Mecánica Automotriz**

*Construcción y aplicación de un Analizador de Materiales  
Foto elásticos y elaboración de un Manual de Instrucciones  
para el laboratorio de Ingeniería Mecánica Automotriz*

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de  
Ingeniero Mecánico Automotriz**

**Autores**

**Luís Adrián Alvarado Sigüenza  
Mario Esteban Bermeo Alvarado**

**Director**

**Ing. Hernán Viteri Cerda**

**CUENCA – ECUADOR  
2008**

## **DEDICATORIA**

Nada termina ni nada comienza si no es por que Dios lo permite, él es quien nos regala el don de la vida y nos da la libertad para escoger nuestro camino, es nuestra responsabilidad respetar la vida lo mejor que podamos. Doy gracias a Dios quien me permite existir y desarrollarme integralmente como ser humano.

Con mucha gratitud a mis padres, familiares y amigos, que Dios los bendiga a cada uno de ellos todos los días de su vida.

A María Auxiliadora, Don Bosco y a mis queridos hermanos Salesianos.

Luis Adrián Alvarado Sigüenza

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo de graduación a mi esposa, a mi hija Danielita, a mis padres y hermanos los cuales me acompañaron en el trayecto de mi vida universitaria, y supieron apoyarme en los momentos más difíciles. Con mucha gratitud a mis profesores y a la universidad.

Mario Esteban Bermeo Alvarado

## **AGRADECIMIENTO**

A nuestros queridos padres quienes se han esmerado por darnos lo mejor  
y por habernos apoyado en todos los momentos,  
enseñándonos el valor del sacrificio y del trabajo.

Con mucha gratitud a las autoridades y maestros de la Facultad de Ciencia y  
Tecnología de nuestra querida Universidad del Azuay que nos han sabido  
brindar siempre lo mejor de ellos colaborando con el enriquecimiento de  
nuestros conocimientos, de manera especial nuestra gratitud sincera al  
Ing. Hernán Viteri, director de nuestro trabajo de grado,  
quien supo guiarnos en el desarrollo de este trabajo.

## RESUMEN

La foto elasticidad es una técnica experimental utilizada para la medición de tensiones y esfuerzos en los materiales por medio del efecto mecánico del fenómeno de la birrefringencia. Esta técnica es especialmente utilizada para el estudio de objetos con formas irregulares y concentraciones de esfuerzos, tal como son las piezas con roturas o curvas, componentes estructurales con cortes o agujeros.

Este método proporciona unos medios visuales importantes para la observación de las características de los esfuerzos principales de un objeto a través de la luz proyectada en una pantalla. El polariscopio es una herramienta esencial para poder determinar las tensiones diseñadas durante la fabricación, este es el que permite la visualización de los esfuerzos en los materiales transparentes

## **ABSTRACT**

The Photo elasticity is an experimental technique for the measurement of stresses and strains in material objects by means of the phenomenon of mechanical birefringence. This is especially useful for the study of objects with irregular boundaries and stress concentrations, such as pieces of machinery with notches or curves, structural components with slits or holes.

The method provides a visual means of observing overall stress characteristics of an object by means of light patterns projected on a screen. The Polariscope is an essential tool for determining strain patterns developed during fabrication, it permits immediate determination of strains in most transparent materials.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos.....	iv
Resumen.....	v
Abstract.....	vi
Índice de contenidos.....	vii
Índice de ilustraciones y cuadros.....	ix
Índice de anexos.....	xii
 Introducción.....	 1

### CAPÍTULO 1: PRINCIPIOS GENERALES

1.1. Foto elasticidad.....	2
1.2. Materiales ópticos.....	2
1.3. La luz como fenómeno ondulatorio.....	3
1.3.1. Longitud de onda.....	4
1.3.1.1. Onda.....	4
1.3.1.2. Rayo.....	4
1.3.1.3. Frecuencia.....	4
1.3.2. Velocidad de propagación.....	5
1.3.3. Propiedades ópticas de la luz.....	6
1.3.3.1. Absorción.....	6
1.3.3.2. Reflexión.....	6
1.3.3.3. Transmisión.....	6
1.3.3.4. Refracción.....	7
1.3.3.5. Dispersión.....	7
1.3.3.6. Difracción.....	7
1.4. Polarización.....	8
1.4.1. El polarizador.....	8
1.4.2. Laminas retardadoras de $\frac{1}{2}$ y $\frac{1}{4}$ de onda.....	9
1.4.3. Luz lineal y circularmente polarizada.....	10
1.5. Birrefringencia.....	12
1.5.1. Materiales birrefringentes.....	12
1.6. Ley de Brewster o ley óptica de las tensiones.....	13
1.6.1.- Angulo de polarización de Brewster.....	13
1.7. Datos foto elásticos.....	15
1.7.1. Visualización de los esfuerzos.....	15
1.7.2. Isóclinas.....	16
1.7.3. Isocromáticas.....	18
1.8. Comportamiento de la luz en el polariscopio lineal.....	20
1.8.1. Polariscopio paralelo y cruzado.....	20
1.8.2. Tensión y coeficientes ópticos.....	21
1.8.3. Vectores de luz.....	24

1.8.3.1. Vectores de un polariscopio cruzado.....	24
1.8.3.2. Vectores de un polariscopio paralelo.....	25
1.9. Comportamiento de la luz en el polariscopio circular.....	25
1.9.1. Luz polarizada circular.....	25
1.9.2. Efectos de las placas de $\frac{1}{4}$ onda.....	26
1.10. Polariscopios.....	28
1.10.1. Polariscopio de difusión de luz.....	28
1.10.2.- El polariscopio de lentes.....	29

## CAPÍTULO 2: APLICACIÓN DE PROBLEMAS MECÁNICOS

2.1. Generalidades.....	32
2.2. Alcance y grado de precisión.....	32
2.2.1. Análisis de esfuerzos.....	32
2.2.2 Simplificación del problema del análisis de esfuerzos.....	33
2.2.3. Fundamentos sobre análisis de esfuerzos y deformaciones.....	37
2.2.3.1. Esfuerzo.....	38
2.2.4. Estado de esfuerzo y deformación en problemas dimensionales.....	38
2.3. Materiales foto elásticos.....	41
2.3.1. Descripción.....	41
2.3.2. Clasificación.....	42
2.3.3. Especificaciones de los materiales foto elásticos.....	42
2.3.4. Tipos de materiales foto elásticos.....	43
2.3.4.1. Policarbonato.....	43
2.3.4.2. Resinas epoxy.....	43
2.3.4.3. Araldita.....	44
2.3.4.4. Plexiglás.....	44
2.3.4.5. Lexan.....	45
2.3.5. Características de los principales materiales foto elásticos.....	45
2.3.6. Selección del material de trabajo.....	46
2.3.6.1. Características del material de la Araldita.....	46

## CAPÍTULO 3: ANÁLISIS MATEMÁTICO

3.1. Datos específicos.....	48
3.2. Construcción de la línea isocromática.....	49
3.2.1. Cálculo de la deformación total de la magnitud ( $a$ ).....	49
3.2.2. Cálculo de la deformación unitaria ( $\epsilon_y$ ).....	49
3.2.3. Cálculo de la longitud final en el eje $y$ .....	50
3.2.4. Cálculo de la deformación unitaria ( $\epsilon_x$ ).....	50
3.2.5. Cálculo de la deformación total ( $\delta_x$ ).....	51
3.2.6. Cálculo de la longitud final en el eje ( $x$ ).....	51
3.2.7. Cálculo de las variaciones angulares ( $\beta$ ) y ( $\alpha$ ).....	52
3.2.8. Cálculo de la suma de variaciones angulares.....	53
3.2.9. Cálculo de la matriz de deformación total ( $\epsilon$ ).....	53
3.2.10. Cálculo de la deformación del espesor.....	55

3.2.11. Cálculo del coeficiente de Lamé.....	55
3.2.12. Cálculos del modulo de rigidez.....	56
3.2.13. Cálculo de las tensiones normales en los planos “x” y “y” a compresión.....	56
3.2.14. Cálculo del esfuerzo cortante en el plano x; y.....	57
3.2.15. Cálculo de los esfuerzos principales.....	58
3.2.16. Construcción del círculo de Mohr.....	58
3.2.17. Cálculo de las direcciones principales.....	59
3.2.18. Cálculo del esfuerzo cortante máximo.....	60
3.2.19. Cálculo de la deformación transversal unitaria máxima.....	60
3.2.20. Construcción de la isocromática.....	60

#### **CAPÍTULO 4: CONSTRUCCIÓN DEL POLARISCOPIO DE DIFUSIÓN DE LUZ**

4.1. Generalidades.....	62
4.2. Descripción del equipo.....	63
4.3. Filtros polarizadores.....	64
4.3.1. Especificaciones técnicas.....	64
4.4. Filtro retardador de $\frac{1}{4}$ de onda.....	65
4.4.1. Especificaciones técnicas.....	65
4.5. Estructura soporte de los filtros.....	66
4.5.1. Soporte de filtros.....	67
4.5.2. Escala de regulación.....	68
4.6. Fuente de luz.....	68
4.6.1. Luz blanca.....	69
4.6.2. Luz monocromática.....	69
4.6.3. Pantalla de difusión de luz.....	69
4.7. Prensa neumática.....	70
4.7.1. Sistema neumático.....	70
4.7.2. Estructura de pruebas.....	71
4.8. Tablero de control.....	71
4.9. Preparación de la probeta.....	72
4.9.1. Técnica para la preparación de los materiales foto elásticos....	72
4.9.2. Obtención de la probeta a temperatura ambiente.....	73

#### **CAPÍTULO 5: EXPERIMENTACIÓN**

5.1. Generalidades.....	74
5.2. Campo de luz circularmente polarizada.....	74
5.2.1. Fondo oscuro.....	75
5.2.1.1. Fondo oscuro y filtros de $\frac{1}{4}$ de onda cruzados.....	75
5.2.1.2. Fondo oscuro y filtros de $\frac{1}{4}$ de onda paralelos.....	76
5.3.2. Fondo claro.....	77
5.3.2.1.- Fondo claro y filtros de $\frac{1}{4}$ de onda cruzados.....	78
5.3.2.2.- Fondo claro y filtros de $\frac{1}{4}$ de onda paralelos.....	79

<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>80</b>
Glosario.....	81

<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	83
<b>ANEXOS</b> .....	85

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES Y CUADROS

### CAPÍTULO 1

Gráfico 1-1: Onda de propagación de la luz.....	3
Gráfico 1-2: Longitud de onda.....	4
Gráfico 1-3: Ondas recogidas por el ojo humano.....	4
Gráfico 1-4: Transmisión de la luz a través del polarizador.....	8
Gráfico 1-5: Transformación de la luz a través del filtro de 1/4 de onda.....	9
Gráfico 1-6: Dirección de vibración de la luz polarizada.....	10
Gráfico 1-7: Plano de polarización.....	11
Gráfico 1-8: Obtención de luz polarizada circular.....	11
Gráfico 1-9: Fenómeno de birrefringencia.....	12
Gráfico 1-10: Angulo de refracción.....	14
Gráfico 1-11: Angulo de polarización.....	14
Gráfico 1-12: Datos foto elásticos.....	17
Gráfico 1-13: Trazo de isoestáticas.....	19
Gráfico 1-14: Trazo de isoestáticas.....	20
Gráfico 1-15: Estados del polariscopio.....	19
Gráfico 1-16: Vectores de luz del polariscopio cruzado.....	24
Gráfico 1-17: Estados del polariscopio circular.....	26
Gráfico 1-18: Plano de la luz circularmente polarizada.....	27
Gráfico 1-19: Disposición del polariscopio de difusión de luz.....	28
Gráfico 1-20: Polariscopio de difusión de luz simple.....	29
Gráfico 1-21: Polariscopio de lentes.....	30

Gráfico 1-22: Polariscopio de lentes desplazable.....30

Gráfico 1-23: Polariscopio de lentes móviles.....31

## **CAPITULO 2**

Gráfico 2-1: Estado de esfuerzo en un cuerpo.....33

Gráfico 2-2: Cuerpo geométrico y carga simétrica.....34

Gráfico 2-3: Cuerpo cargado simétricamente en dos planos.....35

Gráfico 2-4: Estado de esfuerzo en un cuerpo con más de dos planos.....35

Gráfico 2-5: Estado de esfuerzo en una placa con carga en un plano.....36

Gráfico 2-6: Deformación.....38

Gráfico 2-7: Estado de esfuerzos.....39

Gráfico 2-8: Circulo de mohr.....40

## **CAPITULO 3**

Gráfico 3-1: Modelo foto elástico.....48

Gráfico 3-2: Deformaciones angulares de la probeta.....52

Gráfico 3-3: Diagrama de esfuerzos.....59

Gráfico 3-4: Construcción de la isocromática.....61

## **CAPITULO 4**

Gráfico 4-1: Espectros foto elásticos.....62

Gráfico 4-2: Características de transmisión del polarizador.....64

Gráfico 4-3: Filtros.....65

Fotografía 4-1: Banco de pruebas foto elástico.....63

Fotografía 4-2: Estructura de filtros con el polarizador fijo y  $\frac{1}{4}$  de onda móvil.....66

Fotografía 4-3: Estructura de filtros con el polarizador y  $\frac{1}{4}$  de onda móvil.....67

Fotografía 4-4: Fuente de luz.....68

Fotografía 4-5: Pantalla de difusión de luz.....	69
Fotografía 4-6: Prensa neumática.....	70
Fotografía 4-7: Tablero de control.....	72
Fotografía 4-8: Probeta.....	72
Fotografía 4-9: Molde de la probeta.....	73

## **CAPITULO 5**

Gráfico 5-1: Polarizadores cruzados.....	75
Gráfico 5-2: Filtros polarizadores cruzados y $\frac{1}{4}$ de onda cruzados.....	75
Gráfico 5-3. Filtros polarizadores cruzados y $\frac{1}{4}$ de onda paralelos.....	76
Gráfico 5-4: Polarizadores paralelos.....	77
Gráfico 5-5: Filtros polarizadores paralelos y $\frac{1}{4}$ de onda cruzados.....	78
Gráfico 5-6: Filtros polarizadores paralelos y $\frac{1}{4}$ de onda paralelos.....	79
Fotografía 5-1: Probeta en campo de luz blanca.....	74
Fotografía 5-2: Probeta en campo de luz monocromática.....	75
Fotografía 5-3: Isocromáticas en presencia de luz blanca.....	76
Fotografía 5-4. Isoclinas en presencia de luz de monocromática.....	76
Fotografía 5-5: Isocromáticas en presencia de luz blanca.....	77
Fotografía 5-6: Isoclinas en presencia de luz de monocromática.....	77
Fotografía 5-7: Isocromáticas en presencia de luz blanca.....	78
Fotografía 5-8: Isoclinas en presencia de luz de monocromática.....	78
Fotografía 5-9: Isocromáticas en presencia de luz blanca.....	79
Fotografía 5-9: Isoclinas en presencia de luz de monocromática.....	79

## ÍNDICE DE ANEXOS

Tabla A1: Valores de los índices de refracción de algunos materiales birrefringentes.....	85
Tabla A2: Propiedades ópticas y mecánicas de materiales foto elástico.....	85
Tabla A3: Propiedades de materiales foto elásticos a temperatura ambiente.....	86
Tabla A4: Propiedades de resinas epoxy a temperatura crítica.....	86

Alvarado Sigüenza Luís Adrián  
Bermeo Alvarado Mario Esteban  
Ing. Hernán Viteri  
Marzo del 2008

**CONSTRUCCIÓN Y APLICACIÓN DE UN ANALIZADOR DE  
MATERIALES FOTO ELÁSTICOS Y ELABORACIÓN DE UN  
MANUAL DE INSTRUCCIONES PARA EL LABORATORIO  
DE INGENIERÍA MECÁNICA AUTOMOTRIZ**

**INTRODUCCIÓN**

En vista de que en la actualidad la Ingeniería Mecánica cuenta con variados procedimientos para el diseño de elementos mecánicos, desde los más avanzados programas computacionales hasta la técnica de visualización de esfuerzos conocida como la Foto elasticidad, se ha visto conveniente implementar en la Escuela de Ingeniería Mecánica Automotriz un equipo para realizar un “Análisis de esfuerzos” mecánicos, el mismo que servirá como herramienta didáctica para los alumnos de esta especialidad, y de esta manera reforzar los conocimientos.

La foto elasticidad tiene la función de permitir visualizar la concentración de esfuerzos que se producen en los elementos mecánicos sometidos a una carga, determinando las zonas más críticas en donde pueden producirse fallas. Estos modelos son construidos a escala en un material plástico transparente foto elástico.

El estudiante luego de realizar los cálculos de diseño, la técnica de la foto elasticidad le ayudará a verificar de una manera visual y real la concentración de los esfuerzos que se lleguen a producir en los puntos críticos del elemento cuando este se encuentre sometido a un determinado esfuerzo.

A través de esta técnica podemos mejorar el diseño de los elementos y partes mecánicas, con lo cual podremos obtener productos de mejor calidad en el mercado.

## **CAPÍTULO 1**

### **PRINCIPIOS GENERALES**

#### **1.1. Foto elasticidad**

La técnica de la foto elasticidad se sirve de la luz polarizada y de la birrefringencia de los materiales foto elásticos, sometidos a tensión y al paso de la luz polarizada para observar las líneas isóclinas e isocromáticas que son datos foto elásticos con los cuales se determina los sitios y valores de los esfuerzos críticos.

#### **1.2. Materiales ópticos**

Se puede considerar tres tipos 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 electromagnético 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 un esfuerzo mecánico, los materiales que presentan esta característica son llamados foto elásticos.

- Los materiales que presentan coeficiente de absorción anisotrópico, son materiales que absorben selectivamente la componente de la onda electromagnética en una orientación específica, a estos materiales se les llama polarizadores.

### 1.3. La luz como fenómeno ondulatorio

La luz es una forma de energía radiante como se muestra en la gráfico 1-1. A partir de un nivel de reposo se produce una progresiva vibración de partículas que como consecuencia originan una onda que se propaga en dirección perpendicular a la de vibración, por tanto, el resultado de la vibración de partículas adyacentes es una propagación de la onda resultante.

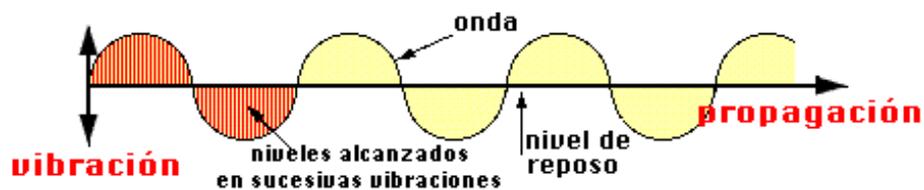
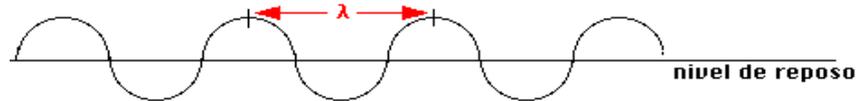


Grafico 1-1. Onda de propagación de la luz

Para la explicación de las propiedades ópticas de los cristales es importante tener siempre en cuenta que las direcciones de vibración y de propagación son perpendiculares. Esto es para todos los medios cuyas propiedades físicas no dependen de la dirección (isótropos), pero en determinadas condiciones dependen de la dirección de un agente (anisótropos), el ángulo puede ser diferente de los  $90^\circ$ , sin embargo, se puede considerar que ambas son siempre perpendiculares (aceptar esto implicará en gran medida las explicaciones sin que se afecten la esencia de los conceptos). Por otra parte, es igualmente importante recordar que la propagación es un simple resultado de la vibración y por tanto será esta la que condicione a aquella.

**1.3.1. Longitud de onda.-** Es la distancia entre dos puntos en fase, siendo aquellos que se encuentran vibrando de la misma manera a igual distancia del nivel de reposo y moviéndose en la misma dirección, ver gráfico 1-2.

$\lambda$  = Longitud de onda, en *nm* (*nanometros*)

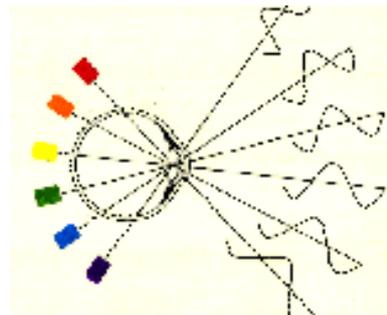


**Gráfico 1-2. Longitud de onda**

**1.3.1.1. Onda.-** Es el movimiento sinusoidal causado por un grupo de partículas vibrando.

**1.3.1.2. Rayo.-** Es el camino rectilíneo seguido por la onda o camino recorrido por la luz. Las ondas de diferente longitud de onda se producen, cuando son recogidas por el ojo humano, sensaciones fisiológicas correspondientes a los diferentes colores. Estos valores que están representados en la gráfico 1-3, aproximadamente son:

- Violeta = 410 milimicras
- azul = 480 milimicras
- verde = 530 milimicras
- amarillo = 580 milimicras
- naranja = 620 milimicras
- rojo = 710 milimicras



**Gráfico 1-3. Ondas recogidas por el ojo humano**

**1.3.1.3. Frecuencia.-** Es el número de oscilaciones por segundo, siendo una oscilación la parte de onda comprendida entre dos puntos en fase. La frecuencia regula la velocidad de propagación.

**1.3.2. Velocidad de propagación.-** Cuando un rayo luminoso de luz monocromática incide sobre la cara de un material transparente se produce el fenómeno de la refracción, el rayo cambia de dirección y varía la velocidad de propagación. Se define entonces el índice de refracción<sup>1</sup> como la relación entre la velocidad de la luz en el vacío y dentro del material. Ciertos cristales transmiten dos rayos diferentes (ordinario y extraordinario), polarizados en planos ortogonales, propagándose cada uno de ellos en el cristal con velocidades diferentes, es decir, el material presenta índices de refracción distintos para los dos rayos.

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.1)$$

Donde:

$n$  = Índice de refracción (*adimensional*)

$c$  = velocidad de la luz en el vacío (*m/s*)

$v$  = velocidad dentro del material (*m/s*)

Por esta razón, el índice de refracción de los minerales es siempre mayor de 1, varían entre 1.43 y 3.22; siendo los valores más normales alrededor de 1.6, el índice de refracción del aire es considerado como 1.

De lo anteriormente expuesto se desprende que la velocidad y el índice de refracción son valores inversos, a alta velocidad le corresponderá un índice de refracción pequeño y viceversa. En los medios anisótropos como son la mayoría de los minerales, la velocidad y por tanto el índice de refracción varían con la dirección de vibración de la luz.

<sup>1</sup> Índice de refracción. *Jean-Jacques Amman. "Polarización de la luz".*  
<http://fisica.usach.cl/~jammann/LabOpticaGuias/G5-PolarizaWEBb.pdf>

**1.3.3. Propiedades ópticas de la luz.-** Cuando la luz incide sobre un cuerpo su comportamiento varía según sea la superficie y constitución de dicho cuerpo y la inclinación de los rayos incidentes, dando lugar a los siguientes fenómenos físicos:

**1.3.1.1. Absorción.-** Al incidir un rayo de luz visible sobre una superficie negra, mate y opaca, es absorbido prácticamente en su totalidad, transformándose en calor.

**1.3.3.2. Reflexión.-** Cuando la luz incide sobre una superficie lisa y brillante, esta se refleja totalmente en un ángulo igual al de incidencia (reflexión especular). Si la superficie no es del todo lisa y brillante se refleja sólo parte de la luz que le llega y además lo hace en todas direcciones como en el caso de los reflectores fotográficos. A este fenómeno se le conoce con el nombre de reflexión difusa y es la base de la Teoría del Color que dice que: al incidir sobre un objeto un haz de ondas de distinta longitud, absorbe unas y refleja otras, siendo estas últimas las que en conjunto determinan el color del objeto.

**1.3.3.3. Transmisión.-** Es el fenómeno por el cual la luz puede atravesar objetos no opacos, la transmisión es directa cuando el haz de luz se desplaza en el nuevo medio íntegramente y de forma lineal. A estos medios se les conoce como transparentes, la transmisión es difusa, si en el interior del cuerpo el rayo se dispersa en varias direcciones, tal como ocurre en el vidrio opal, ciertos plásticos, papel vegetal, etc. A estos materiales se les denomina translucientes. Existe un tercer tipo de transmisión, la selectiva que ocurre cuando ciertos materiales, vidrios, plásticos o gelatinas coloreadas dejan pasar sólo ciertas longitudes de onda y absorben otras, como es el caso de los filtros fotográficos.

**1.3.3.4. Refracción.-** Este ocurre dentro del fenómeno de transmisión, cuando los rayos luminosos inciden oblicuamente sobre un medio transparente o pasan de este medio a otro de distinta densidad, experimentan un cambio de dirección que está en función del ángulo de incidencia (a mayor ángulo, mayor refracción), de la longitud de onda incidente (a menor longitud de onda mayor refracción), y del índice de refracción de un medio con respecto al otro. Si un rayo de luz incide perpendicularmente sobre la superficie del vidrio, sufre una disminución de su velocidad pero no se desvía. Por el contrario, si lo hace oblicuamente la parte del rayo que llegue primero sufrirá un frenazo y continuará avanzando a inferior velocidad, mientras que el resto del rayo continúa todavía unos instantes a mayor velocidad. Esta diferencia de velocidades en la parte frontal del rayo luminoso es la que produce la desviación de su trayectoria.

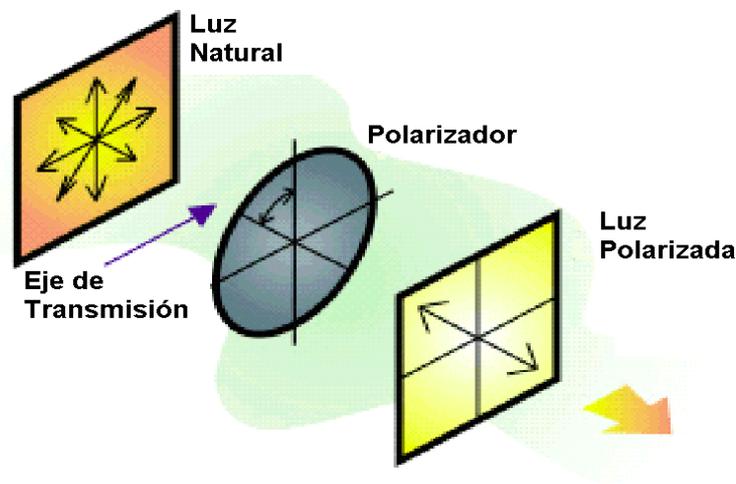
**1.3.3.5. Dispersión.-** Uno de los factores que afectan a la refracción es la longitud de onda de la luz incidente. Como la luz blanca es un conjunto de diversas longitudes de onda, si un rayo cambia oblicuamente de medio cada una de las radiaciones se refractará de forma desigual, produciéndose una separación de las mismas, desviándose menos las de onda larga como el rojo y más las cercanas al violeta.

**1.3.3.6. Difracción.-** Es la desviación de los rayos luminosos cuando inciden sobre el borde de un objeto opaco. El fenómeno es más intenso cuando el borde es afilado, aunque la luz se propaga en línea recta, sigue teniendo naturaleza ondulatoria y al chocar con un borde afilado se produce un segundo tren de ondas circular, al igual que en un estanque, esto da lugar a una zona de penumbra que destruye la nitidez entre las zonas de luz y sombra.

## 1.4. Polarización

Existen evidencias experimentales que han convencido a la física clásica de que la luz puede tratarse como una onda electromagnética transversal. Una de estas evidencias es la polarización de la luz bajo determinadas condiciones. Una onda luminosa puede ser vista como superposición de varias ondas. Pero sin pérdida de generalidad, podemos considerarla como una superposición de dos ondas luminosas armónicas perpendiculares de igual vector de propagación y frecuencia.

**1.4.1. El polarizador.-** Es posible alterar, definir o seleccionar el tipo de polarización de la luz con elementos de óptica constituidos de materiales especiales. Unos de estos llamados polarizadores son hechos de un tipo de material que absorbe la luz polarizada en una dirección específica al eje de transmisión, como de indica en la gráfico 1-4.

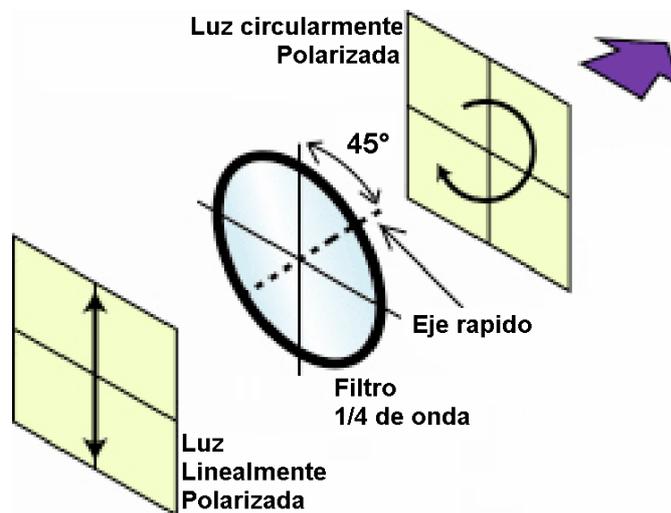


**Gráfico 1-4. Transmisión de la luz a través del polarizador**

Una particularidad importante de los polarizadores es que, cuando se disponen a lo largo de un eje óptico dos polarizadores con ejes cruzados, se produce una absorción total de la luz incidente, a este fenómeno se lo conoce como configuración de extinción.

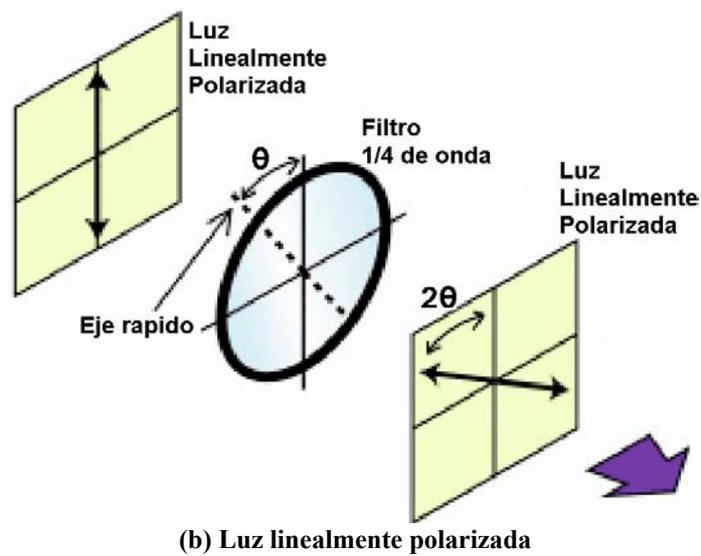
**1.4.2. Láminas retardadoras de  $\frac{1}{2}$  y  $\frac{1}{4}$  de onda.-** Las láminas retardadoras de  $\frac{1}{4}$  de onda corresponden a láminas de material birrefringente. La luz polarizada en una dirección específica se propaga dentro de la lámina a una velocidad diferente que la luz polarizada perpendicularmente a esta dirección. Las láminas de  $\frac{1}{4}$  tienen un espesor muy controlado, introduciendo entre los ejes rápidos y lentos de polarización un retraso o desfase de  $\pi$  y  $\pi/2$  respectivamente entre cada componente. Así, una lámina de  $\frac{1}{4}$  transforma una onda linealmente polarizada a  $45^\circ$  de sus ejes principales (rápidos y lentos) en una onda circularmente polarizada como se puede ver en el gráfico 1-5a y 1-5b.

Este tipo de lámina es de gran utilidad en algunas aplicaciones prácticas como los polariscopios circulares, también pueden usarse combinaciones de polarizadores lineales y retardadores para crear una variedad de resultados, como eliminar las reflexiones no deseadas.



(a) Luz circularmente polarizada

Gráfico 1-5. Transformación de la luz a través del filtro de  $\frac{1}{4}$  de onda



**1.4.3. Luz lineal y circularmente polarizada.-** La luz natural procedente del sol, vibra en cualquier momento en todas las direcciones del espacio (algo difícil de imaginar), posee pues infinitas direcciones de vibración y su eje coincide con el rayo. Estas direcciones se pueden representar vibrando dentro de un plano perpendicular a la dirección de propagación. La luz polarizada vibra en una sola dirección para cada momento, pero la dirección de vibración cambia con el tiempo. En la luz linealmente polarizada (frecuentemente, por simplicidad, se le llama luz polarizada) la dirección de vibración es única y constante con el tiempo, ver gráfico 1-6.

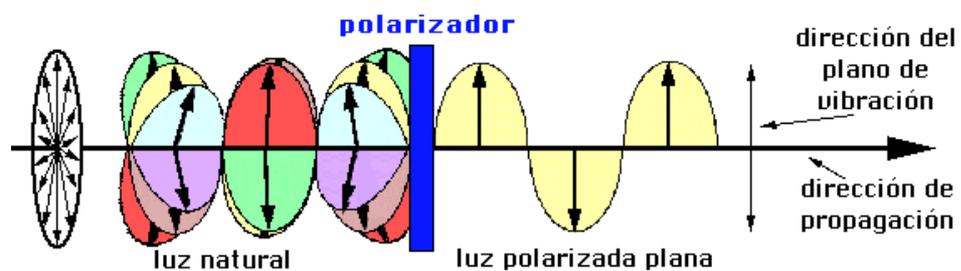


Gráfico 1-6. Dirección de vibración de la luz polarizada

Una fuente de luz que emite un tren de ondas que contiene vibraciones en todas las direcciones, sin embargo mediante la introducción de un filtro polarizador P, como

se ve en el gráfico 1-7, solamente una componente de éstas vibraciones es transmitida, (aquella que es paralela al eje de transmisión del filtro) tal rayo organizado se llama luz polarizada. Si se coloca otro filtro polarizante en su camino se puede obtener la pérdida completa del rayo, cuando los ejes de los dos filtros son perpendiculares el uno con respecto al otro, se obtiene luz linealmente polarizada. Si se colocan filtros de  $\frac{1}{4}$  de onda, como se indica en la gráfico 1-8, se obtiene luz polarizada circular.

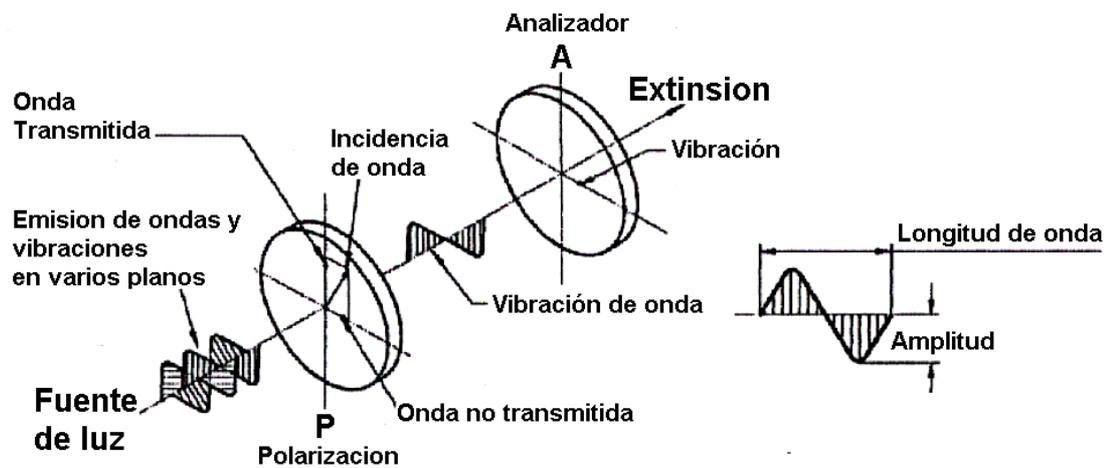


Gráfico 1-7. Plano de polarización

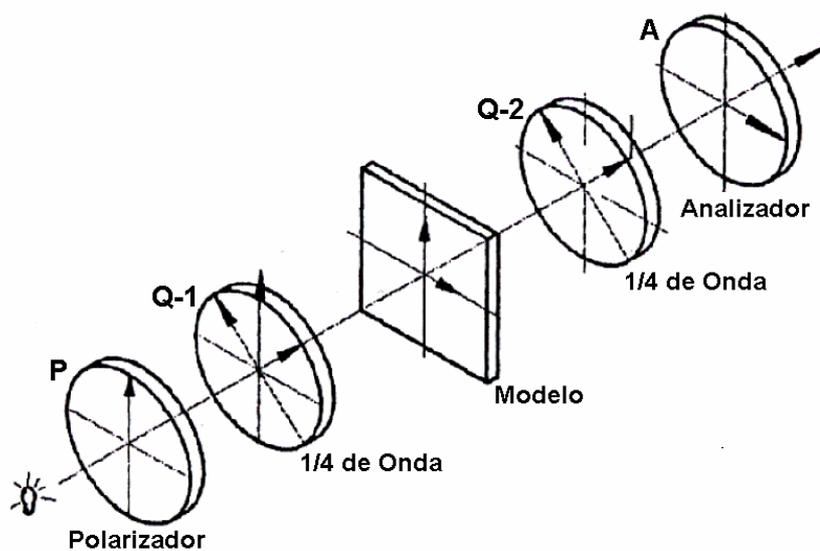


Gráfico 1-8. Obtención de luz polarizada circular

## 1.5. Birrefringencia

El fenómeno de birrefringencia se caracteriza por un retraso óptico entre los dos rayos que emergen de un cuerpo generalmente transparente claro como podemos ver en la gráfico 1-9, uno paralelo al plano de polarización y otro perpendicular, dando lugar a interferencias o franjas en el modelo.

Los materiales están formados por agregados de átomos y moléculas, según el estado de agregación en que se encuentren, los materiales se pueden comportar de forma isótropa o anisótropa al paso de la luz.

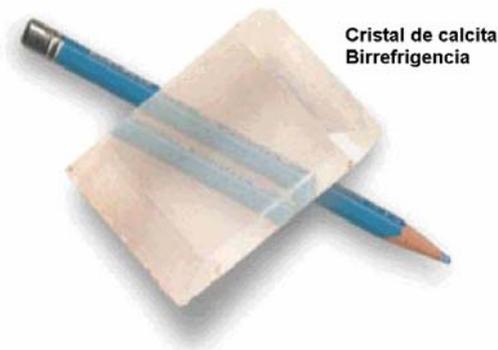


Gráfico 1-9. Fenómeno de birrefringencia

**1.5.1. Materiales birrefringentes.-** Hay una gran variedad de materiales dieléctricos que son anisótropos. Habitualmente los cristales minerales presentan dos índices de refracción diferentes en direcciones perpendiculares, denominados medios uniáxicos: hielo, cuarzo, calcita, turmalina (ver anexos tabla A1). Estos materiales presentan doble refracción, además la luz que procede de estas imágenes está polarizada ortogonalmente entre sí. Hay también medios que presentan tres índices de refracción diferentes, que se denominan biáxicos: mica y nitrito de sodio, entre otros.

## **1.6. Ley de Brewster o ley óptica de las tensiones.**

Cuando la luz pasa de un medio a otro de diferente densidad, su velocidad cambia. Brewster estableció que los materiales birrefringentes al estar sometidos a esfuerzos el cambio relativo en el índice de refracción es proporcional a la diferencia de los esfuerzos principales. El tiempo necesario para atravesar el medio birrefringente depende del espesor y la retardación relativa entre los dos rayos de luz.

**1.6.1. Angulo de polarización de Brewster.-** El fenómeno de reflexión a la superficie entre dos medios dieléctricos altera la polarización de la luz reflejada. Para un ángulo incidente específico, denominado ángulo de Brewster ( $\theta_c$ ), la reflexión solo ocurre para una dirección de polarización en el plano de incidencia (formado por el haz incidente y la normal a la superficie). Se puede ver en la gráfico 1-10 la refracción sobre un dieléctrico.

La polarización paralela al plano de incidencia (o sea, perpendicular a la superficie reflectante) no es reflejada. Este fenómeno ocurre cuando el ángulo entre los haces reflejados y refractados (transmitidos) es de  $90^\circ$ . Consecuentemente y de acuerdo a la ley de Snell, el ángulo de Brewster ( $\theta_c$ ) esta relacionado con el índice de refracción del material dieléctrico.

En la incidencia de Brewster, la lámina dieléctrica corresponde a un polarizador de luz, apagando completamente una de las componentes de polarización de la luz incidente. Como aplicación, este fenómeno se utiliza para hacer ventanas ópticas de celda que transmiten la máxima intensidad de un haz polarizado y no producen perdidas por reflexión.

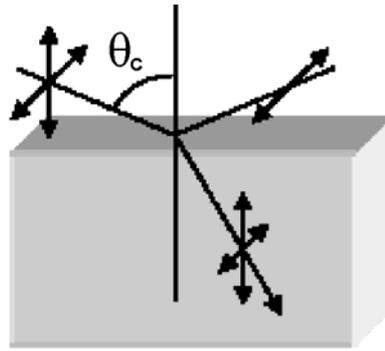


Gráfico 1-10. Ángulo de refracción

La máxima polarización ocurre cuando el haz transmitido y el reflejado forman un ángulo de  $90^\circ$  como se ve en la gráfico 1-11. En general, para cada material hay un ángulo especial, llamado ángulo de polarización, donde sólo la luz polarizada en el plano perpendicular al del haz tiene componente reflejada. Entonces, en el ángulo de polarización de la luz reflejada es 100% linealmente polarizada.

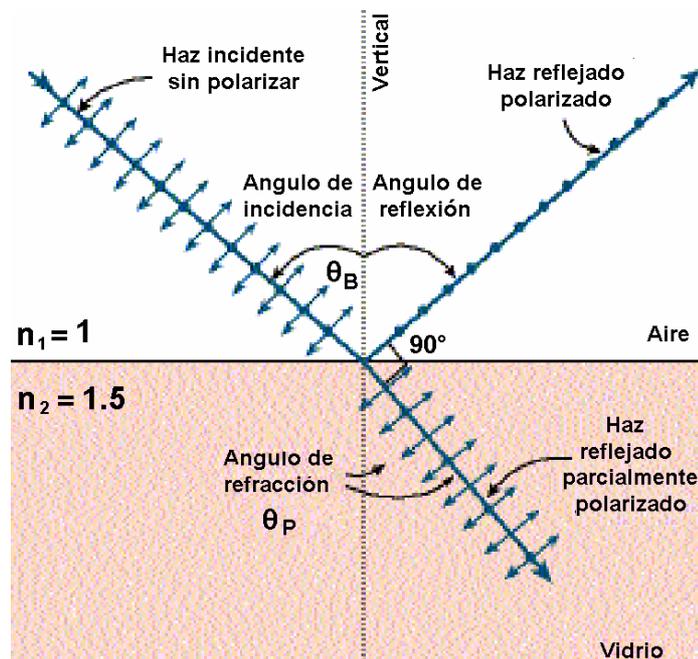


Gráfico 1-11. Ángulo de polarización

La luz transmitida en el otro medio, incluye todos los rayos polarizados paralelos y algunos perpendiculares al plano, por lo tanto, el rayo transmitido está parcialmente

polarizado. Cuando el haz de luz que incide lo hace con el ángulo de polarización, la luz reflejada es perpendicular a la transmitida.

$$\operatorname{sen} \theta_B = \cos \theta_P \quad (1.2)$$

Donde:

$\theta_P$  = ángulo de refracción (*rad*)

$\theta_B$  = ángulo de polarización (*rad*)

Por lo tanto, la ley de Brewster permite calcular el ángulo de polarización, que se denomina en su nombre, ángulo de Brewster<sup>2</sup>.

$$\operatorname{tg} \theta_B = \frac{n_1}{n_2} \quad (1.3)$$

Donde:

$n_1$  = Índice de refracción del aire (*adimensional*)

$n_2$  = Índice de refracción del vidrio (*adimensional*)

## 1.7. Datos foto elásticos

**1.7.1. Visualización de los esfuerzos.-** Algunos métodos experimentales determinan los campos de esfuerzos, también llamados de campo completo. Estos contribuyen considerablemente a la comprensión de los fenómenos que se producen en los medios elásticos continuos, representándolos gráficamente, una de las más precisas es la foto elasticidad que se vale de la birrefringencia asociada a las cargas que se aplican a algunos materiales transparentes cuando se colocan en un campo de luz polarizada.

<sup>2</sup> Ángulo de Brewster. *Rami Arriéle. "The Laser Adventure".* Pag 4. Universidad de Murcia España

Cuando se usa una fuente de luz monocromática de sodio o mercurio las franjas que se forman en el modelo son una serie de líneas negras. Las franjas negras corresponden a los puntos donde los dos rayos que emergen del modelo están exactamente con  $180^\circ$  de fase. Cuando se usa luz blanca las franjas son multicolores y se llaman isocromáticas.

La diferencia en el espectro que ofrece una fuente de luz con respecto a otra se debe a la longitud de onda que esta tiene. La luz de sodio tiene una sola longitud de onda por lo que su espectro es también de un solo color, la luz blanca tiene varias longitudes de onda y su espectro es multicolor.

La fuente monocromática es usada para determinar exactamente la magnitud de los esfuerzos y la fuente con luz blanca es usada generalmente en la investigación de las direcciones de los esfuerzos, en este caso es conveniente utilizar el polariscopio con luz polarizada plana.

**1.7.2. Isóclinas.-** Son consideradas el lugar geométrico de los puntos en los cuales las tensiones principales son paralelas, son las que unen los puntos de igual inclinación de las tensiones principales.

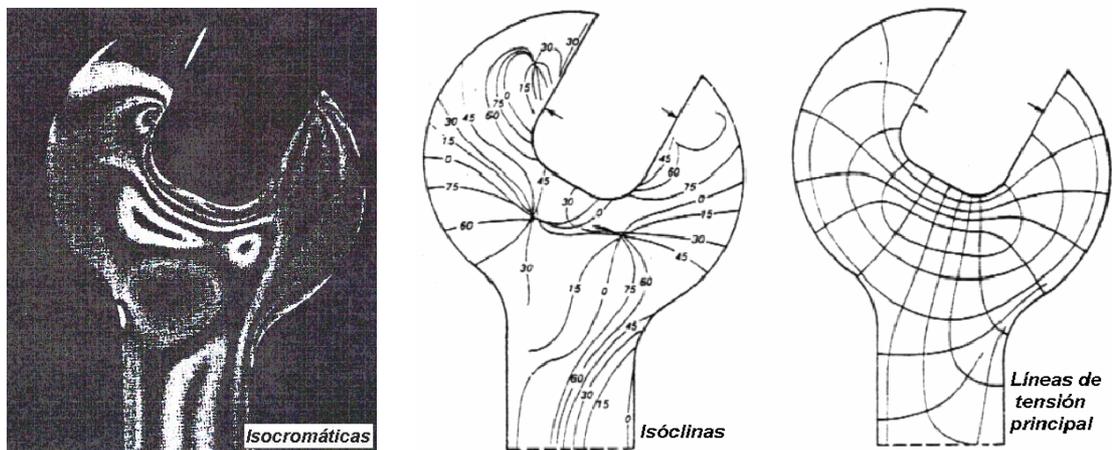
La isoclina es una línea a lo largo de las tensiones principales que actúan en direcciones dadas, la trayectoria de la misma normalmente no da la dirección de una tensión principal si no una comprensión de la dirección. Es útil entender cómo la forma de una parte afecta la distribución de tensión y también proporciona los datos adicionales necesarios para la evaluación de las dos tensiones principales a los puntos dentro de un modelo.

Esta línea es visible cuando el polariscopio plano está cruzado, pero se vuelve invisible en el polariscopio de tipo redondo o circular. Si la dirección de una tensión

principal pasa a coincidir con el plano de polarización, la luz que esta atravesando al modelo continuará vibrando en su plano y será absorbida por el analizador que esta cruzado. Las franjas se pueden hacer visibles rotando el polarizador y analizador con respecto al modelo.

Las isoclinas determinan las direcciones de las tensiones principales, para los puntos de extinción, un plano de tensión principal coincidirá con el plano de polarización. En un modelo bidimensional, el sitio de estos puntos produce una banda negra, término de una isoclina. Orientando adecuadamente el polarizador y analizador a varios ángulos con respecto al modelo que se está analizando, se obtienen una serie de isoclinas que cubren la superficie entera del mismo. Se pueden ver en el gráfico 1-12.

Las isocromáticas, las isoclinas y las líneas de tensión principal obtenidas de un modelo de una llave inglesa puesta en un polariscopio cruzado.



**Gráfico 1-12. Datos foto elásticos**

Estas líneas no deben confundirse con las franjas que son líneas de tensión constante máxima. La distinción entre las franjas y las líneas isoclinas es fácil de hacer, hay que girar el polarizador y el analizador sobre el eje del polariscopio cuando las isoclinas

aparezcan hay que mover el modelo de acuerdo con las direcciones variantes de las tensiones principales considerando que las franjas permanecen fijas en la posición.

Al usar luz blanca la diferenciación se vuelve simple, ya que la isoclina esta de color negro y todas las franjas excepto la del orden cero están coloreadas. Un método recomendado es hacer el modelo de prueba de un material de baja sensibilidad óptica, para que la líneas isoclinas estén bien definidas y que el primer orden de franja (con la luz monocromática) no aparezca.

**1.7.3. Isocromáticas.-** Lugar geométrico de los puntos en los que la diferencia de esfuerzos principales es constante. Estos esfuerzos obran sobre planos perpendiculares al de la probeta. Se obtienen en el banco fotoelástico como franjas de igual color y de ahí su nombre.

Estas líneas se pueden entender como líneas de nivel y se las cuenta en órdenes de franja (N), las franjas isocromáticas dan el valor de la diferencia de esfuerzos (constante) para todos los puntos que pertenecen a la misma franja isocromática con respecto a un plano de referencia. El valor de la diferencia de esfuerzos entre puntos que pertenecen a líneas contiguas se obtiene por calibración.

Hay dos clases de fotografías isocromáticas; unas se identifican por estar en un campo claro o blanco que se da cuando el polarizador y el analizador son paralelos, las otras se identifican por estar en un campo oscuro o negro que se obtienen en un polariscopio de luz circularmente polarizada, con polarizador y analizador cruzados y placas 1/4 de onda cruzadas.

El significado de las líneas es el mismo, pero su orden es ligeramente diferente. En las fotografías de campo oscuro las líneas se cuentan en números enteros, en campo

claro se cuenta en forma fraccionada ( $1/2$ ). Por lo tanto con la superposición de las dos fotografías aumenta la precisión y la sensibilidad para los cálculos.

Las líneas isóclinas dan la variación angular de un elemento infinitesimal a lo largo de una sección, a partir de estas líneas y considerando que las direcciones de los esfuerzos principales serán siempre paralelos o perpendiculares a estas líneas, es posible construir o graficar las líneas de trayectorias de esfuerzos ver gráfico 1-13.

Las líneas de trayectorias de esfuerzos se las denomina también isoestáticas y son líneas que deben dibujarse a partir de las isóclinas. La forma de proceder es dibujar líneas paralelas a la dirección de los esfuerzos principales, Para conseguir esto existe un método práctico.

Considerando la gráfico 1-13, se toma un punto cualquiera A y se grafica los esfuerzos a  $5^\circ$ , a partir de este punto y con esta inclinación se rota  $(10^\circ - 5^\circ)/2$  en el sentido de rotación del polarizador y se obtiene el punto B, aquí se grafica los esfuerzos con el ángulo de la isóclina ( $10^\circ$ ).

A partir del punto B y con la inclinación de los esfuerzos en este punto se rota  $(15^\circ - 10^\circ)/2$ , y se corta en la siguiente isóclina el punto C, en este se grafica los esfuerzos con el ángulo de la isóclina ( $15^\circ$ ). Para más puntos se procede de la misma manera.

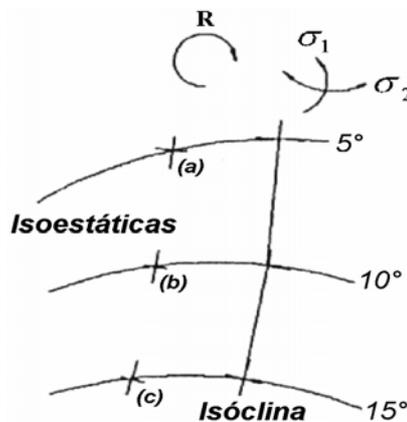


Gráfico 1-13. Trazo de isoestáticas

La aplicación de éste método se indica en el gráfico 1-14, que es una placa rectangular cargada en el orificio central.

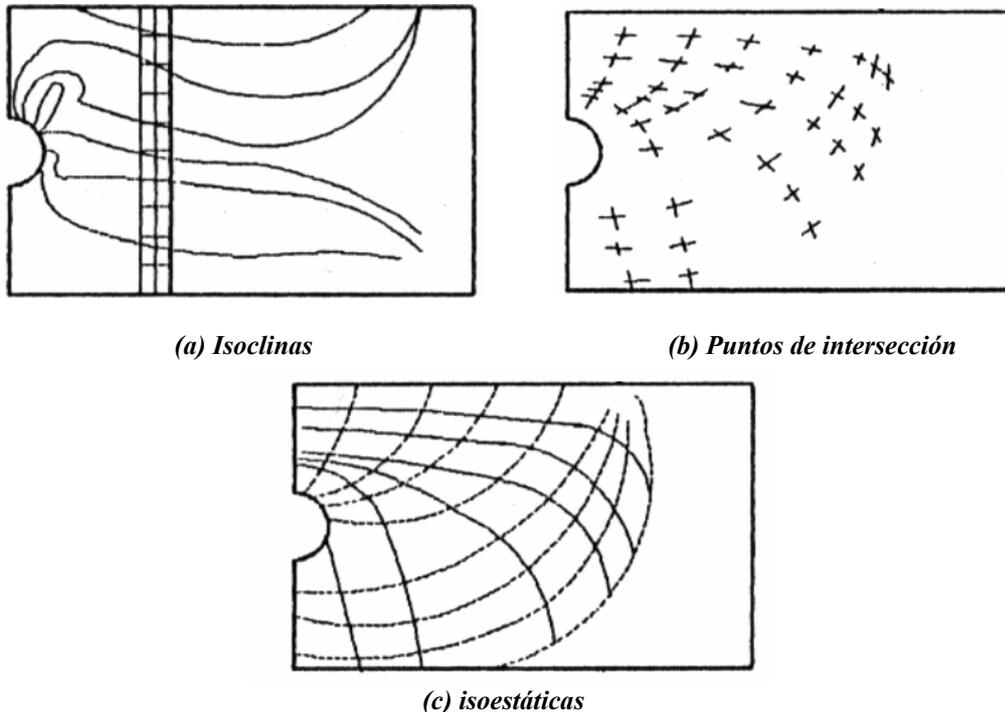


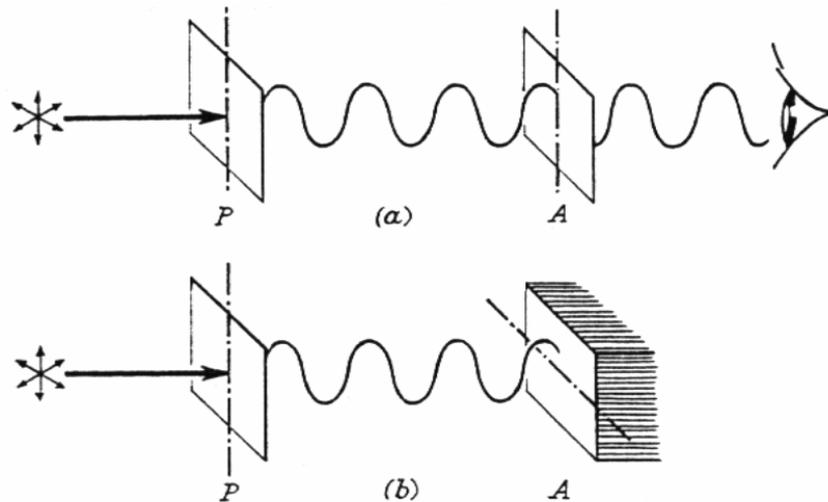
Gráfico 1-14. Trazo de isoestáticas

## 1.8. Comportamiento de la luz en el polariscopio lineal

**1.8.1. Polariscopio paralelo y cruzado.-** Cuando el polarizador “P” filtra la luz para que sólo pueda pasar las vibraciones a través del plano polarizador, el analizador “A” tiene su eje de polarización similar y por consiguiente la luz puede atravesar y ser vista del otro lado. Como los ejes de polarización del polarizador y analizador son entre si paralelos el resultado es un polariscopio paralelo, ver gráfico 1-16a. Sin embargo, el polariscopio en plano paralelo no se usa normalmente en foto elasticidad.

Cuando se origine un giro en el analizador, habrá una disminución progresiva de la cantidad de luz que esta atravesando el analizador. Cuando este llegue a un ángulo de

90° girando en el sentido de las agujas del reloj, toda la luz se extinguirá como podemos ver en la gráfico 1-16b.



**Gráfico 1-15. Estados del polariscopio**

Si miramos a través del analizador no es posible ver el origen de luz, aunque las imperfecciones pequeñas pueden hacer la fuente sólo visible. El polarizador y el analizador para llegar a ser de tipo cruzado, deberán sus ejes de polarización formar entre si ángulos rectos. La intensidad de luz que surge del analizador depende del componente de incidencia de la luz que queda en el eje de la polarización del analizador.

**1.8.2. Tensión y coeficientes ópticos.-** En cualquier modelo transparente bidimensional existen para cada punto dos esfuerzos principales que tienen valores máximos y mínimos (tensión o compresión). Estos no varían en magnitud o dirección a lo largo del espesor del modelo y actúan mutuamente en el plano perpendicular del plano principal de tensión.

Las componentes de ondas de luz atraviesan el modelo y sus velocidades de propagación difieren ligeramente, de tal una manera que la diferencia de las

velocidades de propagación depende de la diferencia entre estas dos tensiones principales.

El retraso relativo<sup>3</sup> resultante es proporcional a la diferencia entre estos y es directamente proporcional al esfuerzo máximo. Este efecto se puede medir en el polariscopio, por lo cual la tensión máxima a los puntos en el modelo pueden ser deducidos. El retraso relativo depende del espesor del modelo y de la sensibilidad óptica del material. Con la mayoría de los materiales el retraso relativo es casi constante, para todas las longitudes de onda. Estos efectos se han verificado experimentalmente, por la siguiente relación:

$$R = Ct(\sigma_x - \sigma_y) \quad (1.4)$$

Donde:

$R$  = Retraso relativo entre las dos componentes que surgen del modelo  
(adimensional)

$C$  = Constante foto elástica del material ( $plg^2/lbf$ ) ( $m^2/N$ )

$t$  = Espesor del modelo ( $plg$ ) ( $m$ )

$\sigma_x$  y  $\sigma_y$  = Tensiones principales que actúan en direcciones normales a la propagación de la luz

( $lbf / plg^2$ ) ( $N/m^2$ )

El efecto foto elástico puede atribuirse principalmente a la diferencia de tensión que ocurre en los puntos dentro del modelo bidimensional. De una manera similar, las cantidades pueden ser

<sup>3</sup> Retraso relativo. *D.J. Silverleaf and G.Blackburn. "Photoelasticity for designers".* Pag. 20

relacionadas por una tensión óptica, como sigue:

$$R = Kt(E_1 - E_2) \quad (1.5)$$

Donde:

$K$  = Coeficiente de tensión-óptico, *adimensional*.

$E_1$  y  $E_2$  = Tensiones principales que actúan perpendicularmente entre si en direcciones normales a la propagación de luz (*plg/plg*) (*m/m*)

Para el comportamiento elástico de un modelo bidimensional las tensiones principales  $\epsilon_x$  y  $\epsilon_y$  producidas en las direcciones de la tensión principal  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  respectivamente son dadas por las relaciones:

$$\epsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu \cdot \sigma_y) \quad (1.6)$$

$$\epsilon_y = \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu \cdot \sigma_x) \quad (1.7)$$

Donde:

$\epsilon_x$  = Deformación principal en  $x$  ( $m$ )

$\epsilon_y$  = Deformación principal en  $y$  ( $m$ )

$E$  = Modulo de elasticidad ( $N/m^2$ )

$\sigma_x$  = Esfuerzo en  $x$  ( $N/m^2$ )

$\sigma_y$  = Esfuerzo en  $y$  ( $N/m^2$ )

$\nu$  = Relación de Poisson (*adimensional*)

Así para el comportamiento elástico y la tensión-óptica los coeficientes simplemente se relacionan entre si a por las constantes elásticas del material.

$$K = \left( \frac{E}{1+\nu} \right) C \tag{1.8}$$

Donde:

$K$  = Coeficiente de tensión-óptico, *adimensional*.

$E$  = Modulo de Young ( $Pa$ )

$\nu$  = Relación de Poisson (*adimensional*)

$C$  = Constante foto elástica del material ( $plg^2/lbf$ ) ( $m^2/N$ )

### 1.8.3. Vectores de luz

**1.8.3.1. Vectores de un polariscopio cruzado.-** El paso de luz a través de un polariscopio puede ser entendido haciendo uso de los vectores de luz<sup>4</sup>. En el gráfico 1-17a se representa un polariscopio cruzado y el fin de la fuente de luz con el punto  $O$  que representa el eje óptico. El eje de polarización del polarizador es dado por  $OX$ . El rayo de luz polarizada que sale del polarizador esta representado por el vector  $OA$ , es decir, que tiene una amplitud correspondiente a la longitud  $OA$ , y está vibrando en el plano  $OX$ .

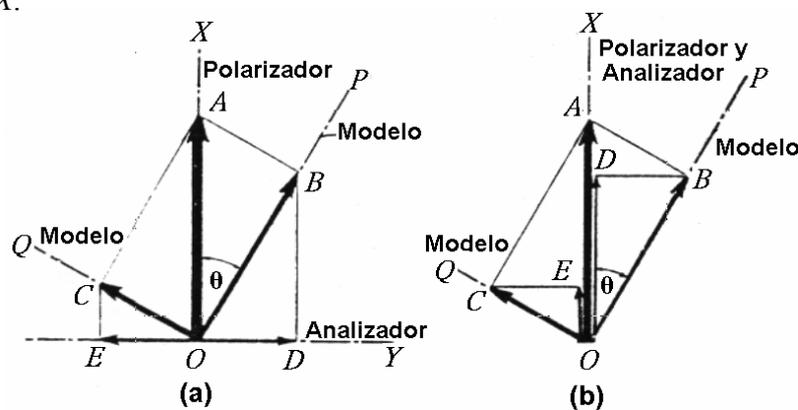


Gráfico 1-16. Vectores de luz del polariscopio cruzado

<sup>4</sup> Vectores de luz. *D.J. Silverleaf and G.Blackburn. "Photoelasticity for designers".* Pag. 31

El modelo tensionado tiene un plano de tensión principal  $OP$  como un ángulo  $\theta$  a  $OX$ , y el otro plano de tensión principal  $OQ$ , perpendicular a  $OP$ . El vector de luz  $OA$  es dividido en dos componentes que vibran en los dos planos principales  $OP$  y  $OQ$  originando los vectores  $OB$  y  $OC$ . Para el analizador, se toman las componentes de estas dos vibraciones en el eje de la polarización  $OY$  obteniendo dos vectores  $OD$  y  $OE$  de igual amplitud.

Entonces:

$$OD = -OE = OA \sin \theta \cos \theta \quad \frac{1}{2} OA \sin 2\theta \quad (1.9)$$

De las diferentes velocidades de vibración  $OB$  y  $OC$  a través del modelo, los vectores  $OD$  y  $OE$  no pueden estar  $180^\circ$  fuera de fase, como parece ser sugerido en gráfico 1-17a.

**1.8.3.2. Vectores de un polariscopio paralelo.-** En el polariscopio paralelo mostrado en el gráfico 1-17b, las componentes  $OD$  y  $OE$  salen del analizador en un plano paralelo al eje del polarizador. En general estos componentes son de amplitud desigual, de manera que cuando una sea medio ciclo detrás de la otra, la extinción completa de la luz no podrá obtenerse.

## **1.9. Comportamiento de la luz en el polariscopio circular**

**1.9.1. Luz polarizada circular.-** El polariscopio plano mostrado en el gráfico 1-16b no es conveniente para el trabajo foto elástico, ya que las isoclinas y las franjas aparecen al mismo tiempo lo cual hace difícil interpretar todas las franjas importantes. Ventajosamente las isoclinas pueden ser eliminadas introduciendo dos placas de  $\frac{1}{4}$  de onda en el polariscopio. Se colocan las placas de  $\frac{1}{4}$  de onda en para

que sus ejes principales estén a  $+45^\circ$  y a  $-45^\circ$  en el eje de polarización, como se muestra en la figura 1-18a con campo oscuro y 1-18b con campo claro.

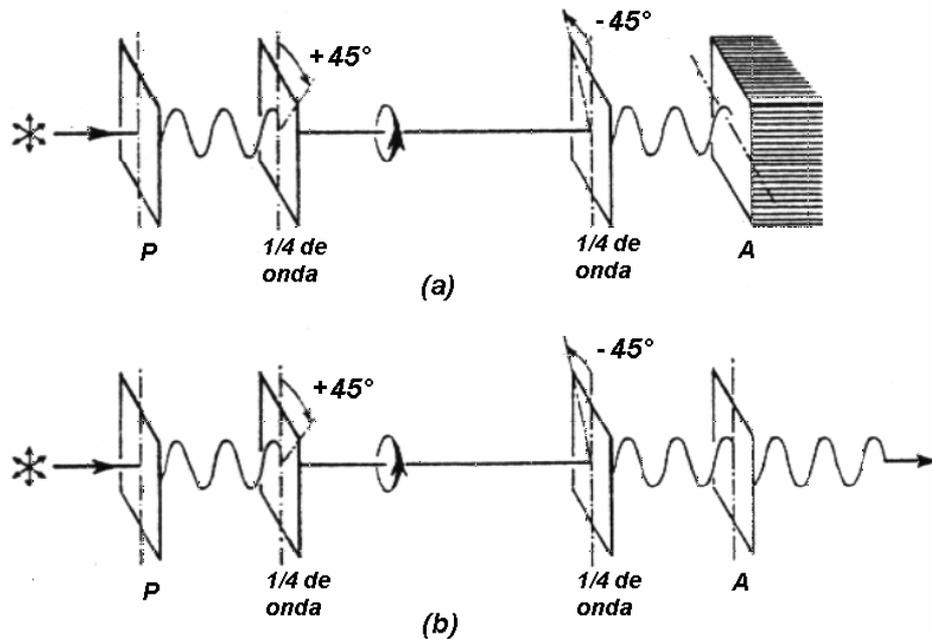


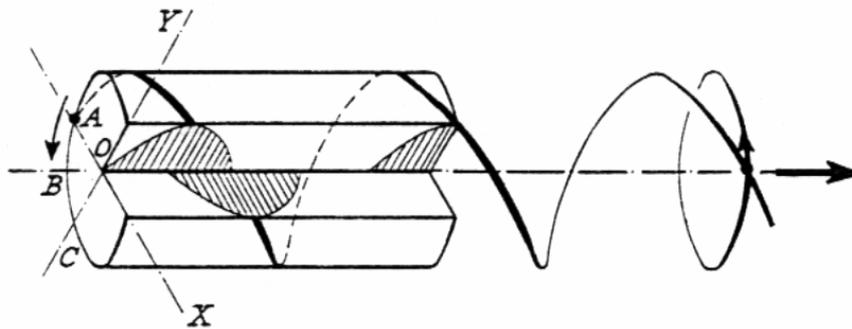
Gráfico 1-17. Estados del polariscopio circular

**1.9.2. Efectos de las placas de  $\frac{1}{4}$  onda.-** La luz se considera como una vibración en los dos planos que contienen los ejes principales de la placa, produciendo dos componentes de vibración. Estos componentes tienen amplitudes iguales, desde que vibran en planos inclinados a  $+45^\circ$  y a  $-45^\circ$  con respecto al de polarización.

Las componentes viajan a través de la hoja de mica a velocidades diferentes, de manera que ellas salgan de fase del mismo modo que la diferencia en fase se produce en un modelo tensionado. El espesor de la hoja de mica es tal que la diferencia en fase es exactamente un cuarto de longitud de onda. El retraso relativo producido en la hoja de mica es constante para todas las longitudes de onda y la diferencia correcta de fase se obtiene solamente con luz de una sola longitud de onda o de un solo color.

Los dos rayos que salen de la hoja de mica tienen amplitudes iguales y vibran en movimiento armónico en los planos perpendiculares, con una componente de un cuarto de longitud de onda delante del otro. Si a cualquier punto se agregan los

desplazamientos instantáneos de las dos componentes vectoriales, obtenemos el camino de un círculo y quedaremos en un plano normal a la dirección de propagación. La luz que vibra de esta manera es circularmente polarizada y se considera como dos componentes que vibran a lo largo de cualquiera de los ejes perpendiculares, como el  $OX$  y  $OY$  indicado en el gráfico 1-18, o alternativamente, como un movimiento redondo en el camino ABC.



**Gráfico 1-18. Plano de la luz circularmente polarizada**

El movimiento circular es producido en todos los puntos a lo largo del camino del rayo y debido al retraso de tiempo para dar movimiento hacia delante. Los desplazamientos no estarán en fase en cualquier momento, pero su sitio de puntos llegara a formar una hélice, como se puede ver en el gráfico 1-18. Este movimiento puede ser representado en una cuerda, a un extremo puede atarse a una pared y del otro proporcionarle un movimiento redondo. Se parte de que la cuerda debe entrar en la trayectoria de un círculo y esta llega a formar un tipo de hélice, esta puede estar en ambos ya sea girando a la derecha o a la izquierda. La dirección de la hélice dependerá si el plano más lento de la placa de  $\frac{1}{4}$  de onda esta a  $+45^\circ$  o a  $-45^\circ$  con respecto al plano de polarización de incidencia de luz.

## 1.10. Polariscopios

Existen dos tipos que son utilizados en foto elasticidad:

- El polariscopio de difusión de luz.
- El polariscopio de lentes.

**1.10.1. Polariscopio de difusión de luz.-** Están compuestos por una pantalla de vidrio que esta iluminada uniformemente por una larga descarga de las lámparas de luz, en el gráfico 1-19 se muestra un esquema de polariscopios de transmisión de difusión de luz.

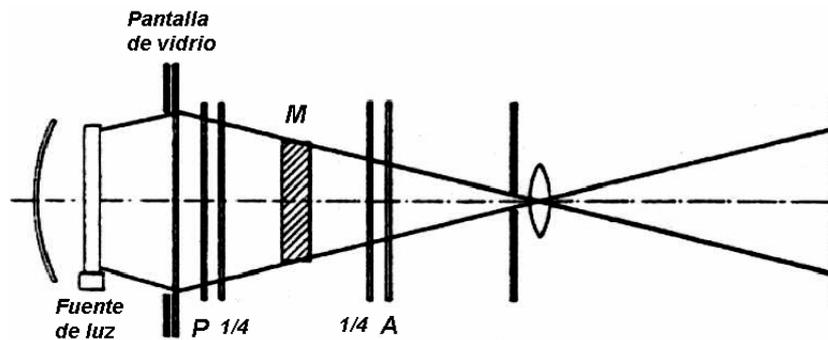


Gráfico 1-19. Disposición del polariscopio de difusión de luz

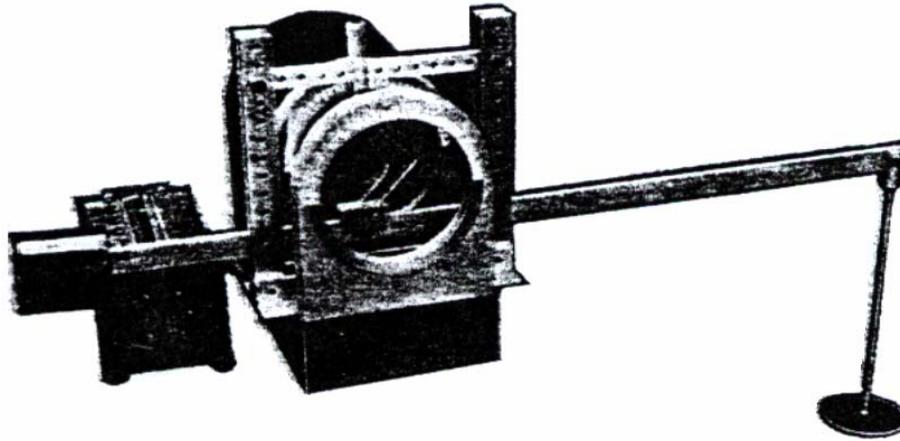
No es necesario posicionar al modelo con precisión con respecto al polariscopio, desde que puedan alinearse los elementos polarizadores y la cámara simplemente a cualquier parte del modelo.

La difusión de luz obtenida de la pantalla es más conveniente para el trabajo de la foto elasticidad, dando una fotografía superior, buenos efectos gráficos y dando un resultado de franjas más claras al ver al modelo directamente.

Una característica del polariscopio de difusión es que no atravesará la luz como un haz paralelo, pero convergerá en el lente de la cámara para que el frente y los bordes de atrás del modelo formen las imágenes en la pantalla que realmente no coinciden.

Cuando es requerido el límite máximo de tensión o la tensión en un punto para el uso del diseñador, el polariscopio de difusión es el aparato más simple y más eficaz

El gráfico 1-20 muestra un polariscopio de difusión sumamente simple, portátil y capaz de obtener un trabajo científico exacto si se aplican las leyes fundamentales de luz polarizada adecuadamente.



**Gráfico 1-20. Polariscopio de difusión de luz simple**

**1.10.2.- El polariscopio de lentes.-** En el tiempo de la evolución de la técnica de la foto elasticidad, se utilizaron materiales para polarizarla luz como es el caso del prisma de Nicol. Estos prismas han sido sustituidos por los llamados polarizadores que son de un material de acetato celuloso y alcohol polivinilico expuestos a un tratamiento especial.

Se utilizan los polariscopios de lentes en ciertos casos, para propósitos de investigación, para obtener un registro fotográfico que cubra una área grande del modelo y para los casos donde se requiere una imagen luminosa, como en la proyección de esta en una pantalla grande para su demostración, en cuadros de cine tomados para las pruebas dinámicas, o en la técnica de multiplicación de franja.

Un polariscopio del tipo lentes se puede apreciar en el gráfico. 1-21. Este tipo proporciona luz monocromática y luz blanca, el polarizador y analizador están juntos y las placas de  $\frac{1}{4}$  de onda pueden girarse fuera de su posición cuando el aparato requiere proyectar isoclinas adelante en una pantalla.

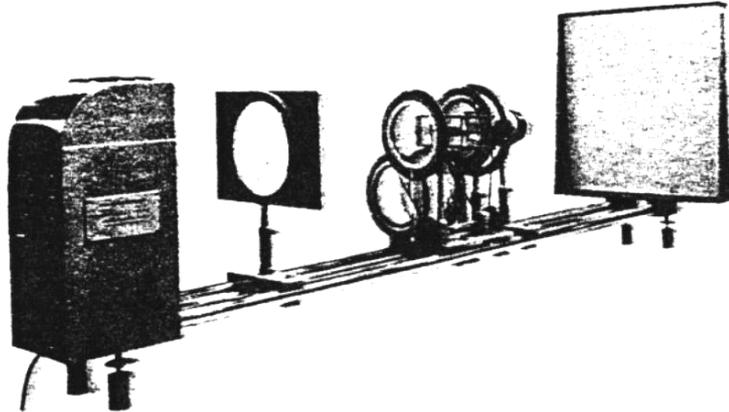


Gráfico 1-21. Polariscopio de lentes

Los polariscopios mostrados en los gráficos 1-22 y 1-23, se han diseñado para la facilidad de producción de isoclinas por uso de un mando de control para la rotación de polarizador y el analizador, estos elementos que están montados en un cojinete de bolas. Las escalas son graduadas en 100 divisiones por  $180^\circ$ , por conveniencia en valoración de órdenes de franja por el tardío o métodos de de compensación.

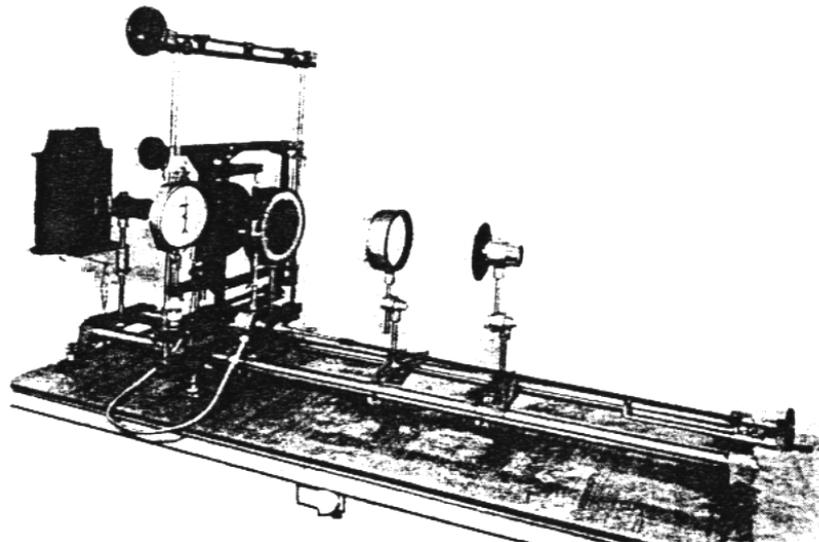
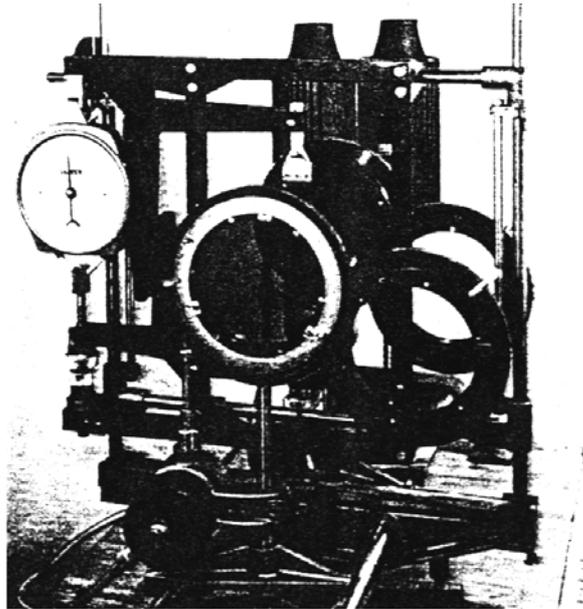


Gráfico 1-22. Polariscopio de lentes desplazable



**Gráfico 1-23. Polariscope de lentes móviles**

## CAPITULO 2

### APLICACIÓN DE PROBLEMAS MECÁNICOS

#### 2.1. Generalidades

El método de análisis a ser utilizado debe adaptarse a la solución del problema. El análisis foto elástico es uno de los métodos experimentales mas usados por su grado de exactitud y relativa facilidad de aplicación. En general antes de decidir cual es el método y procedimiento a usar, se debe tener claro el resultado a obtener, esto es encontrar valores puntuales de esfuerzos máximos o regiones de menor concentración.

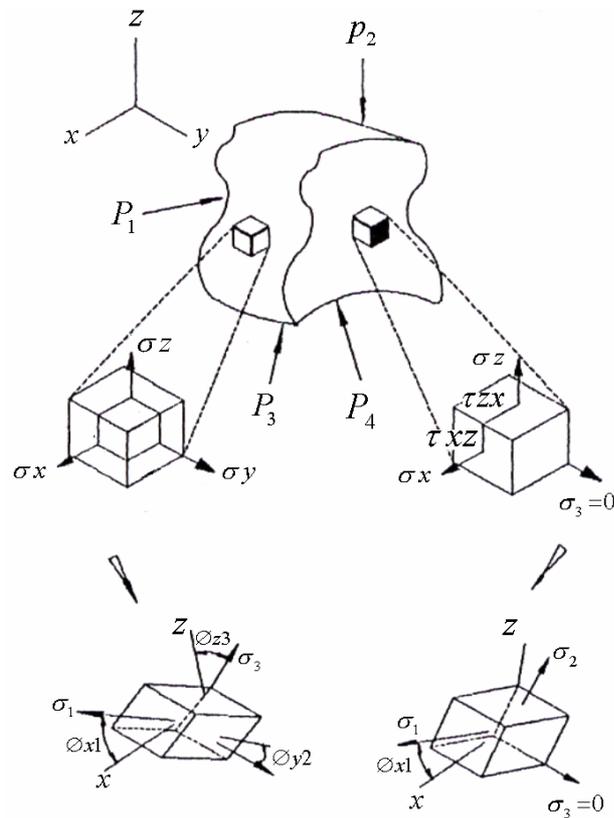
#### 2.2. Alcance y grado de precisión

En la solución de un problema, depende de la aplicación que este tenga. Un trabajo didáctico es realizado más profundamente que un trabajo de servicio a la industria, primero por la disponibilidad de tiempo y por los resultados que se requieren. La foto elasticidad en la industria se utiliza para detectar fallas mecánicas, que permitan rediseñar los elementos y partes mejorando parámetros como: resistencia, geometría, peso, etc.

En un ejercicio didáctico se realizan las mismas pruebas pero mas amplias en la tabulación de datos y con variación de parámetros como carga a la que somete el modelo, tamaño y forma de este, para una visualización mas completa del problema.

**2.2.1. Análisis de esfuerzos.-** Para realizar un análisis de esfuerzos se comienza por separar un todo en sus partes, ya que en los problemas de análisis de esfuerzos, la forma geométrica es un dato. En general, analizar los esfuerzos significa determinar

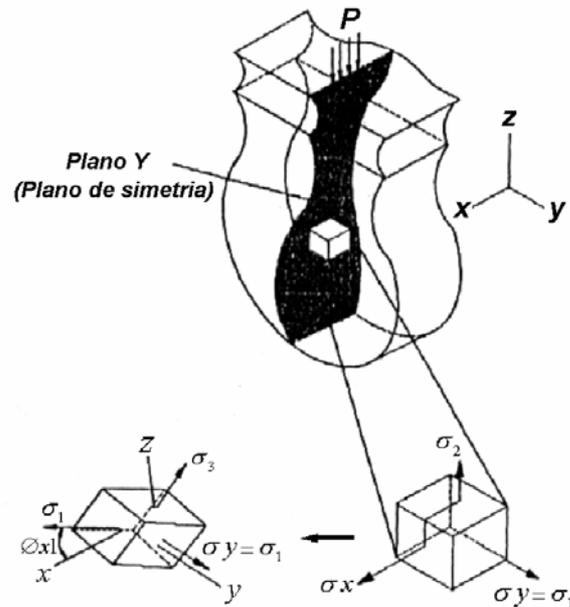
su magnitud y dirección en cada punto, esto es determinar, las tres componentes cartesianas normales de los esfuerzos y las tres componentes correspondientes a los esfuerzos cortantes, o determinar los valores de los esfuerzos principales y sus direcciones, como se indica en el gráfico 2-1.



**Gráfico 2-1. Estado de esfuerzo en un cuerpo**

**2.2.2. Simplificación del problema del análisis de esfuerzos.-** Al analizar una parte o elemento mecánico se debe observar su geometría, para señalar sus partes simétricas y también el sitio en el que se aplica la carga.

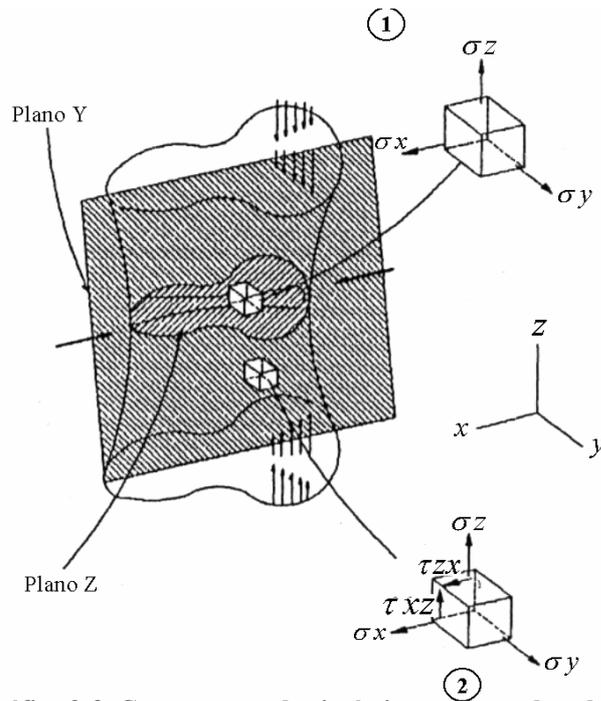
Cuando el cuerpo que se va a analizar tiene un plano de simetría y está cargado simétricamente como en el gráfico 2-2.



**Gráfico 2-2. Cuerpo geométrico y carga simétrica**

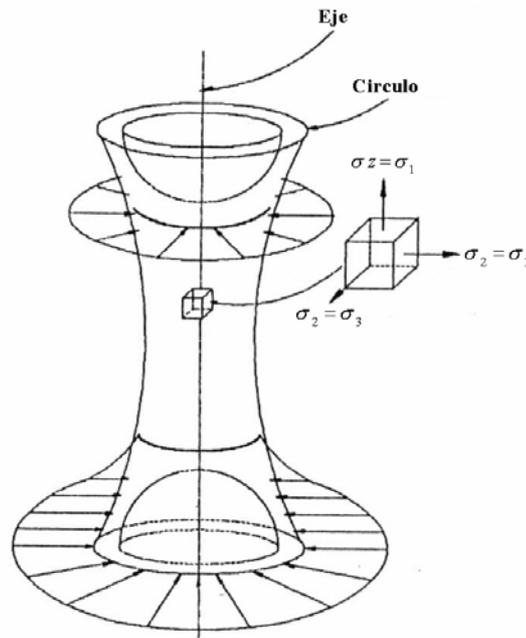
Se presenta la primera simplificación, por geometría ya que en cualquier punto del plano de simetría, la dirección de un esfuerzo principal será perpendicular al plano de simetría (no existe esfuerzos cortantes en el plano de simetría). Entonces el problema se soluciona para los puntos situados en el plano de simetría al determinar: el valor del esfuerzo principal, el valor de dos componentes del esfuerzo normal y una componente de los esfuerzos cortantes que actúan sobre planos perpendiculares al plano de simetría. Si el cuerpo tiene dos planos de simetría y esta cargado simétricamente con respecto a estos dos planos como en el gráfico 2-3.

No existen fuerzas cortantes que actúen sobre esos planos. Por tanto, en todos los puntos que estén sobre el eje de intersección de los planos de simetría, actúan solamente esfuerzos normales que son perpendiculares a esos planos, entonces serán suficientes tres datos para resolver el problema.



**Gráfico 2-3. Cuerpo cargado simétricamente en dos planos**

Cuando un cuerpo como el del gráfico 2-4 tiene más de dos planos de simetría que cortan en una misma línea y se carga simétricamente con respecto a estos planos, existe solamente esfuerzos normales en cualquier punto de la línea, y los perpendiculares a la línea son iguales entre sí. En este caso solo hacen falta dos datos. Para un problema de esfuerzos en un plano, uno de los esfuerzos principales es cero.

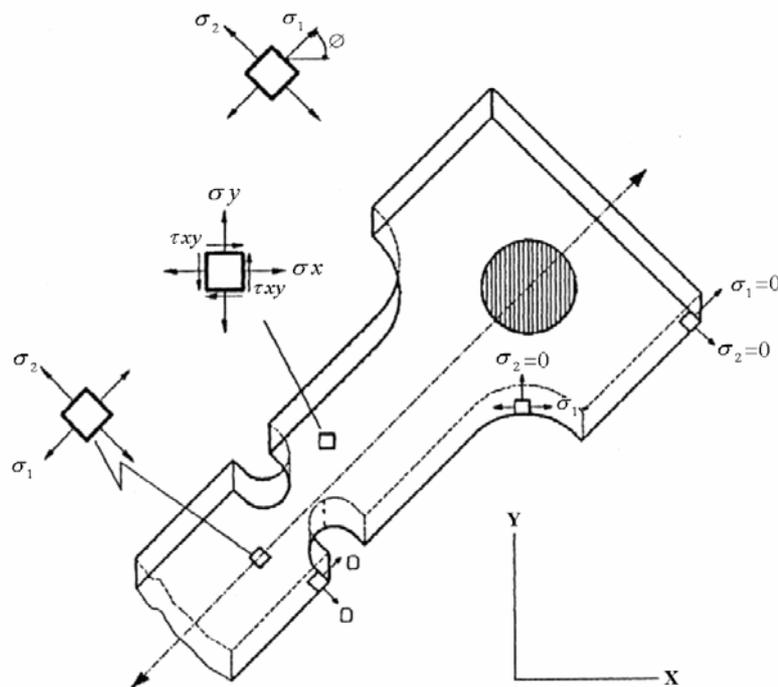


**Gráfico 2-4. Estados de esfuerzo en un cuerpo con más de dos planos**

Entonces el problema se reduce a la determinación de los valores de dos esfuerzos principales y la dirección de uno de ellos, o el valor de dos esfuerzos normales y un esfuerzo cortante.

La situación de esfuerzos en un plano se encuentra en placas delgadas cargadas en un plano y en las superficies libres de los cuerpos tridimensionales lo que significa que deben determinarse tres cantidades en cada caso.

Más simplificación se da, cuando se tiene una placa delgada con un eje de simetría y cargada simétricamente con respecto a ese eje como en la gráfico 2-5 muestra un estado de esfuerzo en una placa con carga en un plano. Tiene que determinarse solamente los dos esfuerzos principales para los puntos situados en el eje de la placa.



**Gráfico 2-5. Estado de esfuerzo en una placa con carga en un plano**

En los puntos situados en los bordes libres de la placa, existe solo una incógnita el valor del esfuerzo paralelo al borde. En las aplicaciones industriales el problema se simplifica con frecuencia, ya que solo se desea conocer ciertos esfuerzos importantes

(por ejemplo, los que producen talla) en algunas regiones del cuerpo, o en puntos específicos y con estas limitaciones se hace mas sencillo el problema.

Según la naturaleza del problema, el objetivo puede ser:

- Conocer solo esfuerzos superficiales.
- Determinar el esfuerzo cortante máximo, (que es proporcional a la diferencia entre los esfuerzos principales) o a la determinación de uno de los esfuerzos principales máximos.
- Conocer el punto donde se producen los esfuerzos máximos. Entonces no será necesario usar un análisis completo de la superficie para determinar los esfuerzos máximos en dicho punto.

**2.2.3. Fundamentos sobre análisis de esfuerzos y deformaciones.-** Cuando se emplean métodos teóricos, en general los resultados del análisis se dan en función de los esfuerzos. En los métodos experimentales sin embargo por lo general se determina primero las deformaciones no los esfuerzos. Solamente cuando el análisis se lleva un paso más adelante, se calculan los esfuerzos con las deformaciones; lo que se hace generalmente por medio de la ley de Hooke o, en casos especiales, por medio de alguna otra relación de esfuerzo-deformación. Los esfuerzos y las deformaciones son conceptos matemáticos.

Cuando una barra recta se somete a un a carga de tensión, la barra se alarga. El grado de alargamiento recibe el nombre de deformación, y se define como el alargamiento producido por unidad de longitud original de la barra, gráfico 2-6

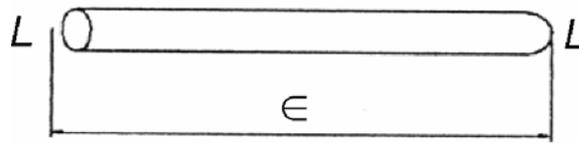


Gráfico 2-6. Deformación

$$\epsilon = \frac{L' - L}{L} = \frac{\delta}{L} \quad (2.1)$$

Donde:

$\delta$  = Deformación (*m*)

$L'$  = Longitud final (*m*)

$L$  = Longitud inicial (*m*)

$\epsilon$  = Deformación unitaria (*adimensional*)

**2.2.3.1. Esfuerzo.-** La ley de Hooke establece que, dentro del límite de proporcionalidad el esfuerzo en un material es directamente proporcional a la deformación que lo produce, donde:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (2.2)$$

Donde:

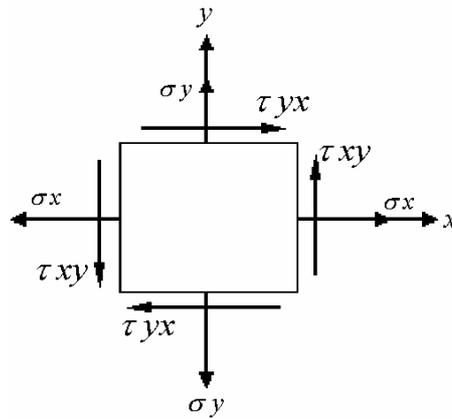
$\sigma$  = Esfuerzo ( $N/m^2$ )

$E$  = Modulo de elasticidad ( $N/m^2$ )

$\epsilon$  = Deformación elástica (*m*)

**2.2.4. Estado de esfuerzo y deformación en problemas dimensionales.-** En el problema de esfuerzos en un plano, indicado el estado de esfuerzo o plano bidimensional en uno de los esfuerzos principales es cero, y deben determinarse tres cantidades. En general, se determinan tres deformaciones principales usando la Ley de Hooke y el principio de superposición, donde la constante  $\nu$  se la conoce por la

relación de Poisson. Las deformaciones principales como se indica en el gráfico 2-7 son:



**Grafico 2-7. Estado de esfuerzos**

A través de las ecuaciones 1.6 y 1.7 se determinan las deformaciones principales en cada uno de los planos. Después que se han determinado las deformaciones pueden obtenerse los esfuerzos usando la misma ley de Hooke.

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_x + \nu \cdot \epsilon_y) \quad (2.3)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_y + \nu \cdot \epsilon_x) \quad (2.4)$$

$$\sigma_z = 0 \quad (2.5)$$

Donde:

$\sigma_x$  = Esfuerzo en  $x$  ( $N/m^2$ )

$\sigma_y$  = Esfuerzo en  $y$  ( $N/m^2$ )

$\sigma_z$  = Esfuerzo en  $z$

$E$  = Modulo de elasticidad ( $N/m^2$ )

$\nu$  = Relación de Poisson (*adimensional*)

Se pueden obtener cómodamente los esfuerzos principales de las tres deformaciones obtenidas experimentalmente.

Las direcciones de los esfuerzos principales coinciden con las direcciones de las deformaciones principales en un medio isótropo, elástico continuo.

El círculo de Mohr, indicado en el gráfico 2-8 es la interpretación gráfica para las fórmulas establecidas de los esfuerzos. En el círculo de Mohr  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  y  $\tau_{xy}$  son constantes conocidas que definen el estado plano de esfuerzo, mientras que  $\sigma$  y  $\tau$  son variables.

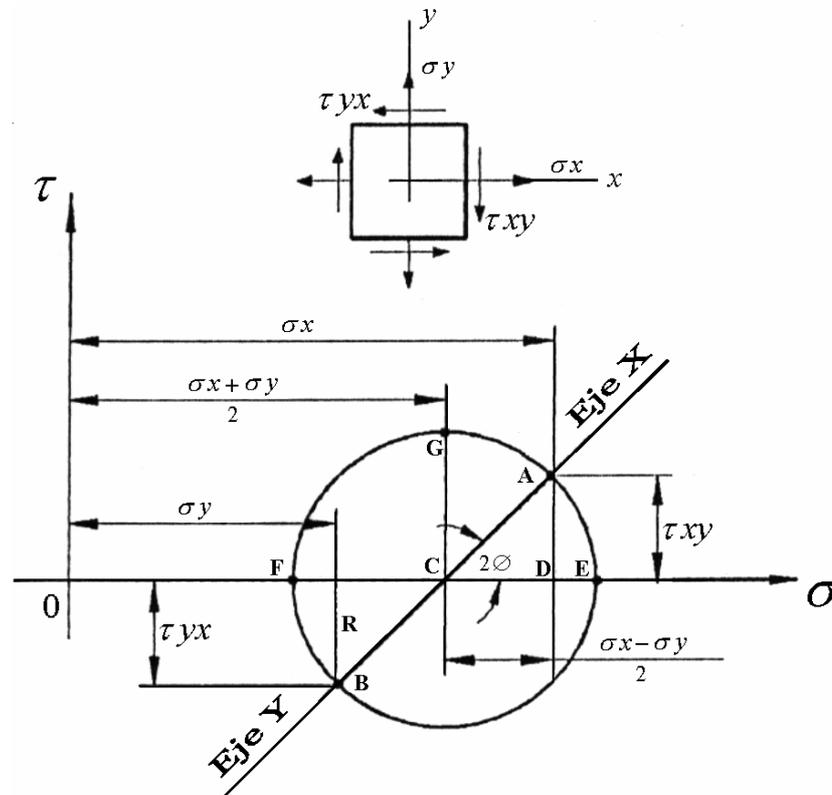


Gráfico 2-8. Círculo de Mohr

Del círculo de Mohr obtenemos los esfuerzos principales y el esfuerzo cortante máximo:

$$(\sigma)_{\max \min} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + (\tau_{xy})^2} \quad (2.6)$$

$$(\tau)_{\max} = \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + (\tau_{xy})^2} \quad (2.7)$$

Donde:

$(\sigma)_{\max \min}$  = Esfuerzos principales ( $N/m^2$ )

$(\tau)_{\max}$  = Esfuerzo cortante máximo ( $N/m^2$ )

$\sigma_x$  = Esfuerzo en  $x$  ( $N/m^2$ )

$\sigma_y$  = Esfuerzo en  $y$  ( $N/m^2$ )

$\tau_{xy}$  = Esfuerzo cortante  $xy$

### 2.3. Materiales foto elásticos

**2.3.1. Descripción.-** Existe gran variedad de materiales foto elásticos disponibles en el mercado y su selección dependerá del tipo de aplicación que se vaya a realizar. Los materiales se presentan en forma de: hojas, líquidos para colar, bloques prefundidos y volúmenes listos para maquinar; cada uno de estos en variedad de dimensión y cantidad.

La preparación del material, el proceso de manufactura del modelo y la aplicación de carga en los modelos de prueba se realiza a temperatura ambiente, es decir las franjas permanecen en el modelo solamente mientras esta bajo sollicitación de carga.

### 2.3.2. Clasificación

- Materiales de alta sensibilidad óptica, útiles para la determinación de las franjas isocromáticas (valor del esfuerzo).
- Materiales de baja sensibilidad óptica usados para la determinación de las líneas isóclinas (dirección de esfuerzos).

**2.3.3. Especificaciones de los materiales foto elásticos.-** Existen Materiales foto elásticos que se preparan con variación de temperatura, específicamente las Aralditas que son resinas epoxy usadas para el método de "congelación" de esfuerzos.

La "congelación" de esfuerzos, permite fijar las franjas en el modelo, esto se consigue manteniendo cargado el modelo a temperatura sobre el punto de ablandamiento y luego enfriándolo a temperatura ambiente, al retirar la carga los esfuerzos permanecen en el modelo, esta técnica se puede aplicar a modelos en dos y tres dimensiones.

En general los materiales que presentan fácil maquinabilidad, excelente transparencia y bajo efecto de borde, con un proceso de manufactura de modelos adecuado, aseguran un producto de alta calidad

Los materiales foto elásticos usados para la determinación de franjas isocromáticas deben poseer alta sensibilidad óptica, en este grupo se prefieren los poli carbonatos, poliuretanos y algunas resinas epoxy.

Para la determinación de líneas isóclinas se desea que el material tenga baja sensibilidad óptica prefiriendo los acrílicos, plexiglás o perpexs. Estos materiales deben poseer un bajo efecto de borde, esta es una característica que se presenta en los modelos después de algún tiempo, especialmente cuando se almacenan sin tomar precauciones. Ocurre con frecuencia en modelos elaborados con la mezcla de resina

básica y un endurecedor, ya que al eliminar humedad de la probeta aparecen ocasionalmente franjas debido a tensiones por contracción; en otro tipo de materiales aparecen franjas debido a la absorción de humedad, que se encuentra en el medio ambiente. Para el método de "congelación" de esfuerzos se usan las aralditas.

#### **2.3.4. Tipos de materiales foto elásticos.**

**2.3.4.1. Policarbonato.-** Son elaborados en forma de: fibras, películas y barnices, pueden producirse por la mezcla de resina y endurecedores adecuados; las resinas convenientemente secas, pueden trabajarse por extrusión, estampación e inyección.

Este plástico es manufacturado en forma de hojas planas por Bayer y vendido bajo el nombre de Makrolon. Este tiene una alta sensibilidad óptica combinado con un razonable y alto módulo de elasticidad, con una excepcional facilidad para la configuración.

Los valores de franjas y coeficientes de deformación son prácticamente los mismos que los de las resinas epoxy. El policarbonato esta prácticamente libre del efecto de borde y muestra pequeños deslizamientos a temperatura ambiente. Aunque la tensión inicial usualmente resulta del proceso de manufactura, esta puede ser eliminada por calentamiento a altas temperaturas.

**2.3.4.2. Resinas epoxy.-** Es de uso muy extenso como material foto elástico, las resinas epoxy crean convenientemente modelos para dos y tres dimensiones y son usadas para investigaciones de recubrimientos birrefringentes. Estas poseen buenas propiedades ópticas y mecánicas, solamente en láminas muy delgadas son susceptibles a los efectos de borde y relativamente de bajo costo.

Las resinas epoxy tienen buenas propiedades de fundición, se usan en la fabricación de modelos complicados. Aunque están disponibles como un material completamente polimerizado, usualmente en forma de hojas planas, que son convenientes para trabajos foto elásticos en dos dimensiones, las resinas epoxy son mas comúnmente suministradas como una resina básica y un endurecedor. Entonces la resina final es formada por la reacción química entre la resina y el endurecedor, cuando las dos son mezcladas en la cantidad y temperatura conveniente.

**2.3.4.3. Araldita.-** Llamada resina para colar, es una resina epoxy en forma líquida, es un plástico modificado, el cual solidifica al unirse con el endurecedor a temperaturas entre 20° y 60°C, sin someterse a presión y pasando casi todo a estado sólido. Se presta para trabajos mediante colado, particularmente en pequeñas y medianas cantidades. Durante el endurecimiento no se verifica presencia alguna de sustancias volátiles, esta combinación se demuestra poco irritante para la piel.

**2.3.4.4. Plexiglás.-** El plexiglás y perspex son los nombres en el mercado del polimetraclorato, y puede encontrarse a un costo moderado en forma de hojas planas, exentas de burbujas, altamente pulidas y con variedad en espesor y medidas. El material es altamente transparente, libre de colores y tensión inicial, es muy elástico, plegable y no es frágil. Está prácticamente exento de deslizamiento y efectos de borde.

La sensibilidad óptica del plexiglás es muy baja, produce los mismos órdenes de franja que el vidrio, es por esto que se debe evitar su uso para la determinación de franjas cromáticas, la virtual ausencia de estas hace que el material sea conveniente para la determinación de líneas isóclinas.

**2.3.4.5. Lexan.-** Es una resina de poli carbonato resultante de la reacción entre derivados del ácido carbónico y el bis fenol A este termoplástico de ingeniería se ha tornado muy conocido por ser transparente como el vidrio y resistente como el acero. Existen, actualmente desarrollados más de 20 tipos diferentes de lexan. Muchos de estos tipos son agregados para mejorar las propiedades originales del poli carbonato para una determinada aplicación, como: fibra de vidrio, aditivos anti-llama, desmoldantes, antioxidantes, etc. Todos estos materiales pueden ser comercializados en "color" transparente (excepto los materiales con fibra y algunos anti-llama) o en colores traslucidos u opacas.

Las películas de lexan de poli carbonato constituyen una colección de productos fabricados por extrusión de gran precisión. Ellos proporcionan una combinación ideal de diferentes propiedades como: transparencia, estabilidad dimensional, resistencia, flexibilidad, resistencia al calor, buen comportamiento dieléctrico e imprimibilidad.

La impresión en la cara posterior del lexan resulta en una durabilidad gráfica excepcional. La excelente transparencia permite además una representación fiel de los colores. A esto se añade que forman una base fácil de imprimir, con una excelente adherencia de la tinta, sin necesidad de tratamiento previo.

Más económica y versátil que el metal, los films de policarbonato lexan son más fáciles de procesar, permitiendo mayor libertad de diseño. La variedad de texturas permite mayor libertad de diseño y proporciona mayor durabilidad y elegancia a la gama completa de aplicaciones.

**2.3.5. Características técnicas de los principales materiales foto elásticos.-** Los materiales foto elásticos tienen propiedades generales como peso específico y

capacidad de absorción de agua, propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas y propiedades ópticas. En esta investigación son de utilidad algunas propiedades ópticas y mecánicas, que se incluyen en los Anexos: Tabla A2, Tabla A3 y Tabla A4.

En el anexo Tabla A2, las unidades están en el S.I. La primera columna indica el valor de franja que se puede obtener con valores de esfuerzos dentro del límite elástico, en 1plg de espesor, al igual que la tercera pero a temperatura crítica, la segunda columna indica la temperatura a la que el material se vuelve blando, los demás corresponden a propiedades mecánicas.

**2.3.6. Selección del material de trabajo.-** Para realizar las experimentaciones en el banco de pruebas foto elástico, se ha seleccionado a la resina llamada Araldita, ya que esta presenta características positivas para nuestro trabajo y se la puede encontrar en nuestro medio.

#### **2.3.6.1. Características de la Araldita**

- Es un plástico modificado, el cual solidifica al unirse con el endurecedor a temperaturas entre 20° y 60°C, sin someterse a presión y pasando casi todo a estado sólido.
- Se presta para trabajos mediante colado, particularmente en pequeñas y medianas cantidades.
- Es poco irritante para la piel.
- Excelente adhesividad
- No es conveniente colar más de 500g de mezcla, cuando se trata de piezas pequeñas.

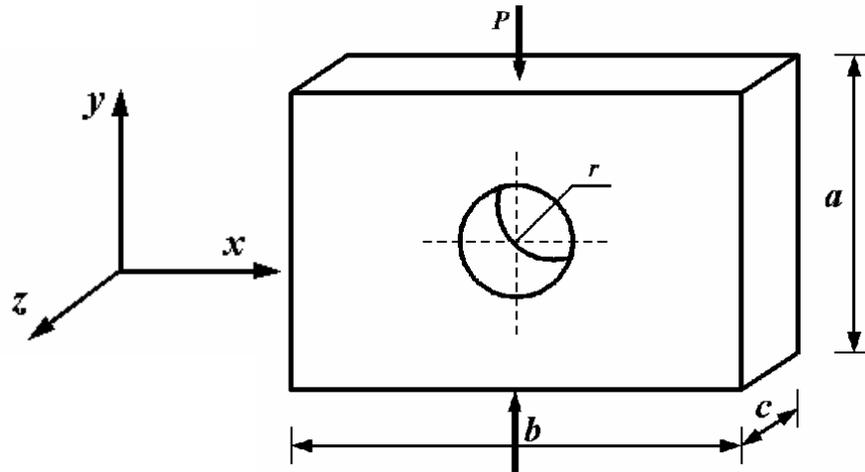
- El material de carga sirve también para reducir tensiones internas y la pieza presenta una menor absorción de agua, una mayor estabilidad dimensional al calor y una elevada resistencia a la compresión.

-En la elaboración de la mezcla, la elevada viscosidad de la masa es una dificultad para eliminar las burbujas y obtener una óptima transparencia.

### CAPÍTULO 3

#### ANÁLISIS MATEMÁTICO

**3.1. Datos específicos.-** En el gráfico 3-1 se indica la probeta que se va a analizar con el propósito de visualizar los datos foto elásticos.



**Gráfico 3-1. Modelo foto elástico**

Material = Araldita CT200 (*Resinas Epoxy*)

$E$  = Módulo de elasticidad  $2.76 \times 10^9 \text{ N/m}^2$  (*anexo Tabla A2*)

$\nu$  = Coeficiente de poisson 0.4 (*adimensional*) (*anexo Tabla A2*)

$P$  = Carga a compresión 198N

$a$  = Alto del modelo 0.05m

$b$  = Ancho del modelo 0.07m

$c$  = Espesor del modelo 0.01m

$r$  = Radio del círculo 0.005m

### 3.2. Construcción de la línea isocromática

#### 3.2.1. Cálculo de la deformación total de la magnitud ( $a$ ).- Aplicando la ecuación

de la ley de Hooke<sup>5</sup>, determinamos la deformación total

$$\delta_y = \frac{P \cdot a}{(b \cdot c)E} \quad (3.1)$$

Donde:

$\delta_y$  = Deformación total a lo largo del eje  $y$  ( $m$ )

$P$  = Fuerza ( $N$ )

$a$  = Alto del modelo ( $m$ )

$b$  = Ancho del modelo ( $m$ )

$c$  = Espesor del modelo ( $m$ )

$$\delta_y = \frac{198N \cdot 0.05m}{(0.07m \cdot 0.01m) 2.76 \times 10^{-6} N/m^2}$$

$$\delta_y = -5.124 \times 10^{-6} m \text{ (a cortamiento)}$$

#### 3.2.2. Cálculo de la deformación unitaria ( $\epsilon_y$ ) utilizando la ecuación 2.1.

$$\epsilon_y = \frac{\delta_y}{a}$$

Donde:

$\epsilon_y$  = Deformación unitaria en el eje  $y$ <sup>6</sup>.

$\delta_y$  = Deformación total a lo largo del eje  $y$  ( $m$ ) (Ec. 3.1)

$a$  = Alto del modelo ( $m$ )

<sup>5</sup> Establece que, dentro del límite de proporcionalidad el esfuerzo en un material es directamente proporcional a la deformación que lo produce.

<sup>6</sup> *Elasticidad. Tercera edición.* Luis Ortiz Berrocal. Mc GRAW HILL

$$\epsilon_y = \frac{-5.14 \times 10^{-6}}{0.05}$$

$$\epsilon_y = -102.48 \times 10^{-6}$$

### 3.2.3. Cálculo de la longitud final en el eje y

$$Lf_y = a - \delta_y \quad (3.2)$$

Donde:

$Lf_y$  = Longitud final en y (m)<sup>7</sup>

$\delta_y$  = Deformación total en el eje y (m) (Ec. 3.1)

$$Lf_y = -5.124 \times 10^{-6} m + 0.05 m$$

$$Lf_y = 0.049 m$$

### 3.2.4. Cálculo de la deformación unitaria ( $\epsilon_x$ ).

$$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y} \quad (3.3)$$

Donde:

$\nu$  = Relación de Poisson 0.4 (adimensional) (Anexo A2)

$\epsilon_x$  = Deformación unitaria en el eje x (m)

$$\epsilon_x = -\nu \cdot \epsilon_y$$

$$\epsilon_x = -0.4 (-102.48 \times 10^{-6} m)$$

$$\epsilon_x = 40.99 \times 10^{-6} m \text{ Ensanchando}$$

<sup>7</sup> Elasticidad. Tercera edición. Luis Ortiz Berrocal. Mc GRAW HILL

**3.2.5. Cálculo de la deformación total ( $\delta_x$ ).**- Aplicando la ecuación 2.1 obtenemos:

$$\epsilon_x = \frac{\delta_x}{L} = \frac{\delta_x}{b}$$

$$\delta_x = b \cdot \epsilon_x$$

Donde:

$\delta_x$  = Deformación total a lo largo del eje  $x$  (m).<sup>8</sup>

$\epsilon_x$  = Deformación unitaria en el eje  $x$  (m).<sup>9</sup>

$b$  = Ancho del modelo (m)

$$\delta_x = 0.07m \quad (40.99 \times 10^{-6} m)$$

$$\delta_x = 2.86 \times 10^{-6} m \quad \text{Alargamiento}$$

**3.2.6. Cálculo de la longitud final en el eje (x).** Aplicando la ecuación 3.3 obtenemos:

$$Lf_x = -\delta_x + b \quad (3.4)$$

Donde:

$Lf_x$  = Longitud final en  $x$  (m).<sup>10</sup>

$$Lf_x = 2.86 \times 10^{-6} m + 0.07m$$

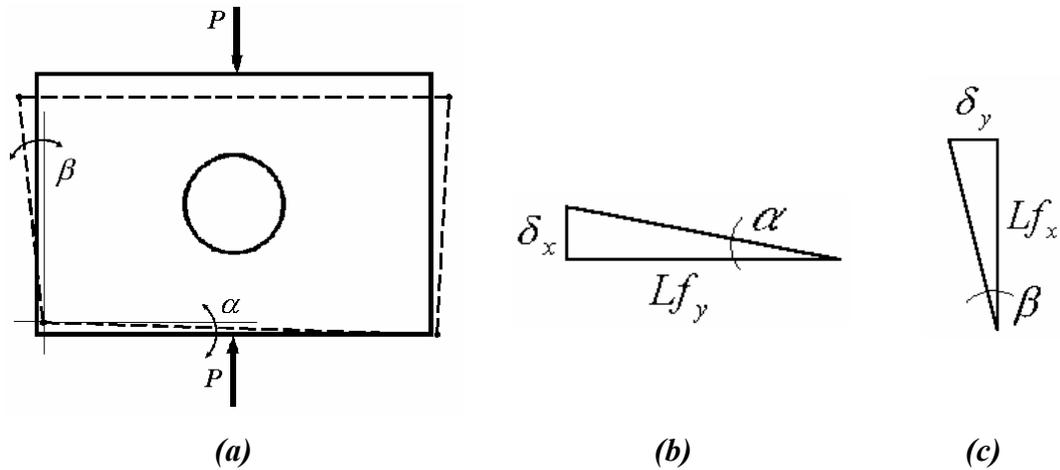
$$Lf_x = 0.07000286m$$

<sup>8</sup> *Elasticidad. Tercera edición.* Luis Ortiz Berrocal. Mc GRAW HILL

<sup>9</sup> Ídem

<sup>10</sup> Ídem

**3.2.7. Cálculo de las variaciones angulares ( $\beta$ ) y ( $\alpha$ ).**- En grafico 3-2a, b y c se indican las deformaciones angulares a la que esta sujeta la probeta, como también las diferentes componentes angulares de donde se saca el resultado.



**Gráfico 3-2. Deformaciones angulares de la probeta**

$$\alpha = \frac{\delta_x}{Lf_y} \quad (3.5a)$$

Donde:

$Lf_y$  = Longitud final en  $x$  (m).<sup>10</sup>

$\alpha$  = Ángulo de deformación en  $y$ .<sup>11</sup>

$$\alpha = \frac{2.086 \times 10^{-6} m}{0.049 m}$$

$$\alpha = 58.36 \times 10^{-6}$$

<sup>11</sup> La deformación angular  $\beta$  es siempre muy pequeña  $\therefore \operatorname{tg}\beta \approx \beta$  con lo que  $\beta = \frac{\delta_y}{Lf_x}$

$$\beta = \frac{\delta_y}{Lf_x} \quad (3.5b)$$

Donde:

$Lf_x$  = Longitud final en  $x$  (m).<sup>10</sup>

$\beta$  = Ángulo de deformación en  $x$

$$\beta = \frac{-5.124 \times 10^{-6} m}{0.07 m}$$

$$\beta = -73.2 \times 10^{-6}$$

### 3.2.8. Cálculo de la suma de variaciones angulares.

$$\gamma_{xy} = \alpha + \beta \quad (3.6)$$

Donde:

$\gamma_{xy}$  = Suma de variaciones angulares

$$\gamma_{xy} = 58.36 \times 10^{-6} + (-73.2 \times 10^{-6})$$

$$\gamma_{xy} = -14.84 \times 10^{-6}$$

El resultado es negativo porque los ángulos principales rectos aumentan en la deformación

**3.2.9. Cálculo de la matriz de deformación total ( $\epsilon$ ).**- Se obtiene mediante una matriz  $[D]$ <sup>12</sup>

$$[D] = \begin{pmatrix} \epsilon_x - \epsilon & \frac{1}{2} \gamma_{xy} \\ \frac{1}{2} \gamma_{xy} & \epsilon_y - \epsilon \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

<sup>12</sup> *Elasticidad. Tercera edición.* Luis Ortiz Berrocal. Mc GRAW HILL

<sup>13</sup> Ídem

Donde:

$\epsilon_x$  = Deformación unitaria en el eje  $x$

$\epsilon_y$  = Deformación unitaria en el eje  $y$

$\epsilon$  = Deformación total ( $m$ )

$\frac{1}{2}\gamma_{xy}$  = Suma de variaciones angulares

$$[D] = \begin{pmatrix} 40.99 - \epsilon & 7.42 \\ 7.42 & 102.48 - \epsilon \end{pmatrix}$$

$$[D] = [(40.99 - \epsilon)(102.48 - \epsilon) - (-7.42)(7.42)]$$

$$[D] = [(40.99)(102.48) - (40.99)(\epsilon) - (\epsilon)(102.48) + \epsilon^2]$$

$$[D] = -[(-7.42)(7.42)]$$

$$[D] = [4200.65 - 40.99\epsilon - 102.48\epsilon + \epsilon^2] - 55.05$$

$$[D] = \epsilon^2 - 143.47\epsilon - 4145.59$$

Igualamos la ecuación a cero y aplicamos el trinomio de la forma  $ax + bx + c$

$$\begin{matrix} a & b & c \\ \epsilon^2 & -143.47\epsilon & -4145.59 = 0 \end{matrix}$$

$$\epsilon = \frac{a \pm \sqrt{(a)^2 - 4(b)}}{2} \quad (3.8)$$

$$\epsilon = \frac{-143.47 \pm \sqrt{(-143.47)^2 - 4(-4145.59)}}{2}$$

$$\epsilon = \frac{-143.47 \pm 192.78}{2}$$

$$\epsilon_1 = 24.65 \times 10^{-6} m$$

$$\epsilon_2 = -168.125 \times 10^{-6} m$$

**3.2.10.- Cálculo de la deformación del espesor.**

$$e = \epsilon_x + \epsilon_y \quad (3.9)$$

Donde:

$e$  = Deformación del espesor ( $m$ ).<sup>13</sup>

$\epsilon_x$  = Deformación unitaria en el eje  $x$  ( $m$ )

$\epsilon_y$  = Deformación unitaria en el eje  $y$  ( $m$ )

$$e = 40.99m - 102.48m$$

$$e = -61.49 \times 10^{-6} m \text{ Ensanchamiento}$$

**3.2.11. Cálculo del coeficiente de Lamé**

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (3.10)$$

Donde

$\lambda$  = Coeficiente de Lamé ( $N / m$ ).<sup>14</sup>

$E$  = Modulo de elasticidad ( $N / m^2$ )

$\nu$  = Coeficiente de poisson (*adimensional*)

$$\lambda = \frac{0.4 (2.76 \times 10^9)}{(1 + 0.4) (1 - 2(0.4))}$$

$$\lambda = 3.94 \times 10^9 N / m$$

<sup>14</sup> *Elasticidad. Tercera edición.* Luis Ortiz Berrocal. Mc GRAW HILL

<sup>15</sup> Ídem

**3.2.12. Cálculos del modulo de rigidez**

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.11)$$

Donde:

$G$  = Modulo de rigidez ( $N/m^2$ ).<sup>15</sup>

$E$  = Modulo de elasticidad ( $N/m^2$ )

$\nu$  = Coeficiente de poisson (*adimensional*)

$$G = \frac{2.76 \times 10^9}{2(1+0.4)}$$

$$G = 0.985 \times 10^9 N/m^2$$

**3.2.13. Cálculo de las tensiones normales en los planos “x” y “y” a compresión.**

$$\sigma_{nx} = \lambda \cdot e + 2G\epsilon_x \quad (3.12a)$$

$$\sigma_{ny} = \lambda \cdot e + 2G\epsilon_y \quad (3.12b)$$

Donde:

$\sigma_{nx}$  = Tensión en el plano  $x$  ( $N/m$ ).<sup>16</sup>

$\sigma_{ny}$  = Tensión en el plano  $y$  ( $N/m$ ).<sup>17</sup>

$\lambda$  = Coeficiente de Lamé ( $N/m$ ) (Ec.3.10)

$e$  = Deformación del espesor en el modelo foto elástico ( $m$ ) (Ec. 3.9)

$\epsilon_x$  = Deformaciones unitarias en el eje  $x$  ( $m$ ) (Ec.2.1)

$\epsilon_y$  = Deformaciones unitarias en el eje  $y$  ( $m$ ) (Ec.2.1)

$G$  = Modulo de rigidez ( $N/m^2$ ) (Ec.3.11)

<sup>16</sup> *Elasticidad. Tercera edición.* Luis Ortiz Berrocal. Mc GRAW HILL

<sup>17</sup> Ídem

Aplicando la ecuación (3.12a)

$$\sigma_{n_x} = 3.94 \times 10^9 (-61.49 \times 10^{-6}) + 2(0.985 \times 10^9)(40.99 \times 10^{-6})$$

$$\sigma_{n_x} = -0.161 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

Aplicando la ecuación (3.12b)

$$\sigma_{n_y} = 3.94 \times 10^9 (-61.49 \times 10^{-6}) + 2(0.985 \times 10^9)(-102.48 \times 10^{-6})$$

$$\sigma_{n_y} = -0.444 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

### 3.2.14. Cálculo del esfuerzo cortante en el plano x; y.

$$\tau_{x_y} = G \gamma_{x_y} \quad (3.13)$$

Donde:

$\tau_{x_y}$  = Esfuerzo cortante en el plano cartesiano ( $N/m^2$ ).<sup>18</sup>

$\gamma_{x_y}$  = Deformaciones angulares en coordenadas cartesianas (Ec.3.6)

$G$  = Modulo de rigidez ( $N/m^2$ ) (Ec.3.11)

$$\tau_{x_y} = (0.985 \times 10^9) \times (-14.84 \times 10^{-6})$$

$$\tau_{x_y} = -0.146 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

<sup>18</sup> *Elasticidad. Tercera edición.* Luis Ortiz Berrocal. Mc GRAW HILL

### 3.2.15. Cálculo de los esfuerzos principales, aplicando la ecuación 2.6.

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_{nx} + \sigma_{ny}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{nx} - \sigma_{ny}}{2}\right)^2 + (\tau_{xy})^2}$$

Donde:

$\sigma_1$  = Esfuerzos principales ( $N/m^2$ ) (Ec.2.6)

$\sigma_{nx}$  = Esfuerzos normales en coordenadas cartesianas ( $N/m^2$ ) (Ec.3.12a)

$\sigma_{ny}$  = Esfuerzos normales en coordenadas cartesianas ( $N/m^2$ ) (Ec.3.12b)

$\tau_{xy}$  = Esfuerzo cortante en coordenadas cartesianas ( $N/m^2$ ) (Ec.3.13)

$$\sigma_1 = \frac{-0.1613 \times 10^6 - 0.443 \times 10^6}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{-0.1613 \times 10^6 + 0.443 \times 10^6}{2}\right)^2 + (-0.146 \times 10^6)^2}$$

$$\sigma_1 = -0.302 \times 10^6 + 0.203 \times 10^6$$

$$\sigma_1 = -0.09 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

$$\sigma_2 = -0.302 \times 10^6 - 0.203 \times 10^6$$

$$\sigma_2 = -0.50 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

**3.2.16.- Construcción del círculo de Mohr.-** En el gráfico 3-3a y b se indica un elemento diferencial del modelo sujeto a los esfuerzos  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  y  $\tau_{xy}$ .

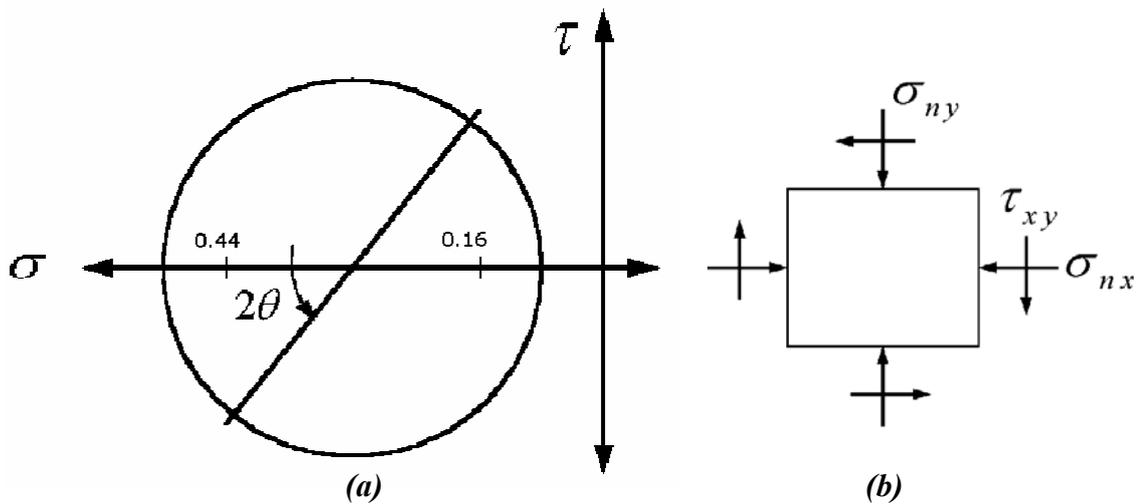


Gráfico 3-3. Diagrama de esfuerzos

Mediante el círculo de Mohr comprobamos  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$

**3.2.17. Cálculo de las direcciones principales.-** donde se encuentran los esfuerzos principales se obtiene mediante la siguiente ecuación.

$$\operatorname{tg} 2\theta = \frac{2 \tau_{xy}}{\sigma_{nx} - \sigma_{ny}} \quad (3.14)$$

Donde:

$\operatorname{tg} 2\theta$  = Ángulo de las direcciones principales (*grad*).<sup>19</sup>

$\tau_{xy}$  = Esfuerzo cortante en el plano cartesiano ( $N/m^2$ )

$\sigma_{nx}$  = Tensiones normales en coordenadas cartesianas ( $N/m^2$ )

$\sigma_{ny}$  = Tensiones normales en coordenadas cartesianas ( $N/m^2$ )

$$\operatorname{tg} 2\theta = \frac{2(-0.146 \times 10^6)}{-0.161 \times 10^6 - (-0.444 \times 10^6)}$$

$$2\theta = -45^\circ$$

$$\theta = 22.5^\circ$$

<sup>19</sup> *Elasticidad. Tercera edición.* Luis Ortiz Berrocal. Mc GRAW HILL

**3.2.18. Cálculo del esfuerzo cortante máximo aplicando la ecuación 2.7.**

$$\tau \max = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{ny} - \sigma_{ny}}{2}\right)^2 + (\tau_{xy})^2}$$

Donde:

$\tau \max$  = Esfuerzo máximo ( $N/m^2$ )

$\sigma_2$  = Tensiones principales ( $N/m^2$ )

$$\tau \max = 0.203 \times 10^6 N/m^2$$

**3.2.19. Cálculo de la deformación transversal unitaria máxima**

$$\left(\frac{1}{2} \gamma_{nx}\right)_{MAX} = \frac{\tau \max}{2G} \quad (3.19)$$

Donde:

$\left(\frac{1}{2} \gamma_{nx}\right)_{MAX}$  = Deformación transversal unitaria máxima

$$\left(\frac{1}{2} \gamma_{nx}\right)_{MAX} = \frac{0.203 \times 10^6 \cdot 360}{2(0.985 \times 10^9)2\pi}$$

$$\left(\frac{1}{2} \gamma_{nx}\right)_{MAX} = 5.8^\circ \times 10^{-3}$$

**3.2.20. Construcción de la isocromática.** Aplicando la ecuación 2.7 tenemos que:

$$\tau \max = 0.203 \times 10^6 N/m^2$$

Calculo de la constante K

$$K = \sigma_1 - \sigma_2$$

$$K = -0.09 - (-0.50)$$

$$K = 0.41 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

Calculo del ángulo  $\chi$

$$\chi = \theta + \frac{\pi}{2}$$

$$\chi = 22.5^\circ + 1.57$$

$$\chi = 24.07^\circ$$

$$\frac{\chi}{2} = 12.03^\circ$$

En el gráfico 3-4 se encuentra la construcción de la isocromática

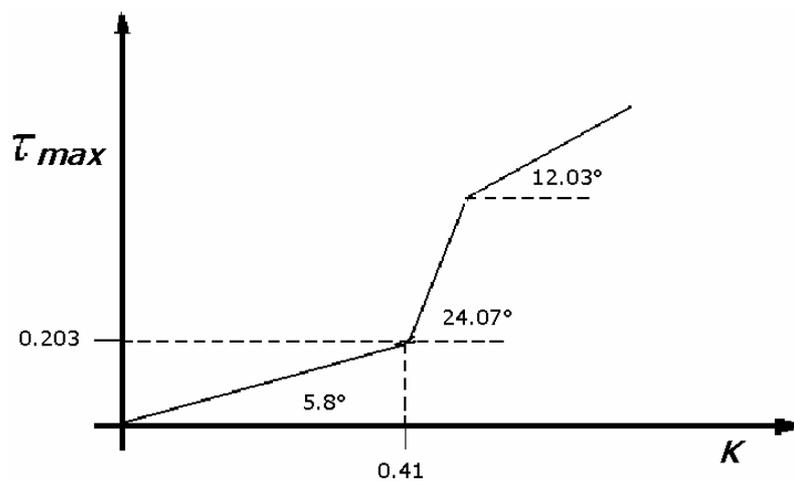


Gráfico 3-4. Construcción de la isocromática

## CAPÍTULO 4

### CONSTRUCCIÓN DEL POLARISCOPIO DE DIFUSIÓN DE LUZ

#### 4.1. Generalidades.

El polariscopio de difusión de luz<sup>20</sup> es un equipo construido para realizar medidas foto elásticas en los campos de la enseñanza, ambientes de la industria y de la investigación. El polariscopio de difusión de luz sirve para medir y estudiar el esfuerzo mecánico resultado de los cambios geométricos en modelos sólidos.

Para realizar la medida foto elástica se pasa la luz por un modelo de plástico transparente objeto del ensayo mientras se aplica una carga al mismo. Los diagramas de esfuerzo en el modelo son isocromáticos, así se puede obtener una imagen general del esfuerzo en el objeto y las concentraciones del esfuerzo que se pueden evaluar como podemos ver en el gráfico 4-1.

El polariscopio de difusión de luz esta compuesto por una fuente de luz monocromática y una de luz blanca que se encuentran situadas dentro de una caja que forma parte de la estructura base. El uso de luz monocromática facilita mucho la evaluación de los diagramas isocromáticos, pero se necesita luz blanca para estudiar las direcciones del esfuerzo principal.

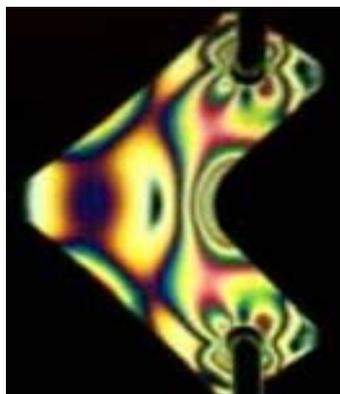


Gráfico 4-1. Espectros foto elásticos

<sup>20</sup> *Polariscopio de difusión de luz.* [http://www.terco.se/esp/PDF/MTL\\_spansk.pdf](http://www.terco.se/esp/PDF/MTL_spansk.pdf). Pagina 13

**4.2. Descripción del equipo.-** El polariscopio de difusión de luz esta compuesto por los siguientes elementos principales, como se indica en la fotografía 4-1.

- Estructura de filtros (a)
  - Filtros polarizadores
  - Filtros retardadores de  $\frac{1}{4}$  de onda
- Fuente de luz (b)
  - Fuente de luz blanca
  - Fuente de luz monocromática
  - Pantalla de difusión de luz
- Sistema de prensa neumático (c)
- Tablero de control (d)
- Estructura base (e)



**Fotografía 4-1. Banco de pruebas foto elástico**

### 4.3. Filtros polarizadores

Los filtros polarizadores tienen un campo de visión de 22cm de diámetro, lo cual nos permite observar con mucha facilidad las diferentes líneas foto elásticas que se producen en el modelo analizado. Estos polarizadores están colocados en unos anillos que a su vez están situados en un soporte circular que permite el movimiento rotacional para poder variar su posición con respecto a la luz y así obtener los campos de luz deseados.

#### 4.3.1. Especificaciones técnicas.-

- Esta laminado en butyrate de acetato celuloso (CAB) para su durabilidad y rigidez.
- La eficacia de transmisión de uno es de 38% y cuando son dos en paralelo de 27%.
- Posee una extinción de luz de 99.98%, cuando los ejes de los polarizadores están cruzados.
- Tiene una absorción de luz y una eficacia de polarización de 99%.
- El espesor de las hojas es de 0.74mm y son de un color gris neutro.
- Son utilizados en la construcción de los displays y en las pantallas de cristal líquido (LCD).

En el gráfico 4-2 podemos ver las características de transmisión.

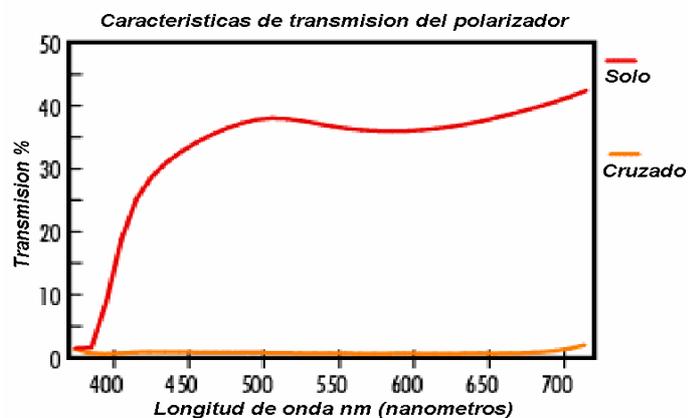


Gráfico 4-2. Características de transmisión del polarizador

#### 4.4. Filtro retardador de $\frac{1}{4}$ de onda

Los filtros retardadores de  $\frac{1}{4}$  de onda tienen un diámetro de 22cm igual que los polarizadores, teniendo una misma amplitud de visualización y dejando ver con facilidad las líneas foto elásticas en el modelo. Estos retardadores van alojados en un juego de anillos y montados en un soporte circular para permitir el movimiento rotacional de los mismos de manera independiente.

##### 4.4.1. Especificaciones técnicas.-

- Esta elaborado en alcohol polivinilico.
- La película es de un material birrefringente claro que cambia la fase el haz de luz polarizada.
- Convierten luz linealmente polarizada en luz circularmente polarizada y viceversa.
- Las combinaciones entre retardador y polarizador son usados para eliminar las reflexiones no deseadas en las imágenes.
- Posee una longitud de onda de 560nm (nanometros).
- Tiene un uniformidad en fase de  $<8\%$  en película entera.
- La transmisión de luz es de 92% y 4% de reflexión en cada cara.
- Tiene un espesor de 0.01 plg y es de color claro.

En el gráfico 4-3 se muestra el polarizador (a) y el retardador de  $\frac{1}{4}$  de onda (b).

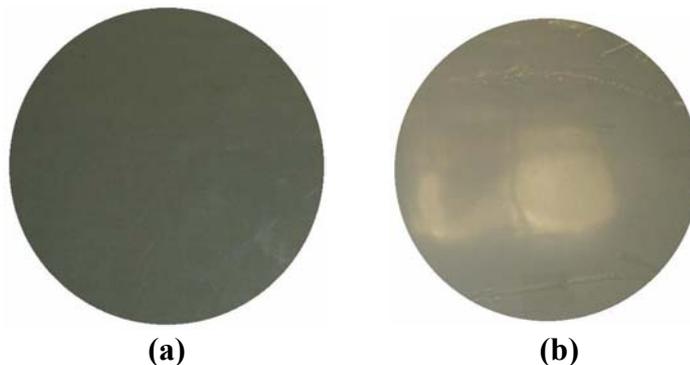


Gráfico 4-3. Filtros

Nota: La adquisición estos filtros especiales los realizo vía internet a través de la siguiente dirección. [www.edmundoptics.com](http://www.edmundoptics.com).

#### 4.5. Estructura soporte de los filtros

Las estructuras de los filtros están fijas sobre un par de patinas con unos canales laterales, que permiten realizar desplazamientos longitudinales del soporte, ya sea hacia adelante o hacia atrás. Debido a que el montaje de la estructura de filtros no es complicado, se pueden intercambiar su ubicación, como podemos observar en la fotografía 4-2.

En esta estructura se colocan los filtros polarizadores y retardadores de  $\frac{1}{4}$  de onda, esta construida en madera debido a su fácil maquinación y su bajo peso. En el equipo contamos con dos estructuras soportes, la primera estructura el filtro polarizador esta fijo y mientras que el retardador de  $\frac{1}{4}$  de onda tiene movimiento rotacional. En la segunda estructura tenemos que tanto el polarizador como el retardador tienen movimiento como se indica en la fotografía 4-3. Estas disposiciones que tienen cada uno de los filtros son para conseguir la variación de la luz cuando se giren cada uno de estos según las condiciones de análisis que se requieran.



**Fotografía 4-2. Estructura de filtros móvil**



**Fotografía 4-3. Polarizador y retardador de  $\frac{1}{4}$  de onda móviles**

Los filtros polarizadores están dispuestos en sus soportes de tal manera que el primero transforma la luz en polarizada y el segundo cumple con el trabajo de ser un analizador ya que en este vamos a tener la visualización de las líneas isoclinas e isocromáticas. Los retardadores de  $\frac{1}{4}$  de onda están situados entre los polarizadores para permitir el cambio de la luz polarizada a luz circular.

#### **4.5.1. Soportes de filtros**

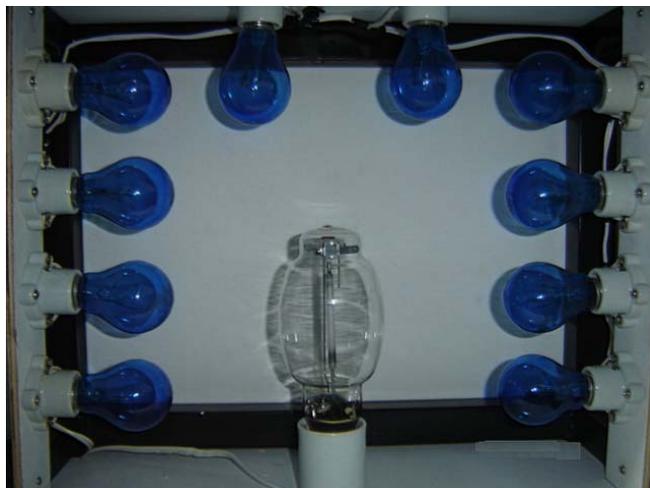
Los filtros están sujetos por un par de anillos construidos en madera que tienen un mismo espesor; con un canal en el interior el cual permite el alojamiento del filtro y la sujeción del mismo, además este sistema de anillos está acoplado dentro de una base circular que permite la rotación completa de cada uno de los filtros para conseguir las condiciones de trabajo requeridas. Están dotados de dos pequeños “tarugos” colocados en la cara frontal que permitirán manipular estos anillos en las especificaciones angulares que se requieran en las pruebas.

Solamente rotará un filtro polarizador y dos retardadores, esto debido a que en las experimentaciones necesitaremos trabajar con variaciones de fondo de luz entonces se fijara un polarizador, es decir que no tendrá rotación.

**4.5.2. Escala de regulación.-** En la superficie exterior del anillo y del soporte están colocados unas reglas circulares con una escala graduada en  $360^\circ$ , que ayudarán a tener una referencia de las variaciones angulares al rotar cada uno de los filtros. La obtención del fondo oscuro y el fondo claro se consigue rotando solamente uno de los dos polarizadores con respecto al otro.

#### **4.6. Fuente de luz**

Es la encargada de proporcionar los diferentes campos luz necesarios para poder realizar el análisis en la probeta, tiene la forma de una caja que internamente contiene la luz blanca y la luz monocromática como se indica en la fotografía 4-4. Esta caja está cerrada en todos sus lados pero en su parte frontal esta provista de una pantalla de vidrio de tipo esmerilado que sirve para obtener luz difusa, interiormente está esmaltada en color blanco para que el reflejo de toda la luz se aproveche al máximo.



**Fotografía 4-4. Fuente de luz**

**4.6.1. Luz blanca.-** Esta compuesta por 10 lámparas incandescentes de luz blanca de 100W, de superficie esmerilada que funcionan a 110V conectadas en paralelo y distribuidas dentro de la caja de tal forma que se pueda aprovechar toda su intensidad. Esta luz de diferente longitud de onda permite identificar las líneas isóclinas con gran nitidez cuando se trabajan con materiales de baja sensibilidad óptica y lograr obtener una mejor resolución de fotografías de los modelos de prueba, además de la obtención de franjas isocromáticas coloreadas.

**4.6.2. Luz monocromática.-** Esta conformada por una lámpara de vapor de sodio de 120W que funciona a 220V y que esta dispuesta en el centro de la caja para obtener un campo de iluminación en todas las direcciones de manera proporcional y así poder aprovechar de mejor manera toda la exposición de luz.

**4.6.3. Pantalla de difusión de luz.-** Es una placa de vidrio de tipo esmerilado como se puede ver en la figura 4-5 que realiza la difusión de los haces de luz, ya que permite que la luz se esparza por toda la superficie del vidrio y se emita una sola luz de tipo constante. El grosor del vidrio esmerilado esta en base a la cantidad de calor que existe en el interior de la caja y esta sujeto por medio de unos soportes.



**Fotografía 4-5. Pantalla de difusión de luz**

#### 4.7. Prensa neumática

El principio de la foto elasticidad nos dice que el elemento analizado además de ser sometido a los diferentes campos de luz también se debe aplicar una carga externa, por lo tanto el polariscopio de difusión de luz esta dotado de un sistema de prensa neumático para realizar las aplicaciones de los esfuerzos en los modelos, en este sistema podemos regular la carga que se aplica a la probeta, así como también podemos variar las posiciones del soporte en caso de tener modelos con dimensiones mayores como de puede observar en la fotografía 4-6.



Fotografía 4-6. Prensa neumática

**4.7.1. Sistema neumático.-** Este sistema esta compuesto principalmente por un pistón de doble efecto que es el encargado de comprimir la probeta en una sola dirección, esta sujetado en su parte superior a la estructura de la prensa. El pistón esta comandado a través de unas cañerías de presión que vienen de una válvula de aire 4/3 y posee un manómetro que registra la presión del aire cuando el pistón descende. La entrada de aire al sistema es a través de una unidad de mantenimiento el cual contiene la toma de conexión rápida del aire presurizado.

Esta unidad es la encargada de mantener la presión como también de realizar la lubricación en los elementos móviles y liberar del aire circulante las impurezas y depositar el agua.

**4.7.2. Estructura de pruebas.-** Se encuentra colocada de manera fija en la estructura base y esta construida en tubo rectangular. El diseño de la estructura es de tal forma que en la parte superior va instalado el pistón neumático y en la parte inferior va un soporte móvil. En las vigas laterales de la estructura están realizados unos agujeros que sirven para poder variar la posición del soporte móvil para trabarlo en la posición deseada, lo cual nos permite utilizar modelos de mayor y de menor dimensión, dependiendo de los diferentes casos que se den.

Posee también un acople que va en el pistón para poder aplicar en el modelo esfuerzos de compresión de forma uniforme.

#### **4.8. Tablero de control**

En este se encuentran instalados los siguientes dispositivos que tienen la función de activar y regular los sistemas de funcionamiento del polariscopio como se observa en la fotografía 4-7.

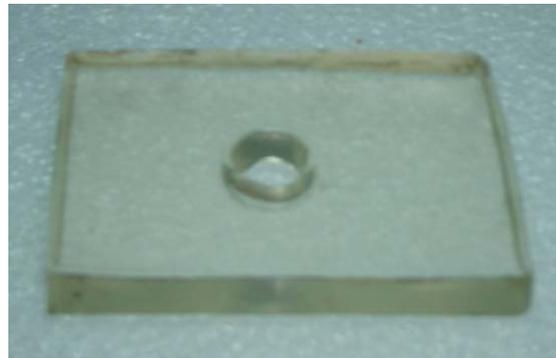
- Un manómetro de control de presión (a)
- Una válvula 4/3 de accionamiento del pistón neumático (b)
- Un interruptor de 220V de accionamiento de luz monocromática (c)
- Un interruptor de 110V de accionamiento de luz blanca (d)



**Fotografía 4-7. Tablero de control**

#### **4.9. Preparación de la probeta**

Existen en el mercado materiales foto elásticos en varias presentaciones: hojas, resina básica y endurecedor, bloques profundos y bloques para maquinar. Para seleccionar el tipo de material debemos tener en cuenta el tipo de prueba mecánica a la que se someterá y la disponibilidad de encontrar el material en nuestro medio. La configuración de la probeta se indica la fotografía 4-8.



**Fotografía 4-8. Probeta**

**4.9.1. Técnica para la preparación de los materiales foto elásticos.-** La diferencia entre los materiales foto elásticos esta en el método de preparación, ya que algunos se trabajan a temperatura ambiente y otros se preparan con variación de temperatura. A temperatura ambiente se trabajan hojas y bloques de material fotoelástico para elaborar modelos en dos y tres dimensiones respectivamente; con variación de

temperatura se trabaja material fotoelástico que sirve para la práctica de la “congelación de esfuerzos”, usándose para modelos en dos y tres dimensiones.

En ambos casos la superficie o el molde en el que se colocará la mezcla deben estar extremadamente limpios, para lo cual se puede usar: alcohol, acetona, etc., dependiendo de la resina a usar.

**4.9.2.- Obtención de la probeta a temperatura ambiente.-** Para preparar la probeta a temperatura ambiente utilizamos una resina básica y un endurecedor. Las cantidades recomendadas para obtener la mezcla correcta de estos materiales son: 100 partes de resina por 70 partes de endurecedor (sistemas epóxicos de relleno WH/HWM-4502). Estos dos elementos se combinan en un recipiente y automáticamente se inicia una reacción exotérmica, a esta temperatura se facilita el homogenizar la mezcla y realizar un adecuado esparcimiento.

Luego se vierte el contenido en un molde que previamente estará cubierto de una sustancia aislante que puede ser aceite para realizar el desmolde con facilidad. Esta mezcla se polimeriza completamente a temperatura ambiente aproximadamente en 24 horas. En la fotografía 4-9 se puede observar el molde utilizado.



**Fotografía**

**a 4-9. Molde de la probeta**

## CAPÍTULO 5

### EXPERIMENTACIÓN

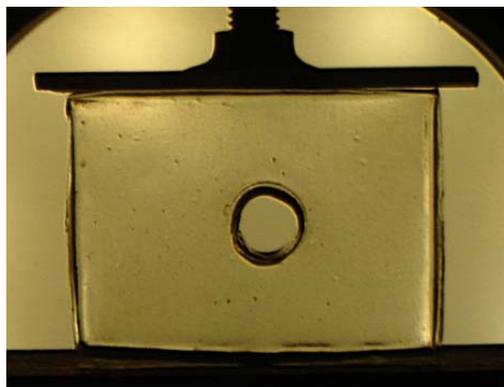
#### 5.1. Generalidades

Por medio de la experimentación se determinará las áreas de mayor concentración de tensiones que están representadas por medio de franjas coloreadas o isocromáticas con ayuda de la luz blanca y también se observará la dirección que tienen los esfuerzos principales por medio de líneas de color negro o isoclinas en presencia de la luz monocromática. Para obtenerlos podemos trabajar con fondo oscuro o fondo claro, cualquiera de estas condiciones de trabajo mas las variaciones de los retardadores de  $\frac{1}{4}$  de onda permitirá visualizar de igual manera los datos foto elásticos.

Con las adecuaciones realizadas en el sistema de filtros se puede variar la posición de los polarizadores y retardadores para conseguir los arreglos necesarios y así obtener los diferentes campos de luz.

#### 5.2. Campo de luz circularmente polarizada

En las fotografías 5-1 y 5-2 se muestran los modelos libres de cargas externas en campos neutros de luz blanca y luz monocromática.



**Fotografía 5-1. Probeta en campo de luz blanca**



Fotografía 5-2. Probeta en campo de luz monocromática

**5.2.1.- Fondo oscuro.-** Se obtiene cuando los ejes de los filtros polarizadores están cruzados, es decir cuando existe la extinción de la luz, como se ve en el gráfico 5-1.

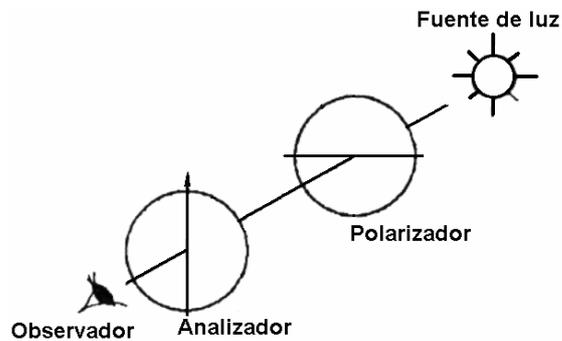


Gráfico 5-1. Polarizadores cruzados

**5.2.1.1- Fondo oscuro y filtros de  $\frac{1}{4}$  de onda cruzados.-** En el gráfico 5-2 se indica la posición de cada uno de los filtros.

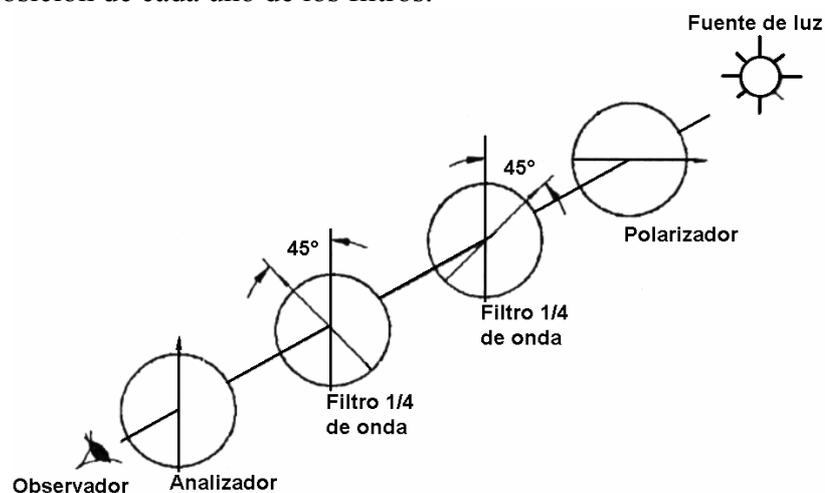
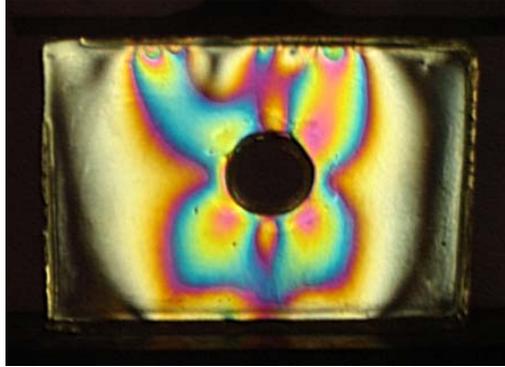
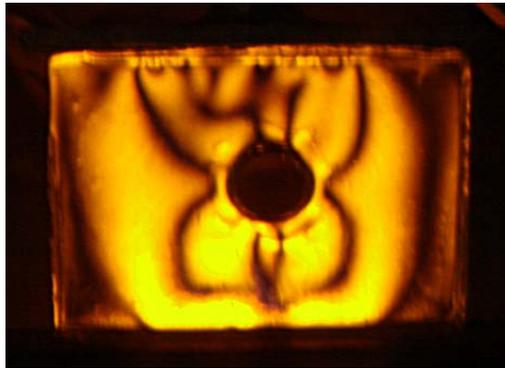


Gráfico 5-2. Filtros polarizadores cruzados y  $\frac{1}{4}$  de onda cruzados

En la fotografía 5-3 se observan las franjas coloreadas o isocromáticas con luz blanca y en la fotografía 5-4 se indican las líneas isoclinas de color negro con luz monocromática.



Fotografía 5-3. Isocromáticas en presencia de luz blanca



Fotografía 5-4. Isoclinas en presencia de luz de monocromática

5.2.1.2- Fondo oscuro y filtros de  $\frac{1}{4}$  de onda paralelos.- En el gráfico 5-3 se enseña la posición de los filtros de  $\frac{1}{4}$  de onda cruzados.

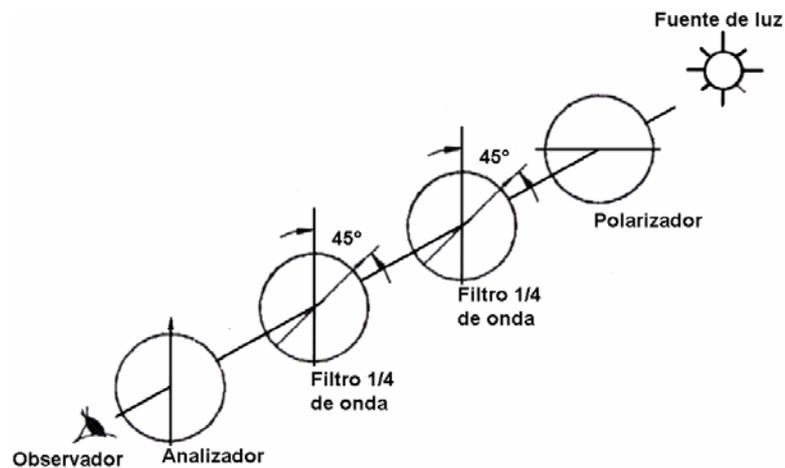
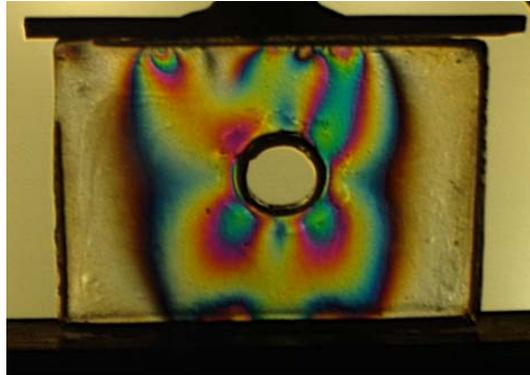
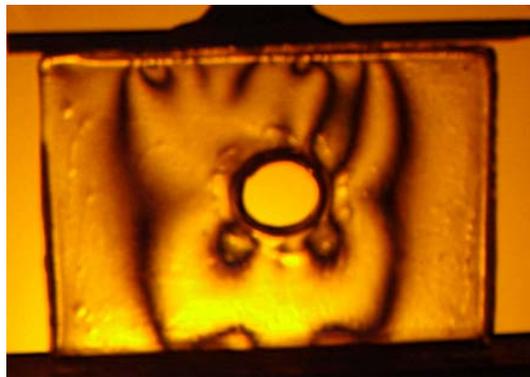


Gráfico 5-3. Filtros polarizadores cruzados y  $\frac{1}{4}$  de onda paralelos

En la fotografía 5-5 se visualiza las franjas isocromáticas y en la 5-6 las líneas isoclinas.



Fotografía 5-5. Isocromáticas en presencia de luz blanca



Fotografía 5-6. Isoclinas en presencia de luz de monocromática

**5.3.2. Fondo claro.-** Se obtiene cuando los ejes de los filtros polarizadores están paralelos y no se produce extinción de la luz, como se ve en el gráfico 5-4.

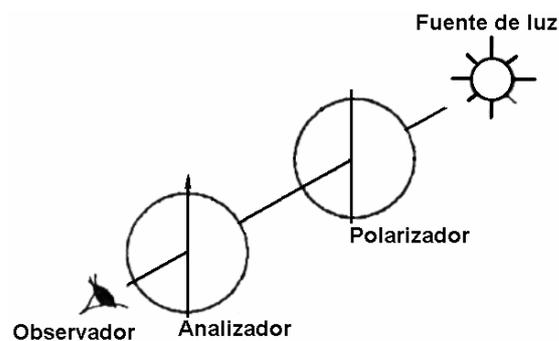
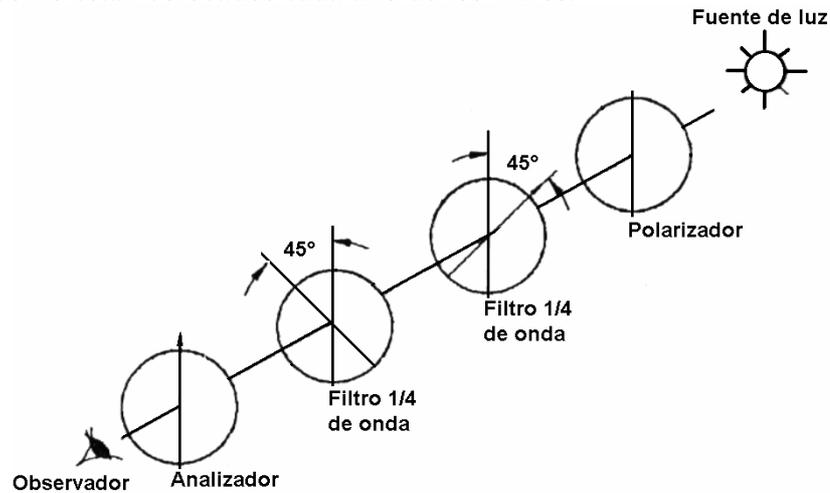


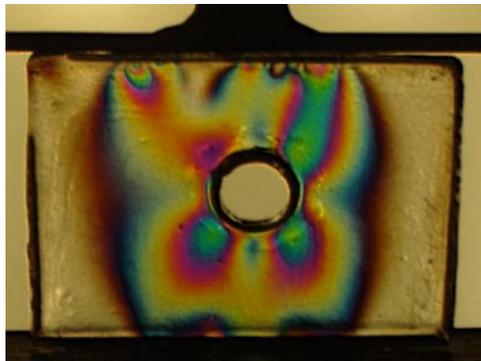
Gráfico 5-4. Polarizadores paralelos

**5.3.2.1.- Fondo claro y filtros de  $\frac{1}{4}$  de onda cruzados.-** En el gráfico 5-5 se muestran como están colocados cada uno de los filtros.

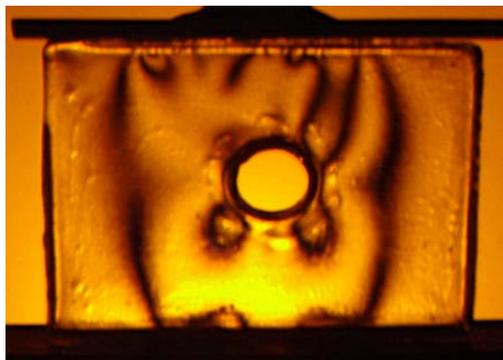


**Gráfico 5-5. Filtros polarizadores paralelos y  $\frac{1}{4}$  de onda cruzados**

En la fotografía 5-7 se visualizan las franjas isocromáticas junto con las líneas isoclinas pero en la fotografía 5-8 con luz monocromática se representan de mejor manera las líneas isoclinas.

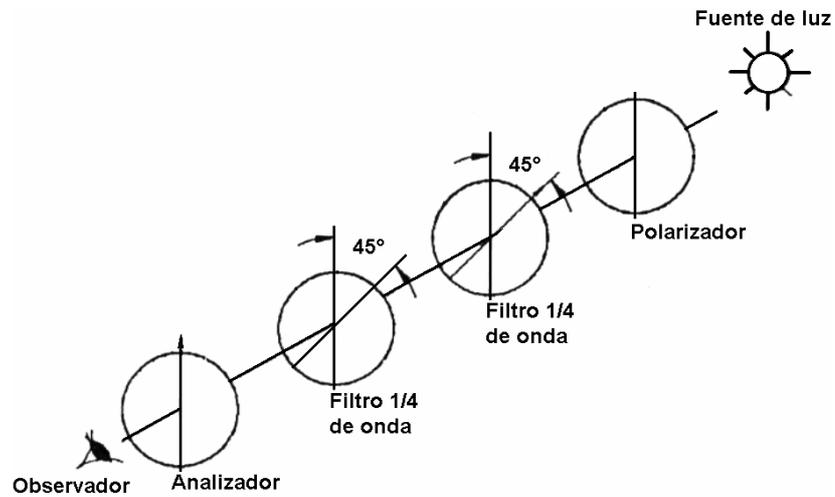


**Fotografía 5-7. Isocromáticas en presencia de luz blanca**



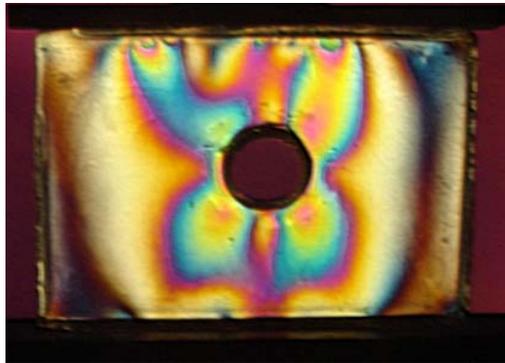
**Fotografía 5-8. Isoclinas en presencia de luz de monocromática**

**5.3.2.2.- Fondo claro y filtros de  $\frac{1}{4}$  de onda paralelos.-** En el gráfico 5-6 se indica la posición de los polarizadores y retardadores.

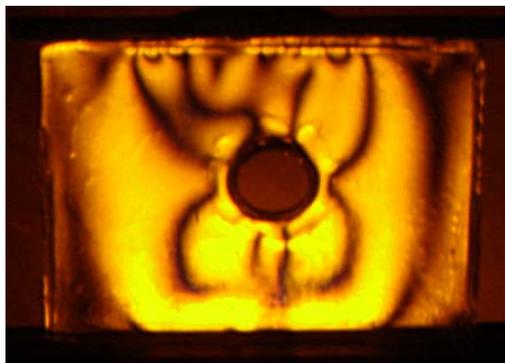


**Gráfico 5-6. Filtros polarizadores paralelos y  $\frac{1}{4}$  de onda paralelos**

En la fotografía 5-9 se representan las franjas isocromáticas y en la 5-9, se muestran las líneas isoclinas.



**Fotografía 5-9. Isocromáticas en presencia de luz blanca**



**Fotografía 5-9. Isoclinas en presencia de luz de monocromática**

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

Al terminar las pruebas y evaluar los resultados del presente trabajo, se pueden aclarar algunas interrogantes que fueron planteadas al inicio de la investigación:

- El análisis de esfuerzos en los elementos mecánicos se simplifica considerablemente con el uso de la técnica foto elástica, por cuanto el análisis matemático requiere de un estudio mucho mas profundo.
- Esta técnica permite visualizar el problema, mediante la observación en el modelo de la distribución de esfuerzos a través de las franjas isocromáticas y líneas isóclinas, de esta manera se puede mejorar el diseño de elementos mecánicos.
- Los materiales empleados en el desarrollo de éste trabajo presentan buenas características foto elásticas, tales como: alta sensibilidad óptica, transparencia, obteniéndose datos foto elásticos nítidos y precisos.
- La técnica de la foto elasticidad permite vincular el área académica con la investigativa, mediante demostraciones prácticas del problema.
- Con esta técnica experimental el laboratorio de la Facultad de Ciencia y Tecnología de la Escuela de Ingeniería Mecánica Automotriz puede desarrollar trabajos de investigación en el campo del análisis experimental de esfuerzos.

### Recomendaciones

- Utilizar ésta técnica para reforzar los conocimientos de los estudiantes en el área de Diseño Mecánico.
- Implementar el laboratorio de la Escuela de Ingeniería Mecánica Automotriz con equipos que permitan la investigación.
- Continuar con el estudio de la técnica de la foto elasticidad partiendo de este documento para el desarrollo de la enseñanza en el laboratorio.

**GLOSARIO**

$\theta_p$	Ángulo de refracción
$\theta_B$	Ángulo de polarización
$n$	Índice de refracción
$R$	Retraso relativo entre las dos componentes que surgen del modelo
$C$	Constante foto elástica del material
$t$	Espesor del modelo
$K$	Coefficiente de tensión-óptico, <i>adimensional</i> .
$E1$ y $E2$	Tensiones principales que actúan perpendicularmente entre si en direcciones normales a la propagación de luz
$\epsilon_x$	Deformación principal en $x$
$\epsilon_y$	Deformación principal en $y$
$\sigma$	Esfuerzo
$\sigma_x$	Esfuerzo en $x$
$\sigma_y$	Esfuerzo en $y$
$\sigma_z$	Esfuerzo en $z$
$E$	Modulo de elasticidad
$\nu$	Relación de Poisson
$\delta$	Deformación
$\delta_y$	Deformación total a lo largo del eje $y$
$\delta_x$	Deformación total a lo largo del eje $x$
$L'$	Longitud final
$L$	Longitud inicial
$\epsilon$	Deformación unitaria

$\epsilon_x$  Deformación unitaria en el eje  $x$

$\epsilon_y$  Deformación unitaria en el eje  $y$

$(\sigma)_{\max \min}$  Esfuerzos principales

$(\tau)_{\max}$  Esfuerzo cortante máximo

$\tau_{xy}$  Esfuerzo cortante en el plano cartesiano

$P$  Fuerza

$Lf_y$  Longitud final en  $y$

$Lf_x$  Longitud final en  $x$  ( $m$ )

$\alpha$  Ángulo de deformación en  $x$

$\gamma_{xy}$  Suma de variaciones angulares

$\gamma_{xy}$  Deformaciones angulares en coordenadas cartesianas

$\frac{1}{2}\gamma_{xy}$  Suma de variaciones angulares

$\lambda$  Coeficiente de Lamé

$G$  Modulo de rigidez

$\sigma_{nx}$  Tensión en el plano  $x$

$\sigma_{ny}$  Tensión en el plano  $y$

$\sigma_{nx}$  Esfuerzos normales en coordenadas cartesianas

$\sigma_{ny}$  Esfuerzos normales en coordenadas cartesianas

$tg 2\theta$  Angulo de las direcciones principales

$\tau_{\max}$  Esfuerzo máximo

$\left(\frac{1}{2}\gamma_{nx}\right)_{MAX}$  Deformación transversal unitaria máxima

## BIBLIOGRAFÍA

### **REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS:**

HEYWOOD, R. B. *Photo elasticity for Designers*. Pergamon Press. USA, 1969.

SHIGLEY J., *Diseño en Ingeniería Mecánica*. 3ra Edición. México, 1985

RILEY W. F., *Introduction to Photomechanis*. N. M. Newark USA, 1965.

ORTIZ BERROCAL Luis, *Elasticidad*. Tercera edición. Mc GRAW HILL

MONDINA Aldo, *Analisi Sperimentale delle Tensioni*. 2da Edición. Milano, 1982.

AVRIL Jean, *Encyclopédie D'Analyse des Contraintes*. Francia, 1984.

KUSKE A., ROBERTSON G., *Photo elastic Stress Analysis*. Gran Bretaña, 1974.

DURE A. J. 11 I, *Aplicaciones del Análisis de Esfuerzos*. México, 1968.

DURELLI A. J., *Introduction to Photomechanis*. N. M. Newark USA, 1965.

MITCHELL L., *Diseño en Ingeniería Mecánica*. 3ra Edición. Mexico, 1985

### **REFERENCIAS ELECTRONICAS:**

**Definiciones generales** <http://fisica.usach.cl>

**Birrefringencia de los materiales** <http://www.ucm.es>

**Propiedades ópticas de la luz**

<http://edafologia.ugr.es>

<http://www.difo.uah.es>

<http://www.ciencias.alcala.es>

<http://www.lfcia.org>

<http://www.maloka.org>

<http://www.upv.es>

**El polariscopio** <http://www.terco.se>

**Materiales foto elásticos**

<http://www.bhphotovideo.com>

<http://www.es.ebay.com>

<http://www.edmundoptics.com>

<http://www.infaimon.com>

## ANEXOS

Tabla A1.- Valores de los índices de refracción de algunos materiales birrefringentes

MATERIAL	INDICE RAPIDO (nr)	INDICE LENTO (nl)
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

Tabla A2.- Propiedades ópticas y mecánicas de materiales foto elástico

MATERIAL	VALOR FRANJA T. AMB KN/m <sup>2</sup> x fr/m	TEMP. CRIT °C	VALOR FRANJA T. CRIT KN/m <sup>2</sup> x fr/m	LIMITE ELASTICO MN/m <sup>2</sup>	ESFUERZO MAXIMO MN/m <sup>2</sup>	E GN/m <sup>2</sup>	RAZON POISON
Vidrio	280	-	-	60	69	6.21	0.25
Perspex plasticised	175	-	-	-	48.3	3.10	-
Perspex unplasticised	142.5	-	-	-	48.3	2.76	0.38
Celluloid	52.5	-	-	27.6	51.7	2.51	0.33
Xilonite	52.5	-	-	34.5 - 55.2	34.5 - 55.2	2.07	0.35
Columbia CR 39	16.8	85	6.12	20.7	48.3	1.72	0.42
Bakelite BT61-893	15.2	110	0.55	41.3	117.1	4.24	0.365
PLM-4	10.5	110	0.384	-	62	2.93	0.36
PSM-5	10.5	-	-	-	-	3.10	0.36
Araldite CT-200	10.1	118	0.244	37.9	69	2.76	0.40
Catalin 800	8.30	85	0.28	-	17.23	1.29	-
Araldita MY 753	7.87	-	-	-	62	3.10	0.35
Makralon	7.17	150	0.133	33.8	61.3	2.28	0.435
PSM-1	7.0	-	-	-	-	2.34	0.38
PSM-4	0.7	-	-	-	-	6.894 MN/m <sup>2</sup>	
Gelatinas	0.023 - 0.0875	-	-	-	-	76 KN/m <sup>2</sup>	0.5

**Tabla A3.-** Propiedades de materiales foto elásticos a temperatura ambiente

<b>MATERIAL</b>	<b>NOMBRE COMERCIAL</b>	$C \times 10^5$ $m^2 / N$	$E \times 10^{-7}$ $N/m^2$
<b>Resinas epoxy</b>	Araldite CT-200 30pph phthalic	56.1	320
	Araldite 6020 50pph phthalic	56.6	317
	Bakelite ERL 22774 50pph phthalic	57.2	335
	Estándar HEX-phthalic	52.1	335
<b>Allyl diglycol</b>	C.R. - 39	34.2	200
<b>Polimetacolorato</b>	Perspex	-4.7	280
	Plexiglas	-4.45	300
<b>Policarbonato</b>	Makrolon	78	260
<b>Nitrato celulosa</b>	Celuloide	2 - 20	200 - 250
<b>Vidrio</b>		-2 - $\pm 1.5$	7000
<b>Banda poliuretano</b>	Photoflex	3500	0.07 - 0.3
	Hysol 4458	3500	0.3 - 0.44
<b>Gelatina</b>		2000 - 6000	0.003 - 0.02

**Tabla A4.-** Propiedades de resinas epoxy a temperatura crítica

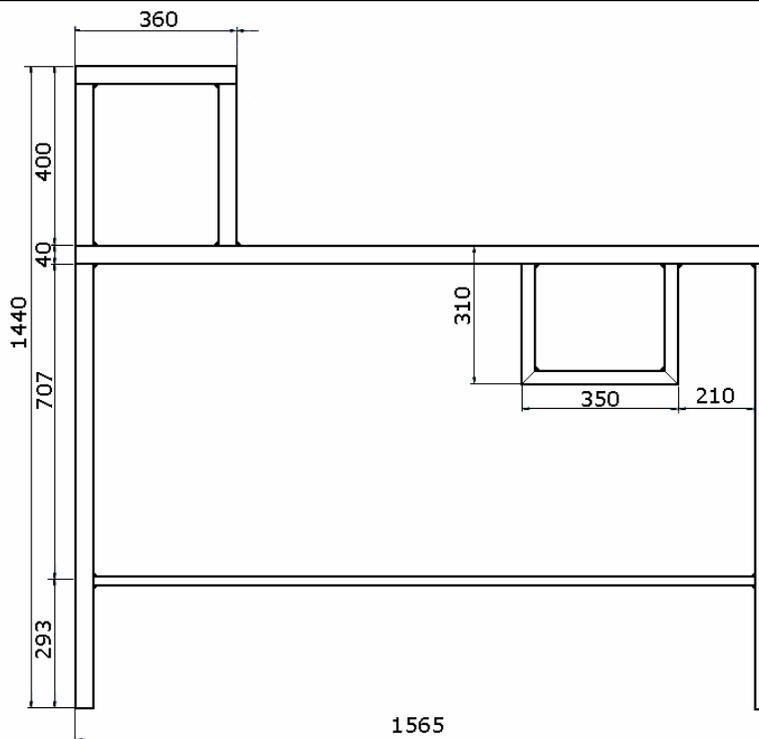
<b>MATERIAL</b>	$C \times 10^5$ $m^2 / N$	$E \times 10^{-7}$ $N/m^2$
<b>Araldite CT-200 30pph phthalic</b>	2560	1.3
<b>Araldite 6020 50pph phthalic</b>	1420	3.59
<b>Bakelite ERL 22774 50pph phthalic</b>	1330	3.67
<b>Estándar HEX-phthalic 42pph phthalic, 20pph HEX</b>	1230	4.54



CONSTRUCCIÓN DE UN POLARISCOPIO DE TRANSMISIÓN

HOJA DE PROCESO

POS.	CANT.	DENOMINACIÓN	MATERIAL	DIMENSIONES	NOTAS	ESCALA
	1	Estructura metálica base	Tubo cuadrado	1.5 x 1.5 plg	Pintado	1:5



FASE Nº	DENOMINACION DE LA FASE	CROQUIS	Vc.	RPM	A	HERRAMIENTAS		TIEMPO
						TRABAJO	CONTROL	
1	Verificación de medidas					Flexo metro Lápiz de color Escuadra	Diseño elaborado	1
2	Cortado de tubo cuadrado					Sierra Entenalla	Flexo metro	5
3	Cortado de tubo redondo macizo					Sierra Entenalla	Flexo metro	1
4	Armado y unión de vigas					Electrodos 6011	Escuadra Nivel	4
5	Pintado de la estructura					Lija Pintura Disolvente Compresor		2
<b>TIEMPO PROCESADO</b>								<b>13h</b>



**UNIVERSIDAD DEL AZUAY**  
**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGIA**  
**ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA AUTOMOTRIZ**

FECHA:  
MARZO / 2008

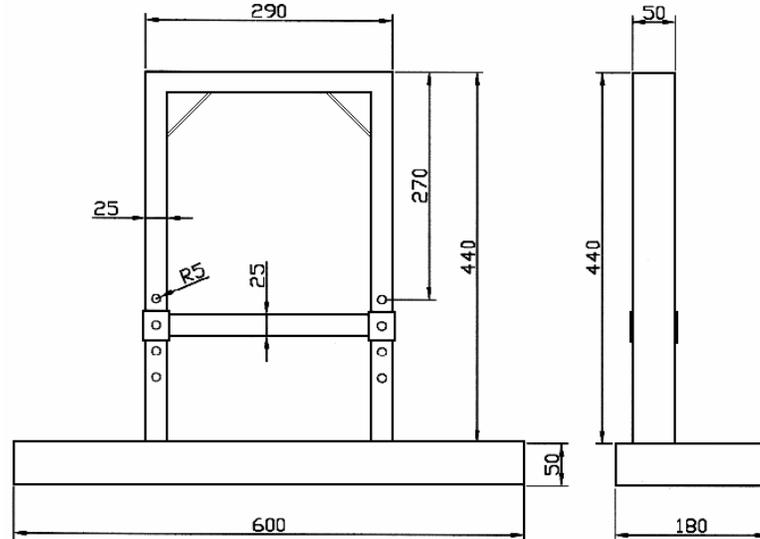
NUMERO:  
02

REALIZADO POR:  
LUIS ADRIAN ALVARADO  
MARIO ESTEBAN BERMEO

CONSTRUCCIÓN DE UN POLARISCOPIO DE TRANSMISIÓN

HOJA DE PROCESO

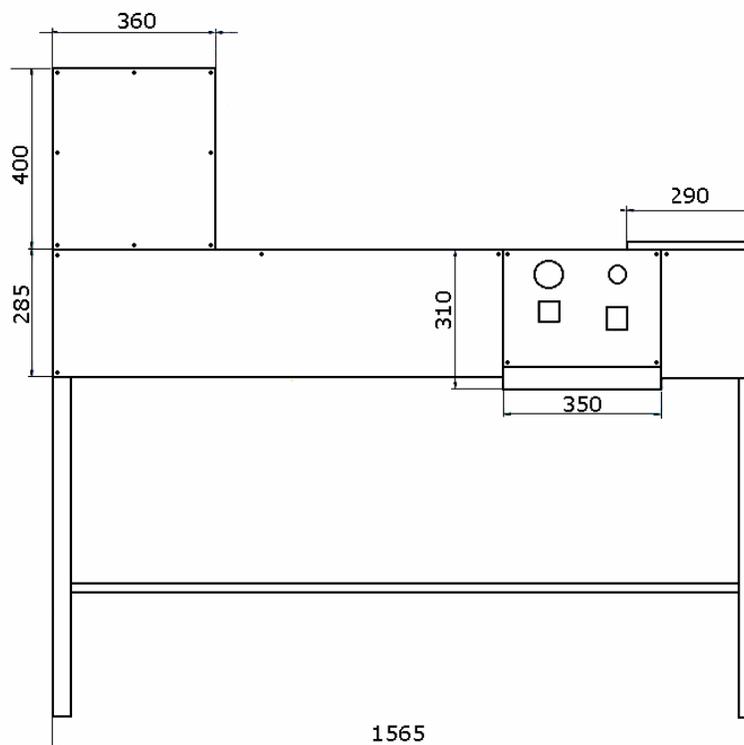
POS.	CANT.	DENOMINACIÓN	MATERIAL	DIMENSIONES	NOTAS	ESCALA
	1	Estructura de la prensa neumática	Tubo rectangular	1.5 x 0.5 plg	Pintado	1:5



FASE N°	DENOMINACION DE LA FASE	CROQUIS	Vc.	RPM	A	HERRAMIENTAS		TIEMPO
						TRABAJO	CONTROL	
1	Verificación de medidas					Flexo metro Lápiz de color Escuadra	Diseño elaborado	0.5
2	Cortado de tubo rectangular					Sierra Entenalla	Flexo metro	1
3	Cortado de platina					Sierra Entenalla	Flexo metro	0.5
4	Armado y unión de vigas Armado y unión del soporte móvil					Electrodos 6011 Entenalla	Escuadra Nivel	5
5	Perforación en las vigas y en el soporte móvil					Taladro Broca Punto Entenalla	Flexo metro Escuadra Calibrador	2
6	Pintado de la estructura					Lija Pintura Disolvente Compresor		1
<b>TIEMPO PROCESADO</b>								<b>10h</b>



CONSTRUCCIÓN DE UN POLARISCOPIO DE TRANSMISIÓN		HOJA DE PROCESO				
POS.	CANT.	DENOMINACIÓN	MATERIAL	DIMENSIONES	NOTAS	ESCALA
		Revestimiento de la estructura	Madera	Plancha de 1.5 x 2 m De 6 líneas	Pintado	1:5



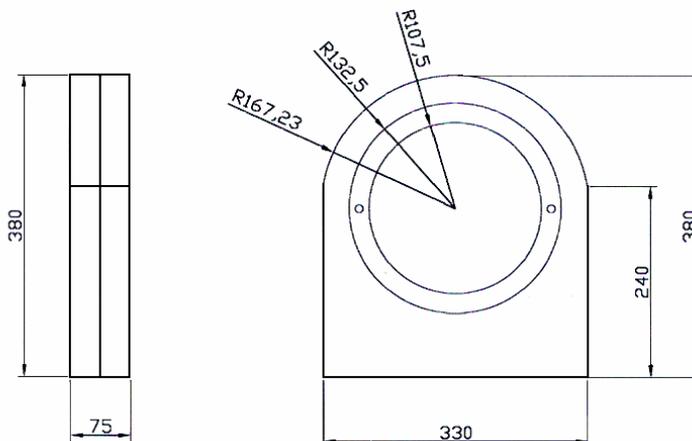
FASE N°	DENOMINACION DE LA FASE	CROQUIS	Vc.	RPM	A	HERRAMIENTAS		TIEMPO
						TRABAJO	CONTROL	
1	Verificación de medidas					Flexo metro Lápiz de color Escuadra	Diseño elaborado	1
2	Cortado de pedazos de madera					Serrucho Prensas Lima cuadrada	Flexo metro Escuadra	8
3	Perforación de los pedazos de madera y de la estructura					Taladro Broca Prensas	Flexo metro Escuadra	4
4	Fijación de los pedazos de madera en la estructura base					Destornillador punta de estrella Tornillos de cabeza cónica		4
5	Pintado del revestimiento de madera					Lija Pintura Disolvente Compresor		3
<b>TIEMPO PROCESADO</b>								<b>20h</b>



CONSTRUCCIÓN DE UN POLARISCOPIO DE TRANSMISIÓN

HOJA DE PROCESO

POS.	CANT.	DENOMINACIÓN	MATERIAL	DIMENSIONES	NOTAS	ESCALA
	2	Estructura soporte de filtros	Aglomerado "mdf"	Plancha de 1 x 1.5m	Pintado	1.5



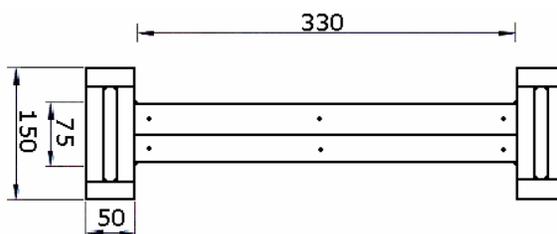
FASE N°	DENOMINACION DE LA FASE	CROQUIS	Vc.	RPM	A	HERRAMIENTAS		TIEMPO
						TRABAJO	CONTROL	
1	Verificación de medidas					Flexo metro Lápiz de color Escuadra	Diseño elaborado	1
2	Maquinado del soporte y de los anillos de sujeción					Sierra eléctrica Torno Lijadora eléctrica	Flexo metro Compás Moldes Escuadra Calibrador	20
3	Perforación de los soportes					Taladro Broca Prensas	Flexo metro Escuadra	1
4	Armado de los anillos y fijación de los soportes					Destornillador punta de estrella Tornillos de cabeza cónica Tarugos Martillo		1
5	Pintado de los anillos y soportes					Lija Pintura Disolvente Compresor		2
<b>TIEMPO PROCESADO</b>								25h



CONSTRUCCIÓN DE UN POLARISCOPIO DE TRANSMISIÓN

HOJA DE PROCESO

POS.	CANT.	DENOMINACIÓN	MATERIAL	DIMENSIONES	NOTAS	ESCALA
	2	Base móvil de la estructura de filtros	Platina Platina	1 plg ½ plg	Pintado	1:5



FASE N°	DENOMINACION DE LA FASE	CROQUIS	Vc.	RPM	A	HERRAMIENTAS		TIEMPO
						TRABAJO	CONTROL	
1	Verificación de medidas					Flexo metro Lápiz de color Escuadra	Diseño elaborado	1
2	Cortado de platina					Sierra Entenalla	Flexo metro	1
3	Armado y unión de las platinas					Electrodos 6011 Entenalla	Escuadra	1
4	Perforación de agujeros para la fijación de la platina con el soporte de filtros					Taladro Broca Punto Entenalla	Flexo metro Escuadra	1
5	Pintado de la estructura					Lija Pintura Disolvente Compresor		1
<b>TIEMPO PROCESADO</b>								<b>5h</b>



**Universidad del Azuay**

**Facultad de Ciencia y Tecnología**

**Escuela de Ingeniería Mecánica Automotriz**

*Construcción y aplicación de un Analizador de Materiales Foto  
elásticos y elaboración de un Manual de Instrucciones  
para el laboratorio de Ingeniería Mecánica Automotriz*

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de  
Ingeniero Mecánico Automotriz**

**MANUAL DE INSTRUCCIONES**

**Autores:**

**Luís Adrián Alvarado Sigüenza  
Mario Esteban Bermeo Alvarado**

**Director:**

**Ing. Hernán Viteri**

**CUENCA – ECUADOR**

**2008**

**Alvarado Siguenza Luis Adrián**  
**Bermeo Alvarado Mario Esteban**  
**Ing. Hernán Viteri**  
**Julio del 2006**

**CONSTRUCCIÓN Y APLICACIÓN DE UN ANALIZADOR DE MATERIALES FOTO  
ELÁSTICOS  
Y ELABORACIÓN DE UN MANUAL DE INSTRUCCIONES PARA EL  
LABORATORIO  
DE INGENIERÍA MECÁNICA AUTOMOTRIZ**

**INTRODUCCIÓN**

En vista de que en la actualidad la Ingeniería Mecánica cuenta con variados procedimientos para el diseño de elementos mecánicos, desde los más avanzados programas computacionales hasta la técnica de visualización de esfuerzos conocida como la Foto elasticidad, se ha visto conveniente implementar en la Escuela de Ingeniería Mecánica Automotriz un equipo para realizar un “Análisis de esfuerzos” mecánicos, el mismo que servirá como herramienta didáctica para los alumnos de esta especialidad, y de esta manera reforzar los conocimientos.

La foto elasticidad tiene la función de permitir visualizar la concentración de esfuerzos que se producen en los elementos mecánicos sometidos a una carga, determinando las zonas más críticas en donde pueden producirse fallas. Estos modelos son construidos a escala en un material plástico transparente foto elástico.

El estudiante luego de realizar los cálculos de diseño, la técnica de la foto elasticidad le ayudará a verificar de una manera visual y real la concentración de los esfuerzos que se lleguen a producir en los puntos críticos del elemento cuando este se encuentre sometido a un determinado esfuerzo.

A través de esta técnica podemos mejorar el diseño de los elementos y partes mecánicas, con lo cual podremos obtener productos de mejor calidad en el mercado.

## PRINCIPIOS GENERALES

### 1.1. Foto elasticidad

La técnica de la foto elasticidad se sirve de la luz polarizada y de la birrefringencia de los materiales foto elásticos, estos sometidos a tensión y al paso de la luz polarizada para observar en estos las líneas isóclinas e isocromáticas que son datos foto elásticos con los cuales se determina los sitios y valores de los esfuerzos críticos.

### 1.2. Polarización

Existen evidencias experimentales que han convencido a la física clásica, de que la luz puede tratarse como una onda electromagnética transversal. Una de estas evidencias es la polarización de la luz bajo determinadas condiciones. Una onda luminosa puede ser vista como superposición de varias ondas. Pero sin pérdida de generalidad, podemos considerarla como una superposición de dos ondas luminosas armónicas perpendiculares de igual vector de propagación y frecuencia.

**1.3. El polarizador.-** Es posible alterar, definir o seleccionar el tipo de polarización de la luz con elementos de óptica constituidos de materiales especiales. Unos de estos llamados polarizadores son hechos de un tipo de material que absorbe la luz polarizada en una dirección específica al eje de transmisión, como de indica en la gráfico 1-1.

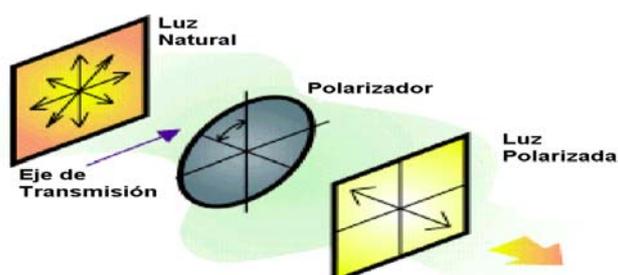
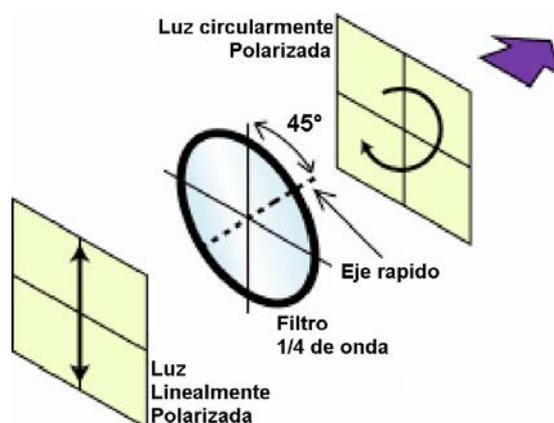


Gráfico 1-1. Transmisión de la luz a través del polarizador

Una particularidad importante de los polarizadores es que cuando se disponen a lo largo de un eje óptico dos polarizadores con ejes cruzados, se produce una absorción total de la luz incidente, a este fenómeno se lo conoce como configuración de extinción.

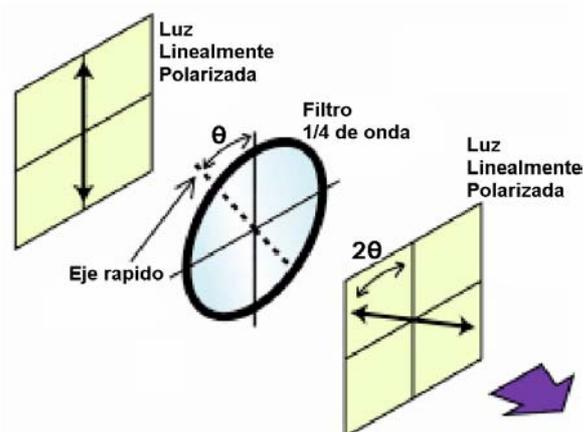
**1.4. Láminas retardadoras de  $\frac{1}{2}$  y  $\frac{1}{4}$  de onda.-** Las láminas retardadoras de  $\frac{1}{4}$  de onda corresponden a láminas de material birrefringente. La luz polarizada en una dirección específica se propaga dentro de la lámina a una velocidad diferente que la luz polarizada perpendicularmente a esta dirección. Las láminas de  $\frac{1}{4}$  tienen un espesor muy controlado, introduciendo entre los ejes rápidos y lentos de polarización un retraso o desfase de  $\pi$  y  $\pi/2$  respectivamente entre cada componente. Así, una lámina de  $\frac{1}{4}$  transforma una onda linealmente polarizada a  $45^\circ$  de sus ejes principales (rápidos y lentos) en una onda circularmente polarizada como se puede ver en el gráfico 1-2 a y b.

Este tipo de lámina es de gran utilidad en algunas aplicaciones prácticas como los polariscopios circulares, también pueden usarse combinaciones de polarizadores lineales y retardadores para crear una variedad de resultados, como eliminar las reflexiones no deseadas.



(a) Luz circularmente polarizada

Gráfico 1-2. Transformación de la luz a través del filtro de  $\frac{1}{4}$  de onda



(b) Luz linealmente polarizada

**1.5. Luz lineal y circularmente polarizada.-** La luz natural procedente del sol, vibra en cualquier momento en todas las direcciones del espacio (algo difícil de imaginar), posee pues infinitas direcciones de vibración y su eje coincide con el rayo. Estas direcciones se pueden representar vibrando dentro de un plano perpendicular a la dirección de propagación. La luz polarizada vibra en una sola dirección para cada momento, pero la dirección de vibración cambia con el tiempo. En la luz linealmente polarizada (frecuentemente, por simplicidad, se le llama luz polarizada) la dirección de vibración es única y constante con el tiempo, ver gráfico 1-3.

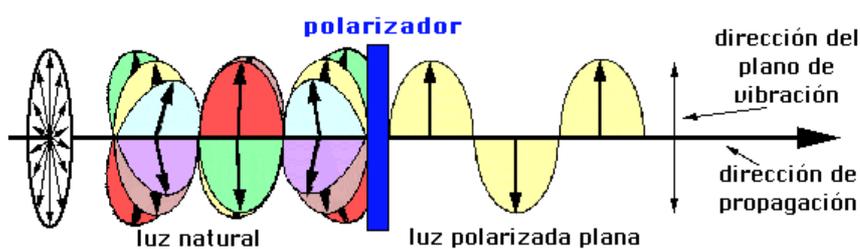


Gráfico 1-3. Dirección de vibración de la luz polarizada

Una fuente de luz que emite un tren de ondas que contiene vibraciones en todas las direcciones, sin embargo mediante la introducción de un filtro polarizador P, como se ve en el gráfico 1-4, solamente una componente de éstas vibraciones es transmitida, (aquella que es paralela al eje de transmisión del filtro) tal rayo

organizado se llama luz polarizada. Si se coloca otro filtro polarizante en su camino se puede obtener la pérdida completa del rayo, cuando los ejes de los dos filtros son perpendiculares el uno con respecto al otro, se obtiene luz linealmente polarizada. Si se colocan filtros de  $\frac{1}{4}$  de onda, como se indica en la gráfico 1-5, se obtiene luz polarizada circular.

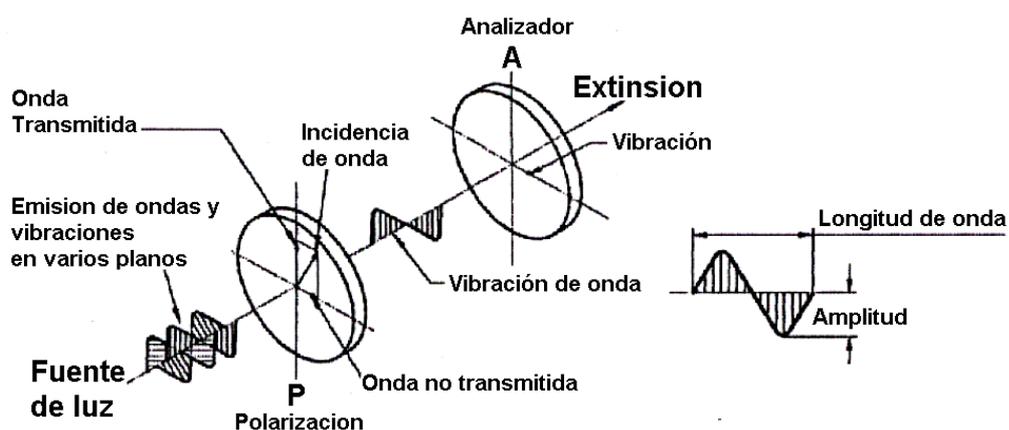


Gráfico 1-4. Plano de polarización

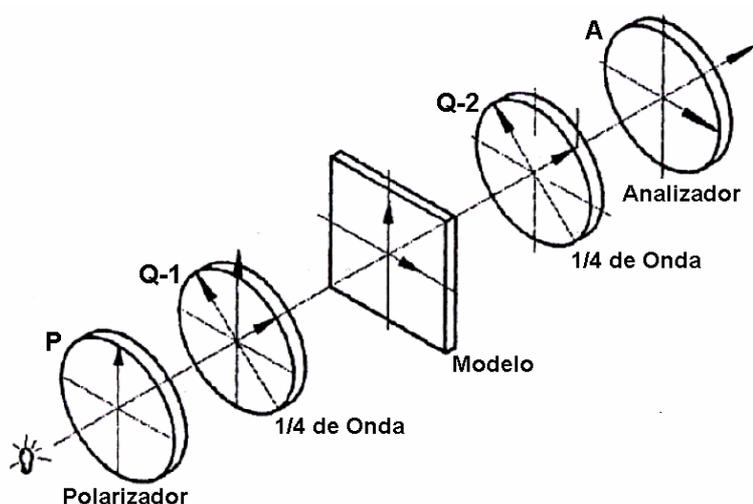


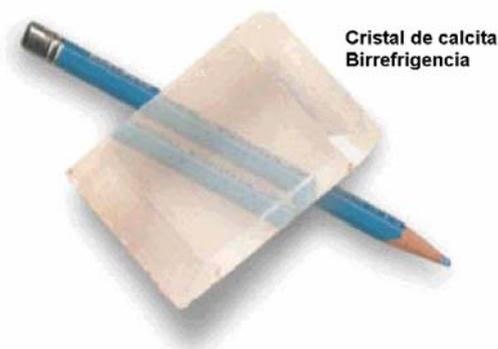
Gráfico 1-5. Obtención de luz polarizada circular

## 1.6. Birrefringencia

El fenómeno de birrefringencia se caracteriza por un retraso óptico entre los dos rayos que emergen de un cuerpo generalmente transparente claro como podemos ver

en la gráfico 1-6, uno paralelo al plano de polarización y otro perpendicular, dando lugar a interferencias o franjas en el modelo.

Los materiales están formados por agregados de átomos y moléculas, según el estado de agregación en que se encuentren, los materiales se pueden comportar de forma isótropa o anisótropa al paso de la luz.



**Gráfico 1-6. Fenómeno de birrefringencia**

## **1.7. Datos foto elásticos**

**1.7.1. Visualización de los esfuerzos.-** Algunos métodos experimentales determinan los campos de esfuerzos, también llamados de campo completo. Estos contribuyen considerablemente a la comprensión de los fenómenos que se producen en los medios elásticos continuos, representándolos gráficamente, una de las más precisas es la foto elasticidad que se vale de la birrefringencia asociada a las cargas que se aplican a algunos materiales transparentes cuando se colocan en un campo de luz polarizada.

Cuando se usa una fuente de luz monocromática de sodio o mercurio las franjas que se forman en el modelo son una serie de líneas negras. Las franjas negras corresponden a los puntos donde los dos rayos que emergen del modelo están exactamente con  $180^\circ$  de fase. Cuando se usa luz blanca las franjas son multicolores y se llaman isocromáticas.

La diferencia en el espectro que ofrece una fuente de luz con respecto a otra se debe a la longitud de onda que esta tiene. La luz de sodio tiene una sola longitud de onda por lo que su espectro es también de un solo color, la luz blanca tiene varias longitudes de onda y su espectro es multicolor.

La fuente monocromática es usada para determinar exactamente la magnitud de los esfuerzos y la fuente con luz blanca es usada generalmente en la investigación de las direcciones de los esfuerzos, en este caso es conveniente utilizar el polariscopio con luz polarizada plana.

**1.7.2. Las Isóclinas.-** Son consideradas el lugar geométrico de los puntos en los cuales las tensiones principales son paralelas, son las que unen los puntos de igual inclinación de las tensiones principales.

La isoclina es una línea a lo largo de las tensiones principales que actúan en direcciones dadas, la trayectoria de la misma normalmente no da la dirección de una tensión principal si no una comprensión de la dirección. Es útil entender cómo la forma de una parte afecta la distribución de tensión y también proporciona los datos adicionales necesarios para la evaluación de las dos tensiones principales a los puntos dentro de un modelo.

Esta línea es visible cuando el polariscopio plano está cruzado, pero se vuelve invisible en el polariscopio de tipo redondo o circular. Si la dirección de una tensión principal pasa a coincidir con el plano de polarización, la luz que esta atravesando al modelo continuará vibrando en su plano y será absorbida por el analizador que esta cruzado. Las franjas se pueden hacer visibles rotando el polarizador y analizador con respecto al modelo.

Las isoclinas determinan las direcciones de las tensiones principales, para los puntos de extinción, un plano de tensión principal coincidirá con el plano de polarización.

Al usar luz blanca la diferenciación se vuelve simple, ya que la isoclina esta de color negro y todas las franjas excepto la del orden cero están coloreadas. Un método recomendado es hacer el modelo de prueba de un material de baja sensibilidad óptica, para que la líneas isoclinas estén bien definidas y que el primer orden de franja (con la luz monocromática) no aparezca.

**1.7.3. Las Isocromáticas.-** Lugar geométrico de los puntos en los que la diferencia de esfuerzos principales es constante. Estos esfuerzos obran sobre planos perpendiculares al de la probeta. Se obtienen en el banco fotoelástico como franjas de igual color y de ahí su nombre.

## CONSTRUCCIÓN DEL POLARISCOPIO DE DIFUSIÓN DE LUZ

### 2.1. Generalidades.

Para realizar la medida foto elástica se pasa la luz por un modelo de plástico transparente objeto del ensayo mientras se aplica una carga al mismo. Los diagramas de esfuerzo en el modelo son isocromáticos, así se puede obtener una imagen general del esfuerzo en el objeto y las concentraciones del esfuerzo que se pueden evaluar como podemos ver en el gráfico 2-1.

El polariscopio de difusión de luz esta compuesto por una fuente de luz monocromática y una de luz blanca que se encuentran situadas dentro de una caja que forma parte de la estructura base. El uso de luz monocromática facilita mucho la evaluación de los diagramas isocromáticos, pero se necesita luz blanca para estudiar las direcciones del esfuerzo principal.

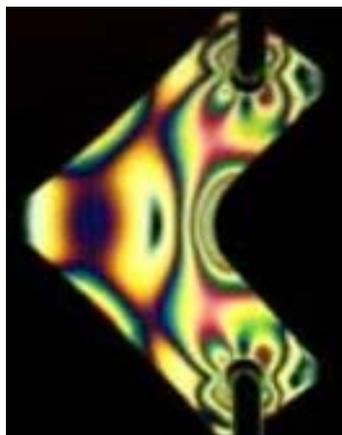


Gráfico 2-1. Espectros foto elásticos

**2.2. Descripción del equipo.-** El polariscopio de difusión de luz esta compuesto por los siguientes elementos principales, como se indica en la fotografía 2-2.

- Estructura de filtros (a)
  - Filtros polarizadores
  - Filtros retardadores de  $\frac{1}{4}$  de onda
- Fuente de luz (b)
  - Fuente de luz blanca
  - Fuente de luz monocromática
  - Pantalla de difusión de luz
- Sistema de prensa neumático (c)
- Tablero de control (d)
- Estructura base (e)



**Fotografía 2-2. Banco de pruebas foto elástico**

### **2.3. Filtros polarizadores**

Los filtros polarizadores tienen un campo de visión de 22cm de diámetro, lo cual nos permite observar con mucha facilidad las diferentes líneas foto elásticas que se producen en el modelo analizado. Estos polarizadores están colocados en unos anillos que a su vez están situados en un soporte circular que permite el movimiento rotacional para poder variar su posición con respecto a la luz y así obtener los campos de luz deseados.

#### **2.3.1. Especificaciones técnicas.-**

- Esta laminado en butyrate de acetato celuloso (CAB) para su durabilidad y rigidez.
- La eficacia de transmisión de uno es de 38% y cuando son dos en paralelo de 27%.
- Posee una extinción de luz de 99.98%, cuando los ejes de los polarizadores están cruzados.
- Tiene una absorción de luz y una eficacia de polarización de 99%.
- El espesor de las hojas es de 0.74mm y son de un color gris neutro.
- Son utilizados en la construcción de los displays y en las pantallas de cristal líquido (LCD).

### **2.4. Filtro retardador de $\frac{1}{4}$ de onda**

Los filtros retardadores de  $\frac{1}{4}$  de onda tienen un diámetro de 22cm igual que los polarizadores, teniendo una misma amplitud de visualización y dejando ver con facilidad las líneas foto elásticas en el modelo. Estos retardadores van alojados en un juego de anillos y montados en un soporte circular para permitir el movimiento rotacional de los mismos de manera independiente.

#### **2.4.1. Especificaciones técnicas.-**

- Esta elaborado en alcohol polivinilico.

- La película es de un material birrefringente claro que cambia la fase el haz de luz polarizada.
- Convierten luz linealmente polarizada en luz circularmente polarizada y viceversa.
- Las combinaciones entre retardador y polarizador son usados para eliminar las reflexiones no deseadas en las imágenes.
- Posee una longitud de onda de 560nm (nanometros).
- Tiene un uniformidad en fase de <8% en película entera.
- La transmisión de luz es de 92% y 4% de reflexión en cada cara.
- Tiene un espesor de 0.01 plg y es de color claro.

En el gráfico 2-3 se muestra el polarizador (a) y el retardador de  $\frac{1}{4}$  de onda (b).

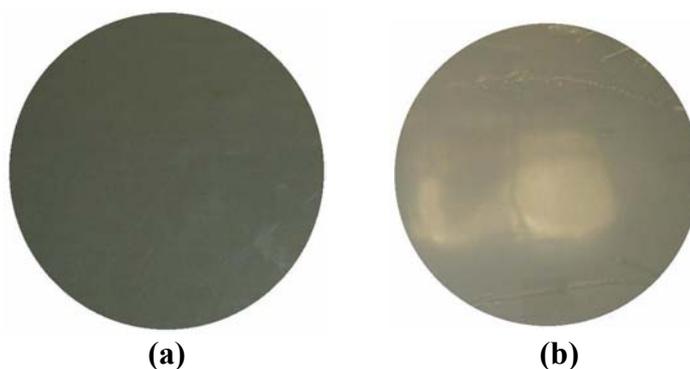


Gráfico 2-3. Filtros

### 2.5. Estructura soporte de los filtros

Las estructuras de los filtros están fijadas sobre un par de platinas con unos canales laterales, que permiten realizar desplazamientos longitudinales del soporte, ya sea hacia adelante o hacia atrás. Debido a que el montaje de la estructura de filtros no es complicado, se pueden intercambiar su ubicación, como podemos observar en la fotografía 2-4.

En esta estructura se colocan los filtros polarizadores y retardadores de  $\frac{1}{4}$  de onda, esta construida en madera debido a su fácil maquinación y su bajo peso. En el equipo contamos con dos estructuras soportes, la primera estructura el filtro polarizador esta

fijo y mientras que el retardador de  $\frac{1}{4}$  de onda tiene movimiento rotacional. En la segunda estructura tenemos que tanto el polarizador como el retardador tienen movimiento como se indica en la fotografía 2-5. Estas disposiciones que tienen cada uno de los filtros son para conseguir la variación de la luz cuando se giren cada uno de estos según las condiciones de análisis que se requieran.



**Fotografía 2-4. Estructura de filtros móvil**



**Fotografía 2-5. Polarizador y retardador de  $\frac{1}{4}$  de onda móviles**

Los filtros polarizadores están dispuestos en sus soportes de tal manera que el primero transforma la luz en polarizada y el segundo cumple con el trabajo de ser un analizador ya que en este vamos a tener la visualización de las líneas isoclinas e

isocromáticas. Los retardadores de  $\frac{1}{4}$  de onda están situados entre los polarizadores para permitir el cambio de la luz polarizada a luz circular.

### **2.5.1. Soportes de filtros**

Los filtros están sujetos por un par de anillos construidos en madera que tienen un mismo espesor; con un canal en el interior el cual permite el alojamiento del filtro y la sujeción del mismo, además este sistema de anillos está acoplado dentro de una base circular que permite la rotación completa de cada uno de los filtros para conseguir las condiciones de trabajo requeridas. Están dotados de dos pequeños “tarugos” colocados en la cara frontal que permitirán manipular estos anillos en las especificaciones angulares que se requieran en las pruebas.

Solamente rotará un filtro polarizador y dos retardadores, esto debido a que en las experimentaciones necesitaremos trabajar con variaciones de fondo de luz entonces se fijara un polarizador, es decir que no tendrá rotación.

**2.5.2. Escala de regulación.-** En la superficie exterior del anillo y del soporte están colocados unas reglas circulares con una escala graduada en  $360^\circ$ , que ayudarán a tener una referencia de las variaciones angulares al rotar cada uno de los filtros. La obtención del fondo oscuro y el fondo claro se consigue rotando solamente uno de los dos polarizadores con respecto al otro.

### **2.6. Fuente de luz**

Es la encargada de proporcionar los diferentes campos luz necesarios para poder realizar el análisis en la probeta, tiene la forma de una caja que internamente contiene la luz blanca y la luz monocromática como se indica en la fotografía 2-6. Esta caja está cerrada en todos sus lados pero en su parte frontal esta provista de una pantalla de vidrio de tipo esmerilado que sirve para obtener luz difusa, interiormente

está esmaltada en color blanco para que el reflejo de toda la luz se aproveche al máximo.



**Fotografía 2-6. Fuente de luz**

**2.6.1. Luz blanca.-** Esta compuesta por 10 lámparas incandescentes de luz blanca de 100W, de superficie esmerilada que funcionan a 110V conectadas en paralelo y distribuidas dentro de la caja de tal forma que se pueda aprovechar toda su intensidad. Esta luz de diferente longitud de onda permite identificar las líneas isóclinas con gran nitidez cuando se trabajan con materiales de baja sensibilidad óptica y lograr obtener una mejor resolución de fotografías de los modelos de prueba, además de la obtención de franjas isocromáticas coloreadas.

**2.6.2. Luz monocromática.-** Esta conformada por una lámpara de vapor de sodio de 120W que funciona a 220V y que esta dispuesta en el centro de la caja para obtener un campo de iluminación en todas las direcciones de manera proporcional y así poder aprovechar de mejor manera toda la exposición de luz.

**2.6.3. Pantalla de difusión de luz.-** Es una placa de vidrio de tipo esmerilado como se puede ver en la figura 2-7 que realiza la difusión de los haces de luz, ya que

permite que la luz se esparza por toda la superficie del vidrio y se emita una sola luz de tipo constante. El grosor del vidrio esmerilado esta en base a la cantidad de calor que existe en el interior de la caja y esta sujeto por medio de unos soportes.



**Fotografía 2-7. Pantalla de difusión de luz**

### **2.7. Prensa neumática**

El principio de la foto elasticidad nos dice que el elemento analizado además de ser sometido a los diferentes campos de luz también se debe aplicar una carga externa, por lo tanto el polariscopio de difusión de luz esta dotado de un sistema de prensa neumático para realizar las aplicaciones de los esfuerzos en los modelos, en este sistema podemos regular la carga que se aplica a la probeta, así como también podemos variar las posiciones del soporte en caso de tener modelos con dimensiones mayores como de puede observar en la fotografía 2-8.



**Fotografía 2-8. Prensa neumática**

**2.7.1. Sistema neumático.-** Este sistema esta compuesto principalmente por un pistón de doble efecto que es el encargado de comprimir la probeta en una sola dirección, esta sujetado en su parte superior a la estructura de la prensa. El pistón esta comandado a través de unas cañerías de presión que vienen de una válvula de aire 4/3 y posee un manómetro que registra la presión del aire cuando el pistón desciende. La entrada de aire al sistema es a través de una unidad de mantenimiento el cual contiene la toma de conexión rápida del aire presurizado.

Esta unidad es la encargada de mantener la presión como también de realizar la lubricación en los elementos móviles y liberar del aire circulante las impurezas y depositar el agua.

**2.7.2. Estructura de pruebas.-** Se encuentra colocada de manera fija en la estructura base y esta construida en tubo rectangular. El diseño de la estructura es de tal forma que en la parte superior va instalado el pistón neumático y en la parte inferior va un soporte móvil. En las vigas laterales de la estructura están realizados unos agujeros que sirven para poder variar la posición del soporte móvil para trabarlos en la posición deseada, lo cual nos permite utilizar modelos de mayor y de menor dimensión, dependiendo de los diferentes casos que se den.

Posee también un acople que va en el pistón para poder aplicar en el modelo esfuerzos de compresión de forma uniforme.

## **2.8. Tablero de control**

En este se encuentran instalados los siguientes dispositivos que tienen la función de activar y regular los sistemas de funcionamiento del polariscopio como se observa en la fotografía 2-9.

- Un manómetro de control de presión (a)
- Una válvula 4/3 de accionamiento del pistón neumático (b)
- Un interruptor de 220V de accionamiento de luz monocromática (c)
- Un interruptor de 110V de accionamiento de luz blanca (d)



**Fotografía 2-9. Tablero de control**

## **2.9. Preparación de la probeta**

Existen en el mercado materiales foto elásticos en varias presentaciones: hojas, resina básica y endurecedor, bloques prefundidos y bloques para maquinar. Para seleccionar el tipo de material debemos tener en cuenta el tipo de prueba mecánica a la que se someterá y la disponibilidad de encontrar el material en nuestro medio. La configuración de la probeta se indica la fotografía 2-10.



**Fotografía 2-10. Probeta**

**2.9.2. Obtención de la probeta a temperatura ambiente.-** Para preparar la probeta a temperatura ambiente utilizamos una resina básica y un endurecedor. Las cantidades recomendadas para obtener la mezcla correcta de estos materiales son: 100 partes de resina por 70 partes de endurecedor (sistemas epóxicos de relleno WH/HWM-4502). Estos dos elementos se combinan en un recipiente y automáticamente se inicia una reacción exotérmica, a esta temperatura se facilita el homogenizar la mezcla y realizar un adecuado esparcimiento.

Luego se vierte el contenido en un molde que previamente estará cubierto de una sustancia aislante que puede ser aceite para realizar el desmolde con facilidad. Esta mezcla se polimeriza completamente a temperatura ambiente aproximadamente en 24 horas. En la fotografía 2-11 se puede observar el molde utilizado.



**Fotografía 2-11. Molde de la probeta**

## EXPERIMENTACIÓN

### 3.1. Generalidades

Por medio de la experimentación se determinará en primer lugar las áreas de mayor concentración de tensiones que están representadas por medio de franjas coloreadas o isocromáticas con ayuda de la luz blanca y en segundo lugar se observará la dirección que tienen los esfuerzos principales por medio de líneas de color negro o isoclinas en presencia de la luz monocromática. Para obtenerlos podemos trabajar con fondo oscuro o fondo claro, cualquiera de estas condiciones de trabajo mas las variaciones de los retardadores de  $\frac{1}{4}$  de onda nos ayudaran a visualizar de igual manera los datos foto elásticos.

Con las adecuaciones realizadas en el sistema de filtros se puede variar la posición de los polarizadores y retardadores para conseguir los arreglos necesarios y así obtener los diferentes campos de luz.

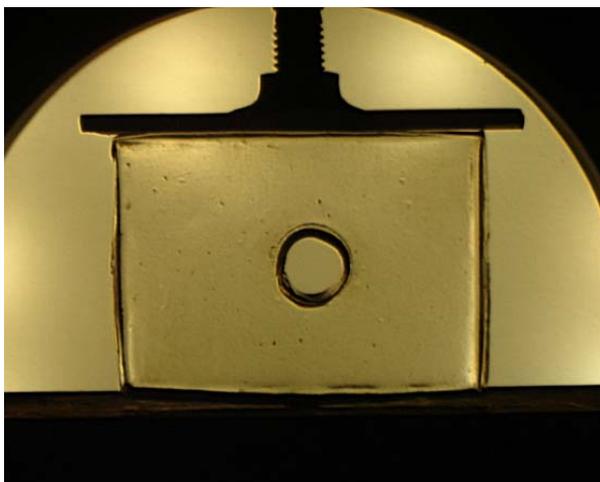
Para comenzar a realizar los experimentos en el foelastimetro, debemos tener en cuenta los siguientes pasos para el funcionamiento correcto del polariscopio:

- 1.- Retirar todos los cobertores de la maquina.
- 2.- Conectar la alimentación eléctrica, primero la de 220V con su amplificador de voltaje y luego la de 110V respectivamente.
- 3.- Verificar en el tablero de control que los interruptores se encuentren apagados, antes de iniciar con las experimentaciones.
- 4.- Conectar la alimentación neumática, observando que el pistón neumático se encuentre en reposo, el vástago en el punto superior.
- 5.- Regular los filtros polarizadores, antes de iniciar la experimentación, estos deben estar acerados, es decir colocados a cero grados con respecto al punto de referencia.
- 6.- Los modelos o probetas deberán estar terminados y listos para ser colocados en la prensa neumática.

A continuación se detallara las pruebas básicas que se deben realizar al momento de experimentar con los modelos foto elásticos, en cada una de estas pruebas se variará los grados de colocación de los filtros polarizadores y de las laminas de  $\frac{1}{4}$  de onda, esto para poder obtener las visualizaciones en el elemento experimentado.

### 3.2. Campo de luz circularmente polarizada

En las fotografías 3-1 y 3-2 se muestran los modelos libres de cargas externas en campos neutros de luz blanca y luz monocromática.

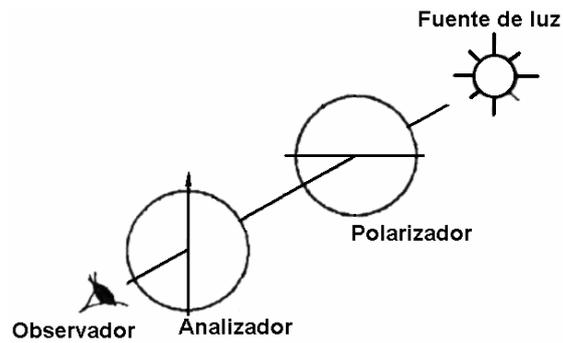


Fotografía 3-1. Probeta en campo de luz blanca



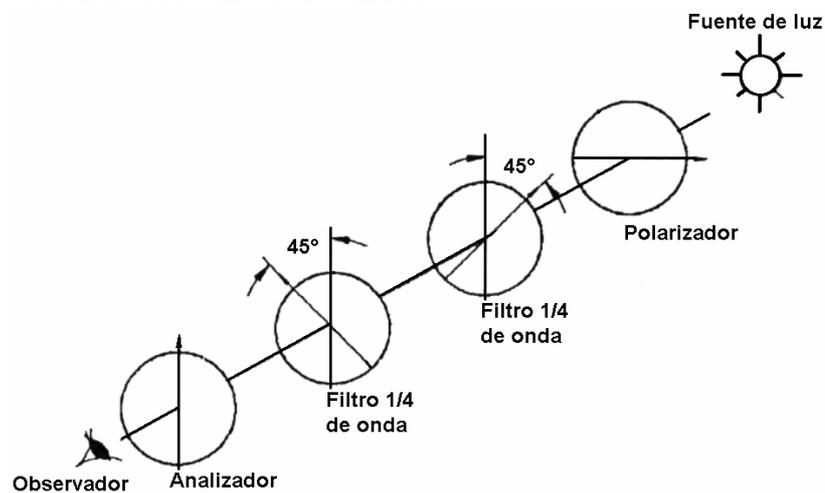
Fotografía 3-2. Probeta en campo de luz monocromática

**3.2.1.- Fondo oscuro.-** Se obtiene cuando los ejes de los filtros polarizadores están cruzados, es decir cuando existe la extinción de la luz, como se ve en el gráfico 3-1.



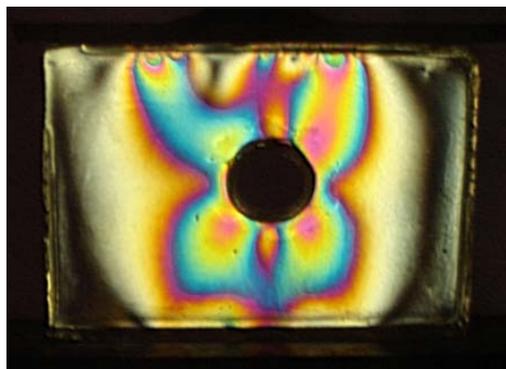
**Gráfico 3-1. Polarizadores cruzados**

**3.2.1.1- Fondo oscuro y filtros de  $\frac{1}{4}$  de onda cruzados.-** En el gráfico 3-2 se indica la posición de cada uno de los filtros.

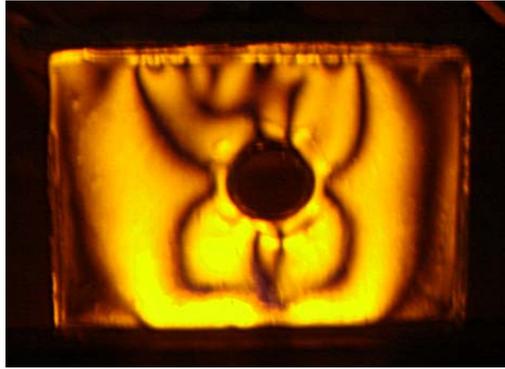


**Gráfico 3-2. Filtros polarizadores cruzados y  $\frac{1}{4}$  de onda cruzados**

En la fotografía 3-3 se observan las franjas coloreadas o isocromáticas con luz blanca y en la fotografía 3-4 se indican las líneas isoclinas de color negro con luz monocromática.



**Fotografía 3-3. Isocromáticas en presencia de luz blanca**



Fotografía 3-4. Isoclinas en presencia de luz de monocromática

3.2.1.2- Fondo oscuro y filtros de  $\frac{1}{4}$  de onda paralelos.- En el gráfico 3-3 se enseña la posición de los filtros de  $\frac{1}{4}$  de onda cruzados.

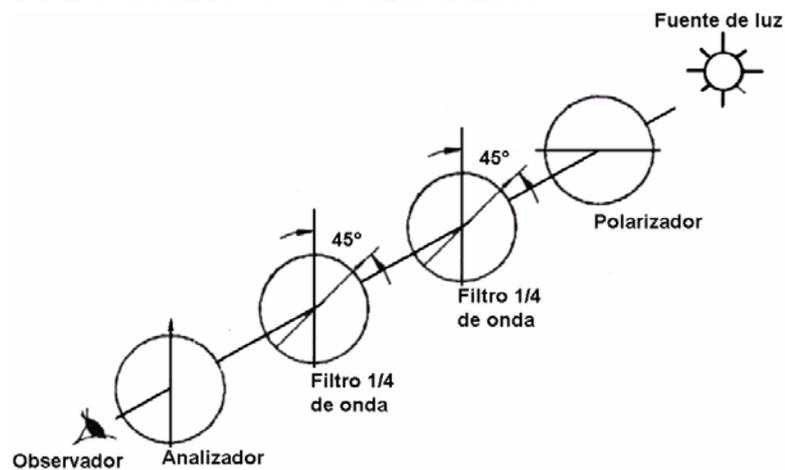
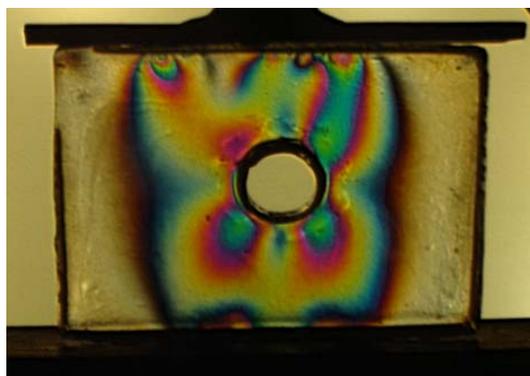
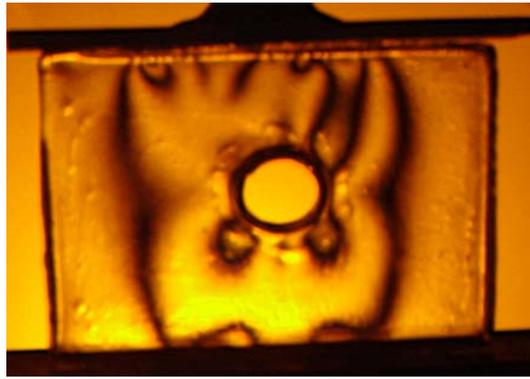


Gráfico 3-3. Filtros polarizadores cruzados y  $\frac{1}{4}$  de onda paralelos

En la fotografía 3-5 se visualiza las franjas isocromáticas y en la 3-6 las líneas isoclinas.



Fotografía 3-5. Isocromáticas en presencia de luz blanca



Fotografía 3-6. Isoclinas en presencia de luz de monocromática

**3.3.2. Fondo claro.-** Se obtiene cuando los ejes de los filtros polarizadores están paralelos y no se produce extinción de la luz, como se ve en el gráfico 3-4.

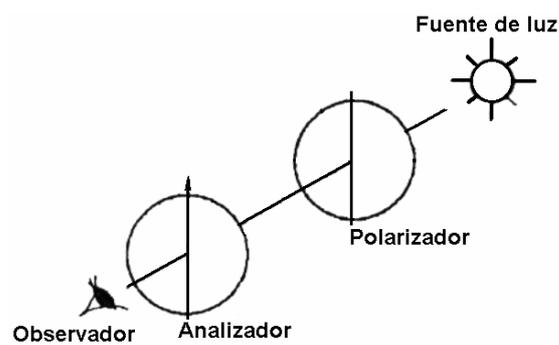


Gráfico 3-4. Polarizadores paralelos

**3.3.2.1.- Fondo claro y filtros de  $\frac{1}{4}$  de onda cruzados.-** En el gráfico 3-5 se muestran como están colocados cada uno de los filtros.

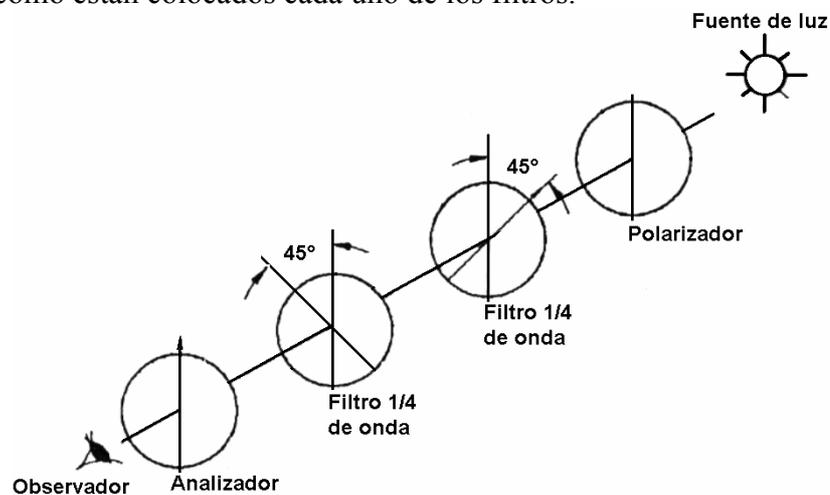
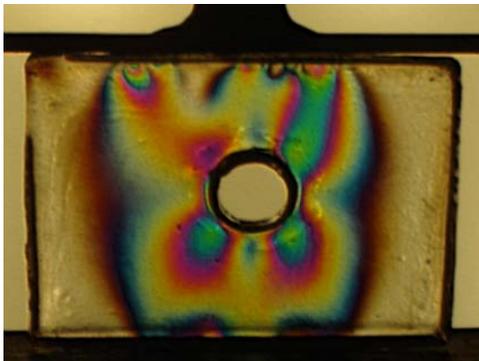
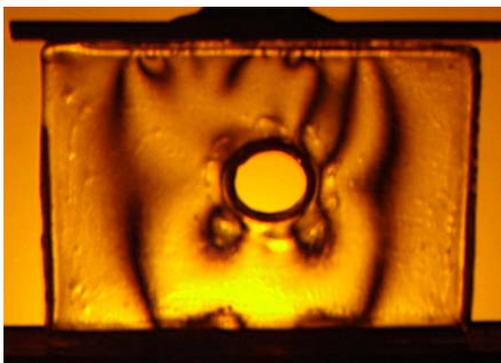


Gráfico 5-5. Filtros polarizadores paralelos y  $\frac{1}{4}$  de onda cruzados

En la fotografía 3-7 se visualizan las franjas isocromáticas junto con las líneas isoclinas pero en la fotografía 3-8 con luz monocromática se representan de mejor manera las líneas isoclinas.



Fotografía 3-7. Isocromáticas en presencia de luz blanca



Fotografía 3-8. Isoclinas en presencia de luz de monocromática

**3.3.2.2.- Fondo claro y filtros de  $\frac{1}{4}$  de onda paralelos.-** En el gráfico 3-6 se indica la posición de los polarizadores y retardadores.

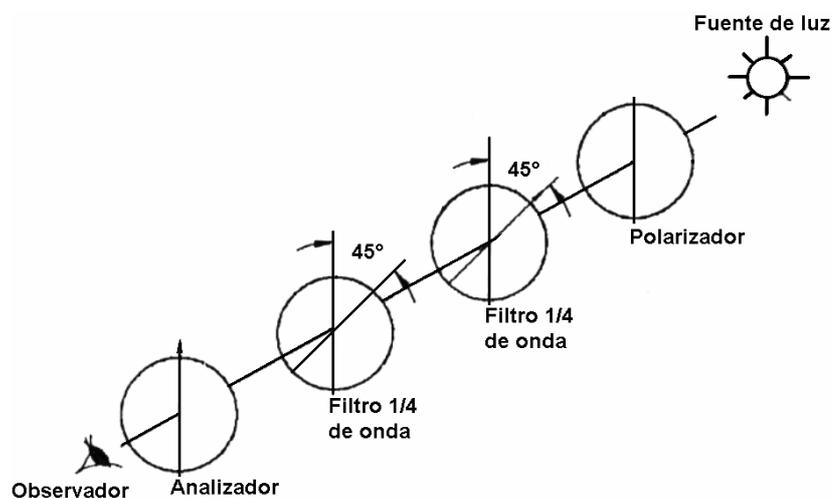
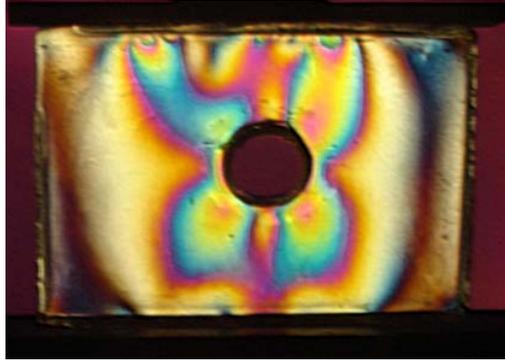
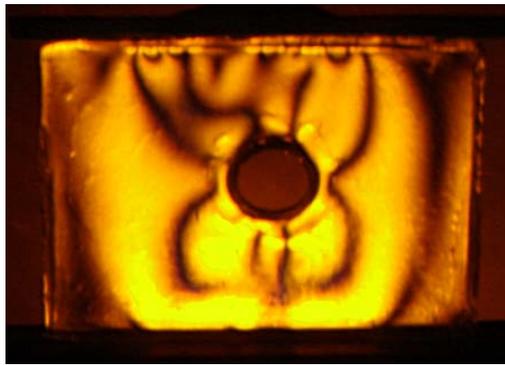


Gráfico 5-6. Filtros polarizadores paralelos y  $\frac{1}{4}$  de onda paralelos

En la fotografía 3-9 se representan las franjas isocromáticas y en la 3-9, se muestran las líneas isoclinas.



**Fotografía 3-9. Isocromáticas en presencia de luz blanca**



**Fotografía 3-9. Isoclinas en presencia de luz de monocromática**

## INTRODUCCIÓN

### PRINCIPIOS GENERALES

1.1. Foto elasticidad.....	3
1.2. Polarización.....	3
1.3. El polarizador.....	3
1.4. Laminas retardadoras de $\frac{1}{2}$ y $\frac{1}{4}$ de onda.....	4
1.5. Luz lineal y circularmente polarizada.....	5
1.6. Birrefringencia.....	7
1.7. Datos foto elásticos.....	7
1.7.1. Visualización de los esfuerzos.....	7
1.7.2. Las Isóclinas.....	8
1.7.3. Las Isocromáticas.....	9

### CONSTRUCCIÓN DEL POLARISCOPIO DE DIFUSIÓN DE LUZ

2.1. Generalidades.....	10
2.2. Descripción del equipo.....	11
2.3. Filtros polarizadores.....	11
2.3.1. Especificaciones técnicas.....	12
2.4. Filtro retardador de $\frac{1}{4}$ de onda.....	12
2.4.1. Especificaciones técnicas.....	12
2.5. Estructura soporte de los filtros.....	13
2.5.1. Soportes de filtros.....	15
2.5.2. Escala de regulación.....	15
2.6. Fuente de luz.....	15
2.6.1. Luz blanca.....	16
2.6.2. Luz monocromática.....	16

2.6.3. Pantalla de difusión de luz.....	16
2.7. Prensa neumática.....	17
2.7.1. Sistema neumático.....	18
2.7.2. Estructura de pruebas.....	18
2.8. Tablero de control.....	18
2.9. Preparación de la probeta.....	19
2.9.2. Obtención de la probeta a temperatura ambiente.....	20

## **EXPERIMENTACIÓN**

3.1. Generalidades.....	21
3.2. Campo de luz circularmente polarizada.....	22
3.2.1.- Fondo oscuro.....	22
3.2.1.1- Fondo oscuro y filtros de $\frac{1}{4}$ de onda cruzados.....	23
3.2.1.2- Fondo oscuro y filtros de $\frac{1}{4}$ de onda paralelos.....	24
3.3.2. Fondo claro.....	25
3.3.2.1.- Fondo claro y filtros de $\frac{1}{4}$ de onda cruzados.....	25
3.3.2.2.- Fondo claro y filtros de $\frac{1}{4}$ de onda paralelos.....	26