



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
VERITATE SOLA NOBIS IMPONETUR VIRILISTOGA. 1948

Facultad de Ingeniería Mecánica

Título: "Preparación y montaje de la práctica de laboratorio para la medición de tensiones mediante la fotoelasticidad".

TRABAJO DE DIPLOMA

Autor: Denis Pérez Pérez

Tutor: Dr. Ing. Luis I. Negrín Hernández

CURSO 2002-2003

Año de los Gloriosos Aniversarios de Martí y del Moncada.

Agradecimientos



Este trabajo no hubiera sido posible sin la ayuda de dos personas muy importantes:

- Mi tutor el Dr. Ing. Luis I. Negrín por su asesoría, orientación y confianza desde un comienzo en que todo saldría bien.
- Gabriela Grassi, mi amiga argentina, que me brindó de forma desinteresada la ayuda necesaria para realizar dicho trabajo.

Gracias a:

- A Yuri y Jarlen, mis amigos de todos los tiempos.
- A Demis, por ser mi amigo y estar cuando más hace falta.
- A Marusa, por estar donde la necesito.
- A mis suegros Reina y Jose, por todo el apoyo que me han brindado durante un año y más.
- A Ondina, por todo el cariño dado y ser una abuela más para mi.
- A Aracelys, “mi querida secretaria”, por su ayuda incondicional y sus oportunos consejos.
- A los trabajadores del taller de la facultad, en especial a Mayuli, Santiago, Frank y Pancho.
- A los profesores del departamento de MAD, especialmente a Feliberto, Eusebio(Chevy), Soriano y Yamil.
- A Daylí Herrera, que me brindó su mano desde el principio.
- A mis compañeros (hermanos) del Consejo FEUC, por la amistad incondicional que me dieron.
- A mis amigos del Cuarto FEU, en especial a Lesbia por su constante preocupación y amistad sin límites.
- A mis compañeros de aula, por soportarme en estos 5 años.
- A los hermanos Carlos y Julio Amore, por todas las carreras que dieron.
- A mis familiares y demás amigos.
- A Héctor Pérez, por su paciencia y ayuda.
- A esta Revolución, por darme la oportunidad de serle útil y ser lo que soy hoy.
- A todos los que de una forma u otra aportaron su granito de arena para que este trabajo fuera posible.

Dedicatoria

- A mi madre, protectora cotidiana de mi vida y dueña absoluta de mis éxitos.
- A mi sobrino Daniel Ernesto, por ser esa personita que da luz a mis días.
- A mi hermano, mi ídolo y cuyo cariño hace sentirme un hermano dichoso.
- A mi padre, por todo el apoyo brindado y ser el “bárbaro” entre los padres.
- A mi novia, por existir y regalarme todo su cariño.
- A mi cuñada, por su paciencia y criterios en la confección de este trabajo.
- A mi abuela Pura, por darme siempre lo mejor de si.
- A Sinecia y Juana (abuelita), mis abuelas que ya no están.
- A Yoandri Castellanos, donde quiera que esté continua siendo mi amigo.
- A una pequeñita que viene en camino.

Resumen

El presente trabajo aborda como tema principal el montaje de una práctica de laboratorio para la medición de tensiones mediante la técnica de la fotoelasticidad, la misma será utilizada en la asignatura de Resistencia de Materiales. Los objetivos fundamentales están dirigidos a: obtener información sobre la técnica de la fotoelasticidad, ya que no se cuenta en la Facultad Ingeniería Mecánica con la bibliografía necesaria; preparar dicha práctica de laboratorio y diseñar y fabricar el dispositivo de carga. El análisis fotoelástico se utiliza para el estudio de tensiones en elementos mecánicos y estructuras ingenieriles. No se tiene referencias que en el país se realice este tipo de análisis, en la Facultad se encuentra un polariscopio el cual llevaba muchos años sin trabajar ya que no existía guía, ni técnica operatoria para utilizarlo, solo se hacían prácticas de forma demostrativa en pregrado.

Se realizó la guía de la práctica de laboratorio y se pudo constatar que el dispositivo construido puede ser utilizado sin ninguna dificultad y su costo de ejecución es despreciable, lo cuál es importante resaltar. Esta práctica tiene gran valor ya que los estudiantes podrán observar y medir las tensiones que presentan diferentes probetas bajo determinado sistema de cargas y les brinda un procedimiento que podrán utilizar para analizar modelos que representen problemas reales, además deja abierto el camino para investigaciones futuras.

INTRODUCCION

La medición de tensiones es un proceso fundamental para el diseño de estructuras y elementos de máquinas. En la práctica abundan los problemas, en que para calcular las tensiones, la solución teórica o la extensometría son difíciles de aplicar. En algunos de estos casos se hace uso del método óptico de investigaciones sobre probetas transparentes. Este método resulta especialmente útil para la investigación de la concentración de tensiones en las entallas y agujeros, donde es imposible colocar extensómetros. El mismo se basa en el fenómeno de la anisotropía óptica de muchas sustancias transparentes amorfas, que se observa al cargar con fuerzas exteriores tales materiales, los que se denominan ópticamente sensibles.

Una vez eliminada la carga, la propiedad de anisotropía óptica desaparece, lo que sirvió de argumento para el empleo del término fotoelasticidad, denominándose a esta técnica de medir tensiones, método fotoelástico.

Se puede determinar experimentalmente la distribución de las tensiones en una muestra fabricada con un material ópticamente activo. La misma distribución de las tensiones existe en la pieza verdadera, por lo que el carácter de distribución de las tensiones no depende del material, sino de la forma y el tipo de carga. Las tensiones en la pieza verdadera son proporcionales a las existentes en el modelo.

Las necesidades de medir tensiones surgen generalmente por las causas siguientes:

- Para determinar las propiedades mecánicas de los materiales.
- Para verificar la exactitud de los cálculos realizados (comprobación experimental).
- Para analizar la distribución de tensiones en piezas de configuración compleja, a las cuales no se adaptan los métodos de cálculos establecidos.
- *Para determinar las cargas cuando existen dificultades en su cálculo analítico, como pueden ser, por ejemplo las cargas de impacto.*
- Las tensiones y deformaciones es necesario determinarlas para distintos tipos de sollicitaciones: tracción, compresión, corte, torsión, flexión y resistencia compuesta.

Los distintos ensayos existentes se pueden dividir en tres grandes grupos:

- Ensayos estáticos. Cuando la velocidad de deformación es baja.
- Ensayos dinámicos, impactos, cargas cíclicas y vibraciones.

- Ensayos especiales. Cuando se analiza la influencia de la temperatura, la velocidad de aplicación de la carga, el efecto del tiempo, relajación, reactividad, etcétera.

Los ensayos fundamentales se realizan por los métodos siguientes:

- Tensometría o extensometría.
- Rayos X.
- Lacas o recubrimientos frágiles.
- Rejillas o líneas Muaré.
- Analogías.
- Polarización óptica.
- Fotoelasticidad.

El origen de la fotoelasticidad se remonta al año 1816, cuando David Brewster descubrió que en el vidrio sometido a tensión se observaban fenómenos de birrefringencia. Durante los años restantes del siglo XIX, investigadores europeos estudiaron las relaciones existentes entre las propiedades ópticas de materiales transparentes bajo tensión. Sin embargo, fue solamente durante la primera parte de la pasada centuria que fueron hechos serios progresos para emplear dicho fenómeno en el análisis de tensiones aplicado a la Ingeniería. Desde entonces, la técnica de la fotoelasticidad se ha convertido en un sólido método de análisis experimental de tensiones. Muchas investigaciones se han llevado a cabo sobre esta especialidad –particularmente en Estados Unidos- y durante una época la industria aceptó su aplicación y hizo un considerable uso de la misma.

La teoría física y óptica y la gran variedad de técnicas utilizables en este campo han provisto material más que suficiente para que aparecieran un sin número de excelentes textos y publicaciones especializadas sobre la fotoelasticidad. No obstante, en la Universidad no se cuenta con un texto que aborde esta temática con suficiente profundidad, por tal razón no es posible utilizar el polariscopio que se encuentra instalado en el Laboratorio de Resistencia de Materiales de la facultad de Ingeniería Mecánica. Este polariscopio solo es utilizado de forma demostrativa en pregrado, ya que no se tiene una guía que permita realizar la medición de tensiones utilizando la técnica de la fotoelasticidad.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto es que surge la necesidad de encontrar una solución a esta problemática. Para ello se partió de la hipótesis que plantea:

Hipótesis:

Si se confecciona una guía para el desarrollo de la práctica de laboratorio de fotoelasticidad y un dispositivo de carga para el polariscopio se pueden realizar las mediciones de tensión.

Para corroborar dicha hipótesis se establecieron como objetivos:

General :

Elaborar una práctica de laboratorio para la medición de tensiones mediante la fotoelasticidad.

Específicos:

- 1- Determinar los postulados teóricos y prácticos que justifican el estudio de la fotoelasticidad como método para la medición de tensiones.
- 2- Preparar una práctica de laboratorio para realizar la medición de tensiones utilizando la fotoelasticidad, a través de la guía de laboratorio, la técnica operatoria, las tablas de procesamiento estadístico y las probetas.
- 3- Diseñar y fabricar un dispositivo que permita aplicar carga a las probetas que se utilizarán en el desarrollo del laboratorio.

Este trabajo investigativo está estructurado en tres capítulos, siendo el capítulo I el que aborda los tópicos teórico-prácticos y los avances de la fotoelasticidad a partir de una eficiente búsqueda bibliográfica sobre el tema.

En el capítulo II se realiza la elaboración de la guía de laboratorio para la medición de tensiones mediante la técnica de la fotoelasticidad, a partir de la revisión de varias prácticas similares encontradas en la búsqueda realizada. Además, se lleva a cabo una detallada explicación sobre el equipo a utilizar y sus accesorios.

En el tercer capítulo, se realiza el diseño, construcción y validación del dispositivo de carga el cual será utilizado en dicha práctica. También, se añade una valoración económica sobre el proceso de fabricación del dispositivo.

CAPITULO I: Fundamentos teóricos sobre el estudio de la fotoelasticidad.

1.1. Introducción

La fotoelasticidad fue desarrollada a partir de la aplicación de principios ópticos para solucionar problemas de la ingeniería de la elasticidad. El método se basa en la característica de la birrefringencia exhibida por algunos plásticos transparentes. En detalle, el fenómeno de la birrefringencia inducida de la tensión (o la carga) se utiliza cuando el material se convierte en birrefringente bajo influencia del cargamento externo. El descubridor del fenómeno fue David Brewster en el siglo diecinueve, el material observado fue el cristal y él previó el potencial de este para el análisis de las tensiones. Sin embargo, el cristal estaba lejos del material ideal aunque la fotoelasticidad del cristal ha generado gran interés. La técnica, sin embargo, fue desarrollada sistemáticamente en una herramienta experimental viable del análisis de la tensión solamente en el segundo trimestre del pasado siglo. Los trabajos realizados por Coker y Filon, Frocht, y Jessop y Harris son particularmente significativos en este aspecto.

En las últimas dos décadas del siglo XX, la fotoelasticidad fue desplazada, en cierta medida, por el método de los elementos finitos (MEF). La simplicidad y la naturaleza del MEF fue preferida por los diseñadores. De hecho, los críticos de la fotoelasticidad plantean que para utilizar esta técnica se requiere construir un modelo birrefringente en vez de la estructura real. Sin embargo, el MEF tiene sus propias limitaciones, pues la aplicación del método es tan buena como la habilidad del diseñador para la construcción del modelo utilizado y la interpretación que se haga de los resultados; en este caso se confía en un modelo numérico de la estructura y del sistema de cargas reales para generar los patrones de la distribución de la tensión y de la deformación. Una nueva tendencia es el uso de ambos métodos combinados, donde se explotan las ventajas de los métodos experimentales y numéricos. También se ha revitalizado el uso de la fotoelasticidad por necesidades recientes tales como: supervisión en línea continua de estructuras, conocer la distribución de tensiones residuales en objetos de cristal y plásticos, apoyándose todo esto con el desarrollo de nuevos materiales, la utilización de la microelectrónica, de los prototipos rápidos de productos y de la visualización dinámica de las franjas de la tensión.

El método se basa en un modelo a escala reducida de la estructura o pieza en estudio –hecho de material plástico transparente- es colocado entre dos filtros de polarización cruzados y la birrefringencia variable debida a las tensiones mecánicas ocasiona que la luz aparezca con diferentes intensidades en diferentes puntos del modelo. El análisis de la polarización de la luz transmitida suministra información precisa sobre la magnitud y dirección de las tensiones, ya que por procesos de medida es posible conocer las que están presentes en la pieza que se examina. El hecho que el modelo se construya en plástico y la pieza en estudio sea, por ejemplo, metálica, no tiene importancia cuando se determinan tensiones en el rango elástico, puesto que, constantes elásticas muy diferentes afectarán solamente la determinación de las deformaciones y no de las tensiones.

Todos estos planteamientos sugieren el análisis, en este capítulo de todo lo referente al tema ya que de acuerdo con el criterio de profesores que deben impartir esta materia, no existe conocimiento pleno acerca de la fotoelasticidad.

1.2. Equipos empleados en ensayos fotoelásticos.

Para la realización de los ensayos fotoelásticos es necesario utilizar el polariscopio, el cual resulta ser el equipo óptico requerido. Este puede ser plano o circular de acuerdo con la disposición de sus accesorios.

El polariscopio plano es un instrumento que permite observar y medir el estado de polarización de objetos transparentes. Esta compuesto de un polarizador y de un analizador. El objeto de interés se pone entre ambos. Los ejes de extinción del polarizador y del analizador se encuentran a 90° para que se tenga un fondo negro. Además, de esta forma, los ejes de transmisión del polarizador y el analizador se ubican perpendiculares entre si. En la práctica se distingue entre polarizador y analizador, aún que se trate de elementos ópticos idénticos: el primero es el que define la dirección de polarización de la luz y el segundo se utiliza para observar la rotación de la polarización.

A diferencia del polariscopio plano, el polariscopio circular agrega entre los polarizadores, de cada lado de la muestra, una lamina retardadora de $\frac{1}{4}$ de onda. De este modo, el haz que entra en la muestra estará circularmente polarizado. Las direcciones principales de las laminas $\frac{1}{4}$ de onda deben ser orientadas a 45 grados de las direcciones de los polarizadores. Sin embargo, la imagen que se observa sigue

negra cuando no hay efectos birrefringentes en la muestra. Este equipo permite una caracterización mas precisa de la polarización. En este caso, solo una condición lleva a la extinción. Solo se observan las isó cromas nada más.

1.2.1. Disposición típica de un polariscopio.

La disposición típica de las partes constitutivas de un polariscopio se muestran en la figura 1.1. Consiste en una fuente luminosa (1), ya sea, de la luz blanca o preferiblemente monocromática (mercurio o vapor de sodio), seguida por una lente-condensador (2) que suministra un haz de luz paralelo y que incide perfectamente sobre la sección de trabajo. Este haz, es luego plano-polarizado por el polarizador (de Polaroid) (3), de donde, si es necesario, pasa a través de una placa-cuarto de onda (de mica) adecuadamente orientada (4), para dar como resultado luz circularmente polarizada. Esta pasará luego a través del modelo deformado (5) mediante un dispositivo de carga (6), por una segunda placa-cuarto de onda (7) y por el analizador (también de Polaroid) (8). Finalmente, existen las lentes del colimador (9) y de proyección (11), un filtro (10) para producir en lo posible luz monocromática, y en el extremo del sistema óptico, una pantalla o cámara fotográfica (12).

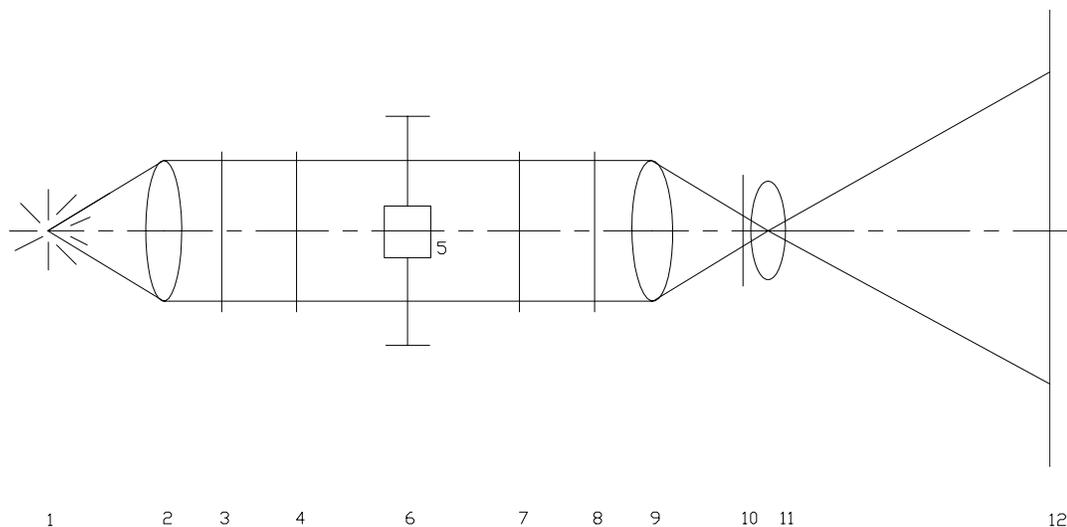


Fig. 1.1. Disposición típica de las partes constitutivas de un polariscopio.

1.2.2. Formas de disponer los elementos ópticos de un polariscopio.

La figura 1.2 muestra las distintas formas de disponer los elementos ópticos de un polariscopio para el trabajo fotoelástico. En la Fig 1.2.a la placa-cuarto de onda ha sido

omitida y ese arreglo recibe el nombre de polariscopio plano. Los ejes ópticos del polarizador y analizador están a ángulo recto, de ahí que la luz no pueda penetrar más allá del analizador. Esta disposición es utilizada cuando se desea hallar las direcciones de las tensiones en el modelo. Las Figs. **1.2.b** y **1.2.c** muestran que se han incluido placas-cuarto de onda, dando por resultado luz circularmente polarizada y por tanto el término polariscopio circular. Estas dos distribuciones son generalmente usadas para encontrar en el modelo, distribución y magnitud de las tensiones. Un par de placas-cuarto de onda pueden ser colocadas en dos formas, ambas cruzadas, por ejemplo, con la onda extraordinaria en la primera opuesta a la onda ordinaria en la segunda, o paralelas, por ejemplo, las ondas extraordinarias coinciden y las ordinarias también (ver figuras **1.2.a** y **1.2.b**). En la primera de estas dos disposiciones los efectos de ambas placas se anulan y la resultante es nula, pero cuando las placas son paralelas, sus efectos son aditivos y la resultante es una diferencia de fase de media longitud de onda.

El polariscopio plano –que es con polarizador y analizador cruzados- causa la extinción de la luz en la pantalla. Por lo tanto, es evidente que la inserción de placas-cuarto de onda cruzadas, también dan como resultado la extinción luminosa en la pantalla, ya que ellas tienen efecto resultante nulo. Sin embargo, en la posición de paralelas, una adición que abarca media longitud de onda, y en consecuencia, *la resultante plana de las vibraciones gira a 90° hasta ser paralela al eje óptico en el analizador. De ahí que se obtiene máxima intensidad luminosa en la pantalla.*

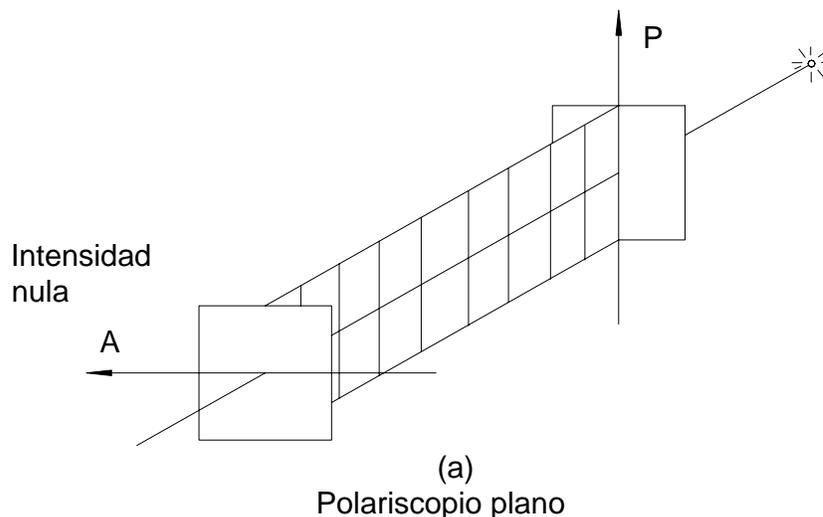
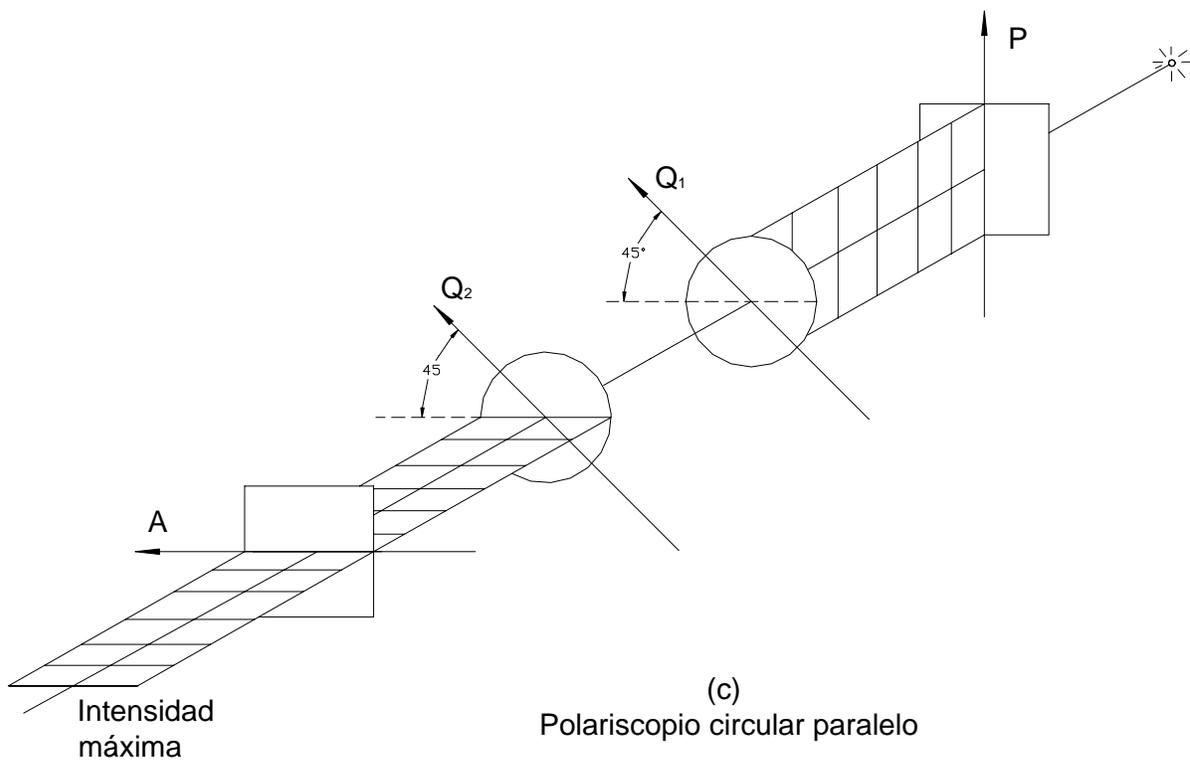
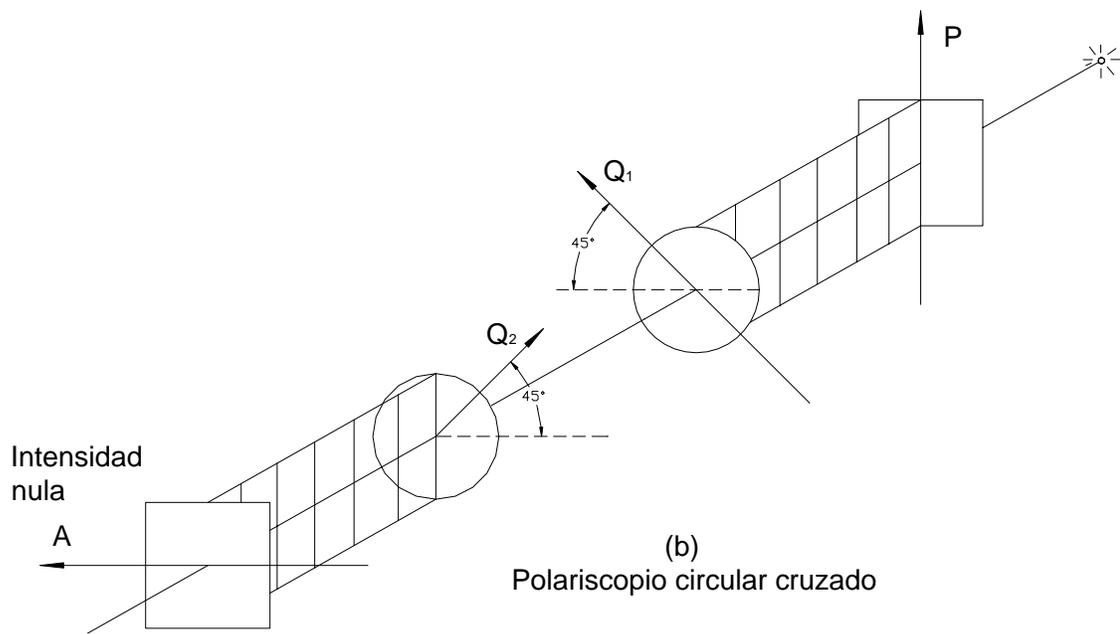


Fig.1.2a



Figs. 1.2. b y c.

1.3. Principios y métodos de la fotoelasticidad

Los principios de la fotoelasticidad se pueden aclarar por las dos leyes siguientes:

1. Para la birrefringencia inducida por la tensión, la incidencia de la luz polarizada está dividida en dos componentes a lo largo de las direcciones principales de la tensión, en una perpendicular del plano a la dirección de la propagación de la luz y transmitida solamente a lo largo de estos planos a través del modelo.
2. Las velocidades de la transmisión de la luz a lo largo de estas direcciones son directamente proporcionales a las intensidades de las tensiones principales respectivas.

Los principales métodos de dicho tema son:

1. Método interactivo o de relajación.
2. Método de la deformación lateral.
3. Método de las diferencias de corte.
4. Integración a lo largo de una trayectoria de tensiones.
5. Técnica de la incidencia oblicua.

1.3.1. Birrefringencia.

Como se ha mencionado previamente, se ha descubierto que ciertos materiales transparentes exhiben la propiedad de la doble refracción o birrefringencia cuando se hallan bajo tensión, pero retornan a la refracción normal cuando se deja de someterlos al esfuerzo previsto.

Evidencias experimentales han mostrado que los planos de refracción extraordinario y ordinario coinciden con los planos de las tensiones principales en todo punto del material. Además, fue descubierto que los índices de refracción y por tanto las velocidades a lo largo de estos planos, estaban relacionadas con las magnitudes de las tensiones principales.

Más, precisamente, si se considera el efecto de introducir una placa de material transparente adecuado entre el polarizador y el analizador de un polariscopio plano. Si la placa en cuestión está inicialmente descargada, no habrá cambio en el comportamiento luminoso del polariscopio. Pero si esta sujeta a una tensión uniforme, la luz, en *general*, se restablece. *Este efecto proviene del hecho que, bajo tensión el material adquiere la propiedad de dispersar la luz incidente en dos componentes*

polarizadas en las direcciones de las tensiones principales; por lo tanto los azimut de estas componentes difieren en 90° . Además, las ondas luminosas en estos haces son transmitidas a través de la placa tensionada con diferentes velocidades, ya que, cuando ellas lo abandonan, han adquirido un retardo relativo de fase, el cual esta demostrado depende de dos factores: la diferencia de las tensiones principales en la placa y su espesor.

El analizador transmite solamente las componentes de aquellos dos haces que son paralelas a su propio plano de polarización. Las componentes transmitidas se combinan para dar una onda luminosa resultante, pero si el retardo relativo es igual a la longitud de onda de la luz utilizada en los experimentos ópticos de interferencia, da como resultado la extinción de la luz transmitida. Según lo visto, si se utiliza luz blanca, el color cuya longitud de onda es igual al retardo relativo está extinguido y la luz observada está coloreada debido a que el resto de los colores que componen la luz blanca han perdido su ordenamiento original. Luz cuya longitud de onda es aproximadamente igual al retardo relativo, está parcialmente extinguida.

El retardo relativo R entre dos ondas transmitidas está dado por la siguiente expresión, considerada la ley básica de la fotoelasticidad:

$$R = c (\sigma_1 - \sigma_2) \cdot d \quad (1.1)$$

Donde σ_1 y σ_2 son las tensiones principales, d el espesor de la placa y c una constante del material, conocida como el coeficiente tenso-óptico. De la (1.1) se deduce que c tiene las dimensiones de la recíproca de una tensión; la unidad empleada en el sistema c.g.s. es el Brewster, que es igual a 10^{-13} cm²/ dina.

En la placa tratada, que está sujeta a tensión uniforme, el retardo relativo es proporcional a la tensión en la misma. Cuando se utiliza luz blanca, se observa la secuencia de colores que se muestran en la tabla adjunta y que se producen a medida que se incrementa la tensión.

Por una simple inspección, se deduce que los colores están extinguidos en el orden de los colores del espectro, comenzando con aquel de menor longitud de onda: el violeta. El cambio en el color observado desde el rojo al azul –correspondiente a la extinción del amarillo- es bastante pronunciado y de gran en fotoelasticidad, como el retardo relativo, y de este modo se puede deducir la diferencia entre las tensiones principales donde quiera se observe este tinte de pasaje.

También la tabla 1.1 indica que la secuencia de colores está repetida con algunas modificaciones, cuando los colores del espectro están extinguidos en un segundo intervalo de tiempo. La segunda, tercera y sucesivas extinciones de un color, corresponden a retardos relativos de dos, tres y múltiplos correspondientes a la longitud de onda de la luz extinguida. Debido a la superposición de los colores restablecidos, no es posible usar luz blanca donde la diferencia de las tensiones principales es tal que el retardo relativo excede en cinco o seis longitudes de onda de luz amarilla.

Si en lugar de luz blanca, se utiliza luz monocromática de una particular longitud de onda, se puede apreciar en determinados intervalos de tiempo que el retardo relativo es igual a un múltiplo exacto de la longitud de onda y la luz estará extinguida, por muy alta que pueda ser la frecuencia.

Tabla 1.1. Secuencia de colores en material transparente a tracción visto con luz blanca

Retardo relativo aproximado en °A	Colores extinguidos	Color observado	Orden
500	-----	Gris	1º
2000	-----	Blanco	1º
4000	Violeta	Amarillo	1º
4500	Azul	Naranja	1º
5000	Verde	Rojo	1º
5900	Amarillo	Púrpura	1º
6500	Naranja	Azul	1º
7000	Rojo	Verde	1º
8000	Rojo intenso (1º) Violeta (2º)	Amarillo	2º
9000	Azul	Naranja	2º
10000	Verde	Rojo	2º
11800	Amarillo (2º) Violeta (3º)	Púrpura	2º
13000	Naranja-Rojo (2º) Indigo (3º)	Verde esmeralda	2º
14000	Rojo (2º) Azul (3º)	Amarillo pálido	3º
15500	Rojo intenso (2º) Verde (3º) Violeta (4º)	Rosa	3º
17000	Amarillo (3º) Indigo (4º)	Verde claro	3º
19000	Naranja (3º) Azul (4º)	Blanco	3º
21000	Rojo (3º) Verde (4º) Violeta (5º)	Rosa pálido	4º
24000	Rojo intenso (3º) Amarillo (4º) Azul (5º) Violeta (6º)	Verde claro	4º
25000	Naranja (4º) Verde (5º) Indigo (6º)	Blanco	4º

A medida que el retardo se incrementa, la superposición de los colores extinguidos resulta más y más pronunciada. La secuencia de colores por encima del tercer orden resulta una repetición del blanco, rosa y verde, siendo cada vez más pálidos hasta el séptimo orden, que es cuando la luz transmitida es prácticamente blanca.

1.3.2. Isoclinas e isocromáticas

Al considerar el comportamiento luminoso en un polariscopio plano sin placas-cuarto de onda pero con un modelo sujeto a las tensiones principales σ_1 y σ_2 . Un elemento del mismo se muestra en la figura 1.3.a inclinado un ángulo θ con respecto al plano de polarización. La figura 1.3.b representa una vista a lo largo del eje del polariscopio (observando desde la fuente luminosa) donde se muestra el esquema vectorial de las componentes luminosas pasando a través del modelo y reducidas por el analizador.

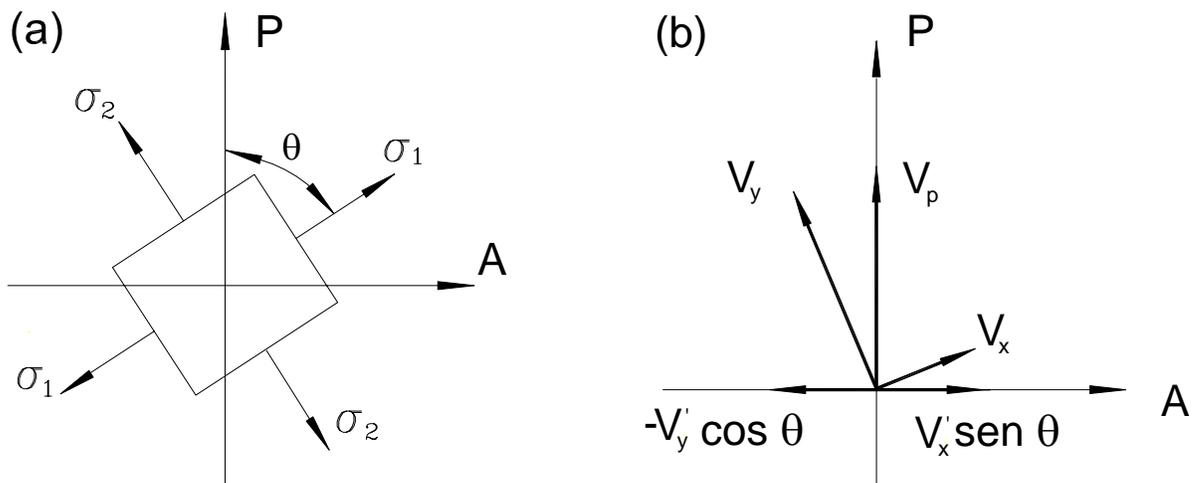


Fig. 1.3. Componentes de onda en un polariscopio plano, pasando a través de un modelo birrefringente.

El vector $V_p = a \cdot \text{sen } \varphi$ representa la luz plano-polarizada por el polarizador. Esta onda penetra en la placa bajo tensión (modelo) y se descompone en:

$$V_x = V_p \cdot \cos \theta = a \cdot \text{sen } \varphi \cdot \cos \theta$$

y

$$V_y = V_p \cdot \text{sen } \theta = a \cdot \text{sen } \varphi \cdot \text{sen } \theta$$

Se asume que la componente según "x" atraviesa la placa antes que la componente según "y" (existe adelanto), luego, al emerger del modelo, se tiene:

$$V'_x = a \cdot \cos \theta \cdot \text{sen } (\varphi + \alpha)$$

y

$$V'_y = a \cdot \text{sen } \theta \cdot \text{sen } \varphi$$

donde α es la diferencia de fase entre las dos componentes. Cuando llegan al analizador, $V'_x \cdot \text{sen } \theta$ y $-V'_y \cdot \cos \theta$ pasan a través del mismo, mientras que $V'_x \cdot \cos \theta$ y $V'_y \cdot \text{sen } \theta$ son interceptadas. Por lo tanto:

$$V_A = V'_x \cdot \text{sen } \theta - V'_y \cdot \cos \theta = a \cdot \text{sen } \theta \cdot \cos \theta \cdot \text{sen } (\varphi + \alpha) - a \cdot \text{sen } \theta \cdot \cos \theta \cdot \text{sen } \varphi$$

$$V_A = a \cdot \text{sen } \theta \cdot \cos \theta \left[\text{sen } (\varphi + \alpha) - \text{sen } \varphi \right] = a \frac{\text{sen } 2\theta}{2} \cdot 2 \cos \frac{(\varphi + \alpha) + \varphi}{2}$$

$$V_A = a \cdot \text{sen } 2\theta \cdot \cos \theta \left(\varphi + \frac{\alpha}{2} \right) \cdot \text{sen}$$

$$V_A = a \cdot \text{sen } 2\theta \cdot \text{sen } \frac{\alpha}{2} \cdot \text{sen } \left(\varphi + \frac{\alpha}{2} + \frac{\pi}{2} \right) \quad (1.2)$$

donde con V_A se designa a la componente resultante que es la paralela al eje del analizador y que se puede expresar así:

$$V_A = A \cdot \text{sen } \varphi' \quad (1.3)$$

donde $\varphi' = \varphi + \frac{1}{2} (\alpha + \pi)$ y A es la amplitud de la componente resultante. La intensidad de la luz transmitida es proporcional al cuadrado de la amplitud, de ahí que:

$$I = C \cdot A^2$$

Por lo tanto
$$I = C \cdot a^2 \cdot \text{sen}^2 2\theta \cdot \text{sen}^2 \left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (1.4)$$

De la fórmula anterior se deduce que la intensidad es nula, y por lo tanto, se produce extinción en el analizador cuando $\theta = 0^\circ$ y $\alpha = 2m\pi$, donde m es cero o un entero cualquiera. La primera solución, $\theta = 0^\circ$, representa la condición para la cual un plano de tensión principal es paralelo al plano de polarización o al eje óptico del polarizador. De ahí que, en todos aquellos puntos del modelo donde se cumpla esta condición, se produce la extinción en el analizador y se forman sobre la imagen del modelo bandas oscuras (o fajas), que reciben el nombre de isoclinas.

Una isoclina puede ser definida entonces, como el lugar geométrico de los puntos del modelo a lo largo de los cuales las direcciones de las tensiones principales son paralelas a los ejes ópticos del polarizador y el analizador. Si polarizador y analizador permanecen cruzados y se giran, aparecerán nuevas isoclinas, mientras las anteriores desaparecen. Se puede obtener una serie completa de isoclinas si se giran unidos ambos en 90° .

En el análisis se ha supuesto que la placa-modelo está sujeta a una tensión uniforme, pero si esto no ocurre, también habrá extinción luminosa todas las veces que la dirección de polarización sea la misma que la de las tensiones principales. En consecuencia, las isoclinas son independientes del valor y forma de la carga aplicada al modelo. Donde la dirección de las tensiones principales cambia rápidamente, las isoclinas están bien definidas, pero en regiones donde la dirección es aproximadamente constante, resulta una tarea bastante confusa establecer su ubicación.

En aquellos puntos donde $(\sigma_1 - \sigma_2) = 0$, llamados puntos isotrópicos o singulares, se puede observar en el modelo un punto oscuro, en las inmediaciones del cual pasarán todas las isoclinas. Por lo tanto, las direcciones de las tensiones principales resultan indeterminadas.

Volviendo a la fórmula (1.4), la segunda condición $\alpha = 2m\pi$ para intensidad nula en el analizador, es el retardo relativo entre una onda ordinaria y una extraordinaria, ambas emergentes desde la placa-modelo. Es decir, si la tensión varía punto a punto en el

modelo, el *retardo relativo* y el *color observado* serán iguales para todos aquellos puntos donde $(\sigma_1 - \sigma_2)$ asume el mismo valor. Bajo luz blanca, el lugar geométrico de tales puntos muestra el mismo color y se le conoce como línea isocromática. En la práctica, el tinte de pasaje de las isocromáticas está perfectamente definido y estas pueden ser trazadas con propósitos cuantitativos. Si se usa luz monocromática, las isocromáticas son reemplazadas por líneas oscuras conocidas como “franjas” y corresponden a un retardo relativo igual a algún múltiplo de la longitud de onda. En consecuencia, cuando $c(\sigma_1 - \sigma_2)d = \pm m\lambda$ (con $m = 0$ o un entero) para cualquier punto del modelo, habrá extinción luminosa en el analizador.

1.3.3. Franjas en un polariscopio circular

Ya se ha explicado que insertar placas-cuarto de onda en un polariscopio no tiene efecto alguno, ya que se produce la extinción luminosa en el analizador como si fuera un polariscopio plano. Por esto, en un modelo bajo tensión en un polariscopio circular-cruzado, se observará una franja tipo que es exactamente de la misma forma que en un polariscopio plano. Sin embargo, en aquél no aparecerán ya las isoclinas, porque con luz circularmente polarizada no es posible que la misma pase a través del modelo sin que se divida en dos componentes para cada uno y todos los puntos del mismo.

Si se rota 90° una de las placas-cuarto de onda, de modo que resulten paralelas, se observa un cambio total de media longitud de onda $(\frac{1}{2}\lambda)$ en el polariscopio, dando como resultado una zona iluminada en la pantalla. La extinción luminosa o la aparición de una franja *acontece ahora donde el estado de tensión en el modelo es tal, que produce retardos relativos de $(m + 1/2)\lambda$* . Así, en un polariscopio circular-paralelo, las franjas son vistas para valores del retardo correspondientes a $\frac{1}{2}$, $1\frac{1}{2}$, $2\frac{1}{2}$, etc, longitudes de onda.

1.3.4. Valor de calibración.

Habiendo obtenido un registro completo de las franjas-tipo para un modelo particular, antes de realizar un análisis de las tensiones principales, es necesario conocer la constante óptica o valor de calibración para el material, al cuál se define como:

El aumento de la diferencia entre las tensiones principales que se requiere para producir una franja o un retardo relativo igual a una longitud de onda.

Una calibración solamente puede ser hecha usando una zona de tensiones conocidas, tal como en tracción simple, compresión o flexión pura, debe ser llevada a cabo en una muestra cortada de la misma lámina del material con que ha sido confeccionado el modelo. En los primeros dos casos de sollicitaciones simples, la relación entre tensión y franja está dada por $R = c(\sigma_1 - \sigma_2) \cdot d = c \cdot d \cdot \sigma_1$ o $c \cdot d \cdot \sigma_2$, respectivamente; de ahí que el retardo es proporcional al valor directo de la tensión en la sección transversal del elemento testigo. Ya que la tensión es constante en toda la longitud del mismo, también el retardo es constante, y por lo tanto es un hecho, que una franja lo cubra por completo.

Si se aplica un incremento de carga, se suceden sobre la pantalla ciclos alternados de luz y oscuridad, correspondiendo las extinciones a cada onda de orden superior (total para las placas-cuarto de onda cruzadas y media cuando son paralelas)

Si se gráfica la carga aplicada en función del orden de franja se obtiene una recta, y luego se divide la pendiente de está por área de la sección transversal de la pieza testigo, se halla un valor que nos suministra la tensión orden de franja. Esta constante, que se simboliza F_m , es conocida como el valor de franja para el modelo; sus dimensiones se expresan en kg/cm^2 por franja, y puesto que el retardo es proporcional al espesor del modelo, es solamente aplicable al espesor del testigo. Para propósitos comparativos o de conversión, se multiplica F_m por el espesor del modelo dando $F_1 = F_m \cdot d$; se le conoce como el valor de franja para el material y se le define como la diferencia de tensiones necesarias para producir un *orden de franja por centímetro de espesor del material (la dimensión es kg/cm^2 por franja y por cm)*.

Teniendo determinado un valor de franja apropiado para el modelo a ser analizado, es necesario que se multiplique el orden de franja n en un punto por el valor de franja F_m para el modelo, para obtener la diferencia de tensiones principales en dicho punto:

$$n \cdot F_m = (\sigma_1 - \sigma_2).$$

1.3.5. Trayectorias de tensiones

Las isoclinas por sí mismas no proveen un esquema claro de la dirección de las tensiones en el modelo. Sin embargo, a partir de ellas es posible construir una serie de curvas conocidas como trayectorias o líneas de tensiones. La tangente y la normal a un punto de una trayectoria, suministra las direcciones de las dos tensiones principales (máxima y mínima) en dicho punto. Esta información, obtenida de un ensayo fotoelástico, es en sí misma enteramente útil, ya que, con las direcciones principales conocidas, el análisis de los componentes con una resistencia strián-gauge, por ejemplo, puede resultar un tanto simple.

De los distintos métodos que se conocen para construir las trayectorias de tensiones, se describe uno que es relativamente simple y de rápida aproximación. Sobre un diagrama de las isoclinas se traza una recta de referencia paralela al eje $\theta = 0^\circ$ o a la posición inicial del polarizador (o analizador). A continuación se dibuja una serie de rectas, paralelas entre sí, por puntos situados a lo largo de una isoclina y que forman con el eje de referencia ángulos iguales a θ , que es el parámetro geométrico de la isoclina.

Como se muestra en la figura 1.4, se traza luego curvas continuas que cortan las isoclinas en direcciones paralelas a las falsillas que se indican. De esta forma, se habrán obtenidos dos grupos de curvas ortogonales que representan las direcciones de tensiones σ_1 y σ_2 . Es evidente que el borde libre de un modelo será también una trayectoria.

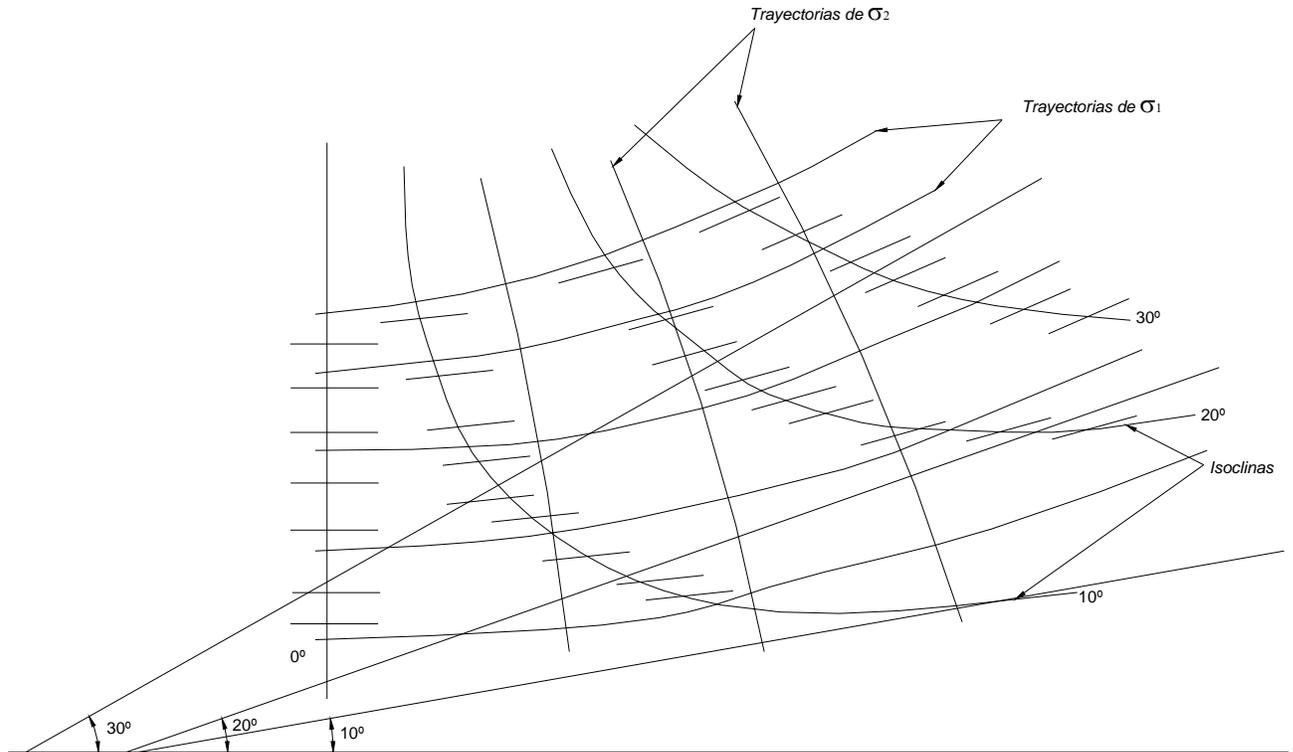


Fig. 1.4. Construcción de las trayectorias de tensiones.

1.4. Separación de las tensiones principales

La información obtenida directamente a partir de un ensayo fotoelástico, respecto a la distribución y magnitud de las tensiones, se expresa en términos de la diferencia entre las tensiones principales en un punto. Se debe hacer notar también que la máxima tensión de corte es la semidiferencia entre las tensiones principales y que ésta, es una magnitud fácil de obtener directamente. Es importante también recordar, que sobre un borde libre o descargado una de las tensiones principales debe ser nula (la normal al borde), y por lo tanto, las tensiones de borde pueden ser obtenidas directamente utilizando la franja-tipo y el valor de franja para el modelo.

A fin de obtener individualmente las tensiones principales, normales, o tensiones de corte en el modelo, es necesario separar σ_1 de σ_2 en una dada franja-tipo. Existen muchos procedimientos para efectuar esto, pero está más allá del alcance de este trabajo ocuparse de todos ellos, en consecuencia, se describen solamente unos pocos: los más utilizados y expeditivos en la práctica de la fotoelasticidad.

Un proceso evidente es encontrar la suma de las tensiones principales en un punto y combinar ésta con la diferencia.

1.4.1. Método interactivo o de relajación

Este método se basa en un análisis numérico del problema. Se ha dicho °

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right) (\sigma_1 + \sigma_2) = 0 \quad (1.5)$$

por sucesivas aproximaciones de $(\sigma_1 + \sigma_2)$ en los puntos internos de una malla, dando los valores de $(\sigma_1 + \sigma_2)$ en los bordes libres de la misma.

1.4.2. Método de la deformación lateral

En un estado de tensiones bidimensional, la tensión principal σ_3 resulta nula y la deformación lateral o deformación a través del espesor del modelo, está dada por:

$$\varepsilon_3 = -\frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (1.6)$$

Por esto, la suma de las tensiones principales en un punto es proporcional a la variación o cambio de espesor del modelo en dicho punto. Esta medición se puede efectuar en dos formas. Como estas variaciones son extremadamente pequeñas, uno de los caminos es medir directamente con un extensómetro de alta sensibilidad, pero como las mediciones se realizan punto a punto, se requiere una técnica esmerada y cuidadosa. La otra alternativa es usar un interferómetro. Este es un aparato óptico que mide las alteraciones (en dirección del espesor) de una superficie plana mediante la producción de una franja patrón de interferencia. Estas franjas son similares, en apariencia, a las isocromáticas, pero en este caso son proporcionales a $(\sigma_1 + \sigma_2)$. Una combinación de estas franjas –que se denominan *isopáquicas*- y de *isocromáticas*, permite la separación de σ_1 y σ_2 .

Debe observarse, sin embargo, que las dimensiones o tamaño mínimo de un modelo estructural viene determinado por el método de medida a utilizar, íntimamente ligado con el medidor de deformaciones elegido. Por lo tanto, es necesario proyectar el modelo en estudio suficientemente grande, para poder elegir un medidor de

deformaciones que posea una longitud de escala lo más pequeña *posible y para que en esa forma, la variación de la deformación entre sus extremos se pueda considerar lineal. Cuando la deformación sigue una ley lineal, la deformación promedio en una cierta longitud de escala, coincide con la deformación en el punto medio de dicha escala.*

1.4.3. Método de las diferencias de corte

Para un elemento sujeto a un estado de tensiones plano, caracterizado por una tensión normal y una tensión de corte, la ecuación de equilibrio que las relaciona es:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0 \quad (1.7)$$

Se puede usar esta relación entre ambas, para obtener $(\sigma_1 + \sigma_2)$, y de allí, separar las tensiones principales. Un primer paso es dibujar las trayectorias de tensiones en el área donde se requiere separar las tensiones principales. Sobre este diagrama (figura 1.5), se dibuja luego una recta arbitraria –puede ser en la dirección del eje x- desde uno de los bordes libres y se divide en segmentos de longitud δ_x . A continuación, se trazan rectas perpendiculares por puntos tales como el B, C y D, donde éstas cortan a trayectorias contiguas situadas a uno y otro lado de A (en puntos como el M y el M'), se determina la máxima tensión de corte $\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)$ a partir de las isocromáticas.

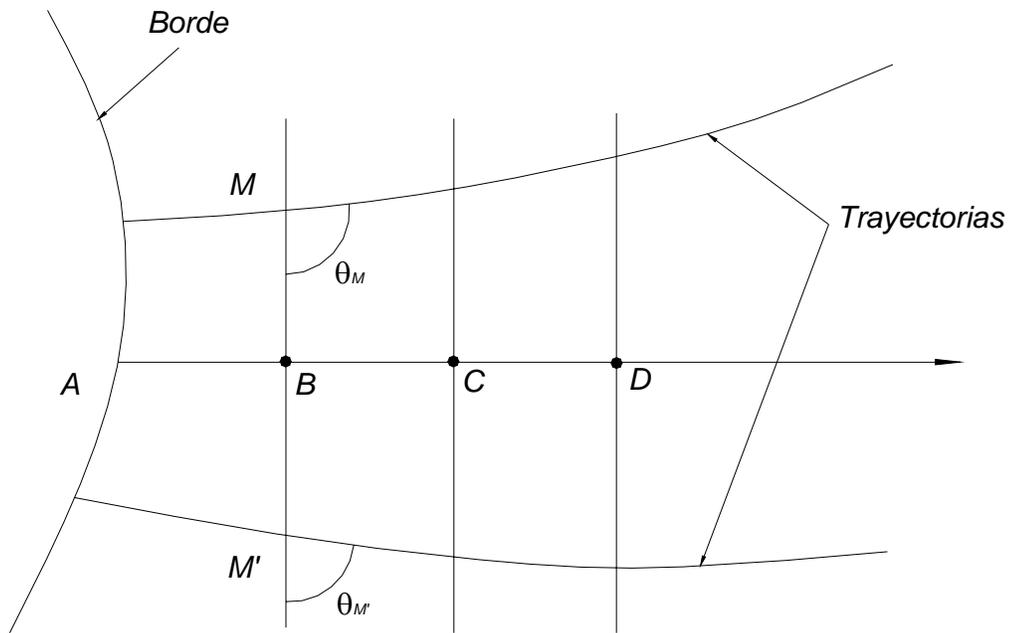


Fig. 1.5. Construcción empleando el método de las diferencias de corte.

Entonces resulta:

$$\tau_M = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)_M \cdot \text{sen}2\theta_M \quad (1.8)$$

y

$$\tau_{M'} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)_{M'} \cdot \text{sen}2\theta_{M'} \quad (1.9)$$

donde θ_M y $\theta_{M'}$ indican los ángulos que forma la recta que pasa por M y M' con las trayectorias de tensiones.

De las ecuaciones (1.8) y (1.9) se obtiene:

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = \frac{\tau_{xy_M} - \tau_{xy_{M'}}}{MM'} \quad (1.10)$$

pero de la (1.7)

$$\delta \sigma_x = -\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \cdot \delta x$$

Por tanto, los incrementos de $\delta \tau_x$ pueden ser hallados en los puntos B, y D, ya que en A es $\sigma_x = 0$, éstos pueden ser sumados desde A hasta D para obtener los valores de σ_x .

Si se requieren también las tensiones principales se deduce de la figura 1.6 que:

$$\sigma_x = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{2} \cdot \cos 2\theta \quad (1.11)$$

La expresión (1.11), con un conocimiento de $(\sigma_1 - \sigma_2)$ a partir de las franjas-tipo, permite obtener $(\sigma_1 + \sigma_2) \cdot \sigma_1$ y σ_2 .

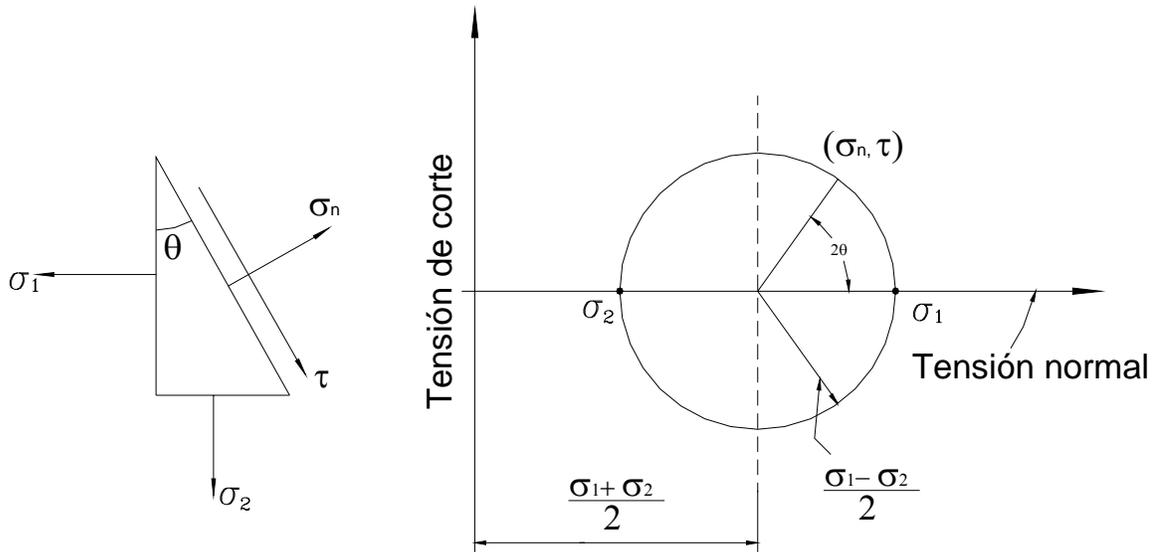


Fig. 1.6. **Representación circular del estado tensional.**

1.4.4. Integración a lo largo de una trayectoria de tensiones

Para este método se puede usar las ecuaciones de equilibrio de Lamé-Maxwell:

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial s_1} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\rho_2}$$

(1.12)

$$\frac{\partial \sigma_2}{\partial s_2} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\rho_1}$$

donde $\frac{\partial \sigma_1}{\partial s_1}$ y $\frac{\partial \sigma_2}{\partial s_2}$ miden las pendientes (interpretación geométrica de la derivada)

de σ_1 y σ_2 a lo largo de sus trayectorias y ρ es el radio de curvatura de la trayectoria ortogonal en el punto que se analiza.

Antes de describir el procedimiento, se debe adoptar una convención de signo para el radio de curvatura. Una forma muy usual y asociada con las ecuaciones de Lamé-

Maxwell, es la siguiente: Sean S_1 y S_2 dos trayectorias ortogonales; la dirección positiva a lo largo de S_1 puede ser elegida arbitrariamente, pero la dirección positiva a lo largo de S_2 debe ser tal que, si se gira en 90° a S_1 , en sentido antihorario, coincide con el sentido positivo de ésta. Los radios de curvatura, ρ_1 o ρ_2 , son positivos si una tangente a la trayectoria se desplaza o gira en sentido antihorario, en un todo de acuerdo con los incrementos positivos de S_1 y S_2 .

De las convenciones anteriores y de las ecuaciones (1.12) se establece que, si el radio de curvatura de un borde es positivo, el signo del incremento en la tensión es opuesto al de la tensión tangencial sobre dicho borde. Recíprocamente, si la curvatura del borde es negativa, el signo del incremento en la tensión normal coincide con el de la tensión tangencial. Un aspecto importante respecto a los signos de las tensiones es que, si se conocen los signos en un punto del modelo, luego se puede determinar los signos de las tensiones en todo borde libre por una inspección o reconocimiento de las trayectorias de tensiones. Debe recordarse que un borde libre es en sí mismo una trayectoria, ya sea de σ_1 o σ_2 , luego el signo de una tensión de borde cambia, donde una trayectoria que está ubicada paralela y cercana al borde (de la misma familia), se torna normal al mismo.

Si se observa la figura 1.7, el radio de curvatura ρ_2 está dado por $\frac{\delta_{s_2}}{\delta_\theta}$, siendo δ_θ el incremento del parámetro θ entre dos isoclinas adyacentes. De las ecuaciones (12) resulta:

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial s_1} = (\sigma_2 - \sigma_1) \cdot \frac{\delta_\theta}{\delta_{s_2}} \quad (1.13)$$

o

$$\delta \sigma_1 = (\sigma_2 - \sigma_1) \cdot \delta_\theta \cdot \frac{\delta_{s_1}}{\delta_{s_2}}$$

Siendo $\delta_{s_1}/\delta_{s_2} = AB/AC = -\cotg \varphi$, se obtiene:

$$\delta \sigma_1 = (\sigma_1 - \sigma_2) \cdot \cotg \varphi \delta_\theta \quad (1.14)$$

comenzando en un borde libre y en varios puntos ubicados a lo largo de una trayectoria σ_1 , se halla $(\sigma_1 - \sigma_2)$ por la franja-tipo, δ_θ por la isocлина-tipo, y φ por la inclinación de las

isoclinas con la trayectoria. Luego, es posible sumar los incrementos de $\delta\sigma_1$ para obtener valores de σ_1 a lo largo de la trayectoria.

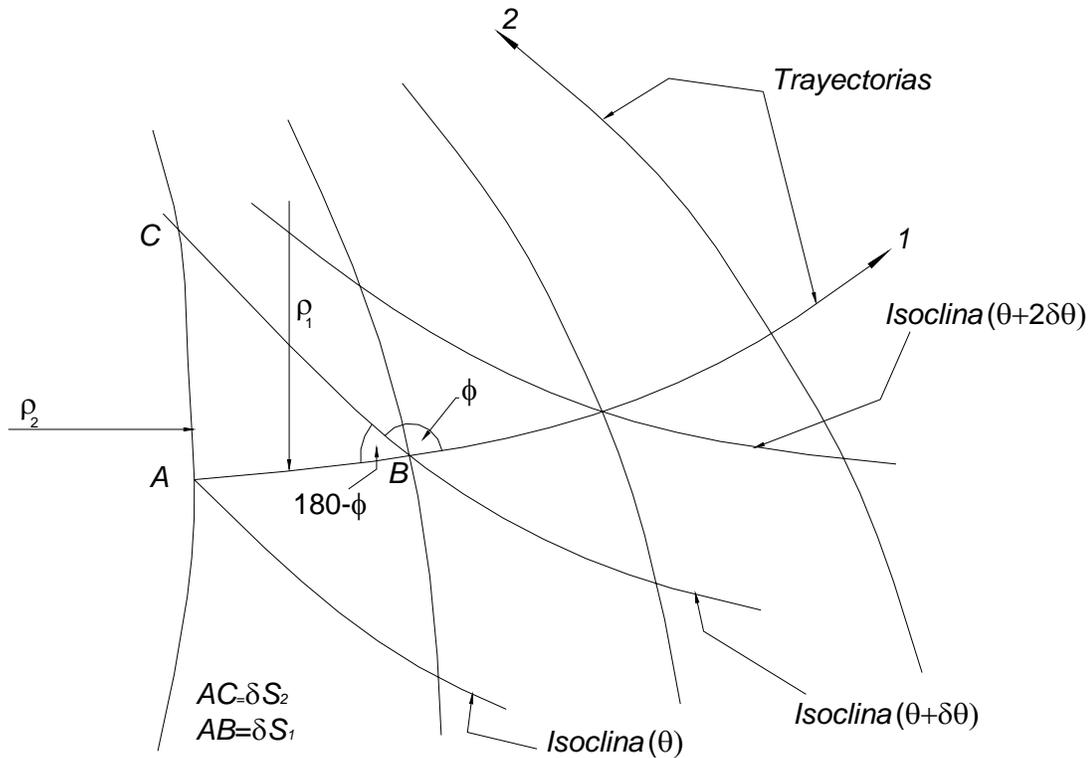


Fig. 1. 7. Integración a lo largo de una trayectoria de tensiones.

1.4.5. Técnica de la incidencia oblicua

Este método, muy útil para separar las tensiones principales, fue desarrollado por Drucker. Primero se obtiene para el modelo dado, la franja-tipo normal y las isoclinas. Luego, en un punto del mismo, donde se desea separar las tensiones, y conociendo la dirección de las mismas por medio de la isoclina en el punto, se gira el modelo un pequeño ángulo alrededor de una de las tensiones principales. La lectura de un orden de franja se efectúa con luz polarizada que ahora tiene una incidencia oblicua debida a la rotación antedicha. Además, es necesario tener el modelo sumergido en un fluido de índice de refracción corregido, para evitar la dispersión de la luz.

Los distintos tipos de franjas obtenidas bajo incidencia normal y oblicua, permiten separar las tensiones principales en la forma que se indica a continuación. Bajo incidencia normal, (ver figura 1.8.a), tenemos la siguiente relación:

$$F_1 \cdot n = (\sigma_1 - \sigma_2) \cdot d \quad (1.15)$$

Donde F_1 es el valor de franja para el material.

Dividiendo el retardo en dos partes: $n_1 = \sigma_1 \cdot d / F_1$ y $n_2 = \sigma_2 \cdot d / F_1$, se obtiene:

$$n = n_1 - n_2 \quad (1.16)$$

Por una ulterior rotación alrededor de σ_1 e incidencia oblicua, la componente de σ_2 perpendicular a los rayos luminosos es $\sigma_2 \cdot \cos^2 \theta$ y el camino óptico recorrido resulta ser ahora, $d / \cos \theta$. En consecuencia, el orden de franja n_0 –bajo incidencia oblicua– está dado por:

$$F_1 \cdot n_0 = (\sigma_1 - \sigma_2 \cdot \cos^2 \theta) \frac{d}{\cos \theta} \quad (1.17)$$

Sustituyendo σ_1 y σ_2 por las expresiones que se obtienen de la (1.15) y siguientes, resulta:

$$F_1 \cdot n_0 = \frac{F}{d} (n_1 - n_2 \cdot \cos^2 \theta) \cdot \frac{d}{\cos \theta}$$

De la cual se obtiene:

$$n_0 = \frac{n_1 - n_2 \cdot \cos^2 \theta}{\cos \theta} \quad (1.18)$$

Pero, teniendo en cuenta que $n = n_1 - n_2$, se obtiene:

$$\begin{aligned} n_0 \cdot \cos \theta &= n_1 + (n - n_1) \cdot \cos^2 \theta \\ n_0 \cdot \cos \theta &= n_1 (1 - \cos^2 \theta) + n \cdot \cos^2 \theta \\ n_1 &= \frac{\cos \theta (n_0 - n \cdot \cos \theta)}{\sin^2 \theta} \end{aligned} \quad (1.19)$$

y

$$\begin{aligned} n_0 \cdot \cos \theta &= n + n_2 - n_2 \cdot \cos^2 \theta \\ n_0 \cdot \cos \theta &= n + n_2 (1 - \cos^2 \theta) \end{aligned}$$

$$n_2 = \frac{n_0 \cos \theta - n}{\sin^2 \theta} \quad (1.20)$$

En consecuencia,

$$\sigma_1 = \frac{F_1 \cdot \cos \theta (n_0 - n \cdot \cos \theta)}{d \cdot \sin^2 \theta} \quad (1.21);$$

$$\sigma_2 = \frac{F_1 (n_0 \cdot \cos \theta - n)}{d \cdot \sin^2 \theta} \quad (1.22)$$

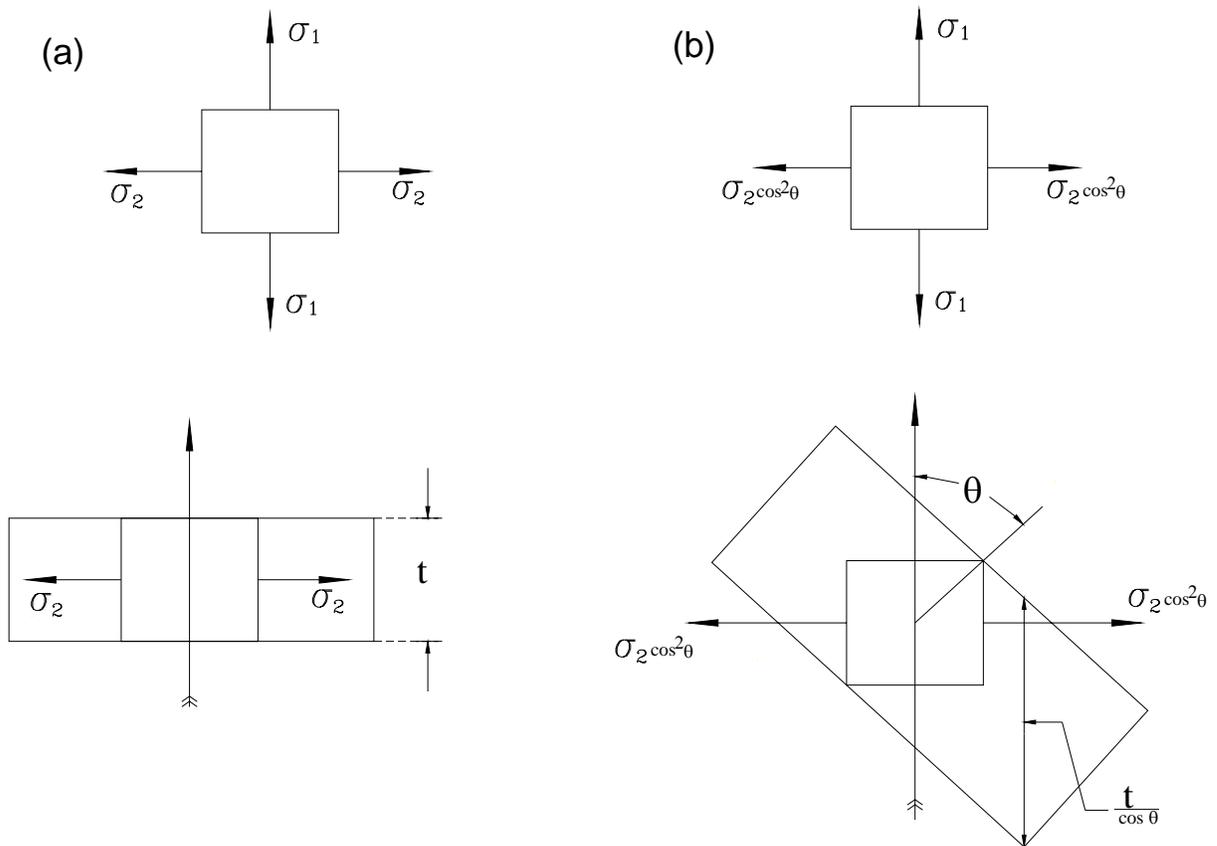


Fig. 1.8. Disposición de un elemento durante incidencia normal y oblicua.

1.5. Materiales dicroicos

En algunos cristales, las ondas que vibran en dos direcciones preferenciales, no solamente se propagan con velocidades diferentes, sino que sufren, también, absorciones diferentes. Este fenómeno se conoce como dicroísmo. La luz natural pasando a través de un material dicroico resulta parcialmente polarizada. Si los

coeficientes de absorción del cristal para las dos ondas son suficientemente diferentes, y si el espesor de la placa es apropiadamente elegido, la luz transmitida puede ser casi totalmente polarizada.

La turmalina es un ejemplo bien conocido de un cristal dicroico. Su uso como filtro de polarización tiene, sin embargo, dos limitaciones importantes:

- Sus cristales pueden ser obtenidos solamente en muestras comparativamente pequeñas.
- La absorción de la turmalina no es despreciable, aún para ondas que vibran en la dirección del eje de transmisión, y es fuertemente dependiente de la longitud de onda.

Como una consecuencia, la luz polarizada transmitida por un cristal de turmalina tiene un tinte verde azulado.

El cristal sintético de sulfato de iodoquinina o herapatita, es una sustancia dicroica que transmite, con muy poca absorción, luz polarizada de toda longitud de onda. No obstante, los cristales de herapatita son mecánicamente muy inestables y por lo tanto no tienen uso práctico como filtros de polarización.

Las láminas de polarización fabricadas por firmas especializadas, son también filtros de polarización dicroicos. Entre sus ventajas podemos citar:

- Facilidad en disponer de grandes láminas.
- Alta transparencia a la luz polarizada.
- Bajo costo.

Un tipo primitivo consistió en un gran número de pequeños cristales dicroicos encastrados en una lámina de plástico transparente; un proceso especial de fabricación aseguraba la orientación "paralela" de cada uno de los cristales. Otro tipo de láminas polarizantes no contienen cristales. Están hechas de un material plástico llamado polivinil-alcohol, cuyas moléculas son sumamente largas. Cuando una lámina de este material se tracciona mecánicamente en una dirección, el arreglo de moléculas se endereza y estas se alinean en la dirección del esfuerzo. Adicionando yodina se suministran fuertes propiedades dicroicas a la lámina, existiendo también otros tipos que están hechas de plásticos puros, sin adición de yodina. Un filtro de polarización puede ser caracterizado por dos valores, k_1 y k_2 , los cuales representan las razones

entre las intensidades transmitidas o incidentes de ondas que vibran en la dirección del eje de transmisión y en una dirección perpendicular al mismo, respectivamente (por supuesto que para un filtro ideal se tiene $k_1 = 1$ y $k_2 = 0$). La tabla siguiente indica los valores que asumen k_1 y k_2 para la lámina conocida comercialmente como Polaroid H; su uso revela que es un excelente filtro de polarización para prácticamente todo el espectro visible.

λ (en Amstrongs)	4000	5000	6000	7000
k_1	0.45	0.80	0.75	0.80
k_2	0.02	0.001	0	0

1.6. *Parámetros fundamentales*

Una sustancia ópticamente isotrópica está caracterizada por un único parámetro: el índice de refracción, el cual determina la velocidad de propagación. Sin embargo, en una sustancia ópticamente anisotrópica no existe una sola velocidad de propagación, y por lo tanto tampoco un solo índice de refracción.

No obstante, se puede describir completamente las propiedades ópticas de tales sustancias, asignando tres direcciones características y mutuamente perpendiculares, O_x , O_y y O_z , y tres constantes correspondientes n_1 , n_2 y n_3 , llamadas índices principales de refracción. Las dos ondas planas que se desplazan, sin cambiar su estado de polarización, en la dirección del eje "x", tienen sus planos de vibración paralelos a los ejes "y" y "z", y sus velocidades de propagación son c/n_2 y c/n_3 . Las dos ondas que se desplazan en la dirección del eje "y" tienen sus planos de vibración paralelos a los ejes "z" y "x", y sus velocidades de propagación son c/n_3 y c/n_1 , respectivamente. Las dos ondas que se desplazan en la dirección del eje "z" tienen sus planos de vibración paralelos a los ejes "x" y "y", y sus velocidades de propagación son c/n_1 y c/n_2 . Se observa que las velocidades de propagación dependen de la dirección de vibración, no de la dirección de propagación. Así, por ejemplo, la onda que se desplaza en una dirección paralela al eje "x", tiene la misma velocidad de propagación que si se desplaza en la dirección de "y" o de "z".

Para determinar los planos de vibración y las velocidades de las ondas que son propagadas en cualquier dirección, distintas de O_x , O_y u O_z , se usa el siguiente procedimiento. Se construye primero el elipsoide cuyos tres semiejes son paralelos a O_x , O_y y O_z , y cuyas longitudes son iguales a n_1 , n_2 y n_3 , respectivamente. La ecuación de esta elipsoide es:

$$\frac{x^2}{n_1^2} + \frac{y^2}{n_2^2} + \frac{z^2}{n_3^2} = 1$$

Conocida la dirección de propagación, se construye luego un plano perpendicular a esta dirección (además es paralelo al correspondiente frente de onda) que pasa por el centro del elipsoide. La intersección del plano con el elipsoide es una elipse. Los ejes de esta elipse son paralelos a los planos de vibración de las dos ondas planas, las cuales se desplazan inalteradas en la dirección dada. Las longitudes de los semiejes son numéricamente iguales a los correspondientes índices de refracción.

A este elipsoide característico se le denomina elipsoide de Fresnel, ya que fue este el primero en descubrir éstas formulación general de la óptica cristalina.

Es bien conocido que los cristales se clasifican dentro de grupos diferentes, según sus propiedades de simetría. Para los cristales pertenecientes al sistema cúbico los tres índices de refracción son iguales a (n_1 , n_2 y n_3), ya que el elipsoide de Fresnel degenera en una esfera. Ya que todas las secciones de una esfera son círculos, no existen direcciones preferentes de vibración, y las ondas planas con un estado arbitrario de polarización, se desplazan con igual velocidad en todas las direcciones. Los cristales pertenecientes a este sistema se comportan en forma semejante que las sustancias ópticamente isotrópicas, aun cuando alguna de sus otras propiedades físicas pueden depender de la dirección.

Para cristales pertenecientes a los sistemas trigonal, hexagonal y tetragonal, dos de los índices principales de refracción son iguales, por ejemplo $n_2 = n_3$. El elipsoide de Fresnel es un elipsoide de revolución alrededor de los ejes ópticos del cristal. Los cristales de estos grupos se llaman uniaxiales.

La sección de un elipsoide de Fresnel perpendicular al eje es un círculo de radio n_2 . por lo tanto, todas las ondas planas que se desplazan en la dirección de los ejes ópticos, mantienen sus estados de polarización. Para tales ondas, el cristal se comporta en

forma semejante a un medio isotrópico. Sin embargo, en todas las otras direcciones, el cristal es birrefringente. Dada una dirección de propagación arbitraria OP, distinta de los ejes ópticos, se corta el elipsoide de Fresnel (figura 1.9) con un plano que pasa por su centro y es perpendicular a OP. La intersección es una elipse, de la cual uno de sus ejes (AB) yace en el plano ecuatorial del elipsoide, mientras el otro (CD) está ubicado en el plano que contiene la dirección de propagación y el eje óptico. Estos dos ejes son paralelos a los planos de vibración de las ondas linealmente polarizadas que se desplazan en la dirección OP.

Si se define al plano que contiene la dirección de propagación y el eje óptico, como la sección principal del cristal relativa a una dirección de propagación dada, se puede decir que de las dos ondas linealmente polarizadas que se desplazan en una dirección dada, una tiene su plano de vibración perpendicular y la otra paralela a la sección principal correspondiente.

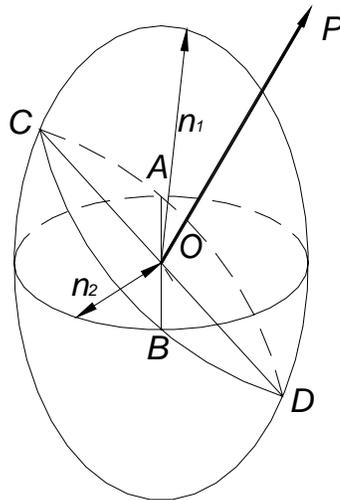


Fig.1.9. Elipsoide de Fresnel para un cristal positivo uniaxial.

El índice de refracción de la onda que vibra perpendicularmente a la sección principal (y en consecuencia al eje óptico) es igual a n_2 , que es el radio de la sección ecuatorial del elipsoide. Por lo tanto, la velocidad de onda es c/n_2 , y tiene el mismo valor para todas las direcciones de propagación. Por esta razón la onda que vibra en una dirección perpendicular al eje óptico es llamada onda(o rayo) ordinaria.

El índice de refracción de la onda que vibra en el plano de la sección principal es numéricamente igual al semieje OC de la elipse. Este índice de refracción es diferente para las distintas direcciones de propagación, su valor es siempre intermedio entre n_1 y n_2 . Así, la onda que vibra en el plano de la sección principal tiene una velocidad que depende de la dirección de propagación; por esta razón es llamada onda extraordinaria.

Cuando $n_2 < n_1$, el elipsoide de Fresnel es alargado en los polos. En este caso, la velocidad de propagación de la onda extraordinaria es menor que la de la onda ordinaria, y al cristal se le llama positivo. Cuando $n_2 > n_1$, el elipsoide de Fresnel es achatado en los polos y la velocidad de la onda extraordinaria es mayor que la de onda ordinaria, luego el cristal es llamado negativo.

Para cristales pertenecientes a los sistemas ortorrómbico, monoclinico y triclinico, los tres ejes del elipsoide de Fresnel tienen longitudes diferentes. De acuerdo a un conocido teorema de Geometría Analítica, dos planos pasan por el centro de un elipsoide, cuyas intersecciones con el mismo son círculos. Estos dos planos contienen los ejes de longitud intermedia y están simétricamente orientadas con respecto a los otros dos ejes. Se denominan secciones circulares del elipsoide.

De este modo, en un cristal del tipo recién considerado, en lugar de una, existen dos direcciones, en las cuales, toda onda plana se desplaza con la misma velocidad y sin sufrir cambios en su estado de polarización. Estas direcciones son perpendiculares a las dos secciones circulares del elipsoide de Fresnel y se denominan ejes ópticos principales del cristal. A este cristal se le llama biaxial.

Nota : Del desarrollo precedente se deduce que, para la onda ordinaria el vector óptico es perpendicular a la dirección de propagación. Esto ocurre para la onda extraordinaria. Tanto los conceptos anteriores como las propiedades ópticas fundamentales de los medios anisotrópicos, pueden derivarse a partir de la teoría electromagnética de la luz mediante el uso de un adecuado modelo atómico de un medio birrefringente.

1.7. Materiales fotoelásticos

En este campo el material más intensivamente utilizado es una resina epoxy conocida como Araldita. En Estados Unidos y en la mayoría de los países europeos existen

varios materiales bien estudiados y que sucesivamente fueron utilizados, ya sea, para experimentación bidimensional o tridimensional, a saber: bakelita, fosterita y kristón; no obstante, estos materiales son un poco costosos y muestran pequeñas ventajas con respecto a la Araldita.

Materiales tales como el celuloide y el perspex, los cuales son birrefringentes, resultan también óptimamente insensibles al uso fotoelástico normal, aunque algunas veces es conveniente su utilización cuando se desean determinar isoclinas.

Se deben cumplir varios requisitos en lo que respecta a las propiedades específicas de un buen material fotoelástico, las más importantes de las cuales son:

- Alta sensibilidad óptica.
- Tensión a la tracción y módulo de elasticidad,
- Ausencia de creep óptico y mecánico.
- Facilidad de moldeo y maquinado.

Aunque algunas propiedades fotoelásticas tienden a variar un poco entre uno y otro stock del mismo material, en la tabla 1.2 que indican algunos valores típicos de ciertas sustancias.

Tabla 1.2. Propiedades de materiales utilizados para modelos fotoelásticos

Las propiedades de algunos de los materiales utilizados en fotoelasticidad aparecen en la tabla, pero los números que las representan sólo deben ser tomados como

Material	Nombre Comercial	Resistencia a la tracción (Kg/cm ²)	Módulo de Young (Kg/cm ²)	Módulo de Poisson	Valor de franja para el material $\frac{kg}{cm^2}$ por franja $\left(\frac{\quad}{cm}\right)$
Resina epoxy	Araldita CT 200 (a 20°C) (a 135°C)	844	$0.32 \cdot 10^{-5}$	0.3	9.29
		22	$0.13 \cdot 10^3$	-----	0.25
Resina Gliptal	Bakelita BT-61-893 (a 20°C) (a 110°C)	1125	$0.44 \cdot 10^5$	0.36	15.18
		28	$0.77 \cdot 10^2$	0.5	0.59
Poliestireno	Fosterita (a 87°C)	37	$0.17 \cdot 10^3$	0.48	0.71
Nitrato de celulosa	Celuloide	422	$0.18 \cdot 10^5$	0.34	39.3
		a 563	$0.23 \cdot 10^5$	0.34	39.3
Gelatina (con 14% de glicerina)	_____	_____	0.9845	0.5	0.03

valores típicos, ya que estas varían en muchos casos considerablemente, con el tiempo y de un modelo a otro. En consecuencia, dichas propiedades físicas deben ser determinadas de un espécimen del material en el momento de ser utilizado.

Conclusiones parciales

- ✓ A partir de la búsqueda realizada se ha logrado acumular bibliografía suficiente sobre el tema de la fotoelasticidad, lo que ha permitido utilizar el polariscopio instalado en el Laboratorio de Resistencia de Materiales, tanto para la docencia como con fines investigativos.
- ✓ Se comprobó que el método fotoelástico para la medición de tensiones sigue teniendo actualidad y se encuentra entre los más utilizados internacionalmente con este fin.
- ✓ Se logró organizar un resumen de los conceptos fundamentales para poder comprender el método fotoelástico para la medición de tensiones.

CAPITULO II. Práctica de laboratorio para la determinación de tensiones usando la técnica de la fotoelasticidad.

2.1. Introducción.

En este capítulo se muestra la confección de una práctica de laboratorio para determinar tensiones en probetas de material birrefringente usando el polariscopio instalado en el Laboratorio de Resistencia de Materiales. Este laboratorio puede ser realizado en pregrado al impartirse el tema “Determinación de tensiones usando métodos experimentales” o en postgrado al impartir la asignatura Teoría de la elasticidad. Para la elaboración de la Guía del laboratorio se mantuvo el mismo formato de las que se usan en estos momentos en el resto de las prácticas. Además, se hace alusión a los accesorios y equipos que conforman la práctica.

2.2. Práctica de fotoelasticidad.

2.2.1. Fundamentos de la fotoelasticidad.

La luz es de la misma naturaleza que las ondas electromagnéticas, diferenciándose de las de radio o de los rayos X en la longitud de onda. Esta longitud de onda está comprendida entre los $0.4 \mu m$ de la luz violeta y los $0.76 \mu m$ de la luz roja, y en un haz de luz natural o *luz blanca* cada onda tiene una longitud distinta. Por el contrario, si todos los rayos tienen la misma longitud de onda, el haz de luz, que adquiere un color determinado, recibe el nombre de *luz monocromática*.

Cuando todos los rayos de un haz de luz vibran en un mismo plano se dice que la luz está *polarizada en un plano*. En caso contrario, como sucede con la luz natural, se tiene una luz *difusa*. Algunos materiales llamados *polarizadores* tienen la propiedad de eliminar parte de luz incidente de tal forma que el haz emergente vibra en un plano determinado que se llama *plano de polarización*. Ver **fig.2.1**

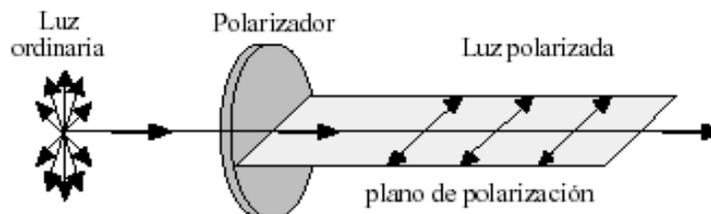


Figura 2.1. Esquema de polarización de la luz.

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* n como el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío (c), y dentro del material (v), es decir:

$$n = \frac{c}{v}$$

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.

Existen muchos materiales transparentes no cristalinos que ordinariamente son ópticamente isótropos, pero se convierten en anisótropos y presentan características similares a los cristales cuando se crea en ellos un estado tensional, propagando la luz a distinta velocidad en las direcciones principales de su estado tensional, de forma que se cumple lo que se conoce como ley de Brewster:

$$n_2 - n_1 = K(\sigma_2 + \sigma_1)$$

siendo n_1 y n_2 los índices de refracción en las direcciones asociadas a las tensiones principales σ_1 y σ_2 respectivamente, y K una propiedad del material conocida como *coeficiente óptico de tensiones*. Este fenómeno recibe el nombre de *doble refracción temporal o birrefringencia accidental*.

Por otra parte, en los casos de estados elásticos bidimensionales, en los que actúan fuerzas de volumen constantes o nulas, se pueden combinar las ecuaciones de equilibrio interno, las de compatibilidad de las componentes de la matriz de deformaciones y las leyes de Hooke, para obtener la ecuación:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) (\sigma_x + \sigma_y) = \nabla^2 (\sigma_x + \sigma_y) = 0$$

La ausencia de propiedades del material en esta expresión indica que la solución de tensiones es independiente del mismo.

Esta circunstancia y la propiedad anteriormente descrita de birrefringencia accidental, que presentan ciertos materiales transparentes no cristalinos sometidos a tensión al paso de luz polarizada, son los fundamentos de la ciencia conocida bajo el nombre de

fotoelasticidad. Para el análisis de las tensiones en un sólido real, el método fotoelástico utiliza un modelo transparente de caras planas paralelas entre sí que reproduce el cuerpo en estudio o uno a escala. A partir de este modelo, se obtiene información suficiente para la determinación de las direcciones principales, así como el valor de la diferencia entre las tensiones principales.

La parte experimental del método fotoelástico se lleva a cabo en un *banco fotoelástico* que consta de un instrumento para la producción y detección de luz polarizada llamado *polariscopio* y un equipo cargador para proporcionar las cargas al modelo.

En la figura 2.2 se indica el esquema de un polariscopio plano, compuesto por dos lentes, un polarizador y un analizador.

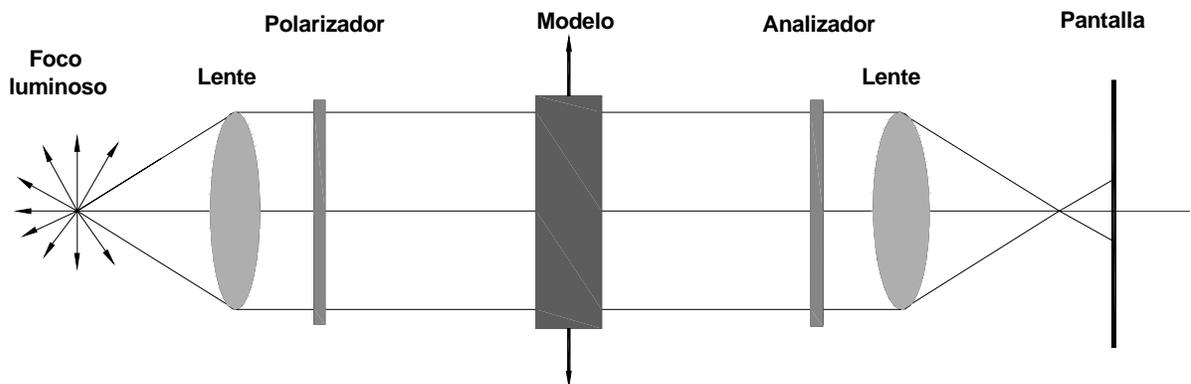


Figura 2.2. Polariscopio plano.

El polariscopio circular (figura 2.3) tiene estos mismos elementos, a los que se le añaden dos láminas de cuarto de onda ($\lambda / 4$) que, básicamente, consisten en un filtro del que la luz sale polarizada en dos ejes perpendiculares con un desfase de un cuarto de longitud de onda.

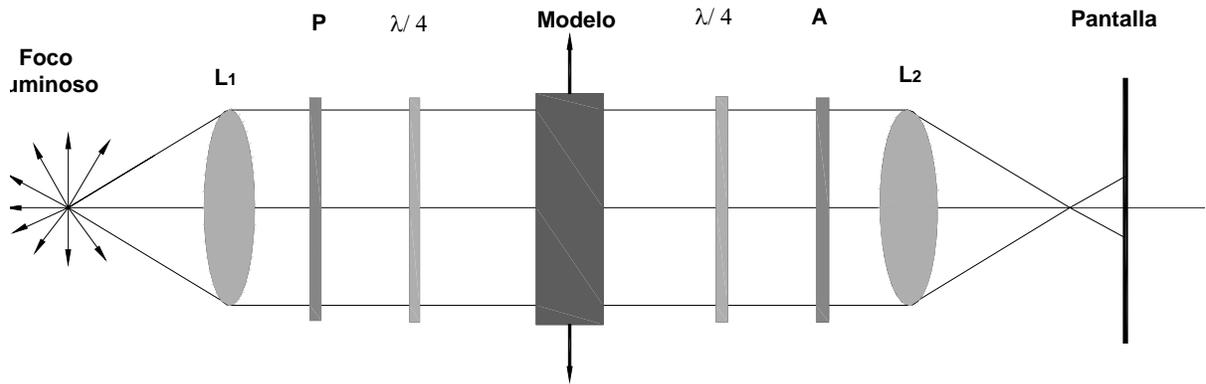


Figura 2.3. Polariscopio circular.

Dada una lámina de espesor e de material birrefringente, sometida a un estado tensional bidimensional, de tensiones principales:

$$\sigma_1, \sigma_2 \quad (\sigma_1 \neq \sigma_2)$$

$$\sigma_3 = 0$$

y colocada en un polariscopio plano utilizando un haz de luz monocromática, la condición para que no salga luz del analizador, es decir, para que se produzca una línea oscura, es que se cumpla la expresión:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = n \frac{\lambda}{Ke} = n \frac{f_\sigma}{e} \quad (2.1)$$

siendo:

f_σ : factor de franja. Característico del material para cada longitud de onda de luz incidente.

n : orden de franja. Número entero positivo: $n = 0, 1, 2, \dots$

Esta expresión se denomina *fórmula fundamental de la fotoelasticidad*. Indica que las zonas oscuras de la pieza cargada, corresponden a los puntos en los que la expresión:

$$\frac{e(\sigma_1 - \sigma_2)}{f_\sigma}$$

toma el valor de un número entero y las claras, de mayor intensidad luminosa, a los puntos de la pieza en los que este valor es un número semientero.

Si en vez de utilizar luz monocromática se utiliza luz blanca, las franjas que se obtienen a la salida del analizador son coloreadas, cada una de las cuales con un determinado color. Es por ello que a estas líneas, lugares geométricos de los puntos de la pieza en los que la diferencia de tensiones principales toma un valor constante, se les ha denominado *líneas isocromáticas*.

Con la utilización de luz blanca, sólo aparecerá oscura la zona en la que $(\sigma_1 - \sigma_2)$ se anula. El resto aparecerá coloreado de una forma continua. En los valores en los que esta diferencia de tensiones hace que el orden de franja n sea entero, el color que aparece es el púrpura. Para valores no enteros de n , aparecen otros colores. En la tabla II.1 se muestra la variación de estos colores para diversos valores del orden de franja n .

Tabla 2.1. Orden de franja

<i>Orden de franja n</i>	<i>Color</i>
0	Negro
0.28	Gris
0.45	Blanco
0.60	Amarillo Pálido
0.80	Naranja
0.90	Rojo
1	Púrpura
1.08	Azul
1.22	Azul / Verde
1.39	Verde /Amarillo
1.63	Naranja
1.82	Rosa/Rojo
2	Púrpura

2.2.2. Concentración de tensiones.

Cuando en un sólido existen zonas en las que se producen cambios bruscos de geometría con reducción de la sección resistente del mismo, se produce en ellas un aumento de tensión superior al explicado directamente por el hecho de que la carga

externa se distribuye entre una sección menor. Este aumento inesperado de las tensiones, fenómeno que se conoce como *concentración de tensiones*, puede explicarse en virtud del principio de Saint Venant. Según este principio, el efecto de las irregularidades geométricas sólo se aprecia en sus proximidades, por lo que la tensión lejos de ellas tiende a conservar el mismo valor que tendría en una pieza regular. Por lo tanto, para que la resultante de las tensiones se mantenga igual a la carga externa es necesario que en las proximidades de una irregularidad las tensiones aumenten más de lo esperado, para compensar el menor aumento que se produce en las zonas alejadas de ella.

Las concentraciones inesperadas de tensiones son la causa del colapso de muchas estructuras y elementos de máquinas, por lo que su estudio es esencial en el diseño tanto de unas como de otros.

En una barra de sección constante solicitada por un esfuerzo axial de tracción, se produce en todos sus puntos un estado tensional uniforme definido por una tensión normal según la dirección de la barra, de valor:

$$\sigma_x = \frac{N}{A}$$

donde A es el área de la sección de la barra y N el esfuerzo axial.

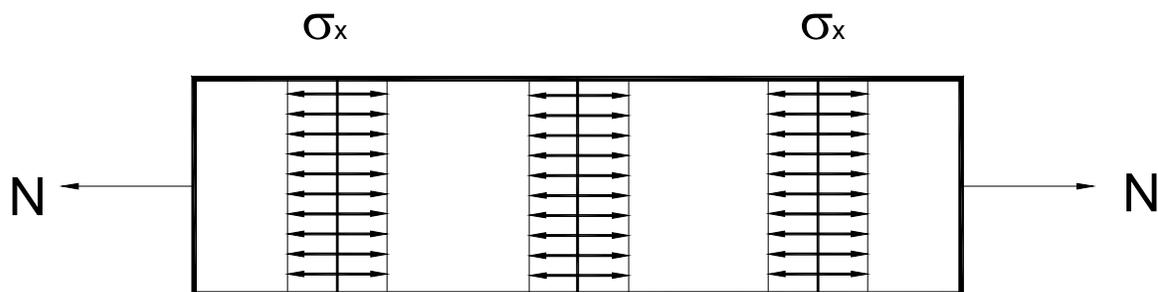


Figura 2.4. Barra sometida a un esfuerzo axial.

Sin embargo, si la sección resistente varía de forma brusca, lo que ocurre en las barras en las que cambia apreciablemente la sección transversal en un intervalo pequeño de la línea media, o en las proximidades de entallas y agujeros, la distribución de tensiones deja de ser uniforme salvo en zonas suficientemente alejadas de la

irregularidad (por lo que en estos casos se la suele denominar *tensión de campo lejano* $\sigma_{x,\infty}$) como se muestra en la figura 2.5.

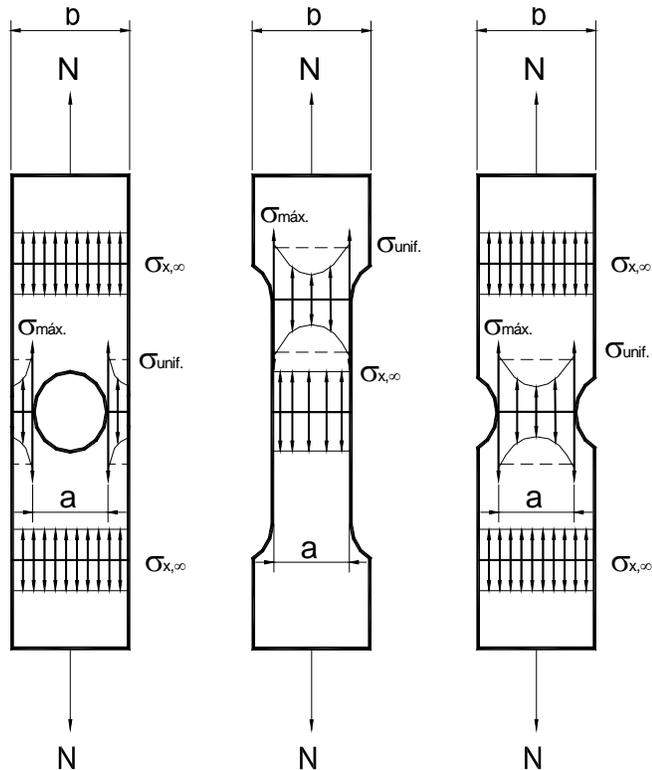


Figura 2.5. Distribución de tensiones en la proximidad de irregularidades geométricas.

La relación entre la tensión máxima local que se da junto a la discontinuidad y el valor promedio de la tensión en puntos alejados de la misma se expresa en función del *factor de concentración de tensiones*, que puede definirse a partir de:

$$\sigma_{\max} = k\sigma_{x,\infty} \quad (2.2)$$

o bien mediante:

$$\sigma_{\max} = k\sigma_{\text{unif}} \quad (2.3)$$

k : factor de concentración de tensiones. $k > 1$. Su valor se puede obtener aplicando la teoría de la elasticidad o experimentalmente. Para los ejemplos de la figura 2.5, depende de las dimensiones a y b .

$\sigma_{x,\infty}$: tensión de campo lejano, que se da en puntos suficientemente alejados de la discontinuidad

σ_{unif} : tensión media que correspondería a un reparto uniforme de tensiones en la sección neta en la que se produce la discontinuidad.

Cuando el tamaño de la región en la que se produce la discontinuidad es pequeño en comparación con las dimensiones globales del sólido, las expresiones **(2.2)** y **(2.3)** conducen a valores de k prácticamente idénticos, pero cuando ambas dimensiones son comparables, como sucede con las probetas utilizadas en esta práctica, la expresión **(2.3)** es más habitual.

2.2.3. Objetivos de la práctica.

La práctica se divide en dos experimentos, los cuales tienen como objetivos los siguientes:

Experimento 1:

Determinar el factor de franja de un material fotoelástico, mediante el empleo de un polariscopio plano.

Experimento 2:

Analizar el efecto de la concentración de tensiones en piezas sometidas a esfuerzo axial de tracción que presentan entallas y agujeros, mediante el empleo de un polariscopio plano.

2.2.4. Equipos necesarios

La realización de la práctica precisa de los siguientes elementos:

1. Polariscopio (modelo Carlzeiss Jena 220902).
2. Dispositivo de carga con dinamómetro y portaprobetas.
3. Probetas adecuadas (4 geometrías).

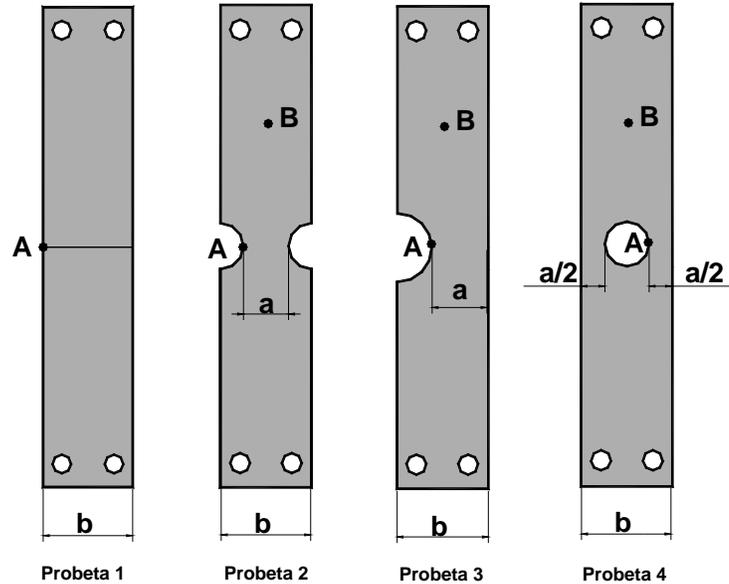


Fig. 2.6. Geometría de las probetas 1 a 4.

2.2.5. Descripción del polariscopio

Equipo para corriente alterna 220v.

Polariscopio 300 con 2 filtros de polarización de 300 mm de diámetro, incluyendo 2 filtros $\lambda/4$ y un compensador movable rojo.

1 dispositivo de iluminación.

3 lámparas, sobre la placa fundamental (forma de U).

Fusible 1.6/ 250 Din 41571

Disco mate

Disco opalino

2.2.5.1. Datos técnicos

Fuente luminosa : 3 tubos de luz fluorescente.

Diferencia de recorrido de los filtros $\lambda/4$ colocado para la producción de la luz circularmente polarizada: $147 \text{ nm} (\pm 15 \text{ nm})$

Campo del dispositivo pendular de la luz linealmente polarizada en el analizador y en polarizador: $0^\circ\text{-}360^\circ$

Intervalo correspondiente: 5°

Diámetro del campo: 300mm

Conexión del circuito: 220v, 50 Hz

Potencia tomada: 95 W

Dimensiones de la placa fundamental: 1000mm x 500 mm

2.2.5.2. Descripción.

Parte mecánica.

El polariscopio (**Fig2.7**) está constituido por una bancada (1), la caja de lámparas (2) con el polarizador (3) y la caja con el analizador (5). La distancia entre el analizador y el polarizador es de 500 mm aproximadamente y corresponde las dimensiones de los modelos. Para la sujeción de los modelos así como de los dispositivos de cargas que algunos casos son necesarios, sirven las dos varillas guías circulares (8) que se encuentran fijadas sobre la bancada. Para hacer posible que se trabaje cómodamente con el dispositivo de carga, tiene en la bancada, en su centro entre las guías circulares un hueco rectangular. En la parte delantera de la bancada se encuentra una rueda de mano (6) la que permite la rotación común del polarizador y el analizador después de conectarse por medio de un desplazamiento axial, también permite la rotación del analizador solamente.

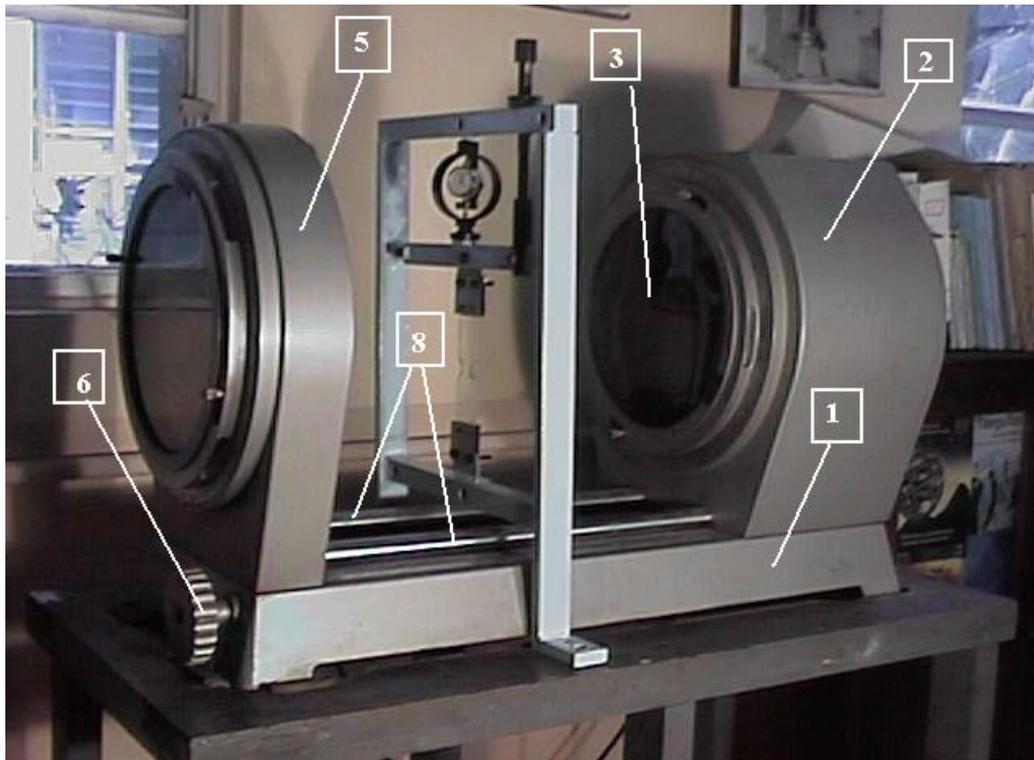


Fig. 2.7. Polariscopio.

Caja de lámparas.

La caja de lámparas está construida de modo tal que las lámparas permiten una iluminación de todo el diámetro libre de 300 mm sin que por ello se produzca ningún calentamiento de los filtros. Se utilizan tres lámparas flexionadas en forma de U las que dan una luz similar a la del día. Las lámparas están instaladas con los correspondientes transformadores, fusibles y el interruptor a la placa de iluminación. Para cambiar los tubos de iluminación se destornillan los tornillos de sujeción (13) se zafan los alambres de tensión y se cambian los tubos. Después del cambio hay que volver a fijar los alambres de tensión, pues ellos garantizan un asiento exacto de las lámparas. Entre los tubos de iluminación y los lentes de cristal mate y de cristal opalino instalados en la caja hay un espacio suficientemente grande. Este espacio permite la circulación del aire que se calienta por medio de los tubos de iluminación y sale entre el lente de cristal mate y el filtro de polarización garantizando así un enfriamiento por aire. En la parte delantera de la caja de lámparas se encuentra el anillo rotatorio (girable) montado sobre cajas de bolas con el aro graduado; este anillo contiene el filtro.

Caja del analizador.

En el extremo delantero de la bancada se encuentra la caja del analizador, la que tiene el mismo montaje para el filtro que la caja de las lámparas. Los anillos de sujeción de los filtros son girados de forma independiente o conjuntamente por medio de la rueda de mano, de modo que la instalación de ambos filtros solamente es posible en posiciones de 30° a 30° . La posición de los filtros puede leerse sobre el aro graduado (en grados) que se encuentra junto al sujetador del filtro. El filtro de orden rojo situado en el marco de la caja del analizador produce la coloración del campo visual desde el rojo púrpura hasta el violeta, este filtro tiene un diámetro de campo visual de 50 mm y puede ser movido a voluntad.

Polarizador y analizador.

El polarizador y el analizador que se encuentran instalados a este aparato constan cada uno de una lámina de polarización y de cuarto de onda de alto valor, las cuales están pegadas entre dos placas de cristal fino. Ambos filtros se encuentran fijamente colocados. Los filtros $\lambda/4$ necesarios para la producción de luz circularmente polarizada se encuentran colocados también fijamente en este montaje, es decir, bajo un ángulo de 45 grados con respecto a la dirección de polarización de los polarizadores. El

montaje es móvil y se puede cambiar según sea requerido. Ambos filtros se pueden girar 360 grados, con un paso de 5 grados en 5 grados. Eso es necesario para evitar una desviación de las posiciones. La calidad de los filtros de polarización se determina por medio de su permeabilidad particular $D_e = 25\%$ y un grado de polarización de $P = 0.995\%$. Los filtros de cuarto de onda se encuentran graduados sobre $\lambda = \text{línea}$, $D = 589$ mm. Ambos filtros tienen una diferencia de recorrido de $\lambda = 147\text{nm} \pm 15 \text{ nm}$. Con una buena calidad de la iluminación pueden ser utilizados ambos filtros plenamente. Los filtros deberán ser siempre limpiados con un pincel suave y nunca con un paño húmedo.

2.2.6. Medida de la fuerza ejercida sobre la probeta.

Para la aplicación de la carga y la medida de la fuerza ejercida sobre la probeta se construyó un dispositivo que permite aplicar carga a la misma mediante un tornillo y medir la fuerza aplicada. Para medir la fuerza se utiliza un dinamómetro de aro (RKM) diseñado especialmente para la medición de carga en modelos de tensión óptica (Fig. 2.8). La indicación se efectúa en divisores y no en unidades de fuerza. Los valores de medición para las diferentes fuerzas que son indicados en divisiones de escala (Skt.)(tabla 2.2) deben ser apuntados en una tabla de medición de fuerza. En esto, debe considerarse la medición entre dos divisores como intervalo de cálculo. La construcción simple en forma de círculo tiene por consecuencia una indicación no lineal, esto significa que una interpolación de valores intermedios es posible sólo cuando se determina gráficamente la relación F/A .



Fig. 2.8. Montaje del dinamómetro.

Tabla 2.2. Valores de medición de fuerzas

Resultado de las mediciones					
Tracción			Compresión		
Rotac. del indicador mayor : 3			Rotac. del indicador mayor : 0		
Posic. del indicador menor : 3			Posic. del indicador menor : 0		
Fuerza (F) en la normal	Indicación A en el equipo de deformación	Apreciación	Fuerza (F) en la normal	Indicación A en el equipo de deformación	Apreciación
N	Skt	Skt/N	N	Skt	Skt/N
100	17.7	0.184	100	18.1	0.180
150	26.3		150	27.1	
200	35.3	0.180	200	36.1	0.180
250	44.4	0.182	250	45.1	0.180

300	53.3	0.178	300	54.6	0.190
350	62.1	0.176	350	63.8	0.184
400	70.6	0.170	400	73.3	0.190
500	87.7	0.171	500	92.7	0.194
600	105.0	0.173	600	111.8	0.191
700	121.7	0.167	700	130.8	0.190
800	138.2	0.165	800	150.2	0.194
900	154.9	0.167	900	170.0	0.198
1000	171.1	0.168	1000	190.1	0.201

2.3. Realización de la práctica.

Para la realización de la práctica se utilizarán cuatro tipos de probetas, que se muestran en la figura 2.6.

Con la ayuda del calibre medir las dimensiones de las probetas y llenar la tabla **2.3**.

2.3.1. Experimento 1

En este experimento se utilizará la probeta 1 para la determinación del factor de franja.

Fijar la probeta 1 al soporte y a la palanca de carga mediante dos tornillos M4 que se introducen en sendos agujeros que tiene la probeta en sus extremos. A continuación, encender la luz blanca del polariscopio. Comprobar que la probeta está descargada, debe aparecer oscura.

El procedimiento a seguir es el siguiente:

Comenzar a aplicar carga hasta que aparezca el color púrpura en la zona central de la probeta, que indica que esos puntos han alcanzado el orden de franja $n = 1$. Al aplicar la fórmula fundamental de la fotoelasticidad (2.1) para la primera isocromática queda:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = n \frac{f_\sigma}{e} \Rightarrow \sigma_1 - \sigma_2 = \frac{f_\sigma}{e}$$

La probeta ha sido sometida a un esfuerzo de tracción, luego las tensiones principales que aparecen en cualquier punto de ella son:

$$\sigma_1 = \frac{N}{A} \qquad \sigma_2 = 0$$

siendo:

N : Fuerza aplicada = según tabla 2.2.

A : Área de la probeta = $b \cdot e$

Sustituyendo estos valores en la expresión anterior:

$$\frac{N}{b \cdot e} = \frac{f_{\sigma}}{e} \Rightarrow f_{\sigma} = \frac{N}{b}$$

Con estos resultados llenar la tabla 2.4.

2.3.2. Experimento 2

Este experimento trata de determinar el efecto de concentración de tensiones para piezas sometidas a esfuerzo axial de tracción que presentan entallas y agujeros. En concreto, se analizará el efecto que produce la disminución de sección que presentan las probetas 2, 3 y 4 en la zona central respecto a la probeta 1.

Para cada una de las probetas 2, 3 y 4, seguir el siguiente procedimiento:

1. Fijar la probeta al soporte y a la palanca de carga mediante dos tornillos M4 que se introducen en sendos agujeros que tiene la probeta en sus extremos. A continuación, encender la luz blanca del polariscopio. Comprobar que la probeta está descargada, debe aparecer oscura.

2. Comenzar a aplicar carga, ejerciendo una fuerza de tracción a la probeta, hasta observar que el punto más desfavorable de la probeta (punto A) alcance por tercera vez (en las probetas 2 y 4) o por quinta vez (en la probeta 3) el color púrpura, es decir, que el orden de franja en ese punto sea $n = 3$ ó $n = 5$.

3. Anotar en la tabla 2.5 la fuerza aplicada e indicar la tonalidad que alcanza un punto cualquiera situado lejos de la entalla o del agujero (punto B) y su correspondiente orden de franja.

4. Descargar la probeta y retirarla.

Cada una de las probetas se ha sometido a un esfuerzo axial de tracción hasta alcanzar en el punto más desfavorable de cada una de ellas (punto A), el orden de franja $n = 3$ ó $n = 5$ según la probeta. La tensión normal en ese punto A se puede calcular mediante la fórmula fundamental de la fotoelasticidad.

Como $\sigma_1 = 0$, llamando σ_A a la tensión principal σ_1 en el punto A, queda:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = n \frac{f_\sigma}{e} \Rightarrow \sigma_{A,Experimental} = n \frac{f_\sigma}{e}$$

Como ya se ha expuesto anteriormente, el efecto de la entalla o del agujero produce en la sección recta de menor área una distribución de tensiones normales no uniforme. El valor de la tensión en A, en el supuesto de considerar un reparto uniforme de tensiones en esa sección, se podría calcular mediante la expresión teórica:

$$\sigma_{A,Uniforme} = \frac{N}{A_{neta}}$$

donde A_{Neta} es el área de la sección neta en el punto donde se halla la entalla:

$$A_{Neta} = a \cdot e$$

El factor de concentración de tensiones debido a la entalla o agujero, se calcula como el cociente entre la tensión máxima que se produce en la pieza por el efecto de la entalla o del agujero, y la tensión que correspondería a un reparto uniforme de tensiones en esa sección.

Es decir:

$$k = \frac{\sigma_{A,Experimental}}{\sigma_{A,Uniforme}}$$

Respecto a la tensión normal en el punto B, σ_B , se puede calcular de forma teórica, conociendo la carga aplicada, o de forma experimental, a través de la fórmula de la fotoelasticidad.

$$\sigma_{B,Teorica} = \frac{N}{A}$$

De forma experimental, el orden de franja se deduce de la tonalidad que ha adquirido dicho punto al detener el proceso de carga. De igual manera que para el punto A, aplicando la fórmula de la fotoelasticidad queda:

$$\sigma_{B,Experimental} = n \frac{f_\sigma}{e}$$

Con todas estas expresiones, calcular las tensiones en los puntos A y B y comparar los resultados. Llenar para cada probeta la tabla 2.5.

2.4. Tablas de procesamiento estadísticos.

Experimento 1

Tabla 2.3 Datos geométricos

	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4
e(mm)				
a(mm)				
b(mm)				

Tabla 2.4. Resultados.

Fuerza aplicada (kg)	N(N)	f_{σ} (N/mm)

Experimento 2

Tabla 2.5. Lectura de medidas.

	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4
Orden de franja en punto A	n= 3	n= 5	n= 3
Fuerza aplicada			
Tonalidad Punto A			
Tonalidad Punto B			
Orden de franja en punto B			

Tabla 2.6. Resultados.

	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4
Orden de franja en el punto A	n= 3	n= 5	n= 3
σ_A (N/mm ²) Experimental			
σ_A (N/mm ²) Distribución uniforme			
Factor de concentración de tensiones K			
Orden de franja en el punto B			
σ_B (N/mm ²) Experimental			
σ_B (N/mm ²) Teórica			

Conclusiones parciales

- ✓ Se preparó una práctica de laboratorio que permite la medición de tensiones empleando el método fotoelástico, para la preparación de la misma se siguió el mismo formato utilizado en las demás prácticas que se realizan en este laboratorio y que se encuentran recogidas en la guía preparada con ese fin.
- ✓ Se construyeron las probetas para la realización de la práctica
- ✓ Se pudo constatar que no todos los polímeros transparentes tienen propiedades birrefringentes, como es el caso del acrílico y el SAN.
- ✓ Se construyó un manual que explica las diferentes partes y el funcionamiento del polariscopio.

Capítulo III. Diseño y fabricación del Dispositivo de carga y las probetas.

3.1. Introducción

Para la realización de los ensayos fotoelásticos es necesario contar con un dispositivo que permita la aplicación de carga a los modelos y conocer la magnitud de la misma. El polariscopio instalado en el Laboratorio de Resistencia de Materiales no contaba con uno, por tal razón fue necesario el diseño y fabricación de dicho dispositivo. El diseño debía realizarse de tal forma que su fabricación se pudiera acometer utilizando materiales de desecho, pues no se contaba con recursos materiales ni monetarios.

En la fabricación de las probetas se debe tener en cuenta que las mismas tengan concentradores de tensiones, para lograr mediante los ensayos determinar el factor de concentración de las tensiones en diferentes casos. Un aspecto fundamental es determinar el material con mejores propiedades birrefringentes para la fabricación de los modelos a ensayar.

3.2. Diseño del dispositivo.

Para el diseño del dispositivo de carga se realizó una revisión en manuales de equipamiento de laboratorios y en Internet, con lo cual se llegó a la forma final tomando ideas de los diferentes dispositivos vistos. Como se planteó anteriormente se trató de hacer un dispositivo lo más sencillo posible y que garantizara que el proceso de aplicación de la carga y la medición de la misma fuera suficientemente exacto.

El diseño final (Fig. 3.1) consta de las siguientes partes:

- 1- Soporte.
- 2- Tornillo de carga.
- 3- Tuerca de transmisión.
- 4- Cojinete.
- 5- Barra de transmisión del esfuerzo.
- 6- Dinamómetro.
- 7- Planchas para la fijación de las probetas.

En la construcción se utilizaron materiales de desecho que se obtuvieron del rastro del taller mecánico de nuestra facultad, donde se realizó todo el proceso de fabricación, emprendido por el propio diplomante. El dinamómetro utilizado estaba en el propio Laboratorio de Resistencia de Materiales y en las instrucciones que lo acompañan se especifica que es precisamente para ser utilizado en la medición de fuerzas en prácticas de fotoelasticidad.

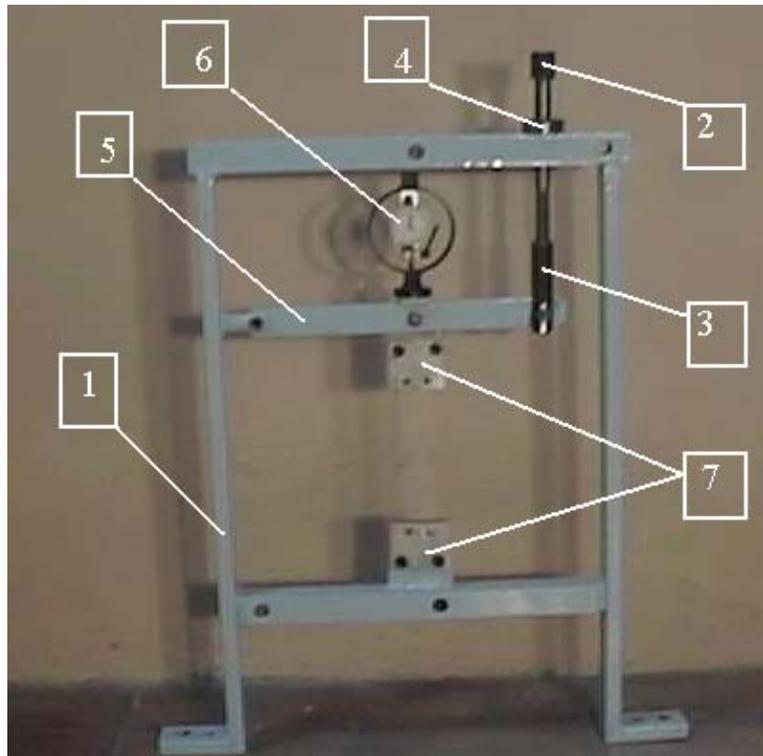


Fig. 3.1. Dispositivo para la aplicación de la carga.

En este diseño solamente se chequea el tornillo de carga, pues las otras partes no están sometidas a cargas considerables y tienen dimensiones que a simple vista permiten predecir que no fallarán bajo la acción de estas.

3.2.1. Chequeo del tornillo de carga.

Se le hace el chequeo a tracción utilizando la expresión:

$$\sigma = \frac{N}{\frac{\pi}{4} \cdot d_3^2} \leq [\sigma]_t$$

donde :

N = Fuerza axial.

d_3 = Diámetro interior de la rosca.

$[\sigma]_t = 0.8 \cdot \sigma_y$; para aceros al carbono sin tratamiento térmico.

Datos del tornillo:

Rosca: M14x1.5

Diámetro medio: 13.026 mm.

Diámetro interior: 12.376 mm.

Material AC 30

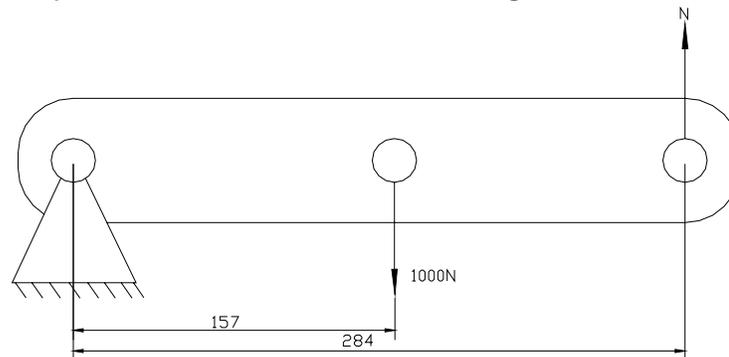
$\sigma_u = 550$ Mpa.

$\sigma_y = 300$ Mpa.

$[\sigma]_t = 0.8 \cdot \sigma_y$

$[\sigma]_t = 240$ Mpa.

Calculo de la fuerza que actúa sobre el tornillo de carga.



$$\sum M_A = 0 \oplus \downarrow$$

$$1000N (157 \text{ mm}) - N(284\text{mm}) = 0$$

$$157000 \text{ N}\cdot\text{mm} - N (284\text{mm}) = 0$$

$$N = \frac{157000 \text{ N}\cdot\text{mm}}{284\text{mm}}$$

$$N = 552.8 \text{ N}$$

Chequeo del tornillo.

$$\sigma = \frac{N}{\frac{\pi \cdot d_3^2}{4}} \leq [\sigma]_t$$

$$\sigma = \frac{552.8}{\frac{\pi \cdot (12.376)^2}{4}} = \frac{552.8N}{120.3mm^2}$$

$$\sigma = 4.6 \text{ Mpa} \ll [\sigma]_t$$

Por lo que el tornillo resiste.

3.2.2. Valoración económica.

Como se planteó anteriormente, se trató que el dispositivo tuviera el menor costo posible, pues no se contaba con recursos para su fabricación. Los materiales utilizados se recuperaron del rastro del taller de la Facultad y el mismo diplomante realizó la fabricación del mismo. En el proceso de fabricación se empleó la soldadura gastándose un total de 3 electrodos y finalmente se pintó como parte del acabado final. La pintura y los electrodos utilizados se dieron por parte de la dirección institucional y provienen de un proyecto para mejorar las instalaciones de la Facultad. Por lo planteado anteriormente se puede apreciar que el costo del dispositivo fabricado es mínimo.

3.2. Diseño y fabricación de las probetas.

Como se plantea en la introducción de este capítulo, al realizar el diseño de las probetas se debe lograr que las mismas tengan concentradores de tensiones como agujeros y entallas, lo que las hace semejantes a las formas de las diferentes estructuras y piezas que pueden analizarse utilizando el método fotoelástico. Las probetas que se diseñaron están dirigidas a la realización de un laboratorio con fines docentes, por lo tanto no tienen que coincidir necesariamente con ninguna pieza o estructura real, no obstante el procedimiento que se establece si puede ser aplicado a cualquier caso real.

El dispositivo diseñado permite aplicar cargas de tracción sobre las probetas, por lo que solamente se diseñarán estas con el fin de soportar dichas cargas. Es importante señalar que si se desea modelar una situación real de una estructura o pieza de máquina es necesario hacer modificaciones o diseñar un nuevo dispositivo para lograr que el sistema de cargas aplicado al modelo coincida con el real.

Se propone la utilización de cuatro probetas (Fig. 3.1), una de ellas sin concentradores de tensiones con el objetivo de determinar el factor de franja (probeta 1) y el resto con

diferentes entallas y agujeros con el fin de determinar el factor de concentración de tensiones.

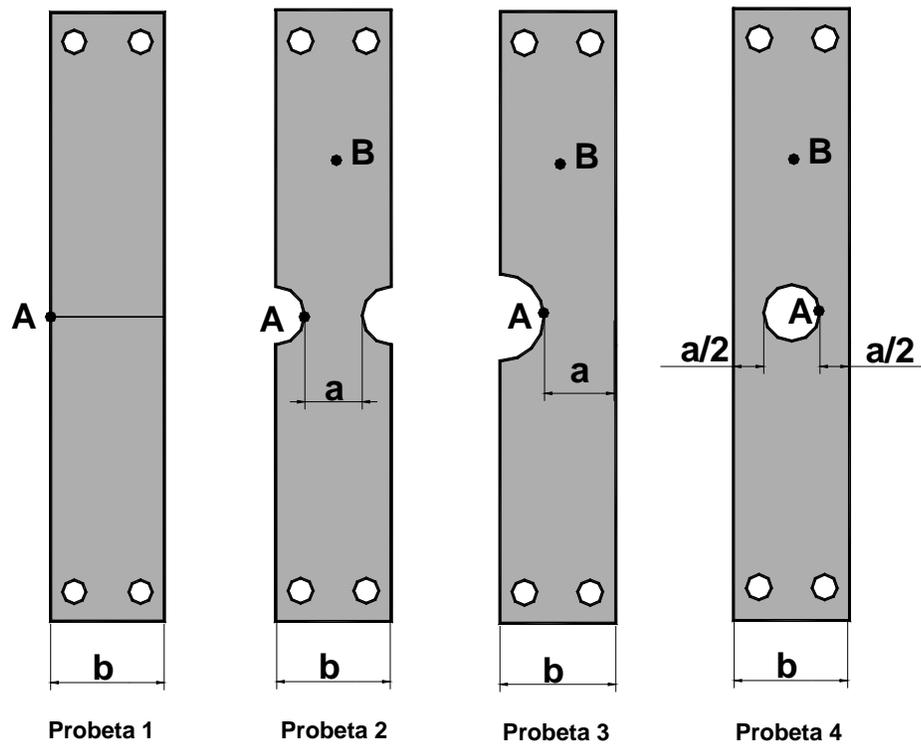


Fig. 3.1. Probetas propuestas para el ensayo.

Como se puede apreciar no se indican las dimensiones de las mismas, solo las formas, esto está motivado por la importancia que tiene que en la realización de los laboratorios los estudiantes adquieran habilidades en el uso de los instrumentos de medición y en el procesamiento estadístico de las mismas.

3.2.2. Materiales para la fabricación de las probetas.

En varios de los textos consultados se refieren a los materiales que se usan en la fotoelasticidad como “plásticos transparentes” sin especificar el tipo exacto del mismo. En otros casos se refieren a los mismos por su composición química sin referir los nombres comerciales de estos. Por ese motivo fue necesario realizar un arduo trabajo para la selección del material ideal para la construcción de las probetas, obteniéndose de ese trabajo los siguientes resultados:

a)- **Acrílico (cloruro de polivinilo) (pvc).**

Nombres comerciales: TROSIPLAST, COROPLAST, VESTOUST, VINOFLX, HOSTATIS.

Densidad a 20 °C: 1.4 g/cm³

Al fabricarse las probetas con este material y realizarse el ensayo se pudo constatar que no tiene propiedades birrefringentes, en las mismas aparecen franjas blancas que se hacen más intensas a medida que aumenta la carga, pero en ningún momento se aprecian franjas de colores. Por este motivo se concluye que no puede utilizarse para la fabricación de modelos a analizar usando la fotoelasticidad.

b)- **SAN (copolimero estireno acrilonitrilo).**

Nombres comerciales: JURAN, VESTORAN.

Este material al ensayarse tiene mejores propiedades fotoelásticas que el PVC, pero tampoco debe utilizarse en la fabricación de modelos. Al aplicársele carga llega a obtener el color amarillo, pero no se definen correctamente las franjas ni ocurre otros cambios de colores antes de que ocurra la rotura de la probeta.

c)- **Poliestireno**

Nombres comerciales: POLYSTROL III, VESTYRON.

Densidad a 20 °C: 1.05 g/ cm³

Primeramente se usó para la construcción de las probetas, planchas obtenidas por inyección, las mismas al montarse en el polariscopio y sin aplicarle carga ya mostraban franjas coloreadas, al analizarlas se ve que coinciden con el sentido del flujo de la inyección, es decir, que corresponden a las tensiones residuales producto del proceso de obtención de las planchas.

Con posterioridad se utilizaron planchas obtenidas por termoconformado. Las probetas consatruidas con estas planchas resultaron satisfactorias, es decir que este material es apropiado para la construcción de modelos que se utilizarán en la fotoelasticidad.

d)- **Otros materiales.**

A partir de consultas con especialistas de la Universidad Nacional del Sur (Argentina) se conoció que ellos utilizan en la confección de modelos para utilizar en fotoelasticidad la resina epoxi que comercializa la compañía suiza CIBA-GEIGY con el nombre de Araldit-B (se trabaja a temperatura) o Araldit-D (para trabajar en frío). Esta compañía tiene una sucursal en nuestro país y en estos momentos se trata de establecer contacto con la misma para analizar la posibilidad de obtenerla.

Conclusiones parciales.

- ✓ Se diseñó y construyó un dispositivo que permite medir y aplicar la carga a los modelos de material birrefringente que se analizan en el polariscopio instalado en el Laboratorio de Resistencia de Materiales. La fabricación del mismo se realizó, prácticamente sin costo alguno y garantiza seguridad en los resultados,
- ✓ No todos los plásticos transparentes disponibles en nuestro país tienen propiedades birrefringentes. Tiene las mejores propiedades para la fabricación de modelos utilizados en fotoelasticidad el poliestireno.
- ✓ El método fotoelástico puede ser utilizado para determinar la distribución de las tensiones remanentes en piezas de material birrefringente obtenidas por el proceso de inyección.

Conclusiones

Se pueden plantear como conclusiones generales del presente trabajo que:

- ✓ Se ha realizado una recopilación de información sobre la fotoelasticidad que recoge los fundamentales postulados teóricos de la temática, lo que ha permitido la obtención de conocimientos suficientes para la explotación eficiente del polariscopio instalado en el Laboratorio de Resistencia de Materiales, tanto con fines docentes como investigativos.
- ✓ Se ha preparado una práctica de laboratorio sobre la medición de tensiones utilizando el método fotoelástico que puede ser realizado al impartirse este tema tanto en pregrado como en postgrado. La misma deja organizada la metodología para aplicar este procedimiento a modelos reales en caso de ser necesario.
- ✓ Se diseñó y fabricó un dispositivo para la aplicación y medición de la carga a los modelos analizados en el polariscopio. Este dispositivo se construyó con la mayor economía y garantiza un funcionamiento confiable.

