



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

**MANUAL DE OPERACIÓN Y EL MANTENIMIENTO DE UN POLARISCOPIO Y SUS PRÁCTICAS  
PARA EL CURSO DISEÑO DE MÁQUINAS 1, BASADOS EN EL FENÓMENO FOTOELÁSTICO**

**Marvin Wosveli Sosa Godinez**

Asesorado por el Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma

Guatemala, octubre de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MANUAL DE OPERACIÓN Y EL MANTENIMIENTO DE UN POLARISCOPIO Y SUS PRÁCTICAS  
PARA EL CURSO DISEÑO DE MÁQUINAS 1, BASADOS EN EL FENÓMENO FOTOELÁSTICO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**MARVIN WOSVELI SOSA GODINEZ**

ASESORADO POR EL ING. CARLOS ANÍBAL CHICOJAY COLOMA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO**

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO (ai)	Ing. José Francisco Gómez Rivera
EXAMINADOR	Ing. Raymundo Ludwin Taylor Cruz
EXAMINADOR	Ing. Roberto Molina Thomae
EXAMINADOR	Ing. Julio César Campos Paiz
SECRETARIA	Inga. Gilda Marina Castellanos de Illescas

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**MANUAL DE OPERACIÓN Y EL MANTENIMIENTO DE UN POLARISCOPIO Y SUS PRÁCTICAS  
PARA EL CURSO DISEÑO DE MÁQUINAS 1, BASADOS EN EL FENÓMENO FOTOELÁSTICO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 18 de septiembre de 2002.



**Marvin Wosveli Sosa Godinez**

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA**

Guatemala 30 de enero de 2012

Ing. Julio César Campos Paíz  
Director  
Escuela de Ingeniería Mecánica  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ing. Campos:

Por medio de la presente informo a usted que como asesor he revisado el trabajo de graduación titulado **MANUAL DE OPERACIÓN Y EL MANTENIMIENTO DE UN POLARISCOPIO Y SUS PRÁCTICAS PARA EL CURSO DE DISEÑO DE MÁQUINAS 1, BASADOS EN EL FENÓMENO FOTOELÁSTICO** del estudiante Marvin Wosveli Sosa Godinez, carnet No 9117361.

En tal virtud lo doy por aprobado, solicitándole darle el trámite respectivo.

  
Ing. Carlos Anibal Chicojay Coloma  
Asesor

*Carlos Anibal Chicojay Coloma*  
INGENIERO MECANICO  
Colegiado No. 2306

cc. Archivo

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

El Coordinador del Área de Diseño, de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado MANUAL DE OPERACIÓN Y EL MANTENIMIENTO DE UN POLARISCOPIO Y SUS PRÁCTICAS PARA EL CURSO DISEÑO DE MÁQUINAS I, BASADOS EN EL FENÓMENO FOTOELÁSTICO, del estudiante **Marvin Wosveli Sosa Godinez**, recomienda su aprobación.

**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Alvaro Pinzón'.

**Ing. Alvaro Antonio Avila Pinzón**  
**Coordinador de Área**



Guatemala, agosto de 2012 .

/behei.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, después de conocer el dictamen del asesor, con la aprobación del Coordinador del Área de Diseño al Trabajo de Graduación titulado MANUAL DE OPERACIÓN Y EL MANTENIMIENTO DE UN POLARISCOPIO Y SUS PRÁCTICAS PARA EL CURSO DISEÑO DE MÁQUINAS I, BASADOS EN EL FENÓMENO FOTOELÁSTICO del estudiante **Marvin Wosveli Sosa Godínez**, procede a la autorización del mismo.

**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'JCCP', written over the printed name of the director.

Ing. Julio César Campos Paiz  
**DIRECTOR**



Guatemala, octubre de 2012


JCCP/behdei




DTG. 485.2012

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al trabajo de graduación titulado: **MANUAL DE OPERACIÓN Y EL MANTENIMIENTO DE UN POLARISCOPIO Y SUS PRÁCTICAS PARA EL CURSO DE DISEÑO DE MÁQUINAS 1, BASADOS EN EL FENÓMENO FOTOELÁSTICO**, presentado por el estudiante universitario **Marvin Wosveli Sosa Godínez**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos  
Decano



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
DECANO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
\*

Guatemala, 4 de octubre de 2012.

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por darme vida, ser mí guía, compañía y darme la oportunidad de alcanzar una meta, mil gracias Padre.
<b>Mis padres</b>	Zoila Amparo Godínez Rodríguez y Álvaro Sosa López; por su amor y dedicación siempre me motivaron y sobre todo por creer en mí.
<b>Mi esposa</b>	Catalina Aguilar, por ser mi complemento, darme amor, tres tesoros y apoyarme en momentos de debilidad y éxito, no dudaste que lo alcanzaría.
<b>Mis hijos</b>	Katherinne, Dulce y Ernesto, son la fuerza que me impulsa a luchar por superarme y que esto les sirva de ejemplo.
<b>Mis hermanas</b>	Johana, Carmen, Ana, Mayra e Ingrid, siempre me apoyaron con cariño y desinterés.
<b>Mis tíos (as), primos (as)</b>	A todos, especialmente a mi tía Reina, por ayudarme cuando le necesité y a Efraín Sosa, por su experiencia, conocimiento y orientación.
<b>Mi hermano</b>	Francisco Culajay, amigo de siempre, me apoyó y dio aliento a terminar mis faenas, gracias.

**Mis amigos**

Julio Juárez, Allan Seijas, Edwin Tello, Vinicio Arzú y muchos otros, gracias por insistir en que terminara mi carrera.

**Mis profesores**

Asesores de la formación y a mis compañeros, compañía en el camino del conocimiento y todas las personas que me dieron una palabra de aliento y apoyo motivándome a no claudicar y sobre todo muy especialmente a usted que tiene en sus manos este documento. ¡Muchas gracias!

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS .....	XV
INTRODUCCIÓN.....	XVII
1. EL FENÓMENO FOTOELÁSTICO.....	1
1.1. Explicación y síntesis del fenómeno fotoelástico.....	1
1.1.1. Fotografía fotoelástico .....	6
1.1.2. Efectos de una probeta esforzada en un polariscopio plano y circular .....	7
1.2. Procedimiento del esfuerzo óptico en dos dimensiones .....	14
1.2.1. Módulo de elasticidad .....	18
1.2.2. Esfuerzo máximo.....	20
1.3. Criterios para seleccionar materiales para realizar ensayos .....	21
1.3.1. Transparencia y homogeneidad .....	35
1.3.2. Sensitividad y linealidad .....	36
1.3.3. Propiedades de materiales fotoelásticos empleados .....	38
1.3.3.1. Resina .....	39
1.4. Patrones de franjas oscuras .....	40
1.4.1. Isoclínicas .....	41
1.4.2. Isocromáticas .....	43
1.5. Escala de esfuerzos de prototipos de probetas.....	45
1.6. Interpretación de imágenes.....	47

2.	EL POLARISCOPIO.....	51
2.1.	Conocer un polariscopio .....	52
2.2.	Tipos de polariscopios que se conocen .....	53
2.3.	Identificación de cada parte .....	53
2.4.	Tipos de iluminación que se manejan con los polariscopios .....	56
	existentes .....	56
2.4.1.	Iluminación policromática .....	56
2.4.2.	Iluminación monocromática.....	56
3.	MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO .....	57
3.1.	Manual de operación .....	57
3.1.1.	Información del polariscopio Chapman. ....	57
3.1.2.	Operación del polariscopio Chapman en general .....	58
3.1.2.1.	Equipo eléctrico e iluminación .....	58
3.1.2.2.	Equipo mecánico.....	58
3.1.2.3.	Equipo hidráulico, de tracción, compresión y anclaje.....	59
3.1.2.4.	Equipo de reflexión de luz y fotográfico .....	59
3.2.	Manual de mantenimiento.....	60
3.2.1.	Síntesis descriptiva de los diferentes tipos de mantenimiento .....	61
3.2.2.	Cuidados y técnicas al usar el equipo .....	62
3.2.3.	Revisiones periódicas al realizar un ensayo.....	65
3.2.4.	Revisiones mayores después de varias pruebas .....	66
4.	PRÁCTICAS DE LABORATORIO DE DISEÑO DE MÁQUINAS 1 .....	67
4.1.	Diseño de guía de prácticas de laboratorio .....	67
4.1.1.	Ensayos a tensión.....	67
4.1.1.1.	Práctica 1 .....	69

4.1.1.2.	Práctica 2 .....	71
4.1.2.	Ensayos a compresión .....	76
4.1.2.1.	Práctica 1 .....	78
4.1.2.2.	Práctica 2 .....	79
4.1.3.	Ensayos a flexión .....	83
4.1.3.1.	Práctica 1 .....	85
4.1.3.2.	Práctica 2 .....	89
CONCLUSIONES .....		91
RECOMENDACIONES .....		93
BIBLIOGRAFÍA .....		95
ANEXO .....		99



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Dirección de propagación .....	5
2.	Funcionamiento del polariscopio plano .....	7
3.	Direcciones de la luz .....	8
4.	Método del polariscopio circular .....	10
5.	Los valores de las componentes del campo eléctrico .....	12
6.	Esfuerzos en un punto en un sistema de dos dimensiones .....	15
7.	Análisis experimental de esfuerzos por medio de la fotoelasticidad ....	17
8.	Módulo de Young .....	19
9.	Distinción del proceso de falla y de rotura .....	22
10.	Multiplicidad de efectos de falla en una misma pieza .....	23
11.	Distribución y concentración de tensiones evidenciado por fotoelasticidad .....	26
12.	Distribución y concentración de tensiones evidenciado por termoelasticidad radiométrica .....	27
13.	Concentración de tensiones para planchuela traccionada con radio de acuerdo .....	29
14.	Concentración de tensiones para planchuela flexionada con radio de acuerdo .....	29
15.	Concentración de tensiones para planchuela traccionada con muesca .....	30
16.	Concentración de tensiones para planchuela flexionada con muesca .....	30

17.	Concentración de tensiones para eje traccionada con radio de acuerdo .....	31
18.	Concentración de tensiones para eje flexionado con radio de acuerdo .....	31
19.	Concentración de tensiones para eje torsionado con radio de acuerdo .....	32
20.	Concentración de tensiones para eje con muesca sometido a tracción.....	32
21.	Concentración de tensiones para eje con muesca sometido a flexión .....	33
22.	Concentración de tensiones para eje con muesca sometido a torsión.....	33
23.	Concentración de tensiones para planchuela con agujero sometida a tracción.....	34
24.	Concentración de tensiones para planchuela con agujero sometida a flexión .....	34
25.	Franja típica de discontinuidad circular en un campo de cortante puro .....	40
26.	Franjas isoclínicas de un anillo redondo bajo compresión diametral obtenida por doble exposición holográfica .....	42
27.	Franjas isoclínicas experimentalmente derivadas de una viga de plástico reforzada con fibra de carbono .....	42
28.	Curvas isocromáticas en una plancha con agujero puesta a tension ..	44
29.	Franjas isocromáticas experimentalmente derivadas de una viga de plástico reforzada con fibra de carbono .....	45
30.	El polariscopio .....	50
31.	polariscopio .....	52
32.	Tipos de polariscopio.....	53
33.	Fuente de sodio.....	54



34.	Lámina para la luz.....	54
35.	Lámina polaroide .....	55
36.	Lámina polaroide .....	56
37.	polariscopio Chapman y todos sus accesorios.....	57
38.	Probeta con muesca para prueba de tensión.....	68
39.	Forma de sujetar el modelo, prueba a tensión .....	70
40.	Modelo sin carga .....	70
41.	Modelo cargado a 80 psi.....	72
42.	Modelo cargado a 130 psi.....	73
43.	Fractura del modelo a tensión a 160 psi .....	75
44.	Probeta en forma de anillo para la prueba de compresión .....	77
45.	Prueba a compresión vista completa del polariscopio.....	79
46.	Ensayo a compresión con una carga de 230 psi.....	79
47.	Falla de la probeta a compresión a 310 psi.....	82
48.	Distribución de fuerzas y resultantes en una viga en deflexión .....	83
49.	Probeta en forma de viga simple apoyada en sus dos extremos para la prueba de deflexión.....	84
50.	Prueba de deflexión a 75 psi.....	86
51.	Prueba a deflexión a 75 psi.....	87

## TABLAS

I.	Ondas electromagnéticas .....	4
II.	Factores de intensidad de esfuerzos obtenidos por el método de Irwin .....	45
III.	Factores de intensidad de esfuerzos obtenidos por el método modificado de Irwin por Bradley–Kobayashi.....	46
IV.	Programa de mantenimiento preventivo en función del equipo y uso del mismo.....	66



## **GLOSARIO**

### **Anisotropía**

Propiedad que presentan ciertos cuerpos consistentes en la dependencia de sus propiedades de la dirección que en ellos se considere.

### **Birrefringencia**

También llamada doble refracción, que consiste en que un haz luminoso, estrecho y monocromático, la penetración en ciertos materiales da lugares refractados distintos. Los medios que poseen simultáneamente da dos haces de luz, esta propiedad se llama birrefringentes. Los sólidos cristalinos, salvo los del sistema cúbico, son birrefringentes.

### **Campo magnético**

La región del espacio situada en las proximidades de un imán o de una carga eléctrica en movimiento posee unas propiedades especiales.

### **Deformación**

Es un término que se usa generalmente para indicar un cambio en la forma de un cuerpo que es causado por la aplicación de una fuerza, por causa térmica o por humedad.

**Efecto dual**

La energía radiante tiene una naturaleza dual y obedece leyes que pueden explicarse a partir de una corriente de partículas o paquetes de energía que se emplea para explicar las interacciones de la luz con la materia que producen un cambio en la forma de energía.

**Esfuerzo**

Es un término que se usa para expresar la resistencia que tiene un cuerpo que soporta una fuerza por unidad de área.

**Espectro**

Serie de colores semejante a un arco iris, por este orden: violeta, azul, verde, amarillo, anaranjado y rojo, que se produce al dividir una luz compuesta como la luz blanca en sus colores constituyentes.

**Fotometría**

Medida de la intensidad luminosa de una fuente de luz o de la cantidad de flujo luminoso que incide sobre una superficie. La fotometría es importante en fotografía, astronomía e ingeniería de iluminación.

**Fragilidad**

La fragilidad se da en aquellos materiales, que bajo cargas aplicadas no presentan ningún efecto de deformación.

**Imperfecciones**

Defectos de las materias primas que se producen en el proceso de fabricación cuidando la pureza también del mismo.

**Inclusiones**

Materiales no metálicas en una matriz sólida metálica.

**Isotropía**

Calidad de tener propiedades idénticas en todas las direcciones.

***Router***

Usado para asegurar el direccionamiento del buen corte de las piezas y determinar la mejor ruta que deben tomar al realizarla.



## RESUMEN

Existe la necesidad de implementar mejoras en la Escuela de Ingeniería Mecánica y llevarla hacia una carrera con diferentes áreas prácticas, donde se puedan llevar a cabo análisis en laboratorios en cursos donde se carece de estos. Este proyecto se basa en la iniciativa del Ing. Carlos Humberto Pérez de diseñar el futuro laboratorio del Curso de Diseño de Máquinas 1.

Se busca sentar una base para que este curso tenga práctica y el estudiante se visualice como un ingeniero que pueda realizar diseños o mejorar los mecanismos que tendrá a su cargo, que actualmente el curso es exclusivamente teórico y no permite aprovechar el potencial creativo del estudiante que cursa el mismo.

Con el presente proyecto se pretende dejar la brecha para que en un futuro no lejano, se implemente el laboratorio del Curso de Diseño de Máquinas 1. El manual servirá de guía al estudiante en lo que respecta al uso, mantenimiento y las adecuadas prácticas en la máquina de ensayos no destructivos, denominada polariscopio fotoelástico.

Dicha máquina basa los ensayos en el fenómeno de la luz polarizada y con ella puede observarse la concentración de esfuerzos y el punto donde se dará la máxima carga.

Es posible ensayar vigas simples a tensión y compresión y asimismo, partes importantes de los componentes de una máquina tales como engranajes, polea, excéntricas, rodamientos y otros que son de amplia utilización en los mecanismos o sistemas mecánicos.



# OBJETIVOS

## General

Realizar el Manual de utilización, mantenimiento y prácticas del curso de Diseño de Máquinas 1, con base al fenómeno fotoelástico que se da en un polariscopio.

## Específicos

1. Dar a conocer los conceptos básicos que se dan al realizar una práctica o ensayo por medio del fenómeno fotoelástico.
2. Conocer los elementos que forman el polariscopio, cuáles son y para qué sirven y los diferentes tipos de polariscopios que existen, así como las iluminaciones que utilizan.
3. Describir el Manual de uso y mantenimiento para un polariscopio fotoelástico circular.
4. Describir el Manual de prácticas del laboratorio del curso de Diseño de Máquinas 1, basándose en el polariscopio fotoelástico tipo circular.



## INTRODUCCIÓN

La velocidad de la luz depende de las características ópticas del medio por el que se propaga. Normalmente, la velocidad de la luz en un medio material se suele relacionar con la que tiene en un medio de referencia (el vacío, normalmente). El índice de refracción, que mide la anterior relación entre las velocidades, se define como el cociente entre la velocidad de propagación de la luz en el vacío (300 000 kilómetros por segundo) y la velocidad en el medio material que se considera. Un medio material se define como ópticamente homogéneo e isótropo, cuando su índice de refracción es el mismo en cualquier punto del sólido y, además, su valor es independiente de la dirección del rayo luminoso que lo ilumina. Algunos materiales exhiben una curiosa propiedad denominada doble refracción o birrefringencia.

En este tipo de materiales, el índice de refracción, depende de la orientación relativa del vector campo eléctrico respecto del material considerado. Existen materiales no cristalinos, tales como resinas sintéticas, baquelita, etcétera, que cuando están libres de tensión presentan propiedades ópticas de carácter isótropo; sin embargo, cuando los citados materiales se encuentran sometidos a un estado tensional se vuelven anisótropos, presentando un índice de refracción que depende de cual sea la dirección considerada.

El Laboratorio de Fotoelasticidad pretende introducir al estudiante de ingeniería mecánica a profundizar y ampliar sus conocimientos en el área de diseño de piezas sujetas a esfuerzos y análisis de los mismos. La investigación da a conocer todo el funcionamiento básico del polariscopio Chapman y accesorios, para posteriormente aplicar las técnicas de uso correcto del equipo completo.

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

# **1. EL FENÓMENO FOTOELÁSTICO**

## **1.1. Explicación y síntesis del fenómeno fotoelástico**

La fotoelasticidad es una técnica experimental para la medición de esfuerzos y deformaciones. Se basa en el uso de luz para dibujar figuras sobre piezas que están siendo sometidas a esfuerzos. Las figuras que se dibujan son semejantes a las mostradas al realizar un análisis de elementos finitos ya que se pueden observar contornos y colores.

La medición se logra al evaluar el cambio del índice de refracción de la pieza al someterse a una carga (piezas transparentes). En el caso de una pieza o transparente, se cubre la pieza con una resina birrefringente.

La fotoelasticidad fue desarrollada a principios del siglo XX. El primer trabajo fue de E. Coker y de L. Filon en la Universidad de Londres y permitió a la fotoelasticidad convertirse rápidamente en una técnica viable para el análisis cualitativo de los esfuerzos, le encontró una gran aplicación en la industria, en dos dimensiones rebasó a esto de las técnicas en confiabilidad, alcance y factibilidad. Ningún otro método tenía la misma precisión visual y cobertura de los patrones de esfuerzo.

El desarrollo de polariscopios digitales usando los LED y los diodos laser permitió la supervisión continua de las estructuras y la fotoelasticidad dinámica. Los progresos en el proceso de imagen permiten que la información de los esfuerzos sea extraída automáticamente de su patrón. El desarrollo de la estereolitografía, que utiliza un método llamado *rapid prototyping* permite la generación de modelos tridimensionales exactos de un polímero líquido, lo cual permitió sustituir el método de vaciado tradicional.

La velocidad de la luz depende de las características ópticas del medio por el que se propaga. Normalmente, la velocidad de la luz en un medio material se suele relacionar con la que tiene en un medio de referencia (el vacío, normalmente). El índice de refracción, que mide la anterior relación entre las velocidades, se define como el cociente entre la velocidad de propagación de la luz en el vacío (300 000 kilómetros por segundo) y la velocidad en el medio material que se considera.

Un medio material se define como ópticamente homogéneo e isótropo cuando su índice de refracción es el mismo en cualquier punto del sólido y, además, su valor es independiente de la dirección del rayo luminoso que lo ilumina. Algunos materiales exhiben una curiosa propiedad denominada doble refracción o birrefringencia.

En este tipo de materiales, el índice de refracción, depende de la orientación relativa del vector campo eléctrico respecto del material considerado.

Existen materiales no cristalinos, tales como resinas sintéticas, baquelita, etcétera, que cuando están libres de tensión presentan propiedades ópticas de carácter isótropo; es decir:

$$n_0 = (C/V)$$

$n_0$  = índice de refracción

$C$  = velocidad de propagación de la luz en el vacío

$V$  = velocidad de propagación en el medio considerado

Sin embargo, cuando los citados materiales se encuentran sometidos a un estado tensional se vuelven anisótropos, presentando un índice de refracción que depende de cual sea la dirección considerada. Si se supone que el estado de tensión en un punto del material viene representado por los valores de sus tensiones principales  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ , los correspondientes índices de refracción, para cada una de las direcciones principales, vienen dados por lo que se conocen como leyes de Maxwell:

$n_1, n_2, n_3$  = índices de refracción, para cada dirección principal

$$n_1 - n_0 = p\sigma_1 + q(\sigma_2 + \sigma_3) \quad n_2 - n_0 = p\sigma_2 + q(\sigma_1 + \sigma_3) \quad n_3 - n_0 = p\sigma_3 + q(\sigma_2 + \sigma_1)$$

Cuando  $\sigma_3 = 0$  (estado de tensión plana) las expresiones anteriores se reducen, pudiéndose poner la primera de ellas como:

$$n_2 = n_1 / (C (\sigma_1 - \sigma_2))$$

Siendo  $C$  = constante del material que recibe el nombre de constante fotoelástica del medio en cuestión que se determina de manera experimental y que depende de la longitud de onda de la luz incidente así también de la temperatura. La ecuación anterior se conoce como la Ley de Brewster y constituye la relación básica de la fotoelasticidad.

De acuerdo con la teoría electromagnética de Maxwell, las ondas electromagnéticas (ver tabla 1) para el denominado espectro visible-, consisten en dos perturbaciones (un campo eléctrico y otro magnético ortogonales entre sí) cuyos vectores representativos son ortogonales a la dirección de propagación, tal como se indica en la figura 1.

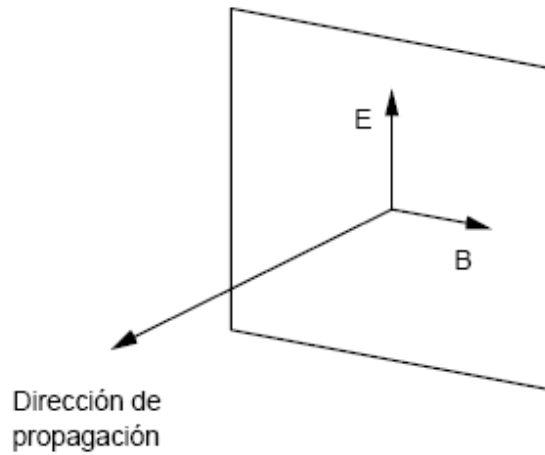
Tabla I. **Ondas electromagnéticas**

<b>LUZ O ESPECTRO VISIBLE: <math>3,8 \times 10^{-7} \text{m} &lt; \lambda &lt; 7,8 \times 10^{-7} \text{m}</math> <math>4 \times 10^{14} \text{Hz} &lt; f &lt; 8 \times 10^{14} \text{Hz}</math></b>	
<b>Color</b>	<b><math>\lambda</math> ( <math>10^{-7}</math> )</b>
Violeta	3,90 - 4,55
Azul	4,55 - 4,92
Verde	4,92 - 5,77
Amarillo	5,77 - 5,97
Naranja	5,97 - 6,22
Rojo	6,22 - 7,80

Fuente: Universidad Carlos III. Manual de mecánica de medios continuos y teoría de estructuras. p. 12.



Figura 1. **Dirección de propagación**



Fuente: Universidad Carlos III. Manual de mecánica de medios continuos y teoría de estructuras. p. 13.

El vector campo eléctrico =  $E = A \cos(kx - \omega t)$

Donde:

$x$  = es la abscisa según la dirección de propagación

$A$  = es la amplitud

$\omega$  = es la pulsación de la onda ( $=2\pi f$ , siendo  $f$  la frecuencia de la onda)

$k$  = el número de ondas ( $=2\pi/\lambda$ , siendo  $\lambda$  la longitud de onda), es ortogonal a la dirección de propagación.

En general (luz no polarizada) la dirección de E cambia en un punto considerado a lo largo del tiempo. Si la luz se encuentra polarizada linealmente el vector E siempre se encuentra contenido en el mismo plano. Si la luz se encuentra polarizada circularmente, el extremo del vector E va describiendo, a medida que avanza el tiempo y la luz se propaga, una circunferencia. De manera análoga se puede describir la luz polarizada elípticamente cuando el extremo del vector E describe una elipse. Para familiarizar al lector con la terminología que aparecerá, se denomina polarizador y analizador a unas láminas delgadas que convierten la luz sin polarizar en luz polarizada linealmente según una dirección que se denomina eje del polarizador o analizador, respectivamente.

### **1.1.1. Fotografía fotoelástica**

La primera hoja polaroid, cuyo nombre ya orienta acerca de su uso, fue inventada en 1928 por Edwin H. Land. Esta hoja incorporaba una sustancia denominada herapatita (luego se verá el origen de este nombre) o peryoduro sulfatado de quinina.

Land se apoyó en las observaciones de un físico de Bristol (Inglaterra) llamado William B. Herapath (de ahí el nombre de herapatita), que aprovechó las observaciones de Mister Phelps, que era alumno suyo y que consistían en lo siguiente: dicho señor había observado que cuando echaba yodo a la orina de un perro, al que se había incorporado a su dieta quinina, se formaban unos cristallitos de color verde; los cristales así formados y superpuestos unos a otros, fueron analizados al microscopio por el Dr. Herapath, quien observó que existían zonas en las que la luz atravesaba la capa de cristales y otras zonas se encontraban a oscuras. De esta manera tan rocambolesca fue como se descubrió este nuevo material polarizador.

Los instrumentos que se utilizan en las técnicas fotoelásticas son los polariscopios. Los hay de dos tipos: el polariscopio plano y el polariscopio circular. Aunque la práctica que acompaña a esta lección corresponde al uso del segundo tipo de polariscopio es conveniente, a efectos didácticos, analizar el funcionamiento del primero de ellos.

### 1.1.2. Efectos de una probeta esforzada en un polariscopio plano y circular

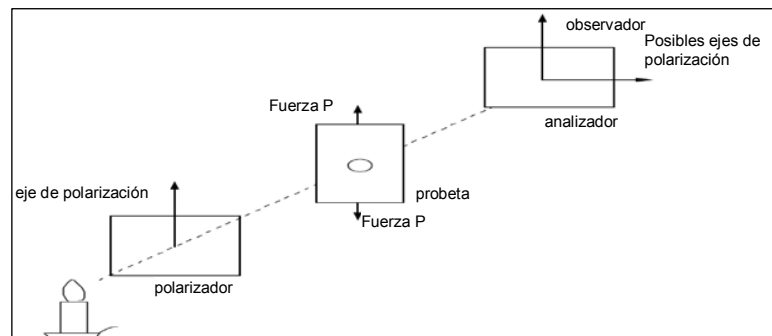
La luz que produce un foco luminoso (luz no polarizada) atraviesa un polarizador que la polariza linealmente. El campo eléctrico de la luz polarizada puede ponerse como:  $E=A \cos \omega t$ .

$A=$  es la amplitud,

$\omega=$  es la pulsación de la onda ( $=2\pi f$ , siendo  $f$  la frecuencia de la onda)

$t =$  tiempo del estudio

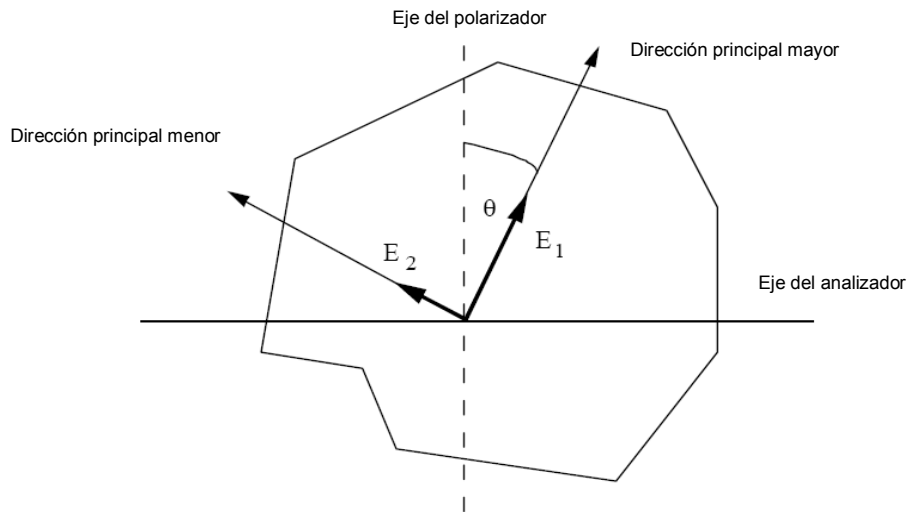
Figura 2. **Funcionamiento del polariscopio plano**



Fuente: Universidad Carlos III. Manual de mecánica de medios continuos y teoría de estructuras. p. 22.

Al atravesar dicha onda luminosa la probeta, se descompondrá, de acuerdo con las direcciones principales de la misma.

Figura 3. **Direcciones de la luz**



Fuente: Universidad Carlos III. Manual de mecánica de medios continuos y teoría de estructuras. p. 25.

Las dos vibraciones que llegan al modelo  $E=A ((\cos \theta)(\cos \omega t))$  y  $E_2=A ((\sin\theta)(\cos \omega t))$  lo atraviesan sufriendo una un retraso respecto de la otra. Se llama  $e$  al espesor del modelo, el tiempo  $t_1$  que necesita la componente de  $E$  paralela al eje principal mayor es:

$$e = t_1/ v_1$$

Donde  $v_1$  es la velocidad a la que se propaga esta componente dentro del modelo. De igual manera, el tiempo  $t_2$  que necesita la componente de  $E$  paralela al eje principal menor es:

$$e = t_2/ v_2$$

Donde  $v_2$  representa la velocidad a la que se propaga esta componente. El desfase entre ambas componentes, una vez que han atravesado el modelo será:

$$\omega(t_1 - t_2)$$

y las componentes según los ejes principales mayor y menor serán, respectivamente:

$$E_1 = A \cos \omega(t - t_1) \cos \theta$$

$$E_2 = A \cos \omega(t - t_2) \sin \theta$$

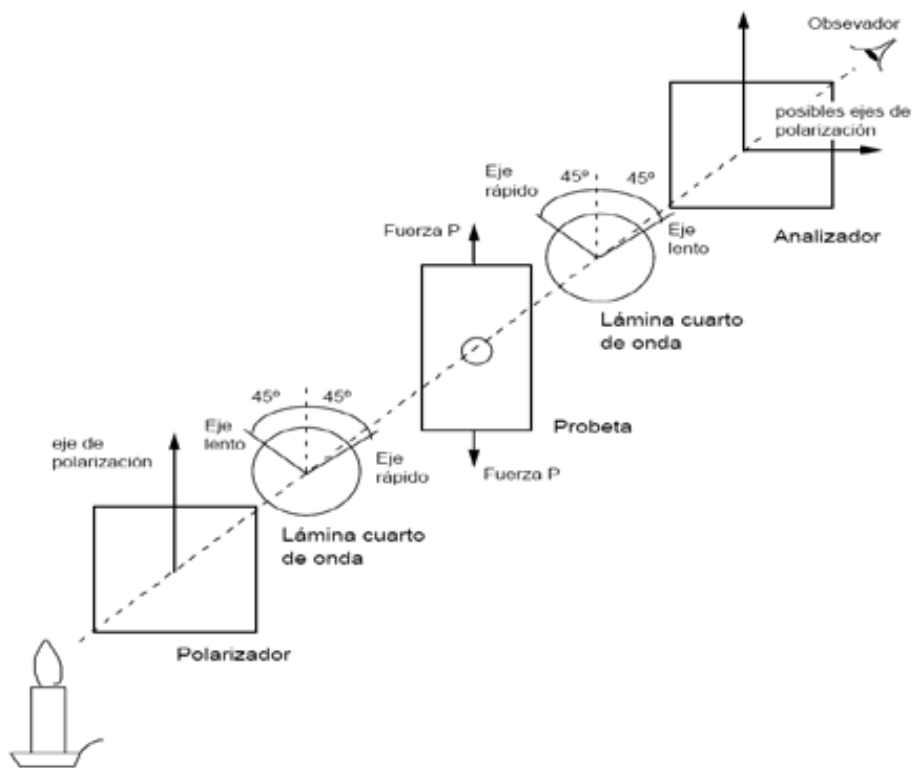
- Fundamento teórico del método del polariscopio circular

Su funcionamiento es el siguiente (ver figura): la luz producida en un foco luminoso se polariza a través de un polarizador lineal cuyo eje de polarización se ha dibujado vertical. La luz linealmente polarizada incide sobre una lámina cuarto de onda cuyos ejes rápido y lento forman 45 grados con el eje del polarizador.

Una lámina cuarto de onda es una lámina de un material apropiado y dimensionada de tal forma que, al incidir sobre ella un rayo de luz emerge de ella dos rayos (el rayo ordinario y el rayo extraordinario) paralelos al rayo incidente y superpuestos, polarizados según dos direcciones ortogonales entre sí de manera que uno (polarizado según el denominado eje lento de la lámina cuarto de onda) lleva un desfase respecto al otro (que está polarizado según el eje rápido de la lámina) de  $\lambda/4$ , lo que equivale a un desfase angular de  $\pi/2$ . Es decir, si el rayo correspondiente al eje rápido fuera  $E = A \cos \omega t$ , el rayo correspondiente al eje lento sería:  $E' = A' \cos (\omega t - \pi/2)$ .

La luz emergente, que queda polarizada circularmente como se demostrará con posterioridad, atraviesa el modelo cargado, incidiendo sobre otra nueva lámina cuarto de onda, cuyos ejes son paralelos a los de la lámina cuarto de onda previa pero intercambiada de posición, para luego incidir sobre lo que se denomina analizador y que vuelve a ser otro polarizador lineal. El eje de polarización del analizador puede ser colocado paralelo u ortogonal al eje del primer polarizador.

Figura 4. **Método del polariscopio circular**



Fuente: Universidad Carlos III. Manual de mecánica de medios continuos y teoría de estructuras. p. 27.

Volviendo a la pesadez de los cálculos matemáticos: sea  $E = A \cos \omega t$  el campo eléctrico tras atravesar la luz del polarizador. Al incidir sobre la primera lámina cuarto de onda este vector se descompondría en otros dos:

- Uno en la dirección del eje rápido ( $E_r = A/\sqrt{2} \cos \omega t$ )
- Otro en la dirección del eje lento ( $E_l = A/\sqrt{2} \cos \omega t$ )

Este último, al atravesar la lámina cuarto de onda, sufre un desfase de  $\pi/2$  respecto al primero, por lo que los dos rayos emergentes de la primera lámina cuarto de onda serán:

$$E_r = A/\sqrt{2} \cos \omega t$$

$$E_l = A/\sqrt{2} \cos (\omega t - \pi/2) = A/\sqrt{2} \sin \omega t$$

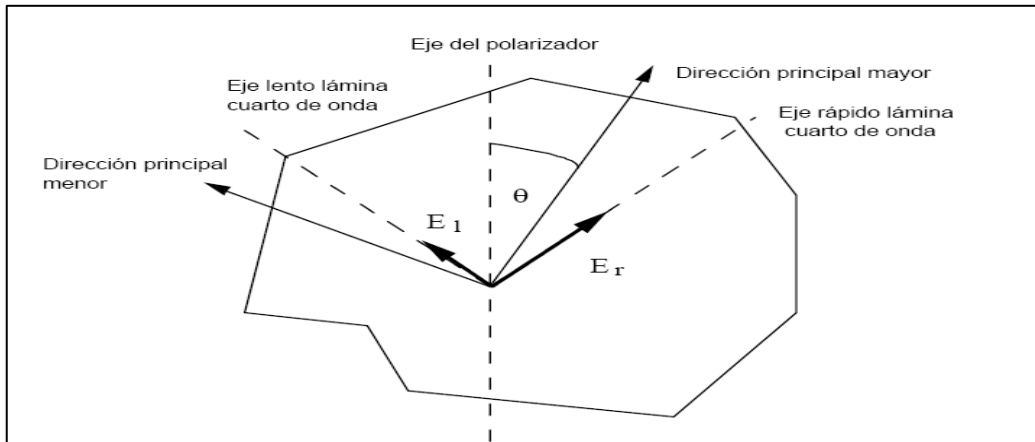
El extremo del vector campo eléctrico resultante describirá, a lo largo del tiempo, un círculo por lo que la luz que emerge se dice que está polarizada circularmente. Al atravesar el modelo cargado se deben calcular los nuevos componentes del campo eléctrico según las direcciones principales de tensión (se supone que el eje correspondiente a la tensión principal mayor forma un ángulo de  $\theta$  con el eje del polarizador, tal como se indica en la figura siguiente).

Los valores de las componentes del campo eléctrico sobre los ejes principales mayor y menor ( $E_1$  y  $E_2$ , respectivamente) vendrán dadas (ver figura 5 ) por:

$$E_1 = A/\sqrt{2} \cos (\omega t + \theta - \pi/4)$$

$$E_2 = A/\sqrt{2} \sin (\omega t + \theta - \pi/4)$$

Figura 5. **Los valores de las componentes del campo eléctrico**



Fuente: Universidad Carlos III. Manual de mecánica de medios continuos y teoría de estructuras. p. 30.

Cada uno de estos dos componentes se propaga en el medio material a velocidades diferentes, pues este se encuentra sometido a un estado tensional y, por tanto, presenta diferentes índices de refracción según cada dirección. Se llama  $e$  al espesor del modelo, que se supone constante y  $v_1$  y  $v_2$  a las velocidades de propagación de las dos componentes consideradas, el nuevo desfase ( $\Phi$ ), que la interposición física del modelo introduce, resultará:

$$\Phi = \omega (e/v_1 - e/v_2) = 2 \pi e C (\sigma_1 - \sigma_2) / \lambda$$

Por lo que las componentes que emergen del modelo son:  $E_1 = A/\sqrt{2} \cos (\omega t + \theta - \pi/4)$

$$E_2 = A/\sqrt{2} \sin (\omega t + \theta - \pi/4 - \Phi)$$



Sobre la siguiente lámina cuarto de onda, las componentes que incidirían según el eje rápido y lento (no olvidar que están cruzados respecto a los ejes de la primera lámina cuarto de onda) son:

$$E'r = A/\sqrt{2} (\cos (\omega t + \theta - \pi/4) \cdot \text{sen} (\pi/4 - \theta) + \text{sen} (\omega t + \theta - \pi/4 - \Phi) \cdot \cos (\pi/4 - \theta))$$

$$E'l = A/\sqrt{2} (\cos (\omega t + \theta - \pi/4) \cdot \cos (\pi/4 - \theta) - \text{sen} (\omega t + \theta - \pi/4 - \Phi) \cdot \text{sen} (\pi/4 - \theta))$$

Como la componente E'l sufre un desfase de  $\pi/2$  al atravesar la segunda lámina cuarto de onda, las componentes emergentes serán:

$$E'r = A/\sqrt{2} (\cos (\omega t + \theta - \pi/4) \cdot \text{sen} (\pi/4 - \theta) + \text{sen} (\omega t + \theta - \pi/4 - \Phi) \cdot \cos (\pi/4 - \theta))$$

$$E'l = A/\sqrt{2} (\text{sen} (\omega t + \theta - \pi/4) \cdot \cos (\pi/4 - \theta) + \cos (\omega t + \theta - \pi/4 - \Phi) \cdot \text{sen} (\pi/4 - \theta))$$

Si el eje del analizador fuera ortogonal al del polarizador, el campo eléctrico que podría ser finalmente observado sería:

$$E' = E'l \cos \pi/4 - E'r \cos \pi/4 = A \text{sen} (\Phi/2) \cdot \text{sen} (\omega t + 2\theta - \Phi/2)$$

Por lo que se producirán franjas oscuras (interferencia destructiva) cuando sea:

$$(\Phi/2) = 0$$

Es decir, cuando  $\Phi/2 = n\pi$  ( $n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ). Como  $\Phi$  depende de la diferencia entre los valores de las tensiones principales, la ecuación anterior definirá las isocromáticas  $\sigma_1 - \sigma_2$ .

$= n \lambda / (e C)$ , donde  $\lambda / (e C)$  es constante.

Si el eje del analizador fuera paralelo al del polarizador, el campo eléctrico que podría ser observado resultaría ser:

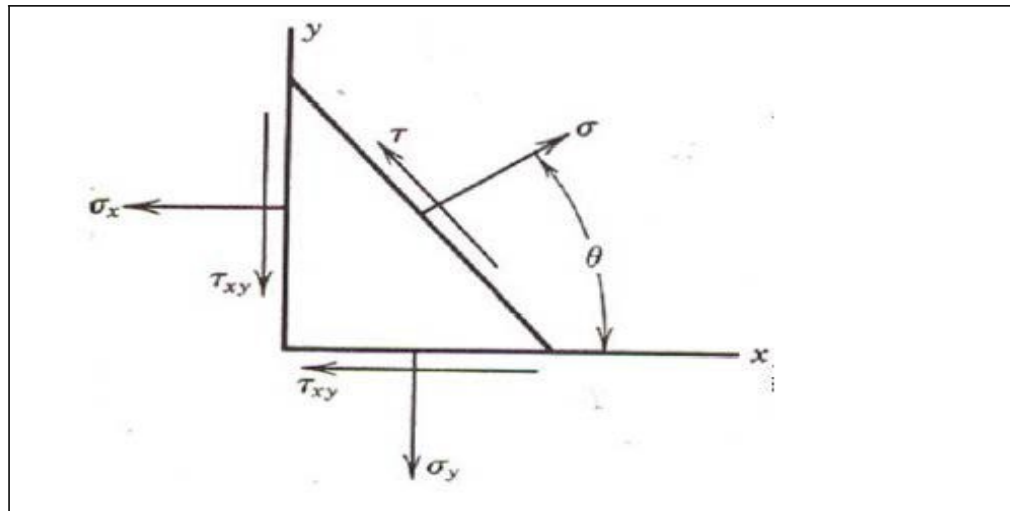
$$E' = E'l \cos \pi/4 + E'r \cos \pi/4 = A \cos (\Phi/2). \text{sen} (\omega t - \Phi/2)$$

Por lo que se producirán franjas oscuras (interferencia destructiva) cuando  $\cos (\Phi/2) = 0$ ; es decir, cuando  $\Phi/2 = (2n+1) \pi$  ( $n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ). Al igual que anteriormente sucedió, la ecuación anterior definirá las isocromáticas  $\sigma_1 - \sigma_2 = (2n+1) \lambda / (e C)$ , donde  $\lambda / (e C)$  es constante.

## **1.2. Procedimiento del esfuerzo óptico en dos dimensiones**

Puesto que los efectos fotoelásticos se relacionan solamente con los esfuerzos principales, una breve revisión de la relación entre los esfuerzos en los varios planos que se pueden pasar a través de cualquier punto dado en un cuerpo es recomendable. Esta discusión se limita a sistemas de esfuerzos en dos dimensiones como aquellos cercanamente aproximados a un modelo plano fino cargado en el plano del modelo.

Figura 6. **Esfuerzos en un punto en un sistema de dos dimensiones**



Fuente: Universidad Carlos III. Manual de mecánica de medios continuos y teoría de estructuras. p. 30

En un punto dado en un miembro, los esfuerzos existentes en dos planos de coordenadas rectangulares, X y Y, se pueden representar, generalmente en componentes normal y cortante, según las indicaciones de la figura 6. En cualquier otro plano en este punto, existen un esfuerzo normal y un esfuerzo cortante de diferente intensidad. Partiendo de las consideraciones del equilibrio, las relaciones entre estos esfuerzos se describen de la manera siguiente:

$$\sigma = \frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta$$

$$\tau = \frac{1}{2} (\sigma_y - \sigma_x) \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta$$

En la última relación τ se convierte en cero y solamente un esfuerzo normal σ existe en el plano cuando:

$$\tan 2\sigma = (2\tau_{xy}) / (\sigma_x - \sigma_y)$$

Diferenciar la ecuación con respecto a  $\theta$  e igualando el resultado a cero constituye una forma de determinar los valores de  $\theta$  para los cuales  $\sigma$  se convierte un valor algebraico máximo (o un mínimo) Los resultados son idénticos con los de la ecuación.

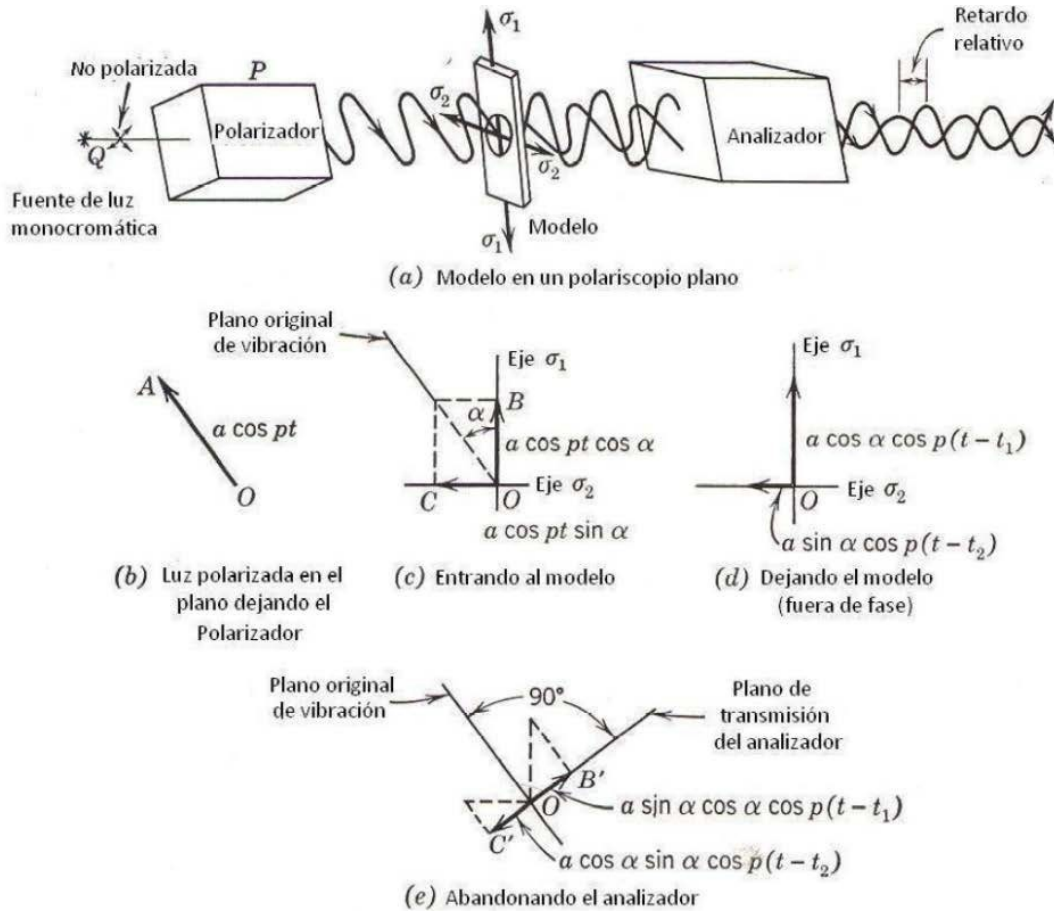
De esta manera los valores algebraicos de los esfuerzos normales máximo (y mínimo) en el punto considerado se encuentran en planos para los cuales los esfuerzos cortantes desaparecen; estos esfuerzos normales son llamados esfuerzos principales.

Puesto que hay dos valores posibles (menores que 360 grados) para el ángulo  $2\theta$  obtenido de la ecuación, que difieren en 180 grados, entonces se tienen dos esfuerzos principales que recaen sobre los planos principales, a 90 grados el uno del otro. Uno de estos es el esfuerzo principal máximo  $\sigma_1$  (los esfuerzos son vistos como esfuerzos de tensión) y la otra es el esfuerzo principal mínimo  $\sigma_2$  (si  $\sigma_2$  es negativo, es el esfuerzo de compresión más grande que existe en el punto). Los valores de los esfuerzos principales son obtenidos al sustituir la ecuación. Esta se convierte en:

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2} \left( (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (4\tau_{xy})^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_y) - \frac{1}{2} \left( (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (4\tau_{xy})^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

Figura 7. **Análisis experimental de esfuerzos por medio de la fotoelasticidad**



Fuente: Universidad Carlos III. Manual de mecánica de medios continuos y teoría de estructuras. p. 31.

Esta diferencia de fase es proporcional a la diferencia entre los esfuerzos principales y es medida introduciendo el analizador que trae la parte de cada vibración componente en interferencia en un solo plano.

Puesto que la luz blanca consiste en muchas longitudes de onda, que serán influenciadas de una manera similar, el análisis será hecho con base en luz monocromática en Q y se investiga el efecto producido al paso de la luz, para una incidencia normal, a través de un punto en el modelo fotoelástico, cuando se ha atravesado el polarizador P, la vibración se ha confinado a un solo plano en la dirección y con la amplitud proporcional a OA. Lo anterior se representa por la ecuación:

$$S = a \cos pt$$

Cuando la luz llega al modelo, generalmente, su plano de vibración no coincidirá con el plano de algún esfuerzo principal. Por lo tanto, puesto que el modelo sometido a esfuerzo transmite solamente la luz en los planos principales, la vibración original es inmediatamente descompuesta en dos componentes mientras entra en el modelo.

### **1.2.1. Módulo de elasticidad**

El módulo de elasticidad (E), también llamado módulo de Young, es un parámetro característico de cada material que indica la relación existente (en la zona de comportamiento elástico de dicho material) entre los incrementos de tensión aplicados en el ensayo de tracción y los incrementos de deformación relativa producidos.

$$E = d\sigma/d\varepsilon$$

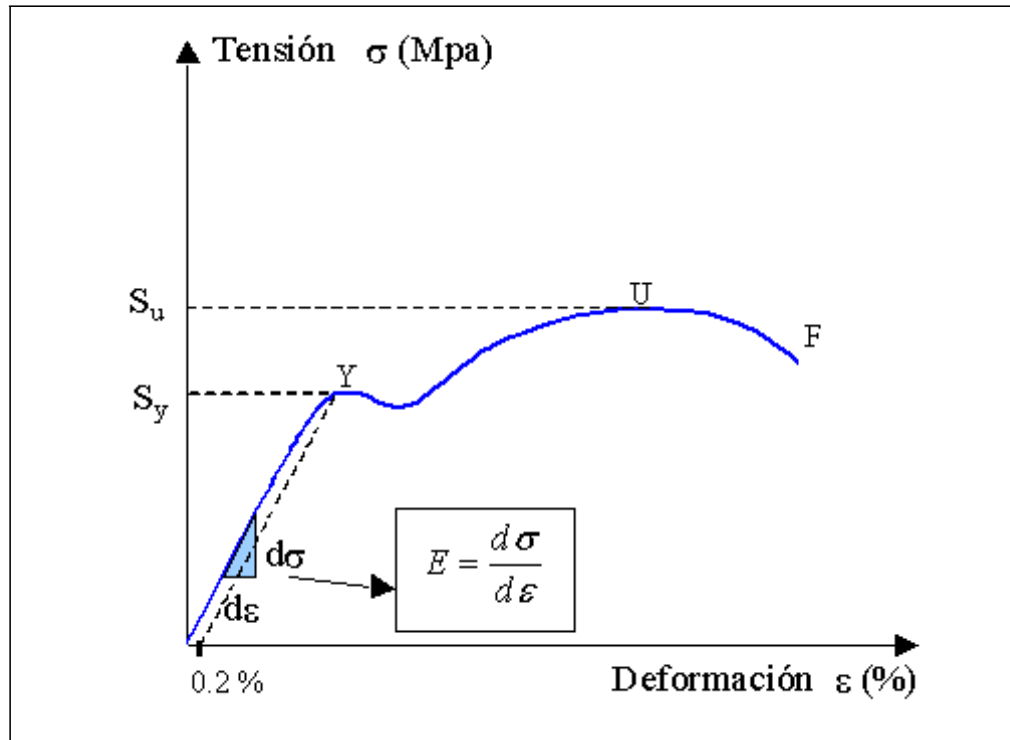
$$E = \text{módulo de elasticidad}$$

$$d\sigma = \text{cambio en la tensión}$$

$$d\varepsilon = \text{cambio en la deformación}$$

Equivale a la tangente en cada punto de la zona elástica en la gráfica tensión-deformación (obtenida del ensayo de tracción).

Figura 8. **Módulo de Young**



Fuente: Universidad Carlos III. Manual de mecánica de medios continuos y teoría de estructuras. p. 35

En muchos casos el módulo de elasticidad es constante durante la zona elástica del material, indicando un comportamiento lineal del mismo (ley de Hooke).

El módulo de elasticidad indica la rigidez de un material: cuanto más rígido es un material mayor es su módulo de elasticidad.

### **1.2.2. Esfuerzo máximo**

El comportamiento de los materiales por el ensayo de tracción, es muy útil para saber ciertas propiedades mecánicas, es usado en el campo de diseño, metalurgia y sobretodo en el ámbito de la ingeniería. Estas propiedades mecánicas son por ejemplo: el esfuerzo de influencia, resistencia a la tensión, resistencia a la fractura, módulo de elasticidad, etcétera.

#### Prueba de la tensión

Esta prueba es realizada generalmente para determinar algunas propiedades mecánicas, como ductilidad, elasticidad, resistencia, etcétera.

El objetivo de esta experiencia es hacer una prueba y determinar las siguientes propiedades del material:

- Módulo de elasticidad
- Límite elástico
- Límite de influencia
- Resistencia a la tracción o esfuerzo máximo
- Alargamiento en la ruptura
- Reducción de área
- Energía elástica
- Tenacidad y tipo de fractura



### **1.3. Criterios para seleccionar materiales para realizar ensayos**

Se sabe que la resistencia es una propiedad o característica de un elemento mecánico. Esta propiedad depende en conjunto de diversos factores, a saber: la identidad del material, el aspecto geométrico de la pieza y los aspectos debidos a la sollicitación. Todas estas facetas se deben considerar apropiadamente antes de establecer algún cuantificador para la resistencia de una parte del elemento. Las tablas de materiales y tablas de dispositivos (embragues, frenos, etcétera) no dan información alguna sobre la resistencia de partes específicas.

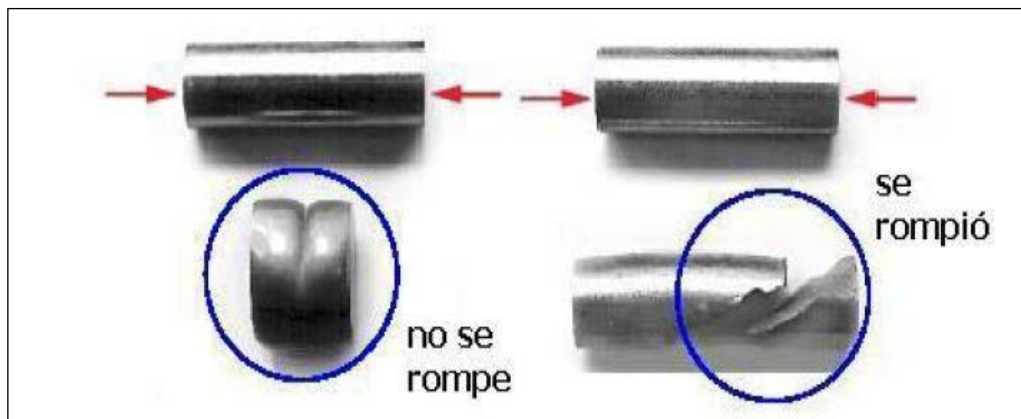
La resistencia de una parte del elemento es una propiedad específica de un elemento de máquina antes de ser ensamblado en la máquina. Tal propiedad es un indicador muy importante para caracterizar la respuesta del elemento de máquina. Sin embargo, se debe tener en cuenta que este tipo de indicadores es de carácter aleatorio cuando se trate de elementos producidos en serie o sometidos a variaciones en los procesos de carga o selección del material.

#### Concepto de rotura y falla

La idea de rotura o de falla de una pieza está asociada a la idea de desafectar la misma del mecanismo o máquina en la cual actúa. Sin embargo, entre ellas existe una diferencia conceptual que permite efectuar un análisis diferente en cada caso y tomar decisiones afines.

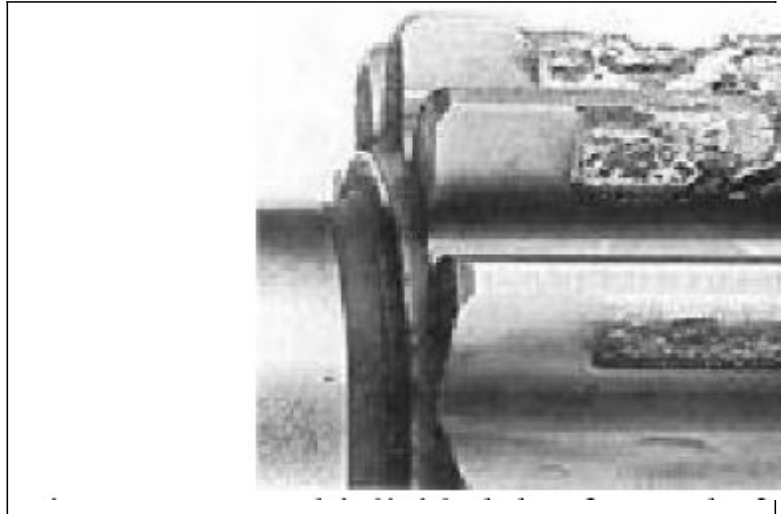
Un proceso de rotura significa que la pieza se divide en dos o más partes dejando así de cumplir con la función que tiene asignada como órgano de máquina. Un proceso de falla aunque es entendido de la misma manera que el anterior como que la pieza deja de cumplir con la función asignada en la máquina, de por sí constituye un concepto algo más general ya que contempla al anterior, sin embargo, la falla de una pieza puede ocurrir sin necesidad de su rotura. Esta diferencia se puede apreciar en una comparación entre dos probetas de ensayo compresivo tal como la que se ve en la figura 9.

Figura 9. **Distinción del proceso de falla y de rotura**



Fuente: PIOVAN, Marcelo Tulio. Elementos de Máquinas. p. 51.

Figura 10. **Multiplicidad de efectos de falla en una misma pieza**



Fuente: PIOVAN, Marcelo Tulio. Elementos de Máquinas. p. 51.

Existen diferentes mecanismos de falla en diferentes tipos de piezas construidas con diferentes tipos de materiales entre las principales se pueden mencionar:

- Deformación inducida por fuerzas o temperatura
- Desplazamientos inducidos por fuerzas o temperatura (pandeo)
- Límite de fluencia
- Rotura dúctil
- Rotura frágil

- Fatiga estructural
- Fatiga superficial
- Impacto o falla dinámica
- Desgaste por fricción
- Endurecimiento parcial
- Daño por radiación: típico en materiales como los polímeros
- Corrosión
- Desgaste por corrosión
- Fatiga por corrosión
- Fatiga por *fretting*
- Desgaste por *fretting*
- Relajación térmica
- Rotura por tensiones térmicas: efectos concentradores de tensiones
- Falla por efectos *creep*: presencia de deformaciones sostenidas en el tiempo.

- Fatiga térmica
- *Shock* o golpe térmico: modificación estructural por efecto térmico
- *Spalling*
- *Debonding*: pérdida de contacto entre fibras y resina en materiales compuestos.
- *Delamination*: pérdida de contacto entre láminas de materiales compuestos.

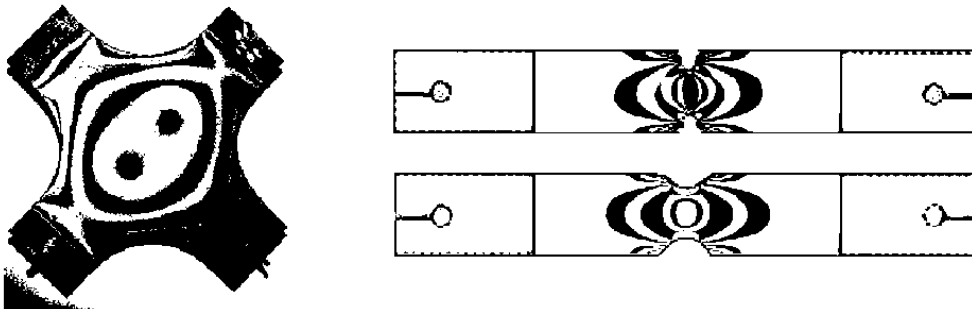
La lista anterior es sólo una muestra de la gran cantidad de mecanismos de falla que se pueden presentar en piezas construidas con diversos materiales y formas. Cada una de las precedentes tiene un proceso de análisis específico para caracterizar el potencial estado de falla de la pieza. Si bien cada caso es diferente en su enfoque y en las variables que se ponen en juego y los métodos de cálculo que se utilizan (en complejidad y representatividad), todas tienen en común la necesidad de caracterizar aspectos geométricos relativos al proceso de falla.

#### La concentración de tensiones

La concentración de tensiones es un efecto geométrico sumamente localizado. En algunos casos se puede deber a una grieta superficial, en otros se da por un maquinado no adecuado o por una mala selección al cambiar de dimensiones los radios crecientes o decrecientes bruscamente entre las superficies no concordantes.

Esta fluencia puede conducir a un endurecimiento por deformación del material y a un incremento de la resistencia de fluencia en tal punto. Suele suceder que siendo las cargas estáticas, la fluencia localizada no conduce a fluencia general y en consecuencia la pieza globalmente puede soportar la sollicitación.

Figura 11. **Distribución y concentración de tensiones evidenciado por fotoelasticidad**



Fuente: PIOVAN, Marcelo Tulio. Elementos de Máquinas. p. 51.

Un concentrador de tensión, es una discontinuidad que altera la distribución de la tensión en inmediaciones de la discontinuidad. Este tipo de discontinuidades se puede ver en las figuras 11 y 12.

La concentración de tensiones es la zona donde se hallan los concentradores de tensiones. Normalmente, se define el factor de concentración de tensiones, como el indicador del incremento de tensiones en la concentración de tensiones y se calcula de la siguiente manera:

$$K_c = (\text{Tensión Máxima Puntual}) / (\text{Tensión Promedio Puntual})$$

Figura 12. **Distribución y concentración de tensiones evidenciado por termoelasticidad radiométrica**



Fuente: PIOVAN, Marcelo Tulio. Elementos de Máquinas. p. 51.

Los factores concentradores de tensión, históricamente han sido y actualmente son muy útiles para emplear metodologías de cálculo tradicionales (resistencia de materiales) sin incurrir en graves errores de representatividad del estado tensional. De manera que el estado tensional en un punto viene dado por la siguiente expresión:

$$\sigma_{\max} = (K_c \cdot \sigma_{\text{Nom}})$$

Donde  $\sigma_{\text{Max}}$  es la tensión normal o tangencial que se pretende valorar en la zona concentradora de tensiones,  $KC$  el coeficiente concentrador de tensiones y  $\sigma_{\text{Nom}}$  la tensión nominal obtenida por cálculo de resistencia de materiales (flexión, tracción, torsión, etcétera).

Para la obtención de los factores de concentración de tensiones usualmente se recurría a ensayos de fotoelasticidad o termoelasticidad radiométrico los cuales son métodos costosos en términos generales.

Sin embargo, hoy en día con el avance computacional es mucho más fácil obtener los factores concentradores de tensión, mediante el empleo de plataformas de cálculo por elementos finitos bidimensionales o tridimensionales, con los cuales se puede hallar en forma precisa el valor de las tensiones en los puntos de interés.

Aún así, en casos de importancia superlativa, por el riesgo que implica la mala predicción de los estados de tensiones, se suelen efectuar modelos computacionales de elementos finitos y correlacionarlos con modelos de fotoelasticidad a escala o de tamaño real, tal como se puede ver en el ejemplo de un tren de aterrizaje en la figura 12.

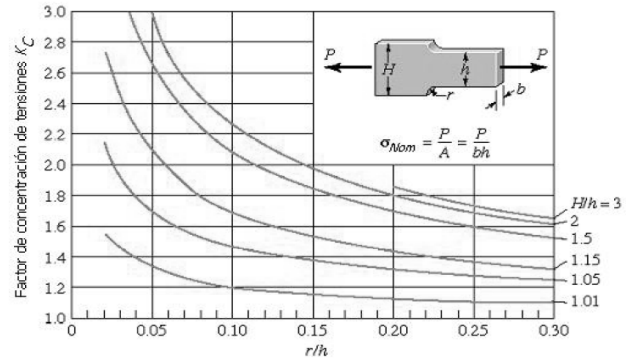
Normalmente los factores de concentración de tensiones se condensan en gráficos, ábacos o programas de cálculo para una configuración de sollicitación determinada, un elemento estructural determinado para varias configuraciones de parámetros geométricos, como por ejemplo, relaciones de alturas de vigas a radios, de acuerdo con muescas, de agujeros, chaveteros, etcétera.

En la figura 13 se muestran las gráficas de factores de concentración de tensiones para diferentes configuraciones geométricas y de carga. Nótese que las curvas se grafican en función de la razón del radio, de acuerdo (o agujero) con una longitud característica (diámetro menor o altura menor, etcétera).

En las figuras a su vez se indican las fórmulas particulares de cada caso, homónimas para calcular la tensión máxima en función de la denominada tensión nominal.

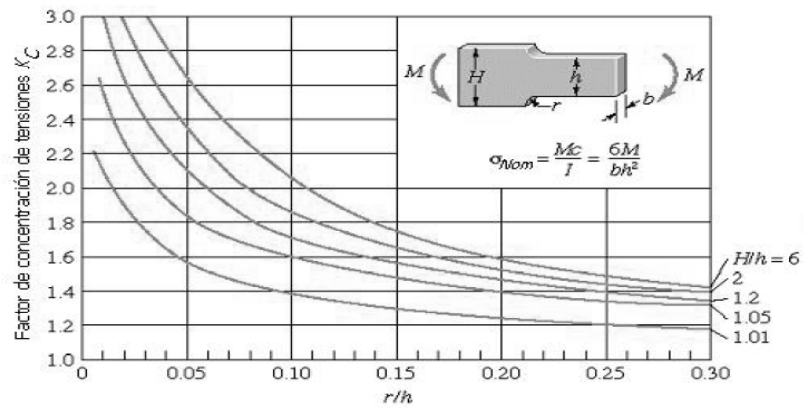


Figura 13. **Concentración de tensiones para planchuela traccionada con radio de acuerdo**



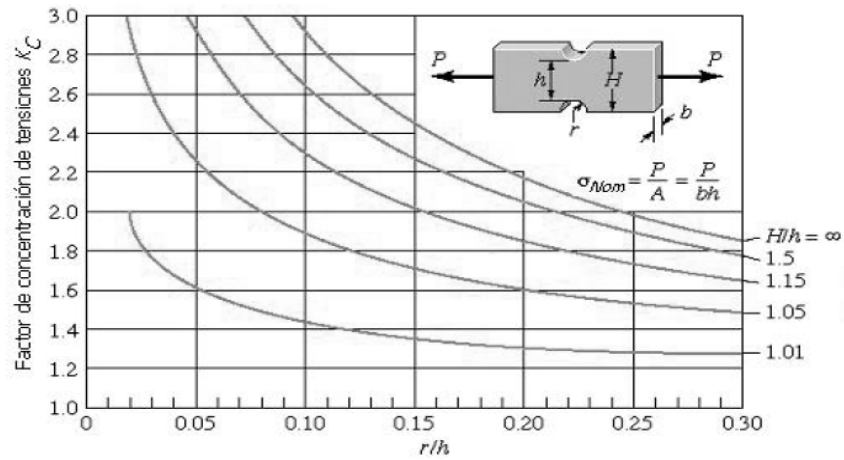
Fuente: PIOVAN, Marcelo Tulio. Elementos de Máquinas. p. 51.

Figura 14. **Concentración de tensiones para planchuela flexionada con radio de acuerdo**



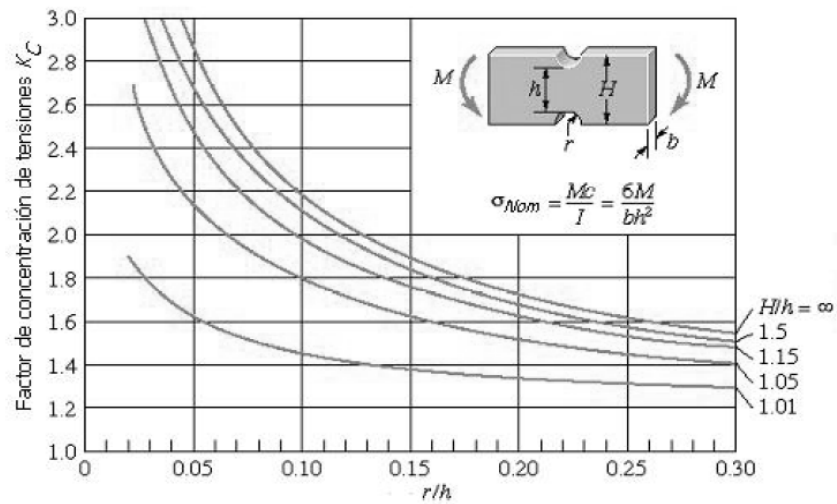
Fuente: PIOVAN, Marcelo Tulio. Elementos de Máquinas. p. 51.

Figura 15. **Concentración de tensiones para planchuela traccionada con muesca**



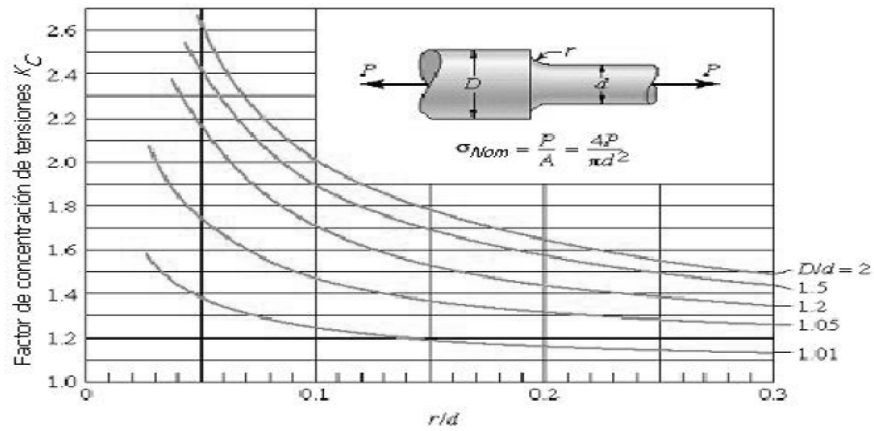
Fuente: PIOVAN, Marcelo Tulio. Elementos de Máquinas. p. 51.

Figura 16. **Concentración de tensiones para planchuela flexionada con muesca**



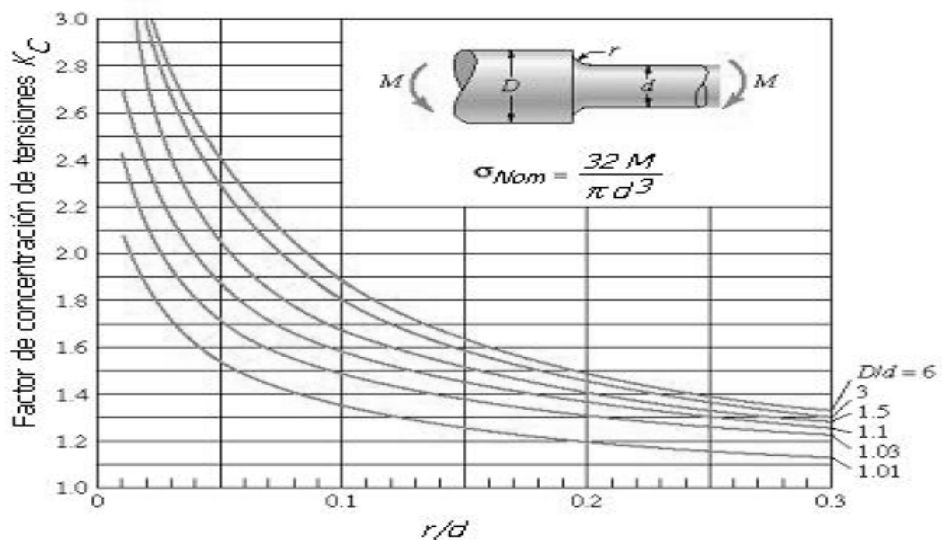
Fuente: PIOVAN, Marcelo Tulio. Elementos de Máquinas. p. 51.

Figura 17. **Concentración de tensiones para eje traccionada con radio de acuerdo**



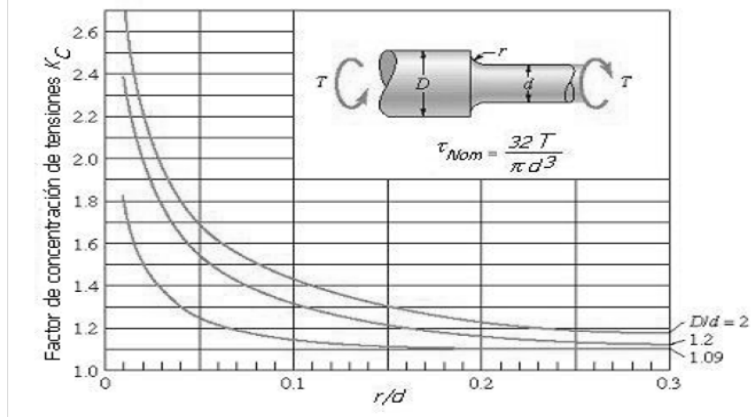
Fuente: PIOVAN, Marcelo Tulio. Elementos de Máquinas. p. 51.

Figura 18. **Concentración de tensiones para eje flexionado con radio de acuerdo**



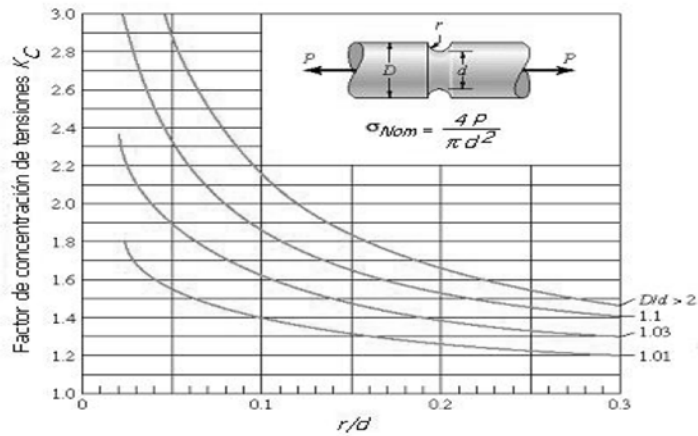
Fuente: PIOVAN, Marcelo Tulio. Elementos de Máquinas. p. 51.

Figura 19. **Concentración de tensiones para eje torsionado con radio de acuerdo**



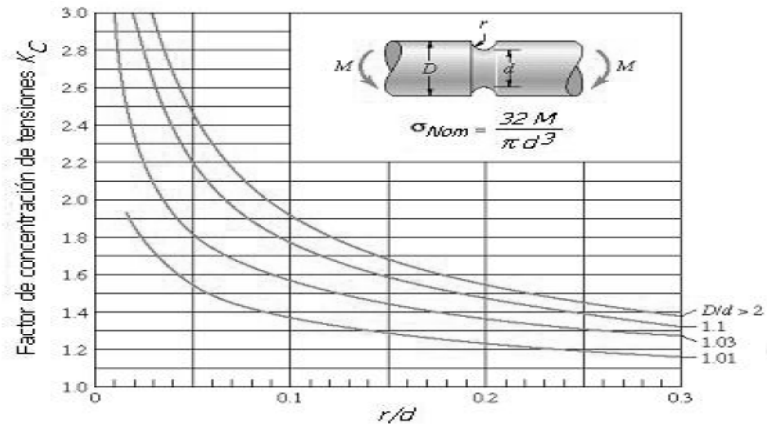
Fuente: PIOVAN, Marcelo Tulio. Elementos de Máquinas. p. 51.

Figura 20. **Concentración de tensiones para eje con muesca sometido a tracción**



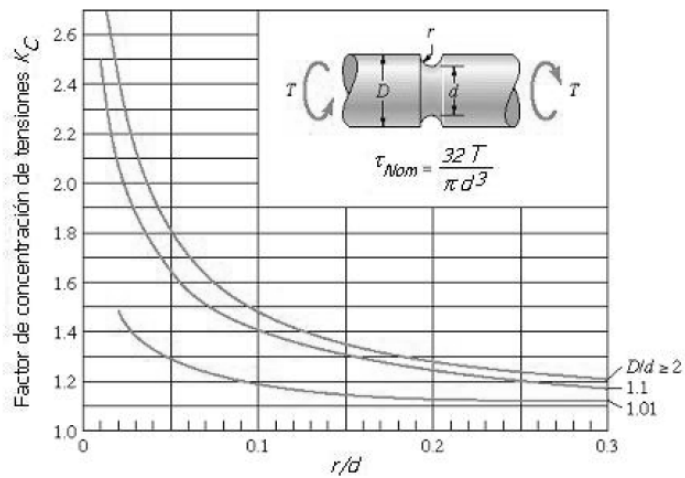
Fuente: PIOVAN, Marcelo Tulio. Elementos de Máquinas. p. 51.

Figura 21. **Concentración de tensiones para eje con muesca sometido a flexión**



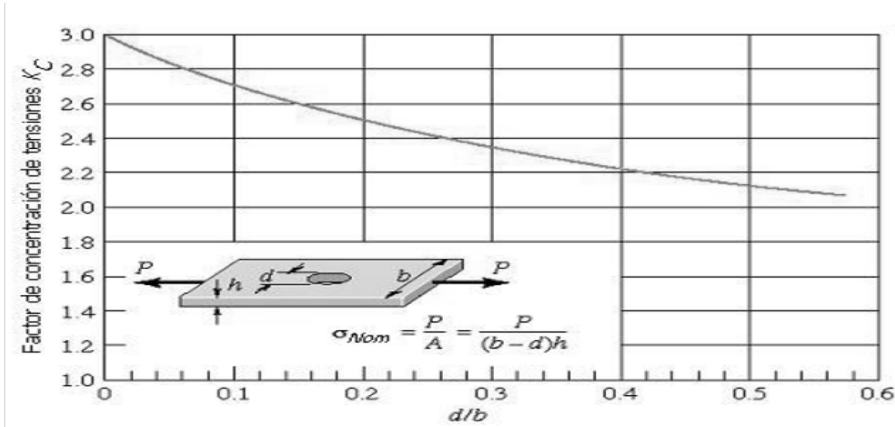
Fuente: PIOVAN, Marcelo Tulio. Elementos de Máquinas. p. 51.

Figura 22. **Concentración de tensiones para eje con muesca sometido a torsión**



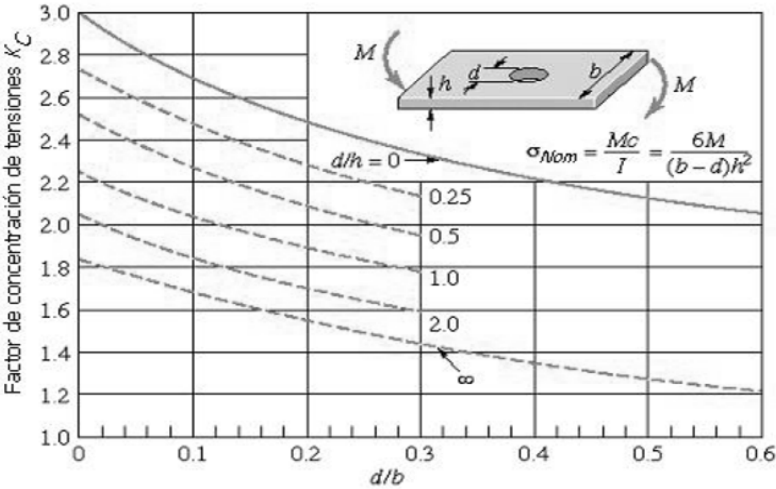
Fuente: PIOVAN, Marcelo Tulio. Elementos de Máquinas. p. 51.

Figura 23. **Concentración de tensiones para planchuela con agujero sometida a tracción**



Fuente: PIOVAN, Marcelo Tulio. Elementos de Máquinas. p. 51.

Figura 24. **Concentración de tensiones para planchuela con agujero sometida a flexión**



Fuente: PIOVAN, Marcelo Tulio. Elementos de Máquinas. p. 51.

En la expresión, el factor KC cambia de significado cuando cambia el tipo de tensión que magnifica. Esto quiere decir, que en los casos de las figuras, KC significa un factor de concentración de tensiones de corte o tangenciales, en cambio para los restantes casos se trata de un factor de concentración de tensiones normales.

La importancia en el uso de los diagramas radica en que son indispensables cuando se usa una metodología de cálculo basada en modelos de resistencia de materiales. En caso de contar con una plataforma computacional de análisis por elementos finitos u otra semejante, las gráficas mencionadas dejan de prestar utilidad.

### **1.3.1. Transparencia y homogeneidad**

En muchas aplicaciones, los materiales seleccionados para modelos fotoelásticos son plásticos transparentes a la luz visible, pero no deben ser cristales claros. Este requerimiento no es difícil de encontrar debido a que muchos materiales polímeros se colorean o se hacen opacos con la ayuda de rellenos. Los polímeros básicos generalmente son transparentes.

En ciertas aplicaciones especiales que involucran el estudio de esfuerzos residuales en materiales opacos, debe utilizarse un polariscopio infrarrojo. Pocos materiales son transparentes en la región ultravioleta o en la región infrarroja del espectro de radiación de energía. Los polariscopios pueden construirse para operar en cualquiera de estas regiones si se tienen ventajas en el uso de luz con longitudes de onda muy largas o muy cortas. Sin embargo, para el propósito de análisis de esfuerzos más convencionales, se prefiere el polariscopio con luz visible.

## Homogeneidad

Muchos materiales fotoelásticos se fabrican a partir de polímeros líquidos por medio del vaciado entre dos placas de vidrio que forman el molde. Cuando los materiales fotoelásticos se fabrican por un proceso de vaciado, las cadenas moleculares del polímero se orientan de manera aleatoria y los materiales son esencialmente homogéneos e isotrópicos. Sin embargo, ciertos plásticos se enrollan o estiran durante el proceso de producción. En este proceso de producción las cadenas moleculares se orientan en la dirección del enrollado o estirado. Estos materiales presentarán propiedades anisotrópicas (mecánicas y ópticas) y deben recocerse para orientar de manera aleatoria las cadenas moleculares para producir un material con propiedades isotrópicas.

### **1.3.2. Sensitividad y linealidad**

Es preferible un material altamente sensitivo debido a que esto incrementa el número de franjas que pueden observarse en el modelo. Si el valor de  $f_{\sigma}$  para un material utilizado para un modelo es bajo, se puede lograr un patrón de franja satisfactorio en el modelo con cargas relativamente bajas. Esta característica reduce la complejidad y tamaño de la carga y limita la distorsión del modelo. En el caso de cubiertas birrefringentes, se necesita un material con un valor bajo de  $f_{\epsilon}$  cubierta para reducir los efectos originados por el espesor de la cubierta.

Los materiales fotoelásticos están disponibles con valores de  $f_{\sigma}$  en un rango que va de 0,035 a 350 kilo Newton por metro. La situación con respecto a valores de  $f_{\epsilon}$  no es tan satisfactoria debido a que materiales con el bajo valor de  $f_{\epsilon}$  deseado no están disponibles aún.



Los valores de  $f_{\varepsilon}$  se encuentran en un rango de 0,005 a 0,050 milímetros. Debe tomarse en cuenta que un material con una sensibilidad de deformación de 0,0005 milímetros podría mejorar la aplicabilidad del método de la cubierta birrefringente de fotoelasticidad.

### Linealidad

Los modelos fotoelásticos se utilizan, generalmente, para predecir los esfuerzos, que se producen en un prototipo metálico. Debido a que existe una escala entre el modelo y el prototipo, debe aplicarse esta escala para establecer los esfuerzos en el prototipo, por lo que el material debe presentar una linealidad en las propiedades esfuerzo-deformación, óptico-esfuerzo y óptico- deformación. Se tienen pocos datos disponibles en la literatura técnica sobre la relación óptica-deformación, pero afortunadamente el método fotoelástico se utiliza para determinar la diferencia de esfuerzos y la carencia de datos sobre el comportamiento de la deformación. Las curvas típicas de esfuerzo deformación y orden de franja esfuerzo presentadas en la figura muestran el comportamiento característico de un polímero utilizado en fotoelasticidad.

Muchos polímeros presentan esta linealidad en la parte inicial de la curva. Sin embargo, a altos niveles de esfuerzos, el material puede presentar efectos no lineales. Por esta razón en las pruebas fotoelásticas asociadas con estos materiales no lineales se evitan los altos niveles de esfuerzos.

### **1.3.3. Propiedades de materiales fotoelásticos empleados**

La selección del material apropiado, para el modelo fotoelástico, es uno de los factores más importantes en un análisis fotoelástico. Desafortunadamente, no existe un material ideal y el investigador debe seleccionar a partir de una lista de polímeros disponibles, una vez que se ajuste a las necesidades de la investigación.

Es importante observar que la cantidad de plástico fotoelástico utilizado cada año no es suficiente para atraer la atención de una compañía de químicos en el sentido del desarrollo y producción de un polímero diseñado especialmente para aplicaciones fotoelásticas. Como una consecuencia, el investigador debe seleccionar un material modelo el cual, generalmente, se utiliza para otro fin, aparte del fotoelástico.

La siguiente lista muestra las propiedades que debe presentar un material fotoelástico ideal. El material debe:

- Ser transparente a la luz empleada en el polariscopio.
- Ser sensible al esfuerzo o deformación.
- Presentar características lineales con respecto a propiedades esfuerzo, deformación, propiedades orden de franja esfuerzo y propiedades orden de franja deformación.
- Ser homogéneo e isotrópico mecánica y ópticamente.
- No presentar comportamiento viscoelástico.

- Tener un alto módulo de elasticidad y un elevado límite proporcional.
- Tener sensibilidades  $f_{\sigma}$  o  $f_{\epsilon}$ , que esencialmente son constantes con pequeñas variaciones en la temperatura.
- Ser maquinable por medios convencionales.
- Estar libre de esfuerzos residuales.
- Estar disponible a un costo razonable.

#### **1.3.3.1. Resina**

Las superficies de las hojas comercialmente disponibles son de calidad óptica y el material está libre de esfuerzos residuales. Los modelos pueden maquinarse con el *router*; sin embargo, debido a que el material es extremadamente frágil, el corte puede ser un problema.

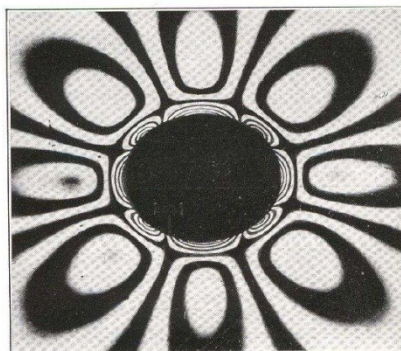
El homalite 100 no presenta *creep* apreciable; por lo tanto, el valor de franja del material puede considerarse como una constante para tiempos de carga que sobrepasen de los 10 a los 15 minutos. Debido a que la absorción de humedad en este material es muy lenta, los efectos ocasionados por el envejecimiento no afectan por varios días aún en condiciones de prueba muy húmedas. El material muestra una baja figura de calidad Q y un bajo índice de sensibilidad S. No se pueden alcanzar altos órdenes de franja sin que el modelo se fracture.

#### 1.4. Patrones de franjas oscuras

Todos los puntos de un modelo que tiene retardo  $p(t_1 - t)$  constante 2 forman una banda o una línea continua. Así una línea oscura o un lugar geométrico aparecen en la imagen del modelo para cada valor de  $n$  en la ecuación. Y, similarmente, una banda o un lugar geométrico brillante aparecen para cada valor de  $n$  en la ecuación siguiente. Cuando se examinan con luz blanca, los diversos órdenes fraccionarios causados por el retardo son hechos evidentes, por medio de una banda brillante de un color o tonalidad particular para cada orden; por tanto estas han sido señaladas con el nombre isocromáticas.

Las líneas brillantes y oscuras alternas formadas en luz monocromática son también isocromáticas y son distinguidas la una de la otra según el valor de  $n$ , consecuentemente, son referidas a menudo como la isocromática de cero, primer y segundo orden de interferencia y así sucesivamente.

Figura 25. **Franja típica de discontinuidad circular en un campo de cortante puro**



Fuente: PIOVAN, Marcelo Tulio. Elementos de Máquinas. p. 51.

### 1.4.1. Isoclínicas

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

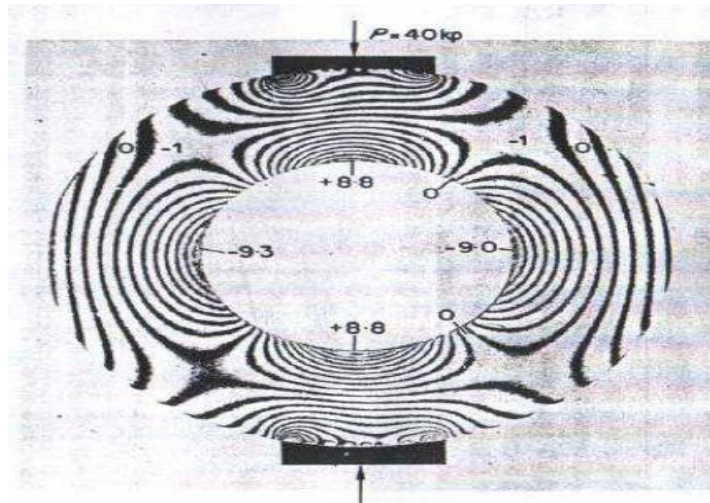
Cambiando el plano de polarización por rotación el polarizador y analizador moverá las áreas oscuras a otra posición, en la cual entonces es localizada una nueva serie de fotografías de estas áreas tomadas cada 15 grados cuando el polarizador y el analizador son rotados, la dirección de esfuerzos principales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

Características de las isoclínicas:

- Negras
- Definidas menos nítidamente que las isocromáticas
- A presión (tensión) constante, ellas varían cuando se rota simultáneamente el polarizador y el analizador manteniéndolos cruzados a 90 grados.
- Con el polarizador y analizador mantenidos fijos ellos varían con la tensión.

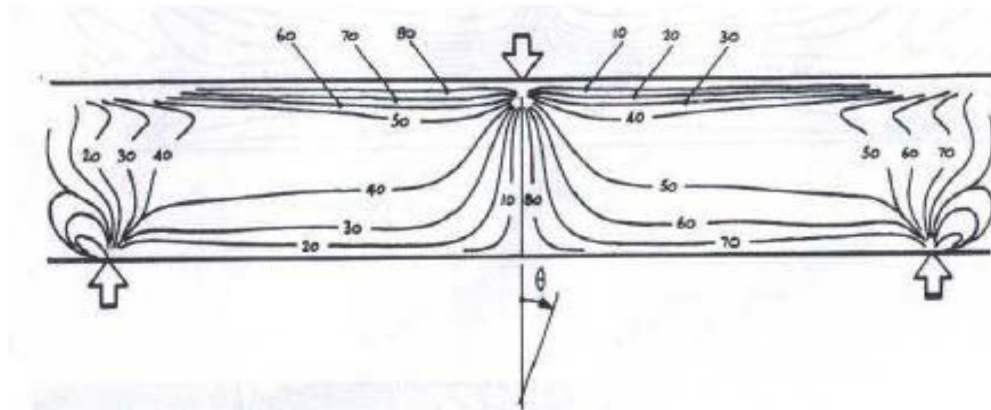
Se muestran en las figura algunos ejemplos de modelos cargados y de las franjas isoclínicas correspondientes.

Figura 26. **Franjas isoclínicas de un anillo redondo bajo compresión diametral obtenida por doble exposición holográfica**



Fuente: ROBERSTON, Kuske; WILEY A, Photoelastic stress analysis. p. 17.

Figura 27. **Franjas isoclínicas experimentalmente derivadas de una viga de plástico reforzada con fibra de carbono**



Fuente: ROBERSTON, Kuske; WILEY A, Photoelastic stress analysis. p. 18.

### **1.4.2. Isocromáticas**

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

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

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

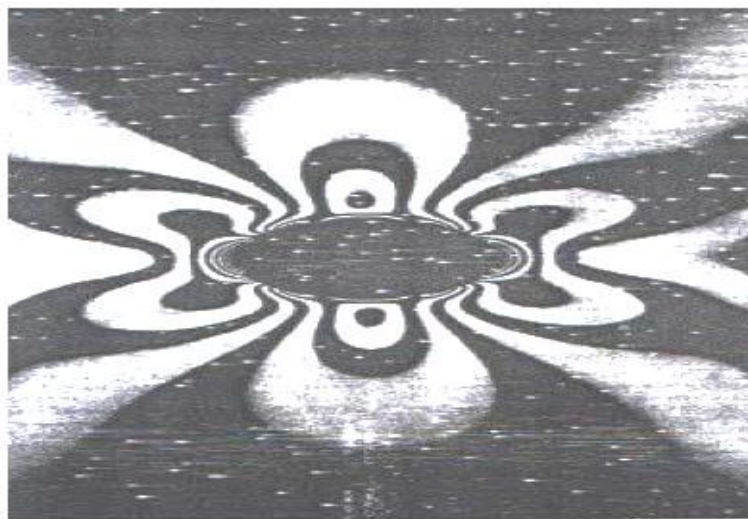
El esfuerzo tangencial principal es igual al máximo valor de corte asignado a una línea isocromática donde la intercepta la frontera. Gradiente de esfuerzos de frontera son rápidamente ploteados de esta importación y son extremadamente importantes cuando el impacto de distribución de carga está envuelto.

Características de las isocromáticas:

- Coloreadas, con excepción de las franjas de orden cero.
- Definidas más nítidamente que las isoclinicas.
- A tensión constante, ellas permanecen fijas cuando se rota el polarizador y analizador manteniéndolos cruzados a 90 grados.
- Con el polarizador y analizador manteniéndolos fijos, ellas varían con la tensión.

Se muestra en las figuras modelos cargados con sus respectivas franjas isocromáticas.

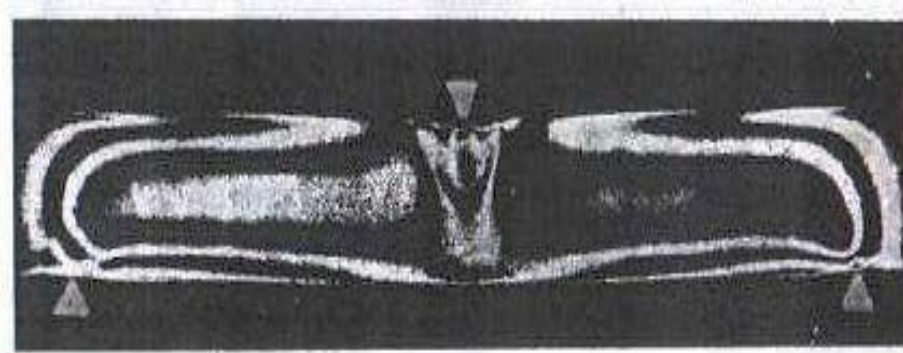
Figura 28. **Curvas isocromáticas en una plancha con agujero puesta a tensión**



Fuente: Enciclopedia Salvat. Ciencia y tecnología. Tomo 6. p. 65.



Figura 29. **Franjas isocromáticas experimentalmente derivadas de una viga de plástico reforzada con fibra de carbono**



Fuente: ROBERSTON, Kuske; WILEY A, Photoelastic stress analysis. p. 19.

### 1.5. **Escala de esfuerzos de prototipos de probetas**

A continuación se menciona los factores de intensidad de esfuerzos por método de Irwin y se tabulan en la tabla II. La carga se da en Newton y a continuación el factor  $K_{I, Irwin}$ .

Tabla II. **Factores de intensidad de esfuerzos obtenidos por el método de Irwin**

Carga, en N	$K_{I, Irwin}$
313.76	0.281
439.27	0.412
502.02	0.445
564.77	0.475
627.53	0.513
690.28	0.542

Fuente: ESTRADA, R. Determinación numérica del factor de intensidad de esfuerzos en fractura modo III y su validación experimental. p. 28.

En el primero de los métodos modificados de Irwin utilizado por Bradley y Kobayashi, se plantea la utilización de datos a partir de dos franjas.

Tabla III. **Factores de intensidad de esfuerzos obtenidos por el método modificado de Irwin por Bradley–Kobayashi**

Carga, en N	$K_{I, \text{Bradley-Kobayashi}}$
313.76	0.19
439.27	0.27
502.02	0.21
564.77	0.34
627.53	0.39
690.28	0.41

Fuente: ESTRADA, R. Determinación numérica del factor de intensidad de esfuerzos en fractura modo III y su validación experimental. p. 28.

En el método de Irwin modificado por Schoedl y Smith se utilizan los datos obtenidos de más de una franja, se tratan de hacer todas las mediciones posibles, con el fin de reducir el error producido en la medición.

En la mayoría de los análisis fotoelásticos la distribución de los esfuerzos en un modelo complejo es tratada como una función de la carga. Para determinar la distribución de esfuerzos en la forma más exacta posible, se requiere de una calibración cuidadosa del valor de franja del material  $f_{\sigma}$ .

Aunque dichos valores se pueden encontrar en la literatura técnica, estos no son muy exactos ya que estos valores varían, como ya se mencionó, con el fabricante, la temperatura y la antigüedad. Por esta razón es siempre necesario calibrar cada hoja de material fotoelástico cada vez que se realiza la prueba.

Para encontrar el valor de  $f_{\sigma}$ , se considera un espécimen sujeto a un esfuerzo de tensión simple que tiene un ancho  $b$  y un espesor  $h$  el cual es empleado como miembro para la calibración.

El esfuerzo axial inducido en el espécimen a tensión por la carga  $P$  puede ser expresado como:

$$\sigma_1 = (P / (bh)) \quad \text{y} \quad \sigma_2 = 0$$

La diferencia de esfuerzos principales en un ensayo fotoelástico en un patrón de franjas isocromáticas está dada por la ecuación:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = (N f(\sigma)) / h$$

Sustituyendo las ecuaciones (6,1) en la ecuación, se tiene que el valor de franja del material  $f_{\sigma}$  puede ser determinado por:  $f(\sigma) = (P / (b N))$ .

## **1.6. Interpretación de imágenes**

La fotoelasticidad es una técnica de un campo completo que permite obtener las direcciones de la tensión principal y las diferencias de la tensión principal en el patrón. En el enfoque clásico, la interpretación de la franja fotoelástica se hace manualmente de una manera puntual. Las técnicas modernas que usan procesamiento de imagen digital para el recuento automático de la franja se basan en algunos métodos de cambio de fase.

Muchos autores han propuesto el uso de más de una longitud de onda para producir un cambio de fase en patrones fotoelásticos. La fotoelasticidad RGB usa este principio, adquiriendo la imagen usando una videocámara RGB y después separando las imágenes roja, verde y azul.

Otros han sugerido la fotoelasticidad de media franja, donde sólo se permite una franja en el patrón isocromático. Usando este enfoque se pueden obtener parámetros isocromáticos fácilmente aunque con menos resolución.

Los enfoques recientes se basan en escalonamiento de carga, donde se aumenta (o disminuye) el sistema de cargas que actúa en el modelo, haciendo el cambio de fase. Este enfoque no es tan genérico porque en la fotoelasticidad tridimensional no se puede cambiar las cargas que actúan en las porciones.

Por último, se puede cambiar la fase fotoelástica modificando algunos arreglos en el polariscopio, tales como las posiciones de la placa de un cuarto de onda o las posiciones del analizador. Este enfoque parece ser el más simple porque no tiene restricciones para las aplicaciones estáticas y porque no requiere cámaras RGB o filtros de luz diferentes, aunque el procesamiento de fase puede que no sea el más simple.

En este trabajo se usa el método de cambio de fase de cuatro imágenes propuesto por N. Plou.zennec y otros, puesto que el arreglo experimental es simple, usando apenas un polariscopio plano y equipos de grabación de imágenes.

$$I = (I_0)/2 \{1 + \cos (2\beta - 2\alpha) \cos (2\alpha) - \sin (2\alpha) \sin (2\beta - 2\alpha) \cos (2\pi N)\}$$

Donde  $\alpha$  es la dirección de las tensiones principales,  $\phi$  es el ángulo entre el analizador y el polarizador,  $N$  es el orden de franja y  $I_0$  es el contraste de imagen.

Para obtener los parámetros fotoelásticos  $\alpha$  y  $N$  de un polariscopio plano, se debe introducir un cambio de fase. Usando cuatro cambios de fase, se obtienen cuatro expresiones diferentes de la ecuación 1. Por lo tanto, este sistema puede resolverse para los parámetros envueltos (discontinuos).

La primera imagen se recoge cuando  $\phi$  es igual a cero y el eje del polarizador se sitúa a  $+45^\circ$  del eje de referencia. La ecuación 1 queda de la siguiente manera:

$$I_1 = (I_0 / 2) \{1 - \cos^2(2\alpha) \sin^2(\pi N)\}$$

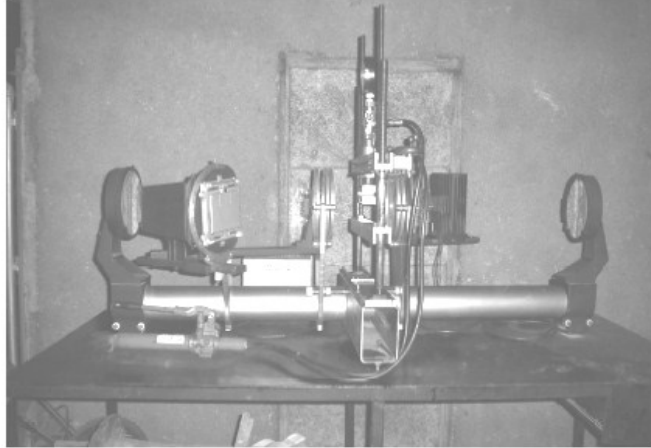
Sin embargo, al colocar el eje del polarizador paralelo al eje de referencia y haciendo que el ángulo  $\phi$  sea igual a  $+45^\circ$ ,  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , la ecuación 1 queda así respectivamente:

$$I_2 = I_0 [0,5 + \sin(2\alpha)\cos(2\alpha) \sin^2(\pi N)]$$

$$I_3 = I_0 [1 - \sin^2(2\alpha) \sin^2(\pi N)]$$

$$I_4 = I_0 \sin^2(2\alpha) \sin^2(\pi N)$$

Figura 30. **El polariscopio**



Fuente: laboratorio Diseño de Máquinas Facultad de Ingeniería, USAC.

## 2. EL POLARISCOPIO

Las ondas luminosas se transmiten vibrando en todas las direcciones perpendicularmente al eje principal de la onda.

Por medio de la reflexión, la luz se polariza. Dirigiendo a un espejo, un rayo luminoso, con una incidencia de 55 grados, se selecciona su salida al ser reflejado, ya que sólo vibra en el plano de reflexión, recibido otra vez, en ángulo de 55 grados por un segundo espejo, volverá a salir reflejado, con mayor o menor intensidad, pasando por reflexión nula, dependiendo de la posición de dicho segundo espejo respecto al plano del rayo luminoso polarizado, que recibe.

Si se coloca un polarizador sobre la platina y se hace girar se ve como se pasa de un máximo de luminosidad a un mínimo, ya que si la luz coincide con los planos del cristal, o no, entonces pasa más o menos luz.

El primer espejo L que recibe el rayo luminoso es un cristal transparente que debido a la inclinación del mismo respecto al rayo (35 grados) lo refleja hacia un espejo E, que lo devuelve y envía, atravesando en esta ocasión L, hacia C.

El aparato de máquinas científicas es reproducción del de Nörremberg, que además, de servir para observar este fenómeno, se utiliza para observar diversos efectos de la luz polarizada al atravesar cuerpos apropiados, colocados en una platina, señalada en la ilustración como P. D es una articulación para que C gire.

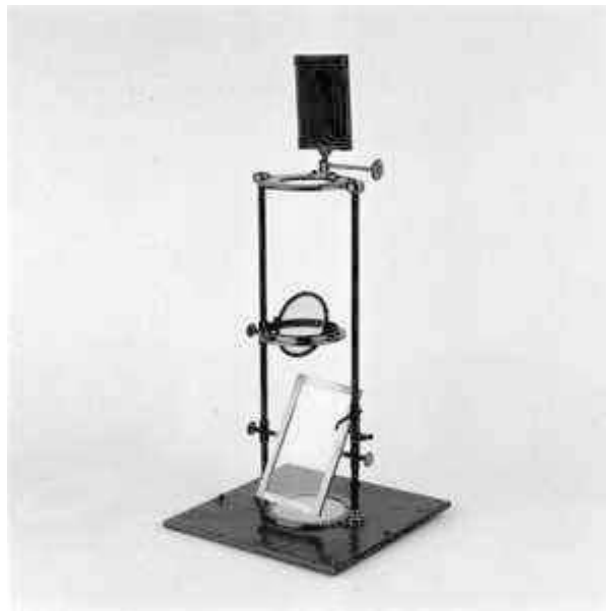
Señalar que: E es un espejo plano, L una lámina de fino cristal transparente que gira sobre un eje graduado. C es un vidrio negro que puede girar horizontal y verticalmente y que las columnas y platinas son de latón.

## 2.1. Conocer un polariscopio

Se puede definir como: instrumento que sirve para comprobar si una luz se halla o no polarizada.

Instrumento para averiguar si un rayo de luz emana directamente de un foco o está ya polarizado.

Figura 31. **Polariscopio**



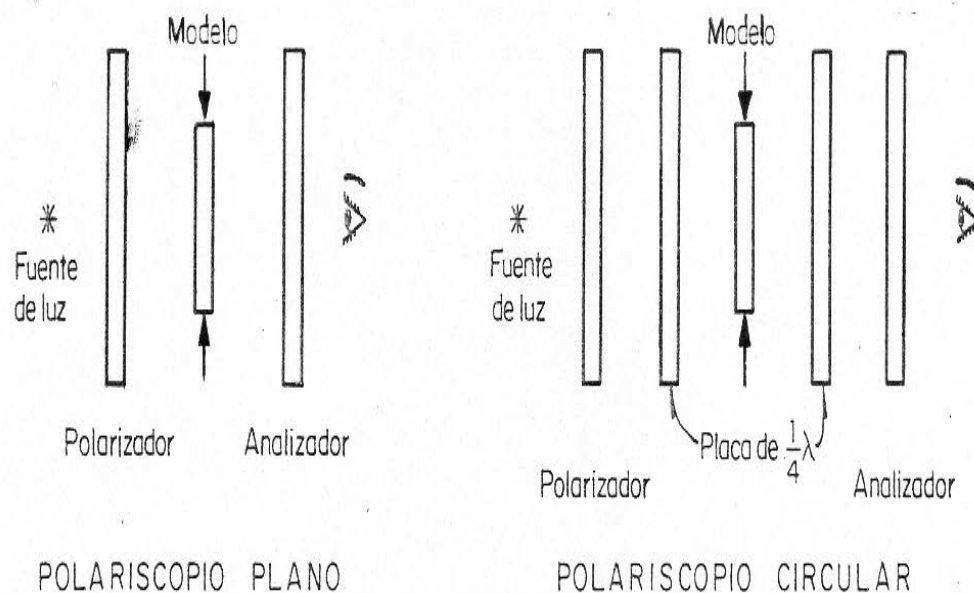
Fuente: <http://www.paraquesirve.net/p/polariscopio>. Consulta: marzo de 2011.



## 2.2. Tipos de polariscopios que se conocen

El dispositivo óptico utilizado para los análisis de esfuerzos por el método fotoelástico bidimensional, es el polariscopio, el cual utiliza la propiedad de la luz polarizada para su operación; en general, se utilizan dos tipos: el plano y el circular, el nombre de estos polariscopios depende del tipo de luz polarizada que utilizan para su operación.

Figura 32. Tipos de polariscopio



Fuente: Universidad Autónoma de Querétaro. Manual del curso de Mecánica. p. 35.

## 2.3. Identificación de cada parte

Fuente de sodio: emite luz natural principalmente en las longitudes de onda entre 589,0 y 589,6 nanómetro.

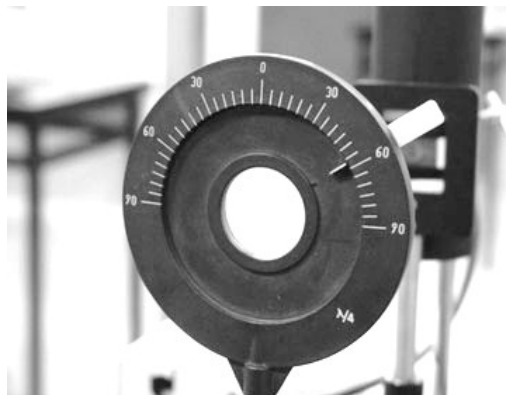
Figura 33. **Fuente de sodio**



Fuente: <http://www.scitoys.com/scitoys/scitoys/light/polariscope.html>. Consulta: marzo de 2011.

Láminas  $\lambda/4$  para la luz: introducen un desfase de  $\pi/2$ , entre las componentes ordinaria y extraordinaria que vibran según sus líneas neutras.

Figura 34. **Lámina para la luz**



Fuente: <http://www.scitoys.com/scitoys/scitoys/light/polariscope.html>. Consulta: marzo de 2011.

Lámina polaroide: absorbe selectivamente una dirección de vibración de la luz incidente, de forma que si incide luz natural, a la salida se tiene luz linealmente polarizada vibrando según el eje de transmisión.

Figura 35. **Lámina polaroide**



Fuente: <http://www.scitoys.com/scitoys/scitoys/light/polariscope.html>. Consulta: marzo de 2011.

Luz problema: para determinar su estado de polarización por medio de las pruebas de análisis mediante distintas láminas.

Figura 36. **Lámina polaroide**



Fuente: <http://www.scitoys.com/scitoys/scitoys/light/polariscope.html>. Consulta: marzo de 2011.

#### **2.4. Tipos de iluminación que se manejan con los polariscopios existentes**

A continuación se mencionan los tipos de iluminación:

- Iluminación policromática
- Iluminación monocromática

##### **2.4.1. Iluminación policromática**

Luz compuesta por más de una longitud de onda de luz blanca: y compuesta por todas las longitudes de onda del espectro visible, de ahí el nombre. Pues se compone de varios cromos.

##### **2.4.2. Iluminación monocromática**

Luz monocromática: compuesta esencialmente por una longitud de onda de luz. A diferencia de la luz blanca, que está formada por muchos componentes. Es aquella que está formada por componentes de un solo color. Es decir, que tiene una sola longitud de onda, correspondiente al color.

### **3. MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO**

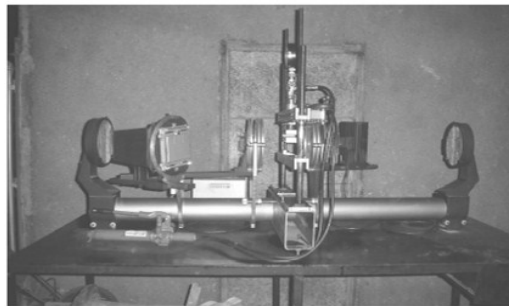
#### **3.1. Manual de operación**

Contiene la información necesaria para llevar a cabo de manera precisa y secuencial, las tareas y actividades operativas que son asignadas a cada uno de los equipos.

##### **3.1.1. Información del polariscopio Chapman**

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

Figura 37. **Polariscopio Chapman y todos sus accesorios**



Fuente: laboratorio de Diseño de Máquinas, Facultad de Ingeniería, USAC.

### **3.1.2. Operación del polariscopio Chapman en general**

El sistema que cuenta con una estructura sólida que puede moverse perpendicular al cuerpo principal para poner en posición adecuada al pistón y la base que soporta la probeta, además esta base se puede bajar y subir con manecillas acopladas a tornillos donde se desplazan, todo este mecanismo permite colocar en posición óptima la probeta para hacer el ensayo, pudiendo realizarse a compresión, tensión y deflexión.

Se cuenta con un deformometro que se encarga de comunicar al reloj comparador la cantidad de carga que se está aplicando. La teoría indica que por cada milésima de pulgada de deformación equivale a 8,2 libras por pulgada cuadrada de carga es necesario calibrar estos elementos para obtener lecturas reales.

#### **3.1.2.1. Equipo eléctrico e iluminación**

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

#### **3.1.2.2. Equipo mecánico**

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

## Sistema del cuerpo principal

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

### **3.1.2.3. Equipo hidráulico, de tracción, compresión y anclaje**

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

### **3.1.2.4. Equipo de reflexión de luz y fotográfico**

Contiene un interruptor de tres posiciones con dos transformadores, el primero entra 110 voltios, salida de 6 voltios, para una bombilla que genera un tipo de luz suave, el segundo entra 110 voltios, salida 240 voltios, para una bombilla que genera un tipo de luz fuerte.

Un sistema donde se pueden obtener los resultados de la prueba impresa en una fotografía para posteriormente analizar con detalle para la interpretación y análisis correcto.

### **3.2. Manual de mantenimiento**

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

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

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

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

La revisión del sistema eléctrico, los cables, los transformadores y las bombillas es necesaria para evitar desperfectos que se puedan dar y obtener la visibilidad correcta en la pieza.

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



### **3.2.1. Síntesis descriptiva de los diferentes tipos de mantenimiento**

Existen cuatro tipos reconocidos de operaciones de mantenimiento, los cuales están en función del momento en el tiempo en que se realizan, el objetivo particular para el cual son puestos en marcha y en función a los recursos utilizados, así se tiene:

- Mantenimiento correctivo

Este mantenimiento también es denominado mantenimiento reactivo, tiene lugar luego que ocurre una falla o avería, es decir, sólo actuará cuando se presente un error en el sistema. En este caso si no se produce ninguna falla, el mantenimiento será nulo, por lo que se tendrá que esperar hasta que se presente el desperfecto para recién tomar medidas de corrección de errores.

- Mantenimiento preventivo

Este mantenimiento también es denominado mantenimiento planificado, tiene lugar antes de que ocurra una falla o avería, se efectúa bajo condiciones controladas sin la existencia de algún error en el sistema. Se realiza a razón de la experiencia y pericia del personal a cargo, los cuales son los encargados de determinar el momento necesario para llevar a cabo dicho procedimiento; el fabricante también puede estipular el momento adecuado a través de los manuales técnicos.

- Mantenimiento predictivo

Consiste en determinar en todo instante la condición técnica (mecánica y eléctrica) real de la máquina examinada, mientras esta se encuentre en pleno funcionamiento, para ello, se hace uso de un programa sistemático de mediciones de los parámetros más importantes del equipo. El sustento tecnológico de este mantenimiento consiste en las aplicaciones de algoritmos matemáticos agregados a las operaciones de diagnóstico, que juntos pueden brindar información referente a las condiciones del equipo.

- Mantenimiento proactivo

Este mantenimiento tiene como fundamento los principios de solidaridad, colaboración, iniciativa propia, sensibilización, trabajo en equipo, de modo tal que todos los involucrados directa o indirectamente en la gestión del mantenimiento deben conocer la problemática del mismo.

### **3.2.2. Cuidados y técnicas al usar el equipo**

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

El polariscopio consta con un fotograma de esfuerzos, que tienen una capacidad máxima de 1 500 psi a tensión, compresión y deflexión. La carga puede ser aplicada excéntricamente dentro del espacio de la probeta. El espacio de la probeta es de 13 pulgadas de ancho y puede ser ajustado verticalmente desde 2 a 16 pulgadas por medio de controles de manecillas en forma de rueda operada con la mano que abre y cierra la distancia entre la parte de arriba o debajo de la viga en forma de cruz.

El marco de carga se desliza horizontalmente y verticalmente también puede ser deslizada más allá del campo óptico para montar el modelo sin necesidad de hacerlo en el espacio comprendido entre el analizador y el polarizador.

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

Los ángulos de los ejes de las abscisas están opuestos uno al otro y bajo esta condición las aberraciones son canceladas.

Todos los espejos están aluminizados con monóxido de silicón para que puedan ser limpiados sin daño de rayarse. Todos los polariscopios de investigación trabajan con una abertura de diafragma.

Esto representa un compromiso óptimo entre la cantidad de luz a través del sistema para imágenes brillantes y los requerimientos que los ases de luz se mantengan para una correcta definición de los bordes del modelo.

En esta apertura el campo esta plano sobre su diámetro entero a muy pequeñas tolerancias. El polariscopio es tan efectivo que el campo entero llenara las diagonales de 6". De los 4 x 5" .Del formato de la cámara, los 45 isoclínicas son mostrados superpuestos en las isocromáticas.

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

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

El plano es sujetado al aeropolarizador por dos tornillos, estando correctamente orientados. El segundo plano está sujetado al aro de en medio por dos tornillos similares y ha sido correctamente orientado, sin embargo, el aro intermedio tiene cuatro agujeros tapados para los tornillos con 90 de separación.

Así pues el segundo plano puede ser reemplazado una o dos posiciones, 90 uno al otro. En una se observan partes iluminadas y en otras oscuras.

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

### **3.2.3. Revisiones periódicas al realizar un ensayo**

Alineación de los soportes de la probeta misma para que quede dentro del fotograma de carga.

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

### 3.2.4. Revisiones mayores después de varias pruebas

Realizar todas las calibraciones indicadas con mayor precisión en todos los componentes del equipo para mantener su perfecto funcionamiento, dependiendo del uso del mismo.

Tabla IV. Programa de mantenimiento preventivo en función del equipo y uso del mismo

Por día	Por semana	Por mes	Mantenimiento mayor
Equipo óptico lentes, espejos, analizadores.	Evitar que acumulen polvo e impurezas.	Con un paño y líquido para limpieza más profunda, revisar uniones.	Debido a uso en varias pruebas se debe calibrar y ajustar.
Equipo hidráulico se deben revisar mangueras, válvulas, manómetro y bomba.	Evitar que acumulen suciedad y al mismo tiempo revisar, alguna posible fuga de hidráulico.	Revisar minuciosamente las uniones en mangueras y el equipo así como con la bomba y su accionamiento.	Verificar el nivel de líquido hidráulico y el trabajo del pistón así como el buen funcionamiento del manómetro.
Equipo mecánico, cuerdas, poleas, cadenas y tornillos, así como ranuras y donde ocurre la aplicación de cargas.	Verificar que al trabajar no tengan suciedad en sus guías.	Realización de limpieza y engrase de las diferentes guías así como las cadenas y poleas.	Verificar a fondo el buen accionar del equipo con el fin de evitar alguna falla por fatiga o desgaste.
Sistema eléctrico, transformador, conexiones, lámparas e interruptor, una limpieza para quitar polvo y suciedad que tenga por ambiente.	Revisión de equipo y limpieza de los mismos con el fin de no provocar deterioros, revisando a uniones o empalmes que existan.	Análisis del buen funcionamiento, del uso el equipo trabaje adecuadamente sin presentar, ninguna inconveniencia.	Verificar el equipo de transformador, llevarlo al laboratorio de ing. eléctrico para chequeo por uso y deterioro.

Fuente: elaboración propia.

## **4. PRÁCTICAS DE LABORATORIO DE DISEÑO DE MÁQUINAS 1**

### **4.1. Diseño de guía de prácticas de laboratorio**

El Laboratorio de Fotoelasticidad pretende introducir al estudiante de Ingeniería Mecánica a profundizar y ampliar sus conocimientos.

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

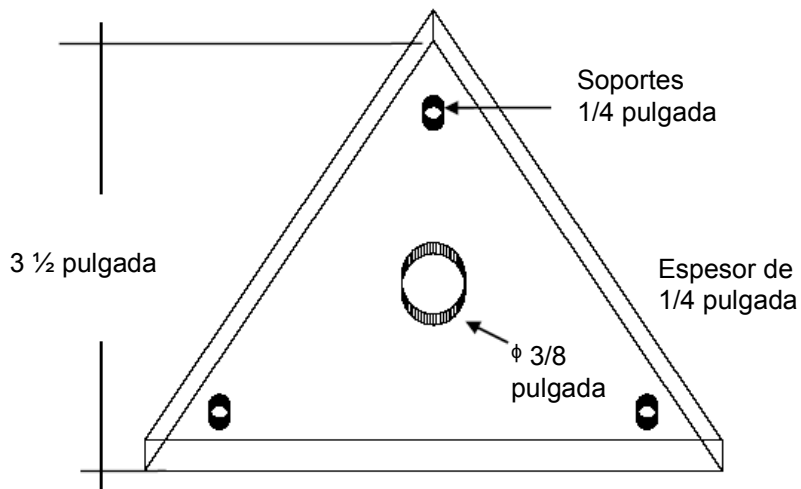
#### **4.1.1. Ensayos a tensión**

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

La prueba de tensión por fotoelasticidad ilustra el comportamiento de los esfuerzos en una probeta de Plexiglás. La importancia de la concentración de esfuerzos puede mostrarse en este ejemplo.

Se pone la probeta, de un material elástico que tenga una muesca y que está sometida a tensión axial el esfuerzo en la orilla del agujero alcanzará un máximo de tres veces el esfuerzo normal.

Figura 38. **Probeta con muesca para prueba de tensión**



Fuente: elaboración propia.

En donde influyen varios factores:

- Alineación de los soportes de la probeta misma para que quede dentro del fotograma de carga.
- Tamaño y forma de la probeta, especialmente no debe sobrepasar de 4 x 5 x 3/8" (1 016 x 1 270 x 95,25 milímetros). Por las bajas cargas que se aplicarán para alcanzar a ver las líneas de deformación isoclínicas e isocromáticas.



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

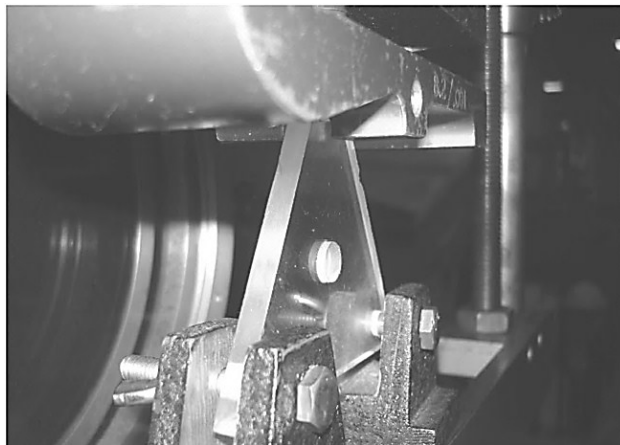
#### **4.1.1.1. Práctica 1**

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

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

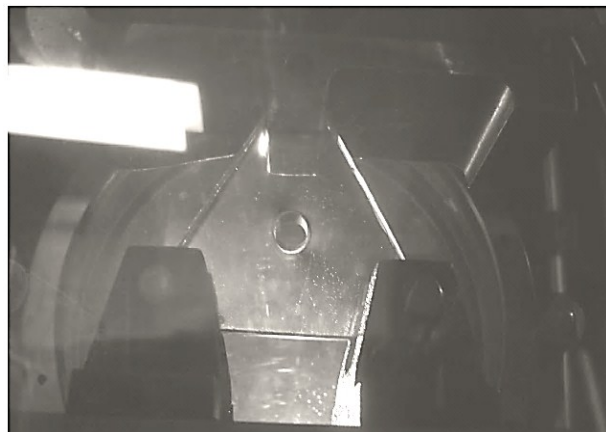
El modelo en forma de triángulo está sujetado en sus vértices para lograr que no sufra movimiento en la prueba, a la hora de aplicarle la carga y esta se dé en forma uniforme como se muestra en la figura 35.

Figura 39. **Forma de sujetar el modelo, prueba a tensión**



Fuente: laboratorio de Diseño de Máquinas, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 40. **Modelo sin carga**



Fuente: laboratorio de Diseño de Máquinas, Facultad de Ingeniería, USAC.

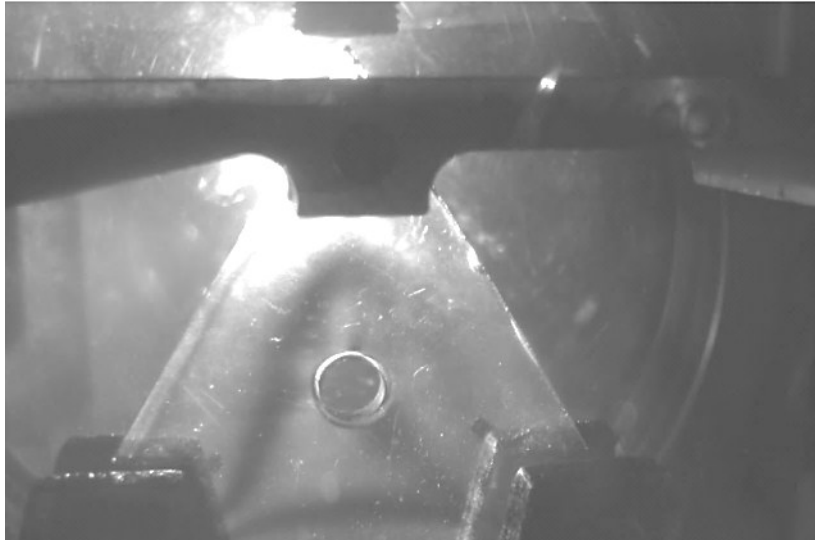
Como se muestra en la figura 29, el modelo está listo para ser puesto a prueba careciendo de carga, el manómetro marca cero en su escala. Por lo mismo, el material transparente no ha sufrido ningún cambio con respecto a su doble refracción o sea que no ha parecido ninguna irregularidad, como lo sería una línea isocromática consecuencia de aplicar una carga, puesto que la luz monocromática ya está encendida por eso la fotografía se toma desde un ángulo determinado donde no afecte la imagen al tomarla.

#### **4.1.1.2. Práctica 2**

En la figura 30, a continuación se aplica una carga de 80 libras por pulgada cuadrada en el modelo se puede ver como aparecen las franjas de color rojo-violeta, amarillo, azul verde y negro. Todas estas franjas se distribuyen en la probeta a lo largo y ancho. Estas franjas comienzan a notarse que salen de los apoyos. Es de esperar, ya que los apoyos son muescas, que sirven para sujetar el modelo. Es normal que, en ese sector cerca de los agujeros se desarrolle la concentración de tensiones, donde está localizada cada muesca es una parte débil porque está casi en la periferia de la probeta exactamente en las aristas y no existe mucho material donde soporte la carga a tensión.

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

Figura 41. **Modelo cargado a 80 psi**



Fuente: laboratorio de Diseño de Máquinas, Facultad de Ingeniería, USAC.

Al analizar la figura 30, luego se aplica una carga de 130 libras por pulgada cuadrada, esta carga hace que aparezcan más franjas y las franjas existentes a 80 libras por pulgada cuadrada se pronuncien más y sean nítidas en su forma y desde luego abarquen todo el área del modelo cargado, llegando hasta la muesca del centro lográndose ver como las franjas negras bordean la superficie de esta muesca y las franjas que salen de donde se sujeta el modelo se junten.

Figura 42. **Modelo cargado a 130 psi**



Fuente: laboratorio de Diseño de Máquinas, Facultad de Ingeniería, USAC.

Por inspección cuidadosa en la figura 31, se contará la cantidad de franjas ya que será la última carga que se aplicará sin llegar a la fractura y donde se tiene una imagen nítida de las franjas isocromáticas para hacer los cálculos de los esfuerzos máximos normales y de corte. Se necesita tener un punto de referencia para lograr hacer el análisis numérico cuantitativo y se parte de la tangente en el modelo o la parte superficial donde los esfuerzos son cero o donde los esfuerzos se anulan y se cuenta el orden de las franjas hacia la parte de adentro hasta la muesca del centro, para saber el esfuerzo cortante máximo en lo largo de la respectiva franja.

Se tienen 3 franjas bien claras que salen de los apoyos de la parte inferior hacia el apoyo superior, entonces se aplica la ecuación. Para la banda de orden tres se tiene:

$$\tau_{\text{Máx}} = nf / t$$

$$\tau_{\text{Máx}} = (3 b \times 700) / 0,25 = 8\,400 \text{ lb/ pulgada}^2$$

Se tiene un esfuerzo de corte de 8,400 libras por pulgada cuadrada a lo largo de la franja de orden tres.

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

$$\delta = p/n$$

$$\delta = 130/3 = 43,3 \text{ psi}$$

Se tiene un esfuerzo máximo normal de 43,3 libras por pulgada cuadrada.

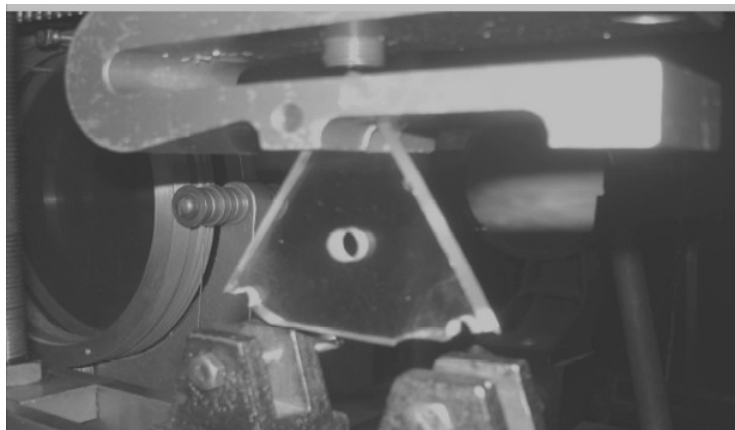
Como se observa en las figuras, las diferentes etapas del modelo cargado a tensión muestran los cambios en las franjas isocromáticas y esto define, las características de resistencia mecánica que el material tiene y cómo se comporta. La forma geométrica propia de la probeta hace que los esfuerzos se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

Al analizar la figura 30 otra vez permite visualizar mejor las franjas. Las franjas que se proyectan del punto izquierdo hacia el derecho en la parte inferior, toman una forma curva de la parte de abajo hacia arriba, esto quiere decir, que esta parte está sufriendo un momento de flexión, donde las muescas son la causa de la concentración de esfuerzos de flexión que la carga ocasiona en esa área, indicando que está a compresión en la parte de abajo y tensión en la parte de arriba en la muesca. La parte negra que se logra visualizar indica el esfuerzo máximo de corte perpendicular al plano del modelo.

En las partes laterales del triángulo especialmente en el centro se nota que las franjas toman una curva más suave como en línea recta hacia la parte de arriba o arista superior, esto indica que esta sección de área está a tensión pura. En la parte inferior y superior cerca de los apoyos se ve una pequeña curva indicando posible compresión y tensión de esfuerzos de flexión.

Esta es la forma como las tensiones se comportarían en una pieza o elemento en funcionamiento en forma de triángulo con una muesca al centro y muescas en las aristas para sujetarla. Una muy buena muestra para lograr un análisis ideal para compararlo con lo real.

Figura 43. **Fractura del modelo a tensión a 160 psi**



Fuente: laboratorio de Diseño de Máquinas, Facultad de Ingeniería, USAC.

Se ve en la figura 39, la probeta fallo en las muescas que es donde se concentraron los esfuerzos, logrando comprobar el análisis previo por medio de las franjas que indicaban una alta concentración de esfuerzos, debido a la carga aplicada y forma geométrica y la disposición de sujeción de la probeta, la carga última aplicada fue de 160 libras por pulgada cuadrada.

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

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

#### **4.1.2. Ensayos a compresión**

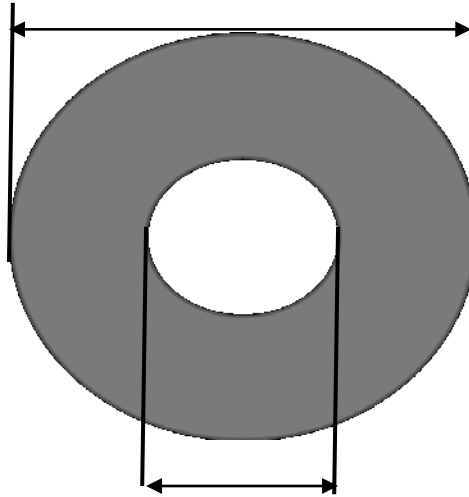
La resistencia a compresión de un material es importante y como los esfuerzos se distribuyen es de especial interés en la prueba de fotoelasticidad, además la resistencia a tensión es solamente una fracción de su resistencia a compresión esta clase de ensayo se acepta generalmente como base de aceptación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

Las cuales son:

- Alineación de los soportes de la probeta y probeta misma para que quede dentro del fotograma de carga.
- Tamaño y forma de la probeta, especialmente no debe sobrepasar de 4 x 5 x 3/8 pulgadas. Por las bajas cargas que se aplicarán para alcanzar a ver las líneas de deformación isoclínicas e isocromáticas.



Figura 44. **Probeta en forma de anillo para la prueba de compresión**



Fuente: elaboración propia.

- Velocidad de carga tiene que ser lenta para lograr distinguir el progreso de las franjas de esfuerzos en la probeta y lograr el análisis adecuado.
  - d. 3 ½ pulgada
  - d. 1 1/4 pulgada
  - Espesor de 3/8 pulgada
- La temperatura a la que se realiza la prueba es la del ambiente para evitar que el material este sometido a otra clase de condición que afecte sus características mecánicas.
- La luz debe estar en perfecto alineamiento con la probeta para abarcar toda el área que está siendo afectada por la carga y así visualizar las franjas de esfuerzos.

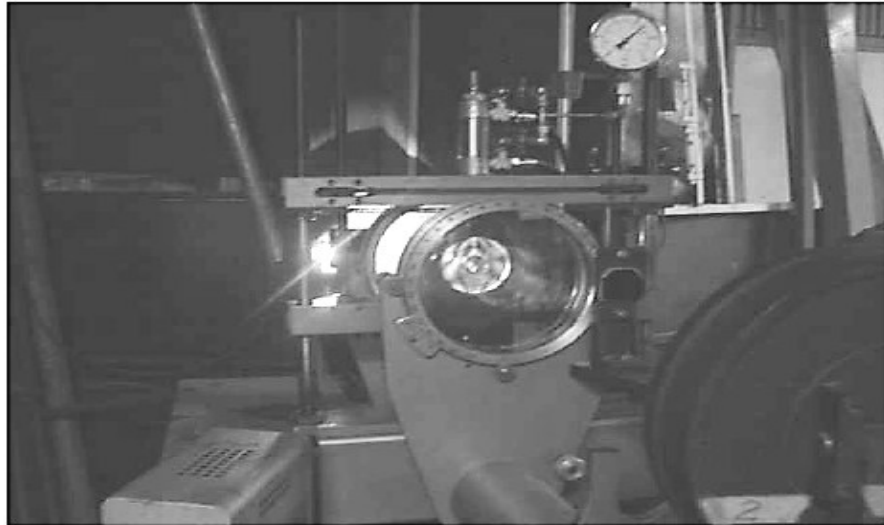
#### 4.1.2.1. Práctica 1

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

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

En la figura 40, se ve al polariscopio Chapman en una vista completa, cómo está dispuesta la probeta y cómo la luz monocromática es emitida desde su fuente de luz, teniendo así una perspectiva de la manera como se realiza el ensayo a compresión por fotoelasticidad.

Figura 45. **Prueba a compresión vista completa del polariscopio**



Fuente: laboratorio de Diseño de Máquinas, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 46. **Ensayo a compresión con una carga de 230 psi**



Fuente: laboratorio de Diseño de Máquinas, Facultad de Ingeniería, USAC.

#### 4.1.2.2. Práctica 2

Se analiza la figura 34 y se ve el comportamiento típico de las franjas isocromáticas concentrándose alrededor del agujero del modelo. Esta región de concentración de esfuerzos alerta de una posible falla.

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

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

Para la banda de orden 6 se tiene:

$$\tau_{\text{Máx}} = nf / t$$

$$\tau_{\text{Máx.}} = 6 \text{ b x } 700 / 0,375 = 11\,200 \text{ lb / pulgadas}^2$$

Se tiene un esfuerzo de corte máximo de 11 200 libras por pulgada cuadrada a lo largo de la franja de orden seis.

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

$$\delta = p/n$$

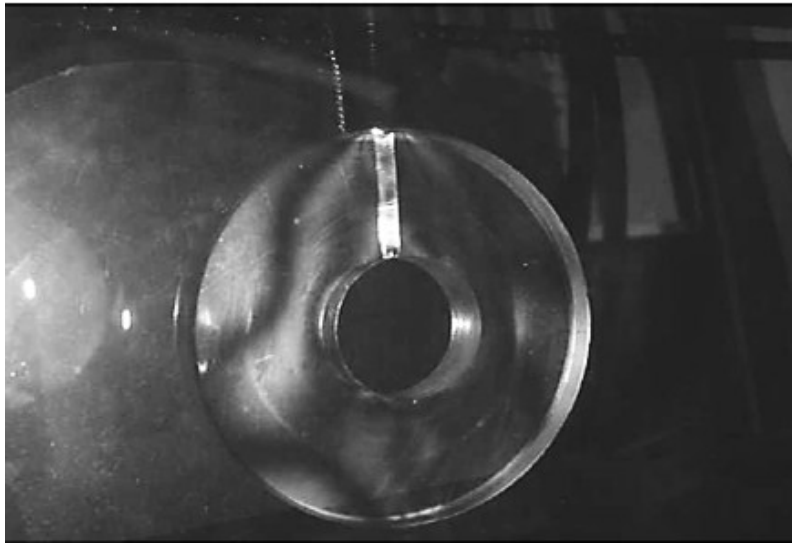
$$\delta = 270 / 6 = 45 \text{ psi}$$

Se tiene un esfuerzo máximo normal de 45 psi.

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

En la figura 47, el modelo se carga a 310 psi sufriendo una fractura en su sección transversal se logra ver una parte de color más clara ya que el material sufrió un corte cambiando el color normal de la probeta, como era de esperarse la falla está localizada desde la parte superior donde se aplica la carga estática, hasta el agujero, comprobando que el agujero es una parte débil y alta en concentración de esfuerzos. El esfuerzo cortante es el causante de que los elementos fallen. Cuando las piezas están en constante rotación las fallas por fatiga constituyen probablemente un 90 por ciento de todas las fracturas comunes y se desarrollan después de un número de aplicaciones de carga, generalmente, a un nivel de esfuerzo inferior a la resistencia de cadencia del material.

Figura 47. **Falla de la probeta a compresión a 310 psi**

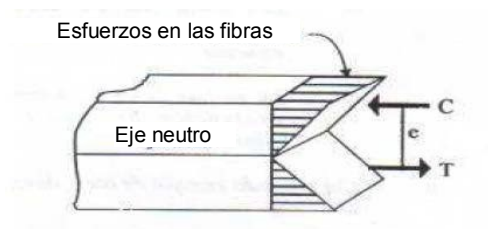


Fuente: laboratorio de Diseño de Máquinas, Facultad de Ingeniería, USAC.

### 4.1.3. Ensayos a flexión

Los esfuerzos de una viga que se carga se muestra en la figura 48, en su eje longitudinal inicialmente recto se deforma en forma curva, llamada curva de deflexión de la viga. Al cargar una viga en deflexión esta indicará compresión en una parte de la sección transversal y tensión en la restante. También surgen momentos flexionantes o pares de fuerzas resultantes. En elementos de máquinas y de estructuras es normal que la fuerza de flexión vaya acompañada de esfuerzos directos de tensión, compresión y corte transversal, longitudinal y de torsión.

Figura 48. **Distribución de fuerzas y resultantes en una viga en deflexión**

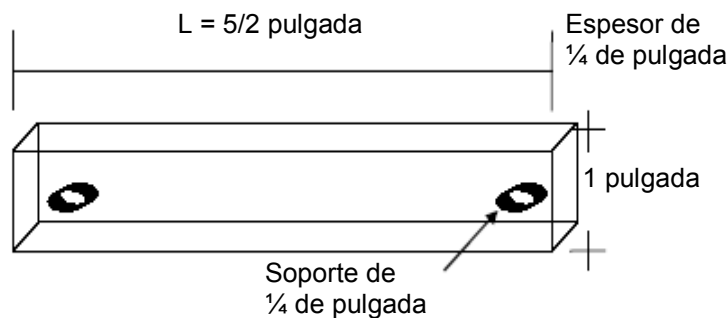


Fuente: ZECEÑA GIRÓN, Carlos E. Laboratorio de resistencia de materiales 1. p. 31.

Por conveniencia en situaciones donde surge el diseño de edificaciones donde existen deflexiones se idealiza y se supone que las cargas actúan en un plano de simetría a modo de no provocar torsión o flexión transversal y que las deflexiones son paralelas a la acción de las cargas. En el análisis fotoelástico la evaluación de comportamiento de esfuerzos en un material plástico se asemeja a la evaluación de materiales comúnmente usados en la industria. Se someterá una viga de claro simple a una carga puntual, este modelo se ilustra en la figura 44.

La importancia de la concentración de esfuerzos puede mostrarse en este ejemplo. Si se pone la probeta de la figura 18 de un material elástico que tenga una muesca y esta se somete a deflexión, el esfuerzo en la orilla de los agujeros alcanzará un máximo de tres veces el esfuerzo normal.

Figura 49. **Probeta en forma de viga simple apoyada en sus dos extremos para la prueba de deflexión**



Fuente: elaboración propia.

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

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



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

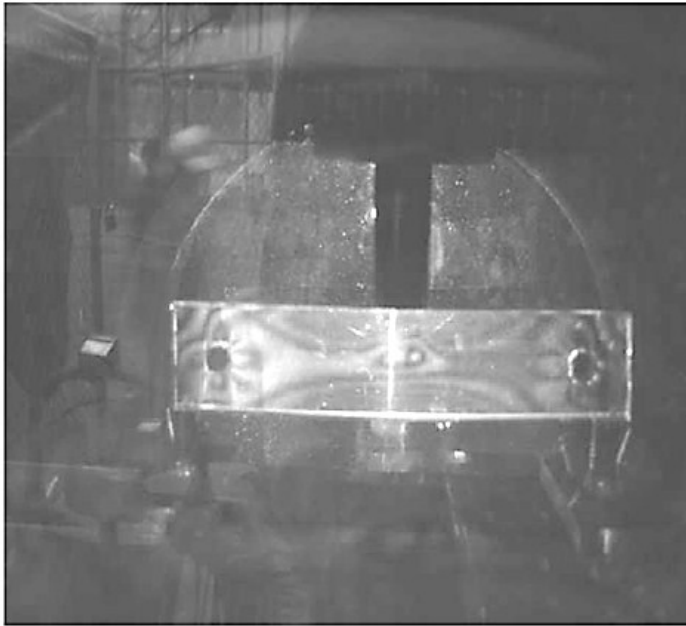
#### **4.1.3.1. Práctica 1**

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

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

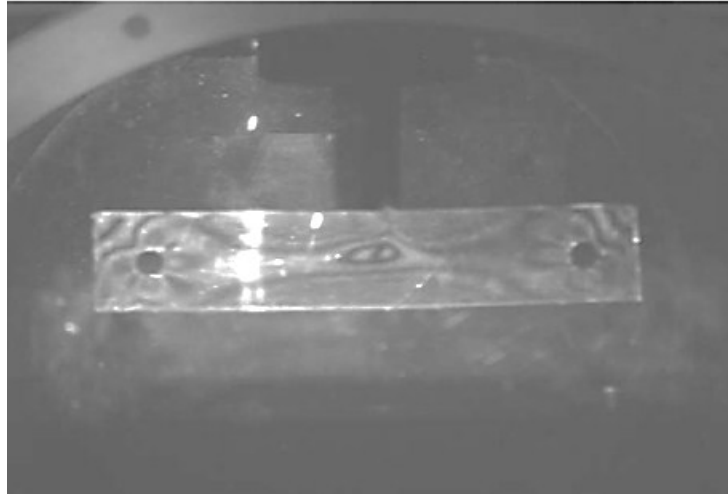
En la figura 45 se ve como la probeta en forma de viga simple está puesta en dos apoyos con una carga puntual simulando de esta forma una aplicación real en la rama de la construcción donde son muy utilizadas.

Figura 50. **Prueba de deflexión a 75 psi**



Fuente: laboratorio de Diseño de Máquinas, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 51. Prueba a deflexión a 75 psi



Fuente: laboratorio de Diseño de Máquinas, Facultad de Ingeniería, USAC.

Analizando la figura 46, se ven las franjas o bandas isocromáticas como aparecen y la dirección que toman, dando información de los esfuerzos de corte y dónde se concentran. Estas franjas son del color del espectro de la luz que van del negro al amarillo aparecen a lo largo de la viga, comenzando del punto donde la carga es aplicada y se distribuye hasta dar en las muescas y apoyos fijos de la viga.

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

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

Este punto oscuro da un punto de referencia para determinar el esfuerzo máximo de corte en cada banda contando hacia fuera desde este punto hacia donde está siendo aplicada la carga a lo largo de ella, con una inspección cuidadosa. Se aplica la ecuación.

Para la banda de orden dos se tiene:

$$\tau_{\text{Máx.}} = nf / t$$

$$\tau_{\text{Máx.}} = (2b \times 730) / 0,25 = 5\,840 \text{ lb/ pulgada cuadrada}$$

Se tiene un esfuerzo de corte máximo de 5 840 libras por pulgada cuadrada a lo largo de la franja de orden dos.

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

$$\sigma = p/n$$

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

Se tiene un esfuerzo máximo normal de 25 psi.

#### 4.1.3.2. Práctica 2

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

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

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

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



## CONCLUSIONES

1. La operación del equipo del polariscopio Chapman no representa gran complicación para realizar los ensayos, ya que los componentes son fáciles de identificar y la maniobrabilidad es sencilla. Con una breve explicación de cada uno de los sistemas y una correcta posición de la probeta se obtienen las lecturas de las cargas.
2. Los polariscopios pueden ser planos y circulares y cada uno proporciona imágenes de probetas ensayadas bajo cargas de trabajo y donde se concentran los esfuerzos; el polariscopio plano es mucho más sencillo y el circular que es una máquina más completa pero de sencillo manejo, que proporciona un análisis más detallado al poder ir variando los analizadores en ángulos de 0 a 90 grados.
3. Las iluminaciones con que trabajan los polariscopios son policromática y monocromática, esta última se obtiene gracias a un filtro que cuenta con la fuente de iluminación que sólo deja pasar un haz de luz que permite que se formen mejor y más visibles las franjas donde se concentran los esfuerzos, según la carga que este siendo ensayada en la probeta de análisis.
4. Es importante conocer que los esfuerzos que se producen en las prácticas se logran visualizar gracias al fenómeno fotoelástico y en ellas se observa la concentración de esfuerzos y como este se concentra en un punto o área específica de la probeta ensayada, llegando incluso a ocasionar una falla. Los beneficios de las prácticas serán mejor.

5. Comprensión de cómo está siendo afectado dicho elemento por las cargas y no sólo hacerlo por medio de cálculos que son menos demostrativos y no ayudan a tener un conocimiento más profundo como lo brinda el ensayo por el método de fotoelasticidad por medio del polariscopio Chapman.



## RECOMENDACIONES

1. Es necesario profundizar sobre los conceptos básicos de óptica, polarización y propiedades mecánicas del polimetacrilato, ya que el presente trabajo sólo presenta un repaso de estos conceptos que son importantes. La implementación de otro material como la baquelita para fabricar una probeta con formas geométricas más reales aplicadas en máquinas, que permiten una mejor resolución de las líneas isocromáticas, sería adecuado para la innovación de nuevas formas de análisis de los esfuerzos, por medio del laboratorio de fotoelasticidad.
2. La utilización del método fotoelástico es muy recomendable. Pero, requiere de una instrumentación muy cuidadosa. Debido a que, es un método óptico, una apreciación distinta puede conducir a resultados diferentes. Por otro lado, si no se tiene el debido cuidado en el manejo del material fotoelástico, también, puede alterar los resultados.
3. El método fotoelástico, es una herramienta que puede ser utilizada, como apoyo didáctico, por presentar de manera visual, la formación de los campos de esfuerzos cuando un cuerpo se somete a cargas.



## BIBLIOGRAFÍA

1. ALBRECHT, Kuske; GEORGE Robertson. *Photoelastic stress análisis. Great Britain: A Wiley. 1974. 185 p.*
2. AMMAN, Jaques Jean; HENTTSCHER, Fernando. *Polarización* [en línea], <<http://www.physics.uq.edu.au/ph128/6d>>. [Consulta: julio de 2011].
3. AVALLONE, Eugene A; BAUMEISTER III, Theodore. *Marks Manual del Ingeniero Mecánico*. 9a ed. Tomo 1. México: McGraw-Hill, 2003. 180 p.
4. BOWNWE, David I. *Propiedades mecánicas de los polímeros*. [en línea], <<http://www.pslc.ws/spanish/styrene>>. [Consulta: septiembre de 2011].
5. DOMÍNGUEZ, V. *Estado del arte del análisis experimental de esfuerzos como base para algunas aplicaciones del método del elemento finito*. Tesis de maestría de Mecánica de Materiales. México: Instituto Politécnico Nacional 1992. 150 p.
6. ENCICLOPEDIA SALVAT. *Ciencia y Tecnología*. Barcelona: Salvat, 1964. 186 p.

7. ESTRADA, R. *Determinación numérica del factor de intensidad de esfuerzos en fractura modo III y su validación experimental*. Tesis de maestría de Mecánica de Materiales. México: Instituto Politécnico Nacional 1994. 140 p.
8. GALLO, G. *Introducción a la fotoelasticidad*. México: Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. 1993. 240 p.
9. GARCÍA, R. *Determinación de factores de intensidad de esfuerzos en cuerpos agrietados por el planteamiento lineal de la mecánica de fractura*. Tesis de Maestría en Materiales. México: Instituto Politécnico Nacional, 1989. 135 p.
10. OLIVARES RAMOS, Eduardo. *Análisis del esfuerzo mecánico* [en línea]. Universidad de Chile. <<http://www.2.ing.puc.cl/>>. [Consulta: julio de 2011].
11. POPOV, E. *Mecánica de sólidos*. México: Limusa, 1980, 350 p.
12. SYDNEY H., Avner. *Introducción a la Metalurgia Física* 2a ed. México: McGraw-Hill, 1994. 640 p.
13. TIMOSHENKO, Stephen; Gere, James H. *Mecánica de materiales*. 2da ed. México: Grupo Editorial Iberoamericana, 1986. 340p.
14. TIPPENS, Paul E. *Física 2*. Colombia: McGraw-Hill, 1996. 400 p.

15. URRIOLAGOITIA, G. *Aplicación de la mecánica de la fractura al caso de estructuras agrietadas sometidas a cargas de fatiga*. Tesis de maestría en Mecánica de Materiales. México: Instituto Politécnico Nacional, 1996. 150 p.
16. VILLA, G. *Aplicación de elementos finitos al diseño de engranes y algunos aspectos fundamentales relativos a mecánica de la fractura*. Tesis de maestría en Mecánica de Materiales. México: Instituto Politécnico Nacional, 1998. 225 p.
17. ZECEÑA GIRÓN, Carlos. *Introducción a las prácticas de laboratorio de Resistencia de Materiales 1*. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1995. 60 p.



## **ANEXO**





## Anexo1. Otros apuntes

*Duración: 2 + 2 sesiones (2 informes)*

### Objetivos:

#### Sesión 1-2

- Entender el concepto de polarización.
- Observar algunas materializaciones de este fenómeno (ley de Malus, ángulo de Brewster). Estudiar una lamina retardadora  $\lambda/4$ .

#### Sesión 3-4

- Armar un polariscopio lineal y circular. Entender las ventajas de cada uno.
- Entender como se puede utilizar éstos para caracterizar sustancias birrefringentes (películas de plástico) y materiales foto-elásticos.
- Medir la actividad óptica de una solución de azúcar.

### Bases teóricas

#### Los materiales ópticos

Se puede considerar entre los materiales de interés en óptica, tres tipos de materiales transparentes:

- Los materiales de índice de refracción y coeficiente de absorción isotrópicos como el vidrio.
- Los materiales que tienen índices de refracción anisotrópicos. La velocidad con que se propaga la luz en estos materiales depende de la orientación del campo electro-magnético relativa a las direcciones preferenciales del material. Se nota una dirección de polarización rápida y una dirección de polarización lenta del material. Estos son los materiales birrefringentes (ver anexo). Para algunos de ellos, el índice de refracción depende de la tensión mecánica. Estos materiales llegan a ser birrefringentes cuando se les aplica esfuerzo mecánico. Los materiales que presentan esta característica son llamados fotoelásticos.
- Los materiales que presentan coeficiente de absorción anisotrópico. Estos materiales absorben selectivamente la componente de la onda electromagnética en una orientación específica. A estos materiales se les llama polarizadores.

#### Concepto de polarización

Existen evidencias experimentales que han convencido a la física clásica, de que la luz puede tratarse como una onda electromagnética transversal. Una de estas evidencias es la polarización de la luz, bajo determinadas condiciones.

En rigor, una onda luminosa puede ser vista como superposición de varias ondas. Pero sin pérdida de generalidad, podemos considerarla como una superposición de dos ondas luminosas armónicas, perpendiculares, de igual vector de propagación y frecuencia (monocromáticas).

Recordemos que en este tipo de ondas, la función  $\vec{E}(\vec{r}, t)$  varía sinusoidalmente con el tiempo en una dirección perpendicular a la dirección de propagación (aquí según el eje  $z$ ):

$$\vec{E}_x(z, t) = \vec{E}_{0x} e^{i\phi} \quad \text{donde: } \phi = \vec{k} \cdot \vec{z} - \omega t$$

Así los vectores constitutivos del campo eléctrico se pueden escribir:

$$\vec{E}_x(z, t) = E_{0x} e^{i(kz - \omega t)} \hat{i} \quad \text{y}$$

$$\vec{E}_y(z, t) = E_{0y} e^{i(kz - \omega t + \Delta\phi)} \hat{j}$$

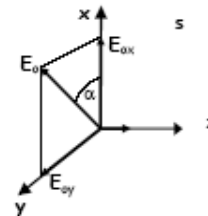


Figura G5-1 Superposición de dos ondas luminosas.

Entonces la onda resultante es:

$$\vec{E}(z, t) = \left[ \hat{i} E_{0x} e^{i\phi_x} + \hat{j} E_{0y} e^{i\phi_y} \right] \quad (1)$$

donde  $\phi_x$  y  $\phi_y$  son las fases respectivas de cada onda. Lo que también se puede expresar como.

$$\vec{E}(z, t) = E_{0x} \left[ \hat{i} + \hat{j} \frac{E_{0y}}{E_{0x}} e^{i\Delta\phi} \right] e^{i(kz - \omega t)} \quad (2)$$

Se puede considerar que  $E_{0x}$  y  $E_{0y}$  son las componentes de  $\vec{E}$ , desfasadas en  $\Delta\phi$ . Se dice que la onda  $\vec{E}$  está polarizada si:  $\phi_y - \phi_x \equiv \Delta\phi = \text{cte. en el tiempo}$ .

## Continuación del anexo 1.

### Polarización Lineal

Si las dos ondas están en fase (diferencia de fases  $\Delta\phi = n\pi$ ,  $n = 0, +2, +4, \dots$ ), la resultante será una onda definida por un vector de dirección fija y de amplitud oscilante (Figura G5-2a). La onda se dice linealmente polarizada.

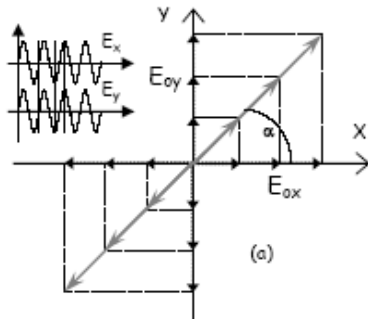


Figura G5-2a polarización lineal,  $E_x$  y  $E_y$  en fase con  $E_x = E_y$

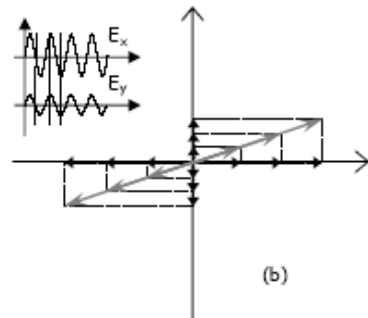


Figura G5-2b Polarización lineal,  $E_x$  y  $E_y$  en fase con  $E_x = E_y$

La orientación de la dirección de polarización en el plano  $(x,y)$  depende del coeficiente  $E_{oy}/E_{ox} \equiv \text{Tg}(\alpha)$  (Figura G5-2b).

Se debe notar que si  $\Delta\phi = n\pi$ , con  $n = (\pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots)$ ; la nueva onda también está linealmente polarizada pero toma una dirección de polarización simétrica a la anterior relativa al eje  $i$ . Se dice que las ondas están en oposición de fase (Figura G5-2c).

### Polarización elíptica

Sin embargo, si la fase entre  $E_x$  y  $E_y$   $\Delta\phi = n\pi$  el vector resultante tendrá un comportamiento particular: su dirección cambia con el tiempo, girando en un plano perpendicular a la dirección de propagación. La polarización de la onda en este caso es elíptica (Figura G5-2d).

Se distingue la polarización derecha (horaria) y la polarización izquierda (antihoraria) según el sentido de rotación del campo electro-magnético.

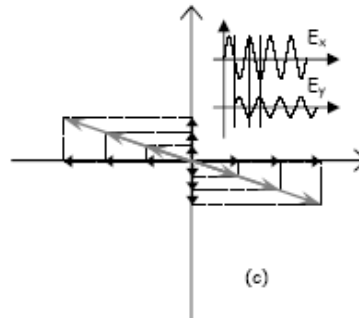


Figura G5-2c Polarización lineal en oposición de fase con  $E_x = E_y$

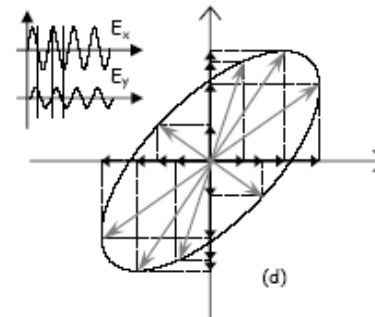


Figura G5-2d Polarización elíptica

### Polarización Circular

En particular, si la diferencia de fase es de  $\Delta\phi = \pi/2 + n\pi$  ( $n = 0, +1, +2, \dots$ ) y  $E_{ox} = E_{oy}$ , la polarización es llamada circular y el vector  $\vec{E}$  tendrá una amplitud constante (Figura G5-2e).

Aquí también, se distingue la polarización circular derecha y la polarización circular izquierda según el sentido de rotación del campo electro-magnético.

### Luz natural

Una fuente de luz ordinaria consiste en un gran número de emisores atómicos orientados aleatoriamente, emitiendo cada uno un tren de ondas polarizado durante un tiempo del orden de los  $10^{-8}$  s. Luego todas las de igual frecuencia se combinarán para formar una onda polarizada resultante que no perdurará en ese estado más de  $10^{-8}$  s. Así, constantemente se están emitiendo nuevos trenes de onda y el estado de polarización total cambia de forma totalmente impredecible.

## Continuación del anexo 1.

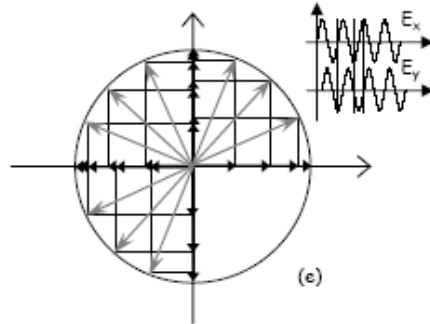


Figura G5-2e Polarización circular.

Estos cambios tienen lugar tan rápidamente que resulta imposible distinguir cualquier estado de polarización, nos referiremos a estas ondas como *luz natural*, que se puede describir matemáticamente en términos de dos ondas arbitrarias de igual amplitud linealmente polarizadas, ortogonales e incoherentes (es decir ondas para las cuales su diferencia relativa de fase varía rápidamente y al azar).

### Láminas $\frac{\lambda}{2}$ y $\frac{\lambda}{4}$ de onda - polarizadores

Es posible alterar, definir o seleccionar el tipo de polarización de la luz con elementos de óptica constituidos de materiales especiales: materiales polarizadores y materiales birrefringentes.

#### Láminas de $\frac{\lambda}{2}$ y $\frac{\lambda}{4}$ de onda.

Las láminas de  $\frac{\lambda}{2}$  y  $\frac{\lambda}{4}$  de onda corresponden a láminas de material birrefringente. La luz polarizada en una dirección específica se propaga dentro de la lámina a una velocidad diferente que la luz polarizada perpendicularmente a esta dirección. Las láminas  $\lambda/2$  y  $\lambda/4$  tienen un espesor muy controlado introduciendo entre los ejes rápidos y lentos de polarización un retraso o desfase de  $\pi$  y  $\pi/2$  respectivamente entre cada componente. Así, una lámina de  $\lambda/4$  transforma una onda linealmente polarizada a 45 grados de sus ejes principales (rápidos y lentos) en una onda circularmente polarizada. Este tipo de lámina es de gran utilidad en algunas aplicaciones prácticas como polariscopios circulares.

#### El polarizador:

Los polarizadores son hechos de un tipo de material que absorbe la luz polarizada en una dirección específica: el eje de extinción. La luz saliendo del material será entonces linealmente polarizada en la dirección perpendicular al eje de extinción, llamado eje de transmisión (Fig. G5-3).

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

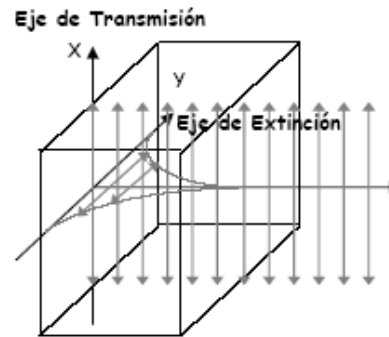


Figura G5-3 Principio de un material polarizador con su eje de transmisión paralelo a X y su eje de extinción paralelo a Y.

### Polarización por reflexión/refracción:

#### Ángulo de polarización de Brewster

El fenómeno de reflexión a la superficie entre dos medios dieléctricos altera la polarización de la luz reflejada. Para un ángulo incidente específico, denominado *Ángulo de Brewster* ( $\theta_c$ ), la reflexión solo ocurre para una dirección de polarización en el plano de incidencia (formado por el haz incidente y la normal a la superficie) (Fig. G5-4). La polarización paralela al plano de incidencia (o sea, perpendicular a la superficie reflectante) no es reflejada. Este fenómeno ocurre cuando el ángulo entre los haces reflejados y refractados (transmitidos) es de  $90^\circ$ . Consecuentemente y de acuerdo a la ley de Snell, el ángulo de Brewster ( $\theta_c$ ) está relacionado con el índice de refracción del material dieléctrico.

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

### Aplicaciones:

#### El polariscopio lineal

El polariscopio (Figura G5-5) es un instrumento que permite observar y medir el estado de polarización de objetos transparentes. Está compuesto de un polarizador lineal y de un analizador lineal. *En la práctica se distingue entre polarizador y analizador, aún que se trate de elementos ópticos idénticos: el primero, generalmente fijo, es el que define la dirección de polarización de la luz y el segundo, orientable, se utiliza para observar la rotación de la polarización.* El objeto de interés se pone entre ambos. Es conveniente cruzar los ejes de extinción del polarizador y del analizador a  $90^\circ$  para tener un fondo negro. Además, de esta forma, tenemos la certeza que los ejes de transmisión del polarizador y el analizador están perpendiculares entre sí.

Continuación del anexo 1.

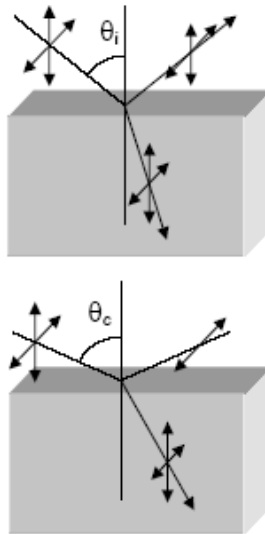


Figura 65-4 Reflexión y refracción sobre un dieléctrico. Condición de Brewster.

Un estudio cuidadoso muestra que dos condiciones llevan al fenómeno de extinción. La intensidad al salir del polariscopio se puede escribir:

$$I = I_0 \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (3)$$

con  $\theta$  el ángulo entre el eje rápido del material birrefringente y el eje de transmisión del polarizador y  $\alpha$  el desfase angular entre las componentes rápidas y lentas de la onda.  $\alpha$  está relacionado con el retraso espacial  $\delta$  entre las componentes por:

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} \delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_r - n_l) e \quad (4)$$

donde  $n_r$ ,  $n_l$  y  $e$  son los índices de refracción rápidos y lentos y el espesor del cuerpo birrefringente respectivamente.

Una condición de extinción (primer término de la relación) es independiente de la longitud de onda  $\lambda$  y produce franjas negras y claras llamadas "isoclinas".

La segunda condición (segundo término de la relación) depende del índice de refracción y consecuentemente de la longitud de onda. Las franjas de extinción de los diferentes colores aparecen en lugares distintos y son llamadas "isocromas".

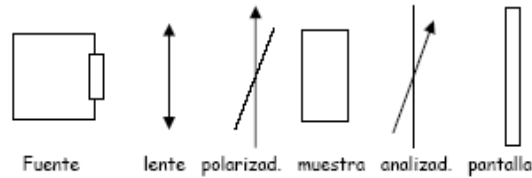


Figura 65-5 Polariscopio lineal

El polariscopio circular

A diferencia del polariscopio lineal, el polariscopio circular (Figura 65-6) 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 más precisa de la polarización.

En este caso, solo una condición lleva a la extinción. Solo se observan las isocromas y no más las isoclinas.

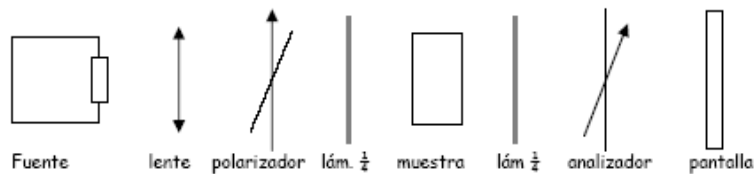


Figura 65-6 Polariscopio circular

## Continuación del anexo 1.

### Material a disposición

- 1 Lamp. De luz blanca,
- 1 láser,
- 2 Polarizadores,
- 2 laminas de  $\frac{1}{4}$  de onda,
- 1 luxómetro,
- 1 goniómetro,
- 1 cristal de calcita
- 1 bloque de vidrio,
- 1 sándwich de vidrio.

### Trabajo a efectuar

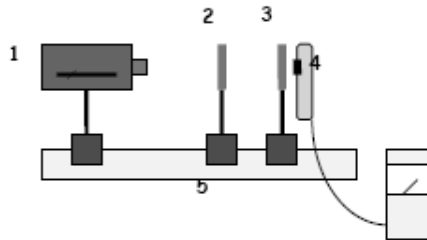
#### Actividades preliminares

- Observación del estado de polarización de varios "objetos" o fuentes de luz a través de un polarizador

#### Actividad 1 Polarización lineal

##### 1. Ley de Malus

Verifique la ley experimental de Malus en la forma  $I = I(\theta)$ , donde  $I$  es la irradiancia de la luz emergente del polarizador (analyzer) y  $\theta$  es el ángulo entre las direcciones de transmisión de los dos polarizadores en el montaje que se muestra a continuación:



- 1 Fuente de luz natural
- 2 Polarizador
- 3 Analizador
- 4 Luxómetro
- 5 Banco óptico

##### 2. Ángulo de Brewster

Con el montaje que a continuación se presenta, observe y mida el ángulo de Brewster (usando un goniómetro) y analice la luz reflejada por una superficie dieléctrica (vidrio). Determinar la curva de polarización: intensidad de la luz polarizada (paralela y perpendicular) en función del ángulo de incidencia.

Luego reemplazar bloque de vidrio por una placa metálica (espejo metálico) y repita en la medida de lo posible lo anterior e intente una explicación de lo observado.

Por último reemplace la placa por un prisma y mida también el ángulo de Brewster, determine el índice de refracción utilizando la ley de Brewster, con sus respectivos errores y en el caso del prisma compare su resultado con el obtenido en la sesión anterior.

- Con la experiencia adquirida hasta ahora, desarrollar un montaje que le permita determinar la dirección de extinción de un polarizador lineal (Usted debe llegar con una idea de como lograrlo).
- Proponer un montaje para realizar un polariscopio lineal únicamente basado en el ángulo de Brewster.

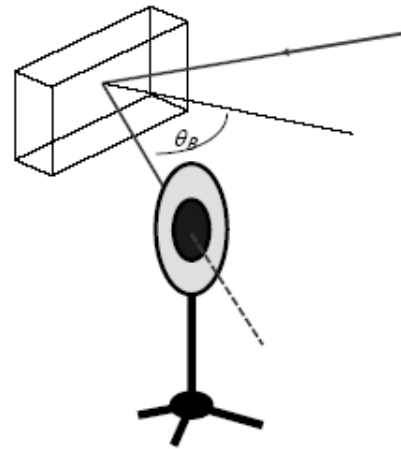


Figura G5-7 Determinación del ángulo de Brewster

#### Actividad 2 Lamina $\frac{1}{4}$ de onda y polarización circular - Birrefringencia

1. Armar un polariscopio lineal
2. Observar los efectos de un cristal de calcita, estudiar el estado de polarización de la luz al salir de un cristal de calcita. Agregar un diafragma entre el polarizador y la calcita...
3. Estudiar la birrefringencia de una lamina  $\frac{1}{4}$  de onda.
4. Armar un polariscopio circular.
5. Materiales birrefringentes

Observar a través de un polariscopio lineal varios materiales. Explicar los efectos en función del ángulo del material estudiado. Explicar los efectos en función del ángulo entre el polarizador y el analizador.

## Continuación del anexo 1.

### Actividad 3 Películas scotch

Pegar una cinta scotch en una lámina de vidrio. Observar el efecto de polarización. Pegar otro pedazo de scotch por encima del primero, con otra inclinación. Calcular y/o deducir el efecto sobre la polarización de la luz.

### Actividad 4 Materiales foto-elásticos y ópticamente activos

Observar la polarización de materiales foto-elásticos en función de los esfuerzos mecánicos aplicados (ver anexo 2).

1. Realizar maquetas simples mostrando como se distribuyen las tensiones en el interior de un objeto en relación a esfuerzos externos.
2. Observar los cambios de polarización en objetos y/o soluciones ópticamente activos.

### Referencias

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>

## Anexo 1 Materiales birrefringentes

Valores de los índices de refracción de algunos materiales birrefringentes ( $n_r$ : índice rápido,  $n_l$ : índice lento):

Material	$n_r$	$n_l$
Calcita	1.4864	1.6584
Cuarzo	1.5443	1.5534
Nitrato de Sodio	1.3369	1.5854
Hielo	1.309	1.313
Turmalina	1.638	1.669

## Fotoelasticidad

Más detalles en "Polarización y Fotoelasticidad"

Para algunos materiales (poliméricos), el valor del índice de refracción varía en función de las tensiones mecánicas locales o aplicadas. Se llaman estos materiales foto-elásticos. Como la tensión en cualquier punto del material es una magnitud con una orientación (vector), la tensión local en un material se define como un tensor  $\sigma_{ij}(\vec{r})$ . En consecuencia, el índice de refracción también es una magnitud tensorial. Se puede así definir un elipsoide de las tensiones y otro de los índices de refracción. Estos dos elipsoides se puede caracterizar por tres ejes principales ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ) y ( $n_1, n_2, n_3$ ) y se relacionan por:

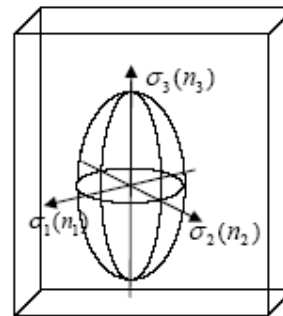
$$n_1 - n_2 = C(\sigma_1 - \sigma_2);$$

$$n_2 - n_3 = C(\sigma_2 - \sigma_3);$$

$$n_3 - n_1 = C(\sigma_3 - \sigma_1)$$

Aparece claramente que en ausencia de tensiones (aplicadas o internas), el material es ópticamente isotrópico. Cuando hay tensiones, el material se torna birrefringente (termino  $\alpha$  de la ecuación 4). Hay que notar que tensiones internas, producidas por heterogeneidades o defectos del material genera localmente birrefringencia en los índices de refracción.

El material foto-elástico permite así visualizar los esfuerzos mecánicos en una estructura.



## Continuación del anexo 1.

### Fotometría - observador patrón, Radiometría - radiador patrón

(Emiliano Galuppo)

La radiometría se refiere a los aspectos energéticos de la óptica. Las mediciones de las magnitudes, que en esta rama de la óptica aparecen, son obtenidas a través de la cuantificación de los efectos de la radiación en materiales sensibles (fotosensores). En cambio la fotometría se preocupa de los aspectos visuales de la óptica, siendo su aparato de medición el ojo humano. Para la visión normal, el observador patrón se caracteriza por una curva de sensibilidad espectral  $I(\lambda)$  (Figura G5-A1).

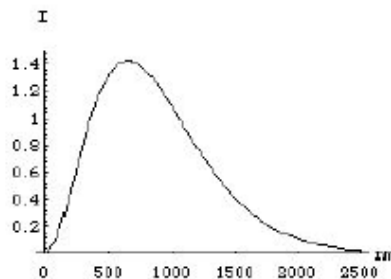


Figura G5-A1 Curva de sensibilidad del ojo humano (según [A1])

Todo cuerpo que produce energía, visible o invisible, es un radiador. Los que producen radiación propia reciben el nombre de radiadores primarios. Los que esparcen o difunden toda o parte de la energía recibida se llaman radiadores secundarios.

Las mediciones de la radiación de un cuerpo se realizan por lo general mediante comparación con los llamados radiadores patrón.

El único radiador del cual se sabe con exactitud como radia y su reparto energético espectral es el cuerpo negro o radiador completo. De este cuerpo se puede conocer su espectro completo con solo conocer su temperatura (ley de radiación de Plank [A2].)

No todo el espectro electromagnético puede ser abarcado por un solo radiador patrón. Cada rango de frecuencias (o longitud de onda) tiene sus radiadores patrón apropiados, que es el cuerpo negro a una temperatura bien determinada. La determinación experimental de estas características es bastante compleja y está debidamente normada por los organismos internacionales de pesas y medidas.

### Determinación de algunas unidades propias de la radiometría y fotometría

**Candela Internacional (cd):** La candela es una de las unidades primarias de sistema internacional de unidades (S.I.). Su definición ha sufrido múltiples modificaciones. La última, dada por la Conferencia General de Pesas y Medidas dice: "La Candela es la intensidad luminosa, en una dirección dada de una fuente que emite radiación monocromática, de frecuencia  $540 \cdot 10^{12}$  Hz y cuya intensidad energética en dicha dirección es de  $(1/683) \text{ W sr}^{-1}$ ".

**Lumen Internacional (lm):** La Conferencia General de Pesas y Medidas ha acordado la siguiente definición: "Lumen (lm) es el flujo luminoso de la radiación monocromática caracterizada por una frecuencia de  $540 \cdot 10^{12}$  Hz y por un flujo radiante de (1/683) vatios.

La frecuencia  $540 \cdot 10^{12}$  Hz equivale a una longitud de onda en aire, ( $n=1.0028$ ),  $\lambda=555 \text{ nm}$  y es la radiación de máxima eficiencia visual,  $V_{555}=I$ . Esta misma definición establece el equivalente mecánico del lumen:  $1 \text{ W}_{555} = 683 \text{ lm}$ .

#### Unidades

Intensidad luminosa	Candela, cd
Flujo:	Lumen, lm = cd*sr
Energía:	Lumen segundos
Irradiancia:	Lux = lm/m <sup>2</sup>
Luminancia:	cd/m <sup>2</sup>
Ángulo sólido	Steradian, sr.

#### Equivalencias:

Nit (nt), Stilb (sb), Lambert (Lb)

$$1 \text{ nt} = 1 \text{ cd m}^{-2} ;$$

$$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} ;$$

$$1 \text{ Lb} = \pi^{-1} \text{ sb}$$

$$1 \text{ tb} = 1 \text{ lm s} ;$$

$$1 \text{ lx} = 1 \text{ lm m}^{-2}$$

#### References:

[A1] [www.physics.uq.edu.au/ph128/6d.html](http://www.physics.uq.edu.au/ph128/6d.html)

[A2] [hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html](http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html)

Continuación del anexo 1.

*Magnitudes Radiométricas*

Nombre	Símbolo	Relación	Unidades S.I.	
Energía radiante	$Q_e$	Energía total ( $Q_e$ ) de la radiación esta dada por: $Q_e = \int_{\Delta t} \phi_e dt$	J	Energía radiante: toda aquella energía que se propaga por el espacio, ya sea considerando la forma de propagación como fotones ó como ondas electromagnéticas
Corriente de radiación o flujo radiante	$\phi_e$	$\phi_e = \frac{dQ_e}{dt}$	Watt W	Flujo de energía o energía por unidad de tiempo Propagación: "potencia emitida" ó "potencia transportada" Detección: "flujo incidente"
Densidad de flujo radiante	$M_e$	$M_e = \frac{d\phi_e}{dA^*}$	W m <sup>-2</sup>	<i>Exitancia</i> radiante: Emisión o difusión de una superficie Irradiancia: Recepción o detección de una superficie Incidencia normal o "intensidad": en caso que la superficie del detector sea perpendicular a la radiación incidente
Intensidad Radiante	$I_e$	$I_e = \frac{d\phi_e}{d\omega_d^\dagger}$	W .sr <sup>-1</sup>	Magnitud que toma en cuenta la dependencia de $M_e$ con la posición, superficie y orientación del detector
Radiancia	$L_e$	$L_e = \frac{dI_e}{dS_n^\ddagger} = \frac{d^2\phi_e}{d\omega_f dA_n}$  $= \frac{dM_e^\S}{d\omega_f}$	W sr <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup>	Cantidad que permite caracterizar, tomando en cuenta la dependencia de la intensidad que emite la fuente extensa, el elemento de área de esta y su orientación, respecto a un detector
Exposición	<i>Exposición</i>	$Exp. = M_n \Delta t_{exp}$	J m <sup>-2</sup>	Corresponde a la cantidad de energía radiante $Q_e$ recibida en cada unidad de área de la superficie detectora, proyectada sobre un plano perpendicular a la dirección de la radiación incidente

\*A : área de la superficie emisora o detectora

†  $d\omega_d = dA_n/r^2$  Ángulo sólido del detector visto desde la fuente.  $r$  es la separación fuente-detector

‡  $dS_n = dS \cos \theta_f$  ,  $\theta_f = \gamma$  : ángulo entre la normal del elemento de volumen y la dirección de propagación

§  $M_n$  : irradiancia normal, medida en el detector,  $\omega_f$  ángulo sólido subtendido desde la fuente vista desde el detector



Continuación del anexo 1.

*Magnitudes Fotométricas*

Nombre	Símbolo	Relación	Unidades S.I	
Intensidad luminosa	$I_v$	$I_v = \frac{d\phi_v}{d\omega_d}$	candela (cd) = 1 lm/ 1 sr	En general la intensidad es función de $\theta_f$ entre la normal externa a la superficie de la fuente y la dirección de emisión, en un emisor ideal se cumple la ley de Lambert: $I_v(\theta_f) = I_v(0)\cos\theta_f$
Flujo luminoso	$\phi_v$	$\phi_v = \int I_v d\omega_d$ $= C / \phi_{\text{ext}} V_\lambda d\lambda^{**}$	lm = 1cd*1 sr = 1 tb $s^{-1}$	La eficiencia luminosa en general es función de la composición espectral y permite caracterizar las fuentes
Eficiencia luminosa relativa espectral	$V(\lambda)$	$V(\lambda) = K(\lambda)/K_{\text{max}}$		El comportamiento del ojo humano como detector queda caracterizada por la grafica de $V(\lambda)^{**}$
Densidad de flujo luminoso	$M_v$	$M_v = d\phi_v/dS$	lux = lm m $^{-2}$	Cuando la superficie S se refiere al emisor (o difusor) $M_v$ se suele llamar "Exitancia luminosa", en cambio cuando S corresponde a la superficie que recibe el flujo luminoso, se habla de "Iluminancia"
Radiancia luminosa o luminancia	$L_v$	$L_v = \frac{dI_v}{dS_n}^{\dagger\dagger}$ $= \frac{dM_v^{§§}}{d\omega_f}$	nit $^{\ddagger}$ (nt) = cd m $^{-2}$ = lx sr $^{-1}$	Si la fuente es Lambertiana $L_v = dI/dS$ , por lo tanto la luminancia no depende de la dirección en que se recibe el flujo luminoso, además se cumple $M_v = \pi L_v$ , con $M_v$ la iluminancia normal medida

\*\*  $\lambda$ : longitud de onda de la fuente, C: cte que depende del sistema de unidades

†† Una superficie emisora que se comporta como radiador cuerpo negro, a la temperatura de solidificación del Pt y a la presión de 101325 Pa presenta el valor  $V(\lambda_0) = 1$  , con  $\lambda_0 = 550 \text{ nm}$

†† Ahora  $dS_n$  es un elemento de área de la fuente proyectada sobre un plano normal a la dirección de la radiación

§§  $M_v$  Iluminancia normal medida con el detector, y  $\omega_f$  ángulo sólido subtendido desde la fuente extensa vista desde el detector