

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	 Sistema Integrado de Gestión
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

GUÍA DE LABORATORIO PARA ENSAYO FOTOELÁSTICO DE TENSIONES CON POLARISCOPIO



Ilustración 1. Equipo de ensayo, polariscopio.

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	 SIGUD
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

CONTENIDO

1.	RESUMEN.....	3
2.	OBJETIVO	3
3.	MARCO TEÓRICO	4
3.1.	Fundamentos generales.....	4
3.2.	Luz normal y polarizada	5
3.3.	Líneas isocromáticas e isóclinas	8
4.	MONTAJE	11
4.1.	Montaje del equipo	11
4.2.	Modelos de ensayo	12
4.2.1.	Modelos con soporte	12
4.2.2.	Modelo de arco con soporte.....	13
4.2.3.	Modelo de gancho de grúa con soporte	13
5.	PROCEDIMIENTO	15
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	15

TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Equipo de ensayo, polariscopio.....	1
Ilustración 2. Trayectoria elastoóptica del rayo, a) luz polarizada lineal, b) luz polarizada circular.....	5
Ilustración 3. Ley de Brewster.....	8
Ilustración 4. Arriba: distribución de tensiones en el modelo bajo carga de flexión: 1 a 4 posición de líneas isocromáticas, 4 eje neutro; F fuerza externa, F_A / F_B reacciones en los apoyos; abajo: diagrama de momento flector.....	9
Ilustración 5. Modelo de una barra con entalladuras en luz monocromática.....	10
Ilustración 6. Modelo de una barra con entalladuras en luz blanca.....	10
Ilustración 7. 1 fuente de luz, 2 filtro de polarización como polarizador, 3 filtro de cuarto de onda, 4 bastidor para fijar y someter a carga los modelos, 5 filtro de polarización como analizador, 6 filtro de cuarto de onda, 7 modelo sometido a carga.	11
Ilustración 8. Posición de los ejes de los filtros.....	12
Ilustración 9. Modelos y soporte.....	12
Ilustración 10. Arco.....	13
Ilustración 11. Modelo gancho de grúa.....	14
Ilustración 12. Estribo de retención para gancho de grúa	14
Ilustración 13. Fijación para pruebas de tensión.....	14

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

1. RESUMEN

La fotoelasticidad es un método de probada eficacia para el análisis y el registro de tensiones mecánicas en componentes constructivos. Se utiliza tanto para la medición cuantitativa como para la demostración de estados de tensión complejos. Como componentes, se utilizan modelos de polímeros transparentes y fotoelásticos que bajo carga mecánica tienen un efecto de doble refracción óptica.

En la práctica se harán ensayos de fotoelasticidad en modelos de polímeros planos, transparentes. En este sentido, los modelos se someten a una carga por aplicación de fuerzas externas y se iluminan con luz polarizada circularmente. La luz que atraviesa el cuerpo se observa con un analizador.

El montaje experimental consta de los siguientes componentes: fuente de luz, dos filtros de polarización lineales, como polarizador y analizador, dos filtros de cuarto de onda y un bastidor en el que se fijan y someten a carga los modelos. La fuente de luz permite obtener imágenes de tensiones en color si se trabaja con luz blanca o bien una representación en claro-oscuro si se trabaja con luz monocromática.

La polarización se consigue mediante una combinación de un filtro de polarización y una placa de cuarto de onda que genera luz polarizada circularmente. Detrás del modelo se encuentra una segunda placa de cuarto de onda combinada con un segundo filtro de polarización. Ambos conforman el analizador. Los filtros están alojados de forma que se pueden girar y están provistos de escalas de ángulos.

En el bastidor se fijan diversos modelos de policarbonato. Con un dispositivo de carga se aplica al modelo cargas de flexión, tensión o compresión por medio de un husillo. Las tensiones que se producen en el modelo se ven como zonas más claras que hacen visible la distribución de las tensiones. Para determinar la diferencia de la tensión principal, se analiza el orden de las líneas isocromáticas oscuras.

2. OBJETIVO

- Comprender los fundamentos básicos del análisis de tensiones en estructuras mediante la elastoóptica.
- Realizar ensayos fotoelásticos sobre distintos modelos e identificar, principalmente bajo luz monocromática, las líneas isocromáticas.

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

- Entender la distribución de esfuerzos en modelos sometidos a fuerzas de tensión, compresión y flexión.

3. MARCO TEÓRICO

El método elastoóptico se aplica desde 1930 y sigue contando entre los procedimientos más interesantes para el análisis óptico de tensiones, no en último lugar por su gran claridad y la composición relativamente sencilla de los ensayos. El principio elastoóptico es particularmente apropiado para el análisis de distribución de tensiones en modelos planos.

3.1. Fundamentos generales

El método elastoóptico aprovecha la propiedad física que tienen determinados materiales transparentes de provocar una doble refracción bajo carga. La doble refracción, o birrefringencia, es una propiedad que se conoce también de ciertos cristales anisótropos naturales, y que resulta del hecho de que algunos materiales, isótropos sin carga, actúan como anisótropos cuando su estructura molecular se altera debido a esfuerzos mecánicos. El índice de refracción depende de las tensiones que actúan en el material. La anisotropía se puede explicar del siguiente modo: si actúa, por ejemplo, una tensión de presión en la dirección x , la estructura molecular se comprime en esa dirección. El medio adquiere una “mayor densidad óptica” y el índice de refracción aumenta. Pero al mismo tiempo, el material experimenta una dilatación positiva en la dirección y , transversal respecto a x , lo que significa que la estructura molecular se estira en esa dirección. En consecuencia, el material “pierde densidad óptica” en la dirección y , con lo que disminuye el índice de refracción. El proceso se invierte en el caso de la dilatación por tensión y la contracción transversal.

En el caso de las tensiones planas existen para cada punto dos cortes perpendiculares entre sí (véase ilustración 2) en los que las tensiones normales σ_x y σ_y adoptan sus valores extremos: las tensiones σ_1 y σ_2 . Al respecto rige el convenio de que σ_1 es siempre la de mayor valor, o sea, corresponde al esfuerzo principal mayor. Al mismo tiempo, un corte con un ángulo de 45° respecto al corte principal tiene siempre la tensión de cizallamiento máxima: la tensión de cizallamiento o corte principal τ_H .

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

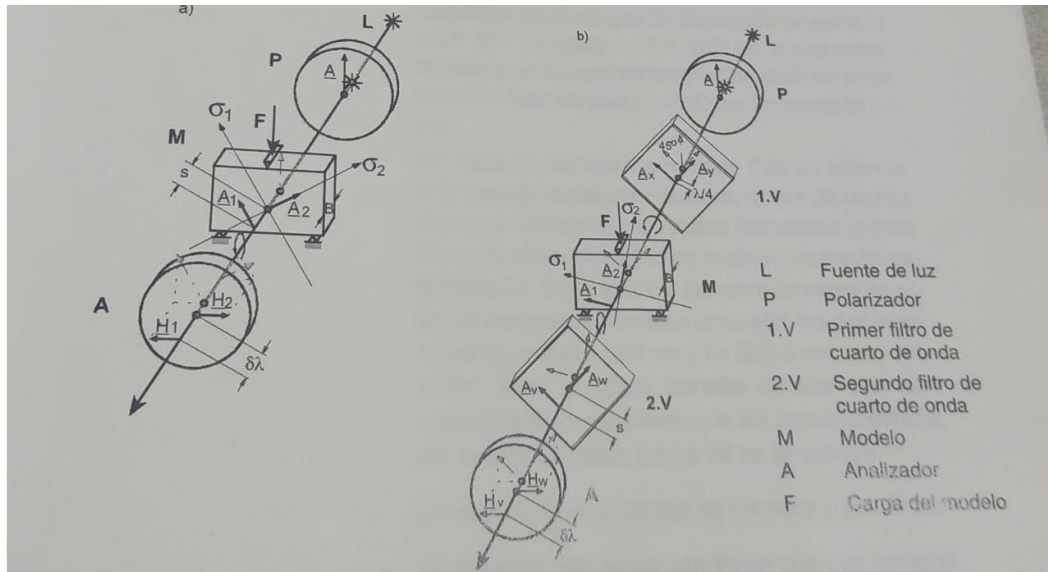


Ilustración 2. Trayectoria elastoóptica del rayo, a) luz polarizada lineal, b) luz polarizada circular.

Con las magnitudes de σ_1 y σ_2 y la dirección principal se pueden determinar mediante el círculo de Mohr, gráficamente y por cálculo, la magnitud y la dirección de todas las tensiones σ_x y σ_y así como τ_{xy} .

El procedimiento resulta particularmente sencillo en el caso de las tensiones en el borde, ya que una de las tensiones incide siempre perpendicularmente en el borde, haciéndose así cero. El ensayo elastoóptico ofrece aquí la posibilidad de leer directamente tensiones en el borde, que en la mayoría de los casos son decisivas para el dimensionado.

3.2. Luz normal y polarizada

En la elastoóptica se considera la luz un fenómeno ondulatorio electromagnético que describe movimientos ondulatorios transversales. En un rayo de luz existen las más diversas direcciones de oscilación perpendiculares a su dirección de propagación. Sin embargo, para el ensayo elastoóptico se necesita luz cuyo vector oscile sólo en una dirección especializada. Este resultado se consigue si se hace pasar luz a través de un filtro de polarización.

En la actualidad se utilizan como filtros de polarización láminas de plástico cuyas macromoléculas largas se han orientado en posición paralela por estiramiento mecánico, presentando así una dirección preferente.

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

Cuando sale del filtro de polarización, la luz está “polarizada linealmente”. Un segundo filtro de polarización, cuya dirección de polarización es exactamente perpendicular a la del primero, permite comprobar este proceso: se obtiene un campo oscuro, lo que significa que se anulan todas las oscilaciones (excepto una escasa luz dispersa). Por esta razón se da el segundo filtro el nombre de “analizador”. La velocidad de propagación de la luz (c) es en el vacío:

$$c = 299792458 \frac{m}{s} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

En otros medios transparentes, la velocidad (v) es menor.

Se conoce como luz visible la radiación electromagnética en el margen de frecuencia de aprox. $\nu = 3.8 \times 10^{14} \text{ Hz}$ hasta $\nu = 7.7 \times 10^{14} \text{ Hz}$, lo que corresponde a un margen de longitud de onda en el vacío $\lambda = 390 \text{ nm}$ hasta $\lambda = 790 \text{ nm}$ (conversión $\lambda = c/\nu$).

Se habla de luz monocromática (de un solo color) cuando todos los trenes de ondas de un haz de rayos oscilan con la misma frecuencia (o bien tienen la misma longitud de onda en un medio determinado). En la luz de la lámpara de vapor de sodio se presentan prácticamente sólo las dos longitudes de onda $\lambda = 589 \text{ nm}$ y $\lambda = 589.6 \text{ nm}$, muy próximas entre sí. Esto permite considerarla una aproximación muy buena a la luz monocromática, por lo que se utiliza como tal en el ensayo.

La relación c/v es el índice de refracción (n). El índice de refracción es constante en cuerpos homogéneamente transparentes. En cuerpos que se comporten de forma no homogénea frente a tensiones o dilataciones, el índice de refracción es una función de las tensiones principales:

$$n_1 = f(\sigma_1) ; n_2 = f(\sigma_2)$$

Si un vector de luz polarizada linealmente A incide en un punto P de un cuerpo transparente, siendo 1-1 y 2-2 las direcciones de las tensiones principales (ver ilustración 2), el vector de oscilación se divide en dos vectores polarizados A_1 y A_2 que oscilan en los planos 1-1 y 2-2. Las velocidades de los dos vectores de luz son entonces, dependiendo de σ_1 y σ_2 , y v_1 y v_2 . El tiempo que necesitan estos dos vectores para atravesar un cuerpo de espesor d es entonces: d/v_1 o respectivamente d/v_2 . De aquí resulta un retardo relativo o la diferencia de trayectoria de un rayo respecto al otro:

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	 Sistema Integrado de Gestión
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

$$\delta = \frac{cd}{v_1} - \frac{cd}{v_2} = d(n_1 - n_2)$$

Sobre la base de la ley de Brewster se llega a la siguiente regla: “la variación relativa del índice de refracción es proporcional a la diferencia de las tensiones principales”.

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

K es un factor de proporcionalidad que depende de las propiedades físicas del material y de la longitud de onda de la luz utilizada. La constante no tiene dimensiones. Se obtiene a través de un ensayo de calibración realizado en un modelo con momento constante, que se puede calcular exactamente por un procedimiento analítico. Con ella se expresa en principio la sensibilidad elastoóptica del material. Si se combinan las ecuaciones resulta la ecuación fundamental de la elastoóptica:

$$\delta = d \cdot K_{(\lambda)}(\sigma_1 - \sigma_2)$$

$$\frac{\delta}{d \cdot K_{(\lambda)}} = (\sigma_1 - \sigma_2)$$

Donde:

δ = Diferencia de trayectoria como cantidad de longitudes de onda (1,2,3...) u órdenes, por ello también número de orden.

d = espesor del modelo (cm)

$K_{(\lambda)}$ = Constante de proporcionalidad

$(\sigma_1 - \sigma_2)$ = Diferencia de las tensiones principales

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

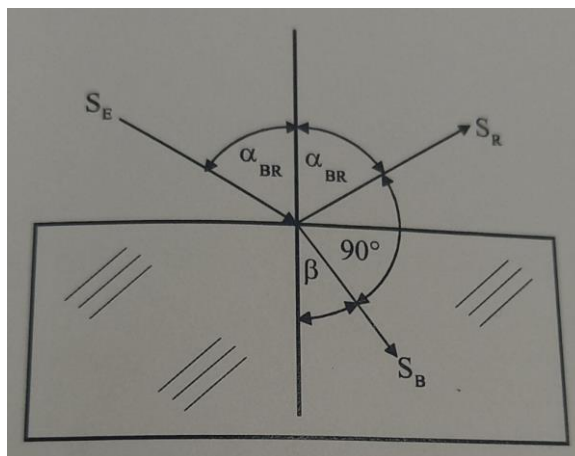


Ilustración 3. Ley de Brewster.

Entre el modelo y el analizador oscilan pues los dos vectores A1 y A2 (ver ilustración 1) con la diferencia de trayectoria δ . Por superposición se pueden reunir en un solo vector. El vector resultante se dice que está “polarizado elípticamente”, porque la punta del vector se mueve sobre una espiral elíptica.

Sin embargo, se llega al mismo resultado si se siguen considerando por separado las dos componentes A1 y A2. El analizador sólo deja pasar las fracciones de las componentes A1 y A2. El analizador sólo deja pasar las fracciones de las componentes A1 y A2 que están en su plano de polarización H1 y H2 (ver ilustración 1). H1 y H2 salen del analizador con la diferencia de trayectoria δ e interfieren. Son el resultado del ensayo elastoóptico.

3.3. Líneas isocromáticas e isóclinas

Si no hay tensiones en el modelo, no se produce birrefringencia. El ángulo α y la diferencia de trayectoria δ son cero y el modelo aparece negro. Si ahora se aplica una carga y se incrementa, resulta una diferencia de trayectoria que aumenta proporcionalmente a la magnitud de la diferencia de las tensiones principales. Según el teorema del paralelogramo, las amplitudes de las componentes H1 y H2 dependen ciertamente de la inclinación de las sub-componentes A1 y A2, pero tienen siempre la misma magnitud. El fenómeno luminoso que se ve ahora detrás del analizador depende de la composición de las fracciones H1 y H2, o de la medida en que la oscilación provocada por la diferencia de trayectorias que se produce permita o no una resultante (ver ilustración 2).

En principio se observan dos extremos:

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

1. H1 y H2 no presentan diferencia de trayectoria. Oscilan en oposición de fase. Este caso se presenta cuando las tensiones principales son ligeramente mayores que cero y de igual magnitud. La diferencia de las tensiones principales $\sigma_1 - \sigma_2$ es entonces cero. Dado que las dos fracciones H oscilan con la misma magnitud, pero con signo inverso, para este punto se obtiene una supresión total, apareciendo por lo tanto el modelo oscuro. El mismo efecto se obtiene si la diferencia de trayectoria equivale a una o varias longitudes de onda enteras.
2. H1 y H2 presentan una diferencia de trayectoria equivalente a media longitud de onda. Oscilan en la misma fase. La superposición de los trenes de onda implicados tiene como consecuencia que las oscilaciones se intensifican en cada punto. Detrás del analizador se obtiene aquí la luminosidad máxima posible. Este proceso se repite conforme al aumento de la diferencia de tensiones principales y con ello la diferencia de trayectorias. Dado que el modelo no es considerado solo por puntos, sino también como superficie, dependiendo de la distribución de tensiones, es decir, del aumento o la disminución de los gradientes de tensión, se reconocen líneas coherentes con alternancia de claro y oscuro: **las líneas isocromáticas**.

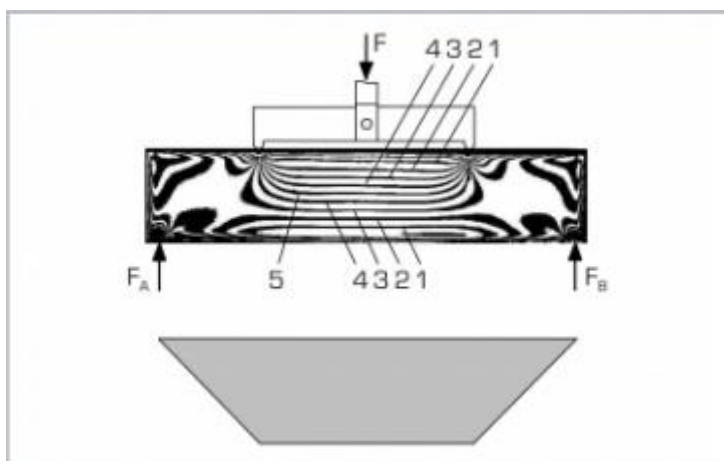


Ilustración 4. Arriba: distribución de tensiones en el modelo bajo carga de flexión: 1 a 4 posición de líneas isocromáticas, 4 eje neutro; F fuerza externa, F_A / F_B reacciones en los apoyos; abajo: diagrama de momento flector.

Se trata pues de líneas con la misma diferencia de tensiones principales. Partiendo del caso $\sigma_1 - \sigma_2 = 0$ (diferencia de trayectorias $\delta = 0$; supresión total) se clasifican las líneas isocromáticas según el orden. Desde el orden “cero” ($\delta = 0$) se cuenta la cantidad de

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	 SIGUD Sistema Integrado de Gestión
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

desplazamientos de fase con longitudes de onda enteras (líneas isocromáticas de primer, segundo, tercer, ... orden).

El modelo de una barra con entalladura representado se somete a la carga de una fuerza individual, (ver ilustraciones 5 y 6). También aquí se puede reconocer la gran densidad de líneas isocromáticas en el círculo interior del arco. Aquí se presentan las tensiones máximas. Precisamente en la luz monocromática es donde mejor se hace la resolución de las distintas líneas; en la ilustración 5 se reconocen con una mucho mayor claridad las trayectorias “en forma de mariposa”, concentrándose debajo del punto de aplicación de la fuerza.

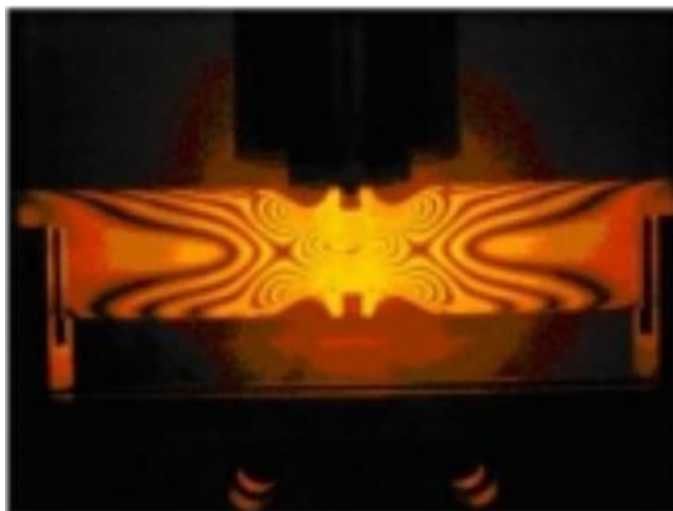


Ilustración 5. Modelo de una barra con entalladuras en luz monocromática.

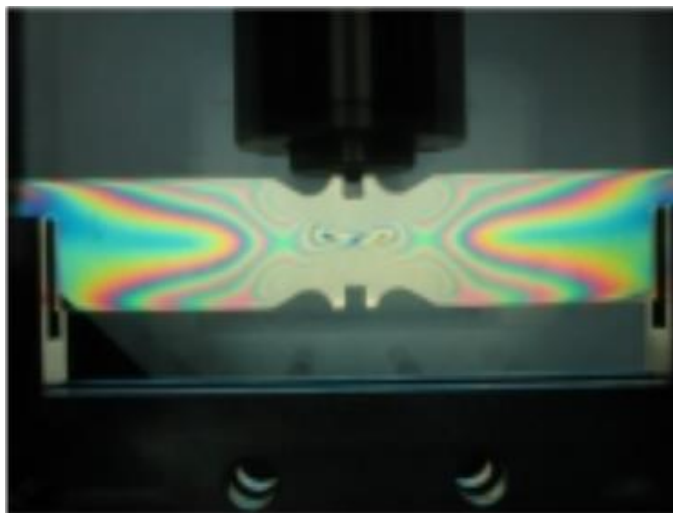


Ilustración 6. Modelo de una barra con entalladuras en luz blanca.

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	 SIGUD Sistema Integrado de Gestión
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

Se debe advertir también que estos valores de claro/oscuro sólo se pueden conseguir con luz monocromática polarizada (usualmente amarilla o verde). La luz blanca se compone de los colores espectrales de diversas longitudes de onda. En el ensayo elastoóptico, los colores de onda corta (azul) alcanzan el desplazamiento de fase de una longitud de onda entera antes que los de onda larga (rojo). Detrás del analizador permanecen visibles entonces los respectivos colores complementarios como “líneas de igual color” (isocromáticas). Sólo la línea isocromática de orden cero es también aquí oscura.

4. MONTAJE

4.1. Montaje del equipo

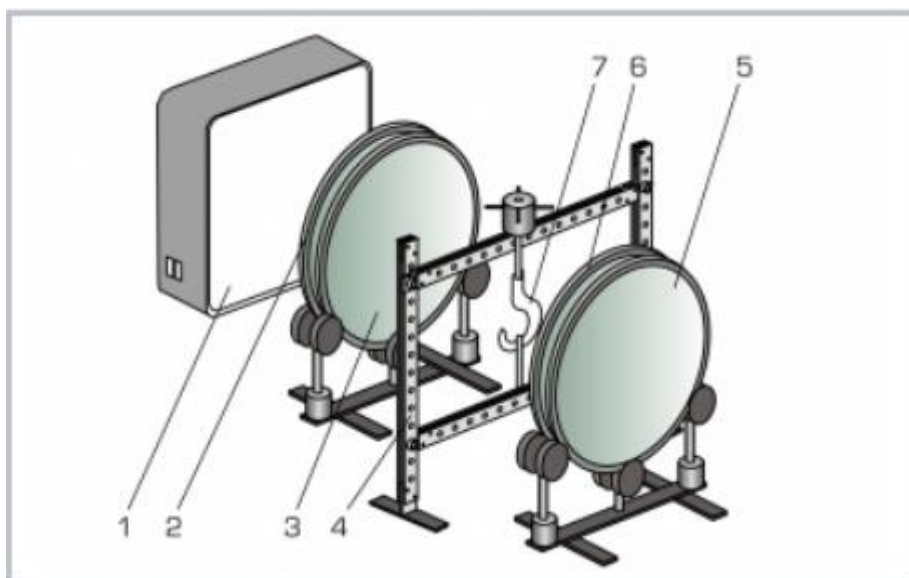


Ilustración 7. 1 fuente de luz, 2 filtro de polarización como polarizador, 3 filtro de cuarto de onda, 4 bastidor para fijar y someter a carga los modelos, 5 filtro de polarización como analizador, 6 filtro de cuarto de onda, 7 modelo sometido a carga.

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

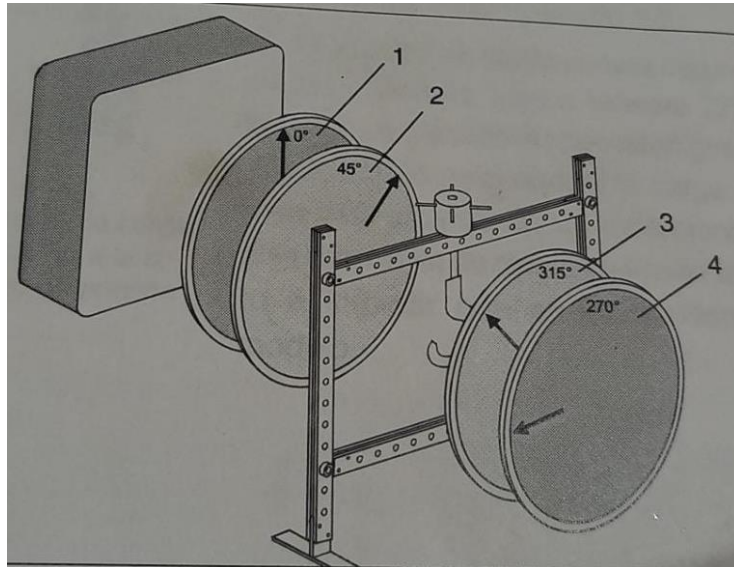


Ilustración 8. Posición de los ejes de los filtros.

4.2. Modelos de ensayo

4.2.1. Modelos con soporte

Primero se tiene que colocar el soporte del modelo (1) en los intersticios del travesaño inferior del bastidor de carga. Sobre él se coloca luego uno de los modelos. Para poder aplicar una carga se tiene que colocar el puente de carga (2) sobre el modelo. A continuación, se coloca el husillo de carga. En este ensayo se trabajan con cargas a compresión.

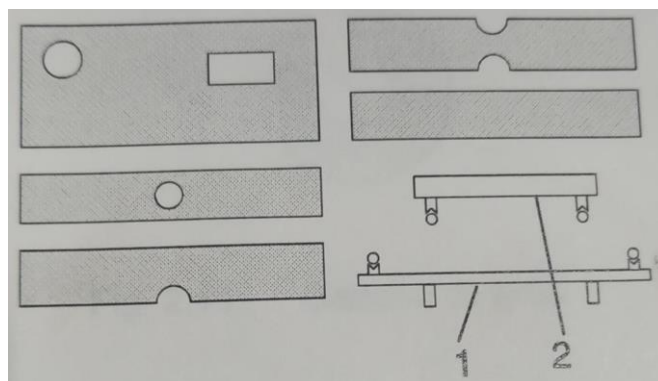


Ilustración 9. Modelos y soporte.

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	 SIGUD Sistema Integrado de Gestión
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

4.2.2. Modelo de arco con soporte

El modelo de arco simula las difusiones de tensiones que se presentan en arcos. Para el montaje del modelo (2) en el bastidor se coloca primero el soporte (1) en los intersticios del travesaño inferior del bastidor. Luego se coloca el modelo y a continuación se emplaza sobre el mismo el puente de carga (3) con los dos puntos de presión.

Ahora se puede montar el husillo de carga (fuerzas de presión), ejerciendo seguidamente una fuerza sobre el modelo a través de la pieza de presión.

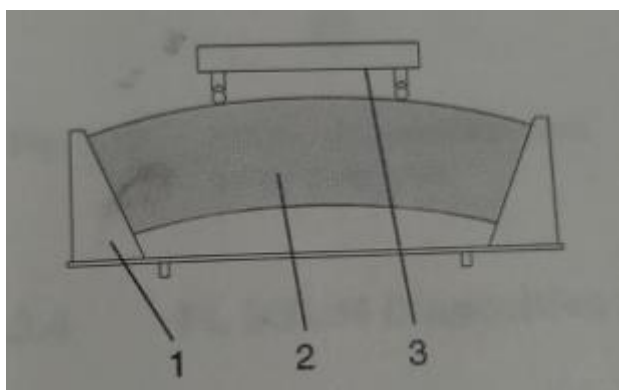


Ilustración 10. Arco

4.2.3. Modelo de gancho de grúa con soporte

Para el modelo de gancho de grúa se tiene que ejercer una carga de tensión (observar el montaje del husillo de carga). El husillo de carga se monta en el extremo superior del gancho de grúa por medio de una pletina y dos tornillos.

El extremo inferior del gancho se sujeta con un estribo de retención (ilustración 12) que se atornilla en el travesaño inferior.

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

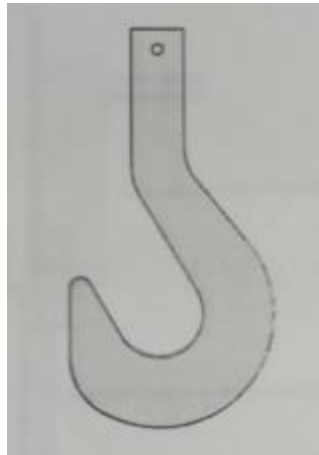


Ilustración 11. Modelo gancho de grúa.

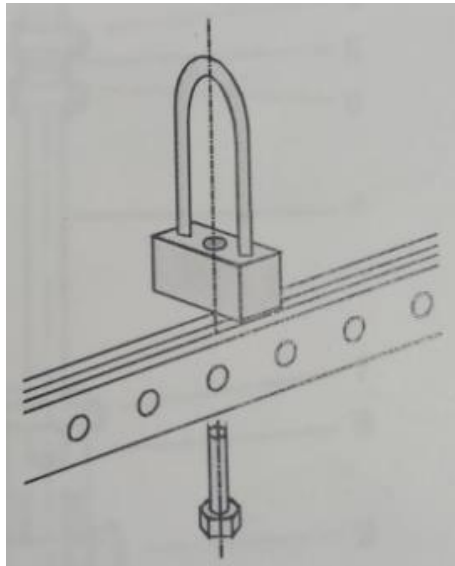


Ilustración 12. Estribo de retención para gancho de grúa

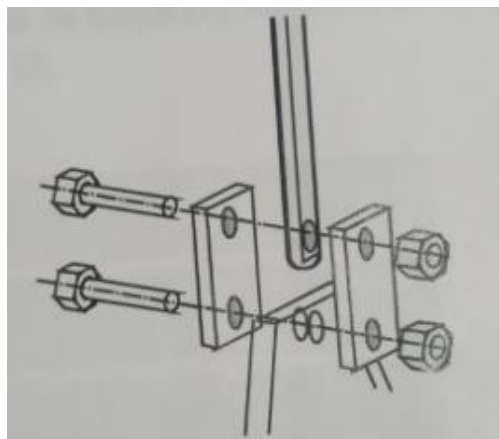


Ilustración 13. Fijación para pruebas de tensión.

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

5. PROCEDIMIENTO

Antes de comenzar el ensayo se deben examinar todos los componentes para detectar posibles daños y se debe verificar que los filtros se encuentren en la posición angular debida.

Dado que la lámpara de sodio necesita un tiempo de precalentamiento de hasta 7 minutos, se debe encender con la debida antelación.

- Inicialmente se debe montar uno de los modelos acorde a las especificaciones indicadas en la sección anterior.
- Aplicar la carga sobre el modelo, bien se de presión o tensión.
- Para un estado de carga máximo, identificar las líneas isocromáticas bajo luz monocromática y luz blanca.
- Contar las diferentes posiciones de líneas isocromáticas, se comienza a contar siempre en el borde exterior del modelo, y se cuenta hacia el interior.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Patzelt, W. J.: Microscopía de polarización – fundamentos, instrumentos, aplicaciones. LEITZ Wetzlar (1974)
- Wolf H.: Elastoóptica, tomo 1, fundamentos, SPRINGER – Verlag Zweite Auflage (1976)
- Becker G.W. / Braund D.: Manual de plásticos I, los plásticos – química, física, tecnología), HANSER Verlag (1990)
- Helfberend, A.: Desarrollo y comprobación práctica didáctica de un ensayo elastoóptico para ilustrar problemas causados por tensiones en elementos y componentes, para clases de formación profesional del ramo de la construcción.