

12. INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS TENSIONAL CON EL MÉTODO *PhotoStress*[®]

12.1. Descripción General

PhotoStress es una técnica de pleno campo usada extensamente en deformaciones superficiales medidas con precisión para determinar las tensiones en un elemento o estructura durante ensayos estáticos o dinámicos.

Con el método PhotoStress, primero se vincula al elemento a ensayar un revestimiento especial de plástico sensible a la deformación. Luego, cuando son aplicadas las cargas de ensayo o de servicio al elemento, la protección es iluminada con luz polarizada de un polariscopio de reflexión. Cuando se observa a través del polariscopio, el revestimiento muestra las deformaciones en un diagrama informativo coloreado que inmediatamente revela la distribución global de deformación y las áreas de puntos altamente deformadas. Con un transductor óptico (compensador) adosado al polariscopio, el análisis tensional cuantitativo se puede realizar rápida y fácilmente. Se pueden hacer grabaciones permanentes de la distribución global de deformación por fotografía o por videograbación.

Con PhotoStress se puede...

- Identificar instantáneamente áreas críticas, regiones sobretensionadas o subtensionadas al máximo de luminancia
- Medir de forma precisa tensiones de pico y determinar concentraciones de tensión alrededor de agujeros, entallas, chaflanes, y otras áreas de fallo potencial
- Optimizar la distribución de tensión en elementos y estructuras para mínimo peso y máxima fiabilidad
- Medir tensiones y direcciones principales en cualquier punto del elemento revestido
- Ensayar repetidamente bajo combinaciones de carga alternante sin repetir el revestimiento (protección) del elemento
- Realizar medidas de tensión en el laboratorio o “a cielo abierto” –sin verse afectadas por la humedad o el tiempo
- Identificar y medir tensiones de montaje y tensiones residuales
- Detectar deformación (rendimiento), y observar la redistribución de deformaciones en el rango plástico de deformación

Los revestimientos PhotoStress se pueden aplicar a la superficie de cualquier elemento de ensayo sin tener en cuenta su forma, tamaño, o composición del material. Para formas complejas a revestir (Fig.1), plástico líquido es fundido en un molde de placa plana y es dejado polimerizar parcialmente. Todavía en un estado flexible, el revestimiento es desplazado del molde y

conformado manualmente a los contornos del elemento de ensayo. Cuando está totalmente solidificado, el revestimiento de plástico se adapta en su lugar con un cemento especial reflectante, y el elemento está entonces preparado para ser ensayado. Para superficies planas, láminas planas premanufacturadas se cortan a medida y se adaptan directamente al elemento de ensayo.

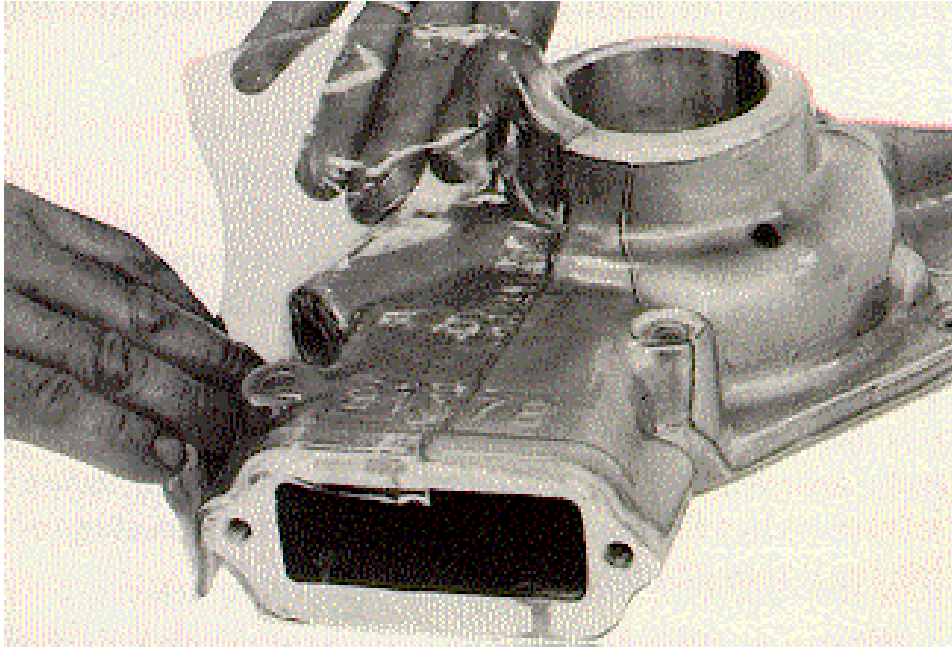


Figura 12.1. Aplicación de recubrimiento fotoelástico a la carcasa de una bomba de agua.

PhotoStress tiene una historia establecida de aplicaciones con éxito virtualmente en cada campo de fabricación y construcción donde se emplea el análisis tensional, incluyendo: automoción – maquinaria FARM – industria aeronáutica y espacial – construcción de edificios – motores – recipientes de presión – construcción de barcos – equipo de oficina – puentes – herramientas – muchos más, muchos otros.

12.2. Instrumentación en Photostress y Materiales

12.2.1. Polariscopios de reflexión

Para el análisis PhotoStress, se utiliza un polariscopio de reflexión para observar y medir las deformaciones superficiales en el elemento de ensayo revestido fotoelásticamente (Fig. 2).

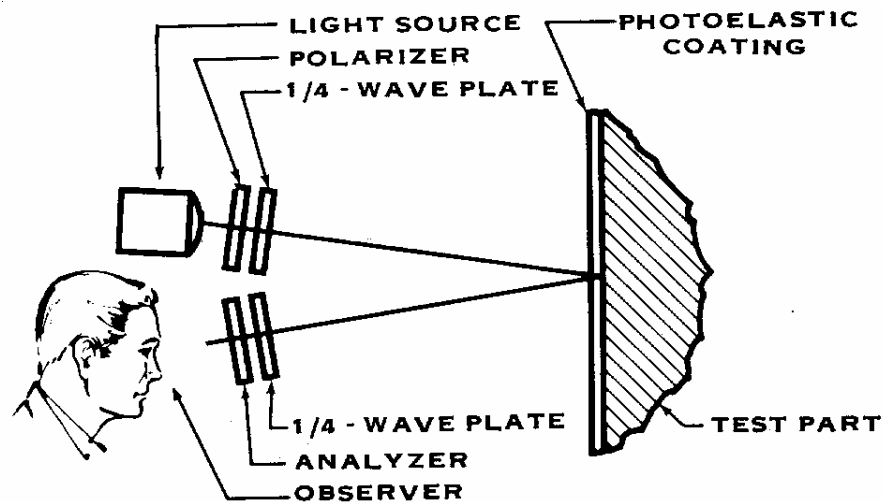


Figura 12.2. Representación esquemática de un polariscopio por reflexión.

12.2.2. Materiales de revestimiento

La elección de los materiales de revestimiento de PhotoStress y su propia aplicación al elemento de ensayo es lo más esencial en el éxito en el análisis de PhotoStress. Está disponible un amplio rango de materiales de revestimiento, tanto en la forma de placa plana como en líquido para aplicación a metales, hormigón, plásticos, goma, y la mayoría de otros materiales. Los revestimientos son composiciones cuidadosas de resinas mezcladas que suministran propiedades fotoelásticas conocidas y repetibles, y se proveen con instrucciones detalladas de aplicación y manejo. Además, están disponibles equipos de aplicación diseñados, que contienen lo que se requiere para la instalación correcta del revestimiento PhotoStress en el elemento de ensayo.

12.3. Análisis de diagramas de Franja Fotoelásticos

PhotoStress ofrece la capacidad para los siguientes tipos de análisis y de medida:

1. Interpretación de diagramas de franja permitiendo la evaluación de magnitudes y gradientes de deformación/tensión.

2. Medidas cuantitativas:

Las direcciones de deformaciones y tensiones principales en todos los puntos del revestimiento fotoelástico.

La magnitud y signo del esfuerzo tangencial a lo largo de los contornos libres (sin carga), y en todas las regiones donde el estado de tensión es uniaxial.

En el estado de tensión biaxial, la magnitud y signo de la diferencia de deformaciones y tensiones principales en cualquier punto elegido en la superficie revestida del objeto de ensayo.

12.3.1. Interpretación total de la distribución de deformación

Además de su capacidad de obtener medidas de deformación precisas en los puntos de ensayo preseleccionados, PhotoStress provee otra capacidad igualmente importante al analista de tensión. Esta es la facilidad para el reconocimiento inmediato de magnitudes nominales de deformación (y tensión), gradientes de deformación, y distribución global de deformación – incluyendo la identificación de áreas sobretensionadas o subtensionadas. Este atributo apreciable extremadamente de PhotoStress descrito como *interpretación total*, es única en los métodos fotoelásticos de análisis tensional. Su aplicación correcta depende sólo del reconocimiento de ordenes de franja por colores, y un entendimiento de la relación entre el orden de franja y la magnitud de deformación.

Cuando un objeto de ensayo revestido fotoelásticamente está sometido a cargas, las tensiones resultantes causan deformaciones que existen en general a través del elemento y sobre su superficie. Las tensiones y deformaciones superficiales son típicamente las mayores, y unas de las de más importancia. Ya que el revestimiento fotoelástico está íntima y uniformemente unido a la superficie del elemento, las deformaciones en el elemento se transmiten consecutivamente al revestimiento. Las deformaciones en el revestimiento producen efectos ópticos α que aparecen como *líneas isocromáticas* cuando son vistas con un polariscopio de reflexión.

El diagrama de franjas fotoelástico contiene mucha información y se lo revela al ingeniero de diseño. Si, por ejemplo, un elemento está siendo analizado a tensión como resultado de fallos en servicio, el diagrama fotoelástico global sugerirá medidas correctoras para prevenir los fallos –con frecuencia envuelven cambio de material y ahorro de peso. A causa del dibujo total generado de distribución de tensión, se puede decir que la zona de sobretensión (tensión excesiva) responsable de los fallos está rodeada por un área de tensión cercana a cero; y un cambio tenue de forma redistribuirá las tensiones hasta eliminar la concentración de tensión, mientras se fuerza al material

de subtensión al aceptar parte de la carga.

De forma similar, en el análisis tensional en prototipos con propósitos de desarrollo de productos, el diagrama fotoelástico puede apuntar el camino en las modificaciones de diseño para conseguir el mínimo peso, el elemento adecuado funcionalmente, es decir, el diseño óptimo. Además, la observación total de la distribución de tensión muestra fácilmente los efectos de los modos de variación de carga, como también el significado relativo de cargas individuales y/o las direcciones de carga. Estos ejemplos son meramente indicativos de las muchas formas en las cuales los diagramas de franja totales en elementos revestidos fotoelásticamente aclaran al analista de tensión entendido y proveen un nivel de comprensión que no se puede obtener de medidas de deformación “a ciegas” en un punto.

12.3.2. Generación de la franja

Comenzando con el elemento de ensayo sin carga, y aplicando la carga, o las cargas, en incrementos, las franjas aparecerán primero en los puntos de tensión más alta (Fig. 3). Cuando la carga es aumentada y aparecen nuevas franjas, las primeras franjas son empujadas hacia las áreas de menor tensión. Con cargas mayores se generan franjas adicionales y en las regiones de alta tensión y se mueven hacia las regiones de cero o de tensión baja hasta que se alcanza la máxima carga. A las franjas se les puede asignar números ordinales (primera, segunda, tercera, etc.) cuando aparezcan, y retendrán sus identidades individuales (“ordenes”) a través de la secuencia de carga. No sólo son franjas ordenadas en el sentido de numeración en serie, sino que además son metódicas –es decir, son continuas, nunca se cruzan o se unen con otras, y siempre mantienen sus posiciones respectivas en la secuencia ordenada.

Cuando se observa con un polariscopio de reflexión, el diagrama de franja fotoelástico aparece como una serie de bandas sucesivas y contiguas de diferentes colores (isocromáticas) en las cuales cada banda representa un grado diferente de birrefringencia (doble refracción), un orden de franja (y nivel de deformación), en cualquier lugar a lo largo de esa banda. Con un entendimiento de la secuencia invariante en la cual aparecen los colores, el diagrama de franja fotoelástica se puede leer como un mapa fotográfico para visualizar la distribución de tensión sobre la superficie del elemento de ensayo revestido.

El efecto fotoelástico es causado por la interferencia constructiva y destructiva entre los rayos de luz que han experimentado el retardo (deceleración) relativo, o cambio de fase, en el revestimiento fotoelástico tensionado. Al usar luz monocromática, la magnitud del retardo relativo a lo largo de cualquier franja es múltiplo integral de la longitud de onda (λ , 2λ , 3λ , etc.), los rayos están 180° desfasados, y existe anulación mutua, causando la extinción de la luz y produciendo una banda negra. Por otro lado, cuando el retardo relativo es un múltiplo impar de $\lambda/2$ ($\lambda/2$, $3\lambda/2$,

$5\lambda/2$, etc.), los rayos están perfectamente en fase y se combinan para causar máxima luminosidad. Magnitudes intermedias de retardo relativo producen intensidades de luz intermedias. Sin embargo, ya que la intensidad de luz es una función en seno-cuadrado del retardo relativo, el diagrama fotoelástico resultante aparece compuesto de luz alternativa y franjas oscuras.

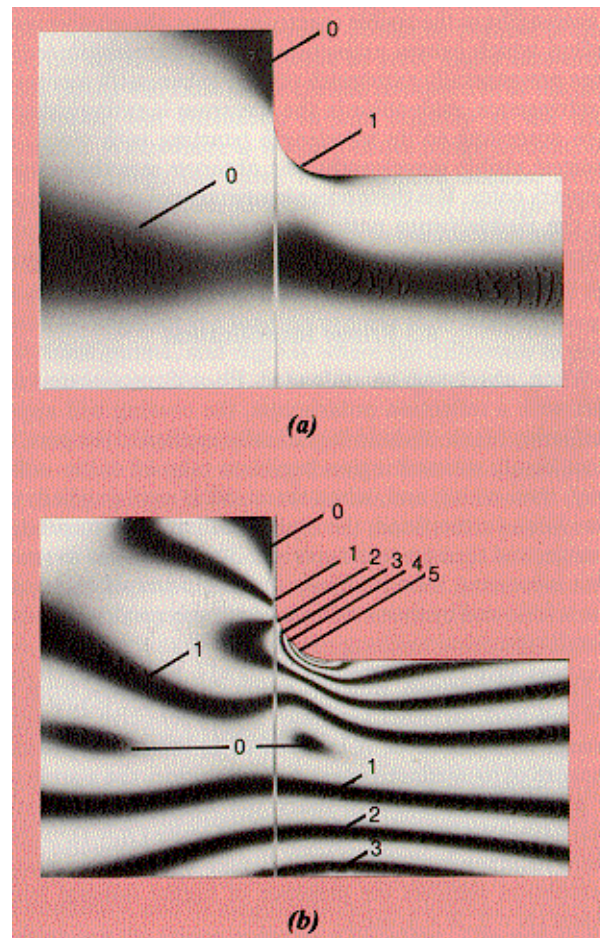


Figura 12.3. Franjas generadas en un espécimen sometido a flexión. (a) carga baja. (b) carga elevada.

La luz blanca, generalmente usada para la interpretación total de diagramas de franja en ensayos PhotoStress, está compuesta por todas las longitudes de onda del espectro visible. Por tanto, el retardo relativo que causa la extinción de una longitud de onda (color) no extingue en general a otras. Cuando, con el aumento de la birrefringencia, cada color del espectro se extingue por turnos de acuerdo a su longitud de onda (empezando con violeta, la longitud de onda más pequeña), el observador ve el color complementario. Estos colores complementarios hacen al diagrama de franja visible en luz blanca. La secuencia de color completa se da en la tabla 1, incluyendo, para cada color, el retardo relativo y el orden de franja numérico.

12.3.3. Identificación de la franja

Cuando se observa un elemento de ensayo revestido con PhotoStress sin carga, el revestimiento aparecerá uniformemente negro. Según se aplica gradualmente la carga, la región con mayor tensión empieza a tomar color – primero gris, luego blanco; y cuando el violeta se extingue para producir naranja; y el verde, para dar rojo. El siguiente color que desaparece con el aumento carga es el amarillo, dejando un color morado; y este continua con la extinción del naranja, produciendo una franja azul profundo.

La franja morada, que se distingue fácilmente de la roja y azul en cada lado, y que es muy sensible a un pequeño cambio en el nivel de deformación, se distingue como “color de paso”. A causa de esta distinción y resolución, el color de paso morado se selecciona para marcar el incremento en retardo relativo igual a un orden de franja de la unidad ($N = 1$). Recurrir subsecuentemente a un color de paso con retardo relativo mayor significa la presencia de ordenes de franja integrales mayores ($N=2, N=3$, etc.).

Al continuar aumentando la carga en el elemento de ensayo y produciendo retardo relativo adicional, la luz roja se extingue del espectro de luz blanca, y el color de la banda es azul verde. Con una carga todavía mayor, el retardo relativo alcanza el nivel donde corresponde el doble de la longitud de onda de violeta, extinguiéndose este color por segunda vez y comenzando el ciclo de banda otra vez. Sin embargo, el color rojo intenso en el final (borde) del espectro de luz blanca además tiene el doble de longitud de onda de violeta, y por tanto experimenta su primera extinción simultáneamente con la segunda extinción de violeta. El resultado es que el color de banda es la combinación de dos colores complementarios, amarillo y verde. Cuando la carga y el retardo relativo continua aumentando, el ciclo de color de banda se repite, pero los colores no son exactamente los mismos que en el primer ciclo a causa de la extinción simultánea de dos o más colores.

TABLA 1
Características de franja isocromática

Color	Deceleración relativa Aproximada		Número de orden N
	nm	$in \times 10^{-6}$	
Negro	0	0	0
Gris	160	6	0.28
Blanco	260	10	0.45
Amarillo pálido	345	14	0.60
Naranja	460	18	0.80
Rojo apagado	520	20	0.90

Morado (color de paso)	570	22.7	1.00
Azul profundo	620	24	1.08
Verde-azul	700	28	1.22
Verde-amarillo	800	32	1.39
Naranja	935	37	1.63
Rojo rosa	1050	42	1.82
Morado (color de paso)	1150	45.4	2.00
Verde	1350	53	2.35
Verde-amarillo	1440	57	2.50
Rojo	1520	60	2.65
Rojo/verde transición	1730	68	3.00
Verde	1800	71	3.10
Rosa	2100	83	3.65
Rosa/verde transición	2300	90.8	4.00
Verde	2400	95	4.15

Con cada ciclo de color completo sucesivo el efecto de las extinciones simultáneas complejas, cada vez más, causa que los colores de banda se conviertan en más pálidos y menos distintivos. A causa de este efecto, los ordenes de franja por encima de 4 o 5 no se distinguen por el color en luz blanca. Aunque los ordenes de franja mayores de 3 raramente se encuentran (o se necesitan) en análisis de tensión con revestimientos fotoelásticos.

A causa de la extinción múltiple simultánea de los colores, el color de paso de segundo orden es más pálido que el primero, y cae en el área de transición entre las bandas roja y verde. En ordenes de franja de 3 y 4 el color de paso no es visible distintamente como una banda morada, pero la transición bien definida entre rojo y verde en cada caso tiene la misma función y representa el orden de franja integral.

Una simple viga voladiza, que se muestra en la figura 4 provee los medios para entender la identificación de banda. La viga está revestida en un lado con plástico fotoelástico y abrazado (revestido en el lado superior) al extremo de un banco de ajustador o mesa de trabajo manual. Está colgado un peso, usando un hilo o cable, en el extremo libre de la viga. Cuando se observa con el polariscopio (operación de luz circular), el retardo aumenta proporcionalmente a la deformación.

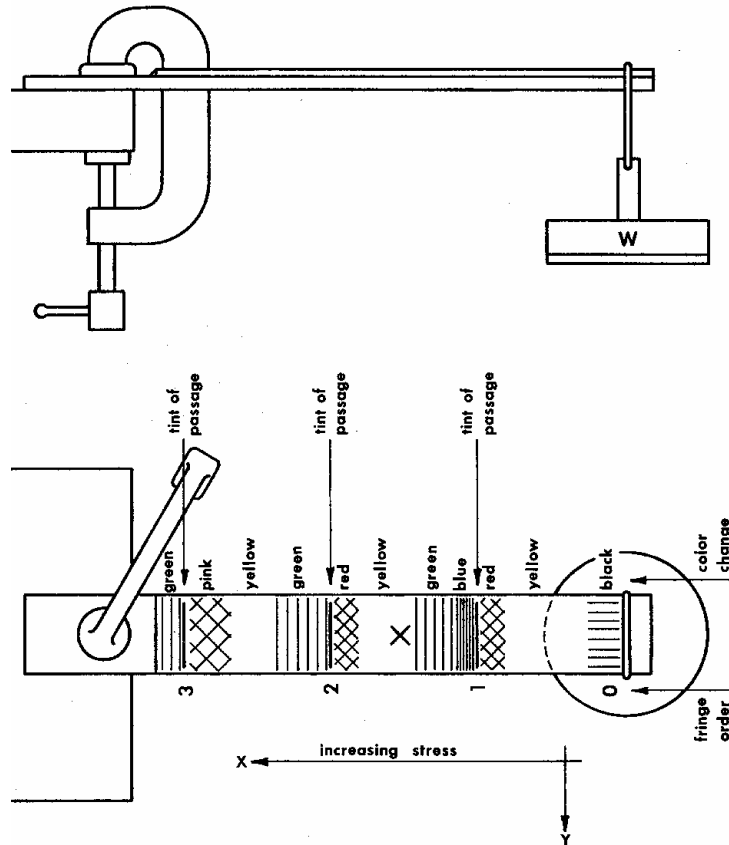


Figura 12.4. Análisis fotoelástico sobre una viga en voladizo.

Las bandas están relacionadas con el aumento de la magnitud de deformación como se resume en la tabla. Para este ejemplo [ver ec. (8)]:

$$\begin{array}{l}
 t = 0.100 \text{ (2.54 mm)} \\
 K = 0.15 \\
 \lambda = 22.7E-6 \text{ in (575 nm)}
 \end{array}
 \left. \begin{array}{l}
 \\
 \\
 \end{array} \right\} f = 757 \text{ } \mu\text{in/in/franja} \text{ (}\mu\text{m/m/franja)}$$

Número de Orden N	Deformación $(\epsilon_x - \epsilon_y) = Nf$
0 (franja negra)	0
1 (rojo-azul)	757 $\mu\text{in/in}$ ($\mu\text{m/m}$) (1 f)

2 (1° rojo-verde)	1514 $\mu\text{in/in}$ ($\mu\text{m/m}$) (2 <i>f</i>)
3 (2° rojo-verde)	2271 $\mu\text{in/in}$ ($\mu\text{m/m}$) (3 <i>f</i>)

12.3.4. Significado cuantitativo de las franjas

Las bandas fotoelásticas tienen comportamientos característicos los cuales son de mucha ayuda en la interpretación de los diagramas de franja. Por ejemplo, las franjas son normalmente bandas continuas, formando o bien mallas cerradas o líneas curvas. Las bandas de orden cero negras son normalmente manchas aisladas, líneas o áreas rodeadas por bandas adyacentes o de orden mayor. Las bandas nunca se intersecan, o de otra manera pierden sus identidades, y entonces el orden de franja y el nivel de deformación son uniformes en cada punto en una banda. Además, las franjas siempre existen en una secuencia continua en número y color. En otras palabras, si se identifican las franjas primera y tercera, la franja de segundo orden debe estar entre ellas. La secuencia de color en cualquier dirección establece si el orden de franja y el nivel de deformación aumenta o disminuye en esa dirección.

Las características de las franjas fotoelásticas son las mismas en aquellas de contornos de nivel constante en un mapa topográfico en color. Como resultado, se puede considerar cualquier diagrama fotoelástico, y ser visualizado, como un mapa topográfico de la diferencia (sin considerar el signo) entre las deformaciones o tensiones principales sobre la superficie del elemento de ensayo. En otras palabras, las magnitudes de los niveles de deformación, como se indica con los ordenes de franja, corresponden directamente a niveles de altitud constante en un mapa topográfico. Y el diagrama de franja representa picos y valles, mesetas y colinas – representados respecto “del nivel del mar” por las franjas de orden cero.

Si hay una franja de orden cero en el campo de visualización, será normalmente obvio por su color negro. Asumiendo que el elemento de ensayo revestido tenga una esquina cuadrada libre o una proyección destacada, la tensión siempre será cero, y la banda de orden cero (mancha) existirá en la esquina, independientemente de la magnitud de la carga, pero disminuyendo en tamaño lentamente según aumenta la carga. Cuando no hay banda de orden cero evidente, la banda de primer orden se puede con frecuencia reconocer a causa de los colores brillantes adyacentes al color de paso morado. Como alternativa, cuando el objeto de ensayo se pueda cargar de forma

incremental desde un estado inicial de tensión nula, la franja de orden cero inicial que cubre el revestimiento completo se puede seguir normalmente a través del proceso de carga según retrocede hacia puntos sin tensión, y a regiones donde la diferencia en tensiones principales es cero.

Una vez que se ha identificado una banda, se pueden asignar los ordenes a las otras bandas, asegurándose de que la dirección del orden de franja que está aumentando, corresponda a la secuencia de color correcta –por ejemplo, amarillo-rojo-verde, etc. Con este proceso el observador puede localizar rápidamente los ordenes de franja más altos y, en general, las regiones que han sufrido la mayor deformación. Áreas de franjas finas espaciadas muy finas, normalmente atraerán la atención del observador, ya que regiones con pendiente fuerte de deformación significan altas deformaciones también. El analista de tensión advertirá algunas grandes áreas donde el diagrama es casi uniformemente negro o gris, usualmente indicando una región sobretensionada significativamente.

Con frecuencia, el proceso de localizar los ordenes de franja más altos guiarán al observador a uno o más puntos críticos en un contorno libre. Cuando esto ocurre, el analista de tensión sabe que la tensión principal distinta de cero en tal punto es tangente al contorno, y su magnitud se puede obtener directamente multiplicando el orden de franja por una constante. El signo de la tensión, positivo o negativo para tracción o compresión, se puede determinar además muy fácilmente en un contorno libre con el polariscopio de reflexión.

12.4. Medida de las direcciones de deformación principal

12.4.1. Principio de medida

Las direcciones de deformación principal se miden siempre con referencia a una línea establecida, eje o plano. Por tanto, el paso inicial en la determinación de la dirección de las deformaciones principales (o tensiones) será seleccionado en una referencia conveniente. En la mayoría de los casos, la dirección de referencia se sugiere inmediatamente, como un eje de simetría del elemento de ensayo o estructura; en otros casos, será suficiente una línea vertical u horizontal.

Cuando un haz plano polarizado de luz atraviesa un revestimiento fotoelástico en un elemento sujeto a tensión, se descompone en ondas propagándose a distintas velocidades a lo largo de la dirección de las deformaciones principales. Después de emerger del plástico, estas dos ondas se pondrán fuera de fase con otra y no se recombinarán en una única vibración paralela a la que entra en el plástico. Sin embargo, en puntos donde la dirección de las tensiones principales es paralela al eje del filtro de polarización, el haz no se verá afectado y la vibración emergente será paralela a la vibración entrante. Un filtro analizador A con su eje perpendicular al filtro de polarización P producirá la extinción de las vibraciones en estos puntos (ver Fig. 5).

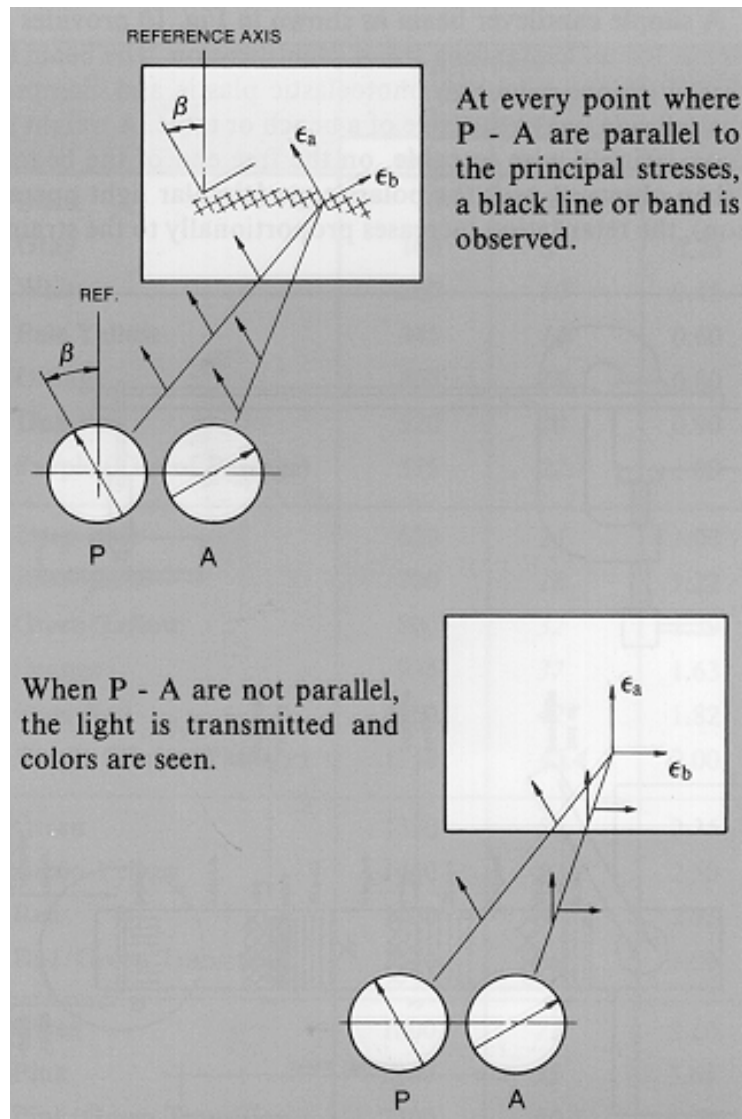


Figura 12.5. Direcciones principales detectadas mediante rotación de los ejes del polarizador / analizador hasta conseguir la extinción total de la luz en el punto de ensayo.

Observando el elemento tensionado a través de un polariscopio de reflexión (Fig. 6), aparecen líneas negras (o incluso áreas). Estas líneas se llaman *isoclinas*. En cada punto de una isoclina, las direcciones de las deformaciones principales son paralelas a la dirección de polarización de A y P . Con respecto al eje de referencia elegido, la medida de las direcciones en un punto es simplemente efectuada por la rotación de A y P juntos hasta que aparece una isoclina negra en el punto donde se van a medir las direcciones. Cuando se requieren las direcciones de deformación sobre un área completa, las isoclinas se graban normalmente con fotografía o trazando directamente en el revestimiento.

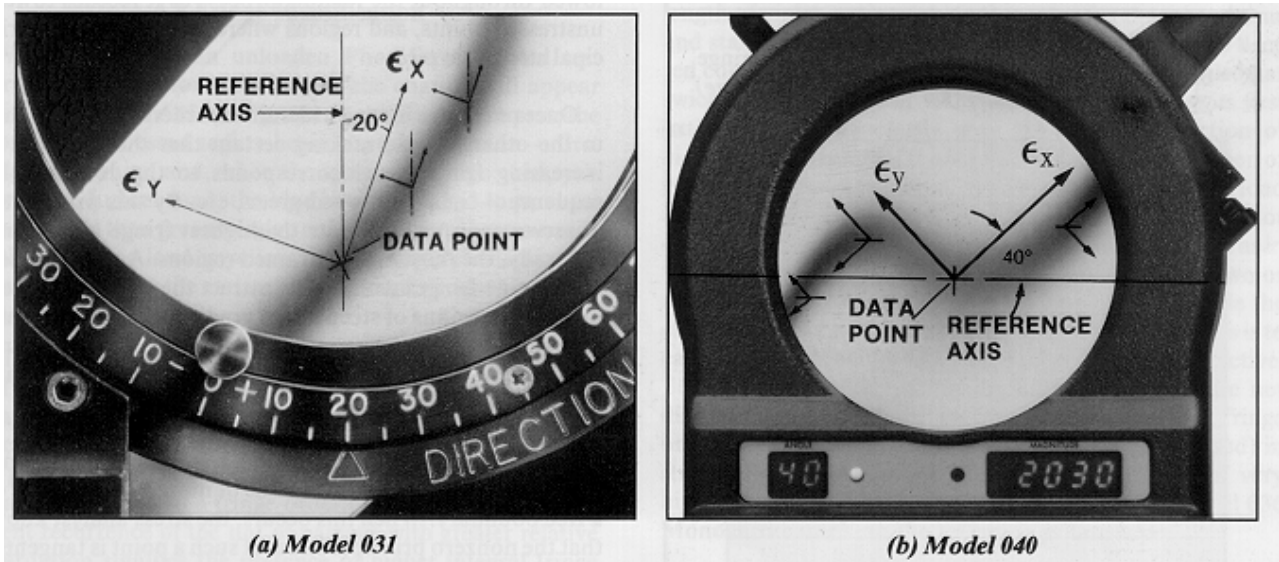


Figura 12.6. Ejemplos de polariscopios de reflexión. Determinación de isoclinas.

Si las isoclinas son estrechas y agudas, significa que las direcciones de ϵ_x y ϵ_y varían rápidamente de una localización a la siguiente. Isoclinas formando líneas negras amplias indican que las direcciones de ϵ_x y ϵ_y varían lentamente en esa región. Cuando esto ocurre, el contorno que rodea a la isocлина completamente se debería marcar (no meramente el centro). En el caso de un espécimen a tracción con sección transversal constante, se verá una isocлина que cubre el área completamente cuando los ejes de polarización coinciden con los ejes del espécimen, ya que la dirección de ϵ_x es la misma en cada punto.

Al rotar el polarizador y el analizador se conectan entre sí (en incrementos angulares pequeños y uniformes) sobre el rango de 0 a 90°, la familia completa de isoclinas se generarán. Un ejemplo de este procedimiento se muestra fotográficamente en la figura 7, para un anillo sometido a compresión diametralmente. Las isoclinas se pueden combinar en una única ilustración trazando desde las fotografías a una porción de papel, como se ilustra en la figura 8a (para sólo la mitad del anillo, ya que el diagrama es simétrico). Luego, si se desea, la familia de isoclinas se puede usar para construir un diagrama isostático, como el de la figura 8b. Las líneas isostáticas tienen la propiedad de ser en todo punto tangentes a las direcciones de tensión principal, y por tanto ilustran el “flujo” de tensión a través del objeto de ensayo.

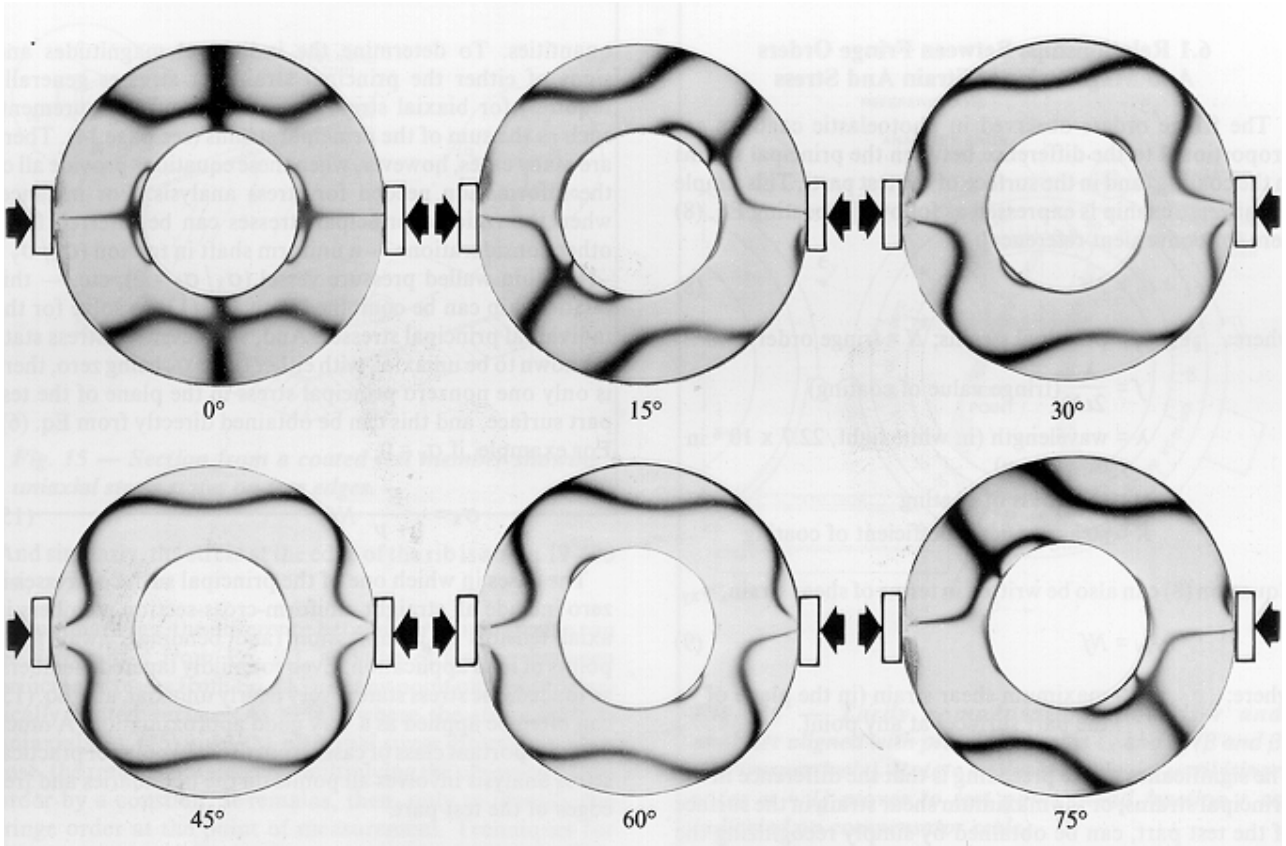


Figura 12.7. Franjas de isoclinas correspondientes a un anillo cargado diametralmente con incrementos de 15°.

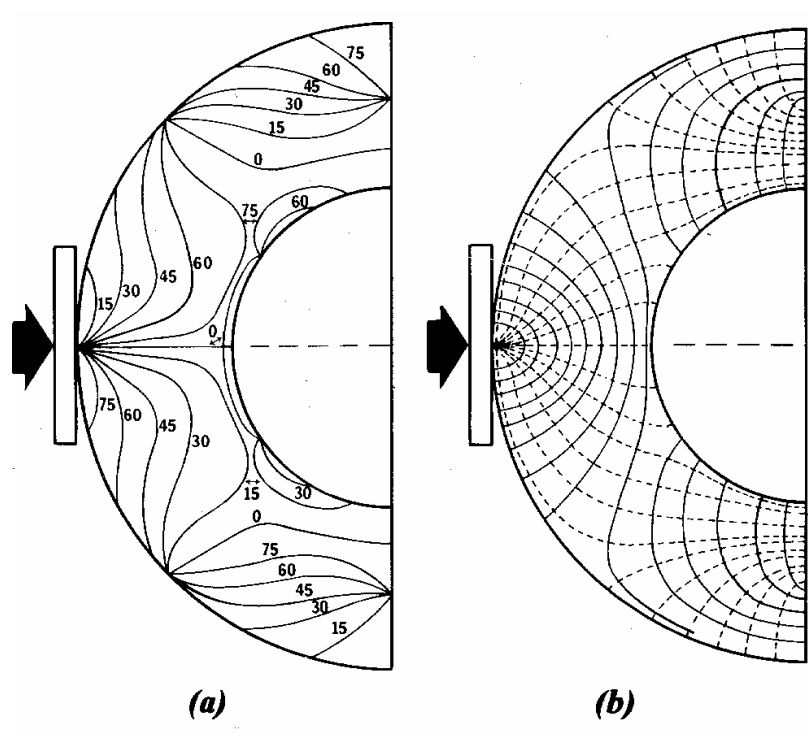


Figura 12.8. (a) Franjas de isoclinas. (b) Líneas isostáticas construidas partiendo de las isoclinas.

12.5. Medida de Magnitudes de Tensión y Deformación

12.5.1. Relaciones entre orden de franja y magnitudes de deformación y tensión

Los ordenes de franja observados en revestimientos fotoelásticos son proporcionales a la diferencia entre las deformaciones principales en el revestimiento (y en la superficie del elemento de ensayo). Esta simple relación lineal se expresa como sigue (se repite aquí la ecuación 8 por conveniencia):

$$\varepsilon_x - \varepsilon_y = Nf \quad (8)$$

Donde: $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ = deformaciones principales; N = orden de franja

$f = \lambda/(2tK)$ (valor de franja del revestimiento)

λ = longitud de onda (en luz blanca, $22.7E-6$ in o 575 nm)

t = espesor del revestimiento

K = coeficiente óptico deformación del revestimiento

La ecuación (8) además se puede escribir en términos de deformación tangencial, γ_{xy} :

$$\gamma_{xy} = Nf \quad (9)$$

Donde: γ_{xy} = deformación tangencial máxima (en el plano de la superficie del elemento) en cualquier punto.

El significado de lo anterior es que la diferencia en las deformaciones principales o en la máxima deformación tangencial en la superficie del elemento de ensayo, se puede obtener simplemente reconociendo el orden de banda y multiplicando por el valor de banda del revestimiento.

Los ingenieros y diseñadores trabajan con frecuencia con tensión más que con deformación; y debido a este propósito, las ecuaciones (8) y (9) se pueden transformar introduciendo la ley de Hooke para un estado de tensión biaxial en los materiales isotrópicos mecánicamente:

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y) \quad (10)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_y + \nu\varepsilon_x) \quad (11)$$

y,

$$\sigma_x - \sigma_y = \frac{E}{1 + \nu} (\varepsilon_x - \varepsilon_y)^* \quad (12)$$

substituyendo la ec. (8) en la ec. (12),

$$\sigma_x - \sigma_y = \frac{E}{1 + \nu} Nf \quad (13)$$

donde: σ_x, σ_y = tensiones principales en la superficie del elemento de ensayo
 E = módulo elástico del elemento de ensayo
 ν = coeficiente de Poisson del elemento de ensayo

Y sabiendo que la tensión tangencial máxima, τ_{MAX} , en el plano de la superficie en cualquier punto es $(\sigma_x - \sigma_y)/2$,

$$\tau_{MAX} = \frac{1}{2} \left(\frac{E}{1 + \nu} \right) Nf \quad (14)$$

Las ecuaciones (8) y (13), que son las relaciones principales usadas en análisis de tensión de revestimientos fotoelásticos, dan sólo la *diferencia* en deformaciones y tensiones principales, no las cantidades individuales. Para determinar las magnitudes individuales y los signos tanto de las deformaciones como de las tensiones principales generalmente se requiere, para estados de tensión biaxial, una segunda medida, tal como la suma de las deformaciones principales. Hay muchos casos, sin embargo, cuando estas ecuaciones proveen toda la información necesaria para el análisis de tensión. Por ejemplo, cuando la relación de tensiones principales se puede deducir de otras consideraciones – una flecha uniforme a torsión ($\sigma_x / \sigma_y = -1$), un recipiente de presión de pared delgada ($\sigma_x / \sigma_y = 2$), etc. – esta relación se puede combinar con la ecuación (13) para resolver las tensiones principales individuales. Y, cuando se sabe que el estado de tensión es uniaxial, σ_x o σ_y son cero, sólo hay una tensión principal distinta de cero en el plano de la superficie del elemento de ensayo, y esto se puede obtener directamente de la ecuación (6). Por ejemplo, si $\sigma_y = 0$,

$$\sigma_x = \frac{E}{1 + \nu} Nf \quad (15)$$

Los casos en los cuales una de las tensiones superficiales principales son cero incluyen todos los elementos rectos de sección transversal uniforme a tracción axial o a compresión (y a flexión), a distancia de los puntos de aplicación de la carga. Incluso para elementos inclinados

suavemente, también cargados, el estado tensional es aproximadamente uniaxial, y la ecuación (15) se puede aplicar frecuentemente como una buena aproximación. Un tipo de caso mucho más importante desde el punto de vista del análisis de tensión práctico envuelve todos los puntos en los contornos y en los extremos libres del elemento de ensayo.

Considérese, por ejemplo, un agujero sin carga que penetra al elemento de ensayo. En cada punto del extremo del agujero, los ejes principales son normales y tangenciales, respectivamente, al extremo. Como la tensión normal principal en el extremo es necesariamente cero, el estado de tensión es uniaxial, y la única tensión principal distinta de cero es en el lugar tangente al extremo del agujero. Hay muchos otros casos, tales como bridas proyectantes y nervios, y objetos “bidimensionales” en general, en los cuales el estado de tensión en el extremo sin carga es siempre uniaxial. Para tales casos, la única tensión principal distinta de cero, que es tangente al extremo, se puede determinar directamente del orden de franja observado sustituyendo en la ecuación (15); o, en efecto, multiplicando el orden de franja por una constante.

La figura 9 muestra una porción de la superficie de un elemento de máquina metálica a la cual se le ha aplicado un revestimiento fotoelástico. Como se indica, el revestimiento se ha dispuesto para unir de forma precisa el borde del agujero con el del nervio. El estado de tensión uniaxial en los puntos *a* y *b* se demuestra por los diagramas de cuerpo libre aumentados de elementos de material eliminado de los bordes para examinarlos. Con el elemento en carga en servicio normal, y revisando el revestimiento con el polariscopio de reflexión; se observa un orden de franja de dos en el punto *a*, y aproximadamente $\frac{3}{4}$ en el punto *b*. El calibrado previo ha establecido un valor de franja de 1100 $\mu\epsilon$ por franja para este revestimiento. Por tanto, la tensión en el punto *a* en la región más crítica se puede calcular directamente de la ecuación (15) asumiendo (para acero) que $E/(1+\nu) = 23.5E6$ psi o 162 GPa:

$$\sigma_x = 23.5 \times 10^6 \times 1100 \times 10^{-6} \times 2 = 51\,700 \text{ psi o,}$$

$$\sigma_x = 162 \times 10^9 \times 1100 \times 10^{-6} \times 2 = 356 \text{ MPa}$$

Y de forma similar, la tensión en el borde del nervio es aproximadamente de 19-400 psi, o 134 MPa.

Resumiendo, la diferencia entre deformaciones principales se puede determinar de la ecuación (8), y la diferencia entre tensiones principales de la ecuación (13), en cualquier punto en una superficie revestida fotoelásticamente. En punto donde el estado de tensión es uniaxial, la ecuación (15) da directamente la tensión principal. En cada caso, el resultado se obtiene multiplicando el orden de franja observado por una constante. Queda, sólo identificar el orden de franja en el punto de medida. Se siguen las técnicas para desarrollar esto de forma precisa y positiva con el polariscopio de reflexión.

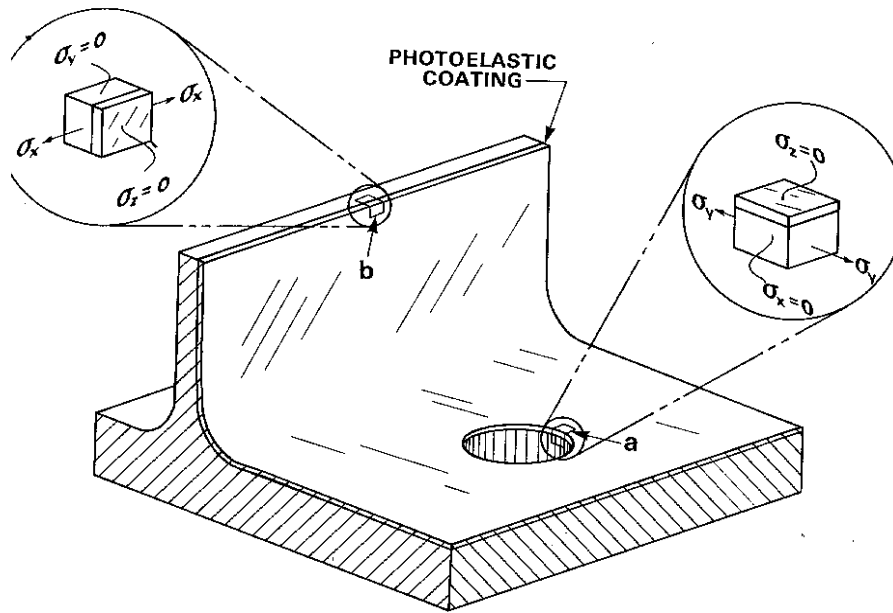


Figura 12.9. Porción de la superficie de un elemento de máquina metálica a la cual se le ha aplicado un revestimiento fotoelástico

12.5.2. Medidas en un punto

Se ha mostrado que en el primer paso de medida, uno observa el área completa y asigna a cada franja su orden ($N = 1, 2, 3$, etc.). En cada punto de una franja, N es entonces conocido y por tanto:

$$\varepsilon_x - \varepsilon_y = Nf$$

En general, el punto de interés en la estructura caerá entre franjas, y será necesario establecer el “orden fraccional” o fracción de una franja. La técnica usada se llama “compensación”. Se usan dos métodos básicos:

1. Compensación tardía usando el analizador rotatorio incorporado al polariscopio modelo 031.
2. Compensación de balance nulo usando los accesorios modulares de la serie 030, modelos 232 o 632, o el polariscopio modelo 040.

12.5.2.1. Compensación tardía

La compensación tardía es un método relativamente rápido y simple. Sin embargo, el método requiere un operador con experiencia si las medidas se van a hacer a toda prueba. El principio del método es el siguiente:

Cuando el polarizador y el analizador están alineados con la dirección de las deformaciones/tensiones principales, y las placas de cuarto de onda están a 45° , una rotación α del analizador en el sentido de las agujas del reloj, desplazará a una franja a la posición donde el orden fraccional r es $\alpha / 180$.

El analizador (de esfera) se gradúa en centenas de franja de 0 a 180 (ver Fig. 10). El analizador es rotado en el sentido de las agujas del reloj hasta que llega a una franja en el punto seleccionado de medida (rojo en un lado, verde en el otro). El orden de franja fraccional r es entonces leído directamente del analizador dial.

Si el orden de franja más bajo se mueve al punto (franja n), la lectura total será:

$$N = n + r \quad \text{y,} \quad \epsilon_x = \epsilon_1, \epsilon_y = \epsilon_2$$

donde: ϵ_1, ϵ_2 = deformaciones principales máxima y mínima, respectivamente.

Si el orden de franja más alto se mueve al punto (franja $n+1$), la lectura total será:

$$N = -[(n+1)-r] \quad \text{y,} \quad \epsilon_x = \epsilon_1, \epsilon_y = \epsilon_2$$

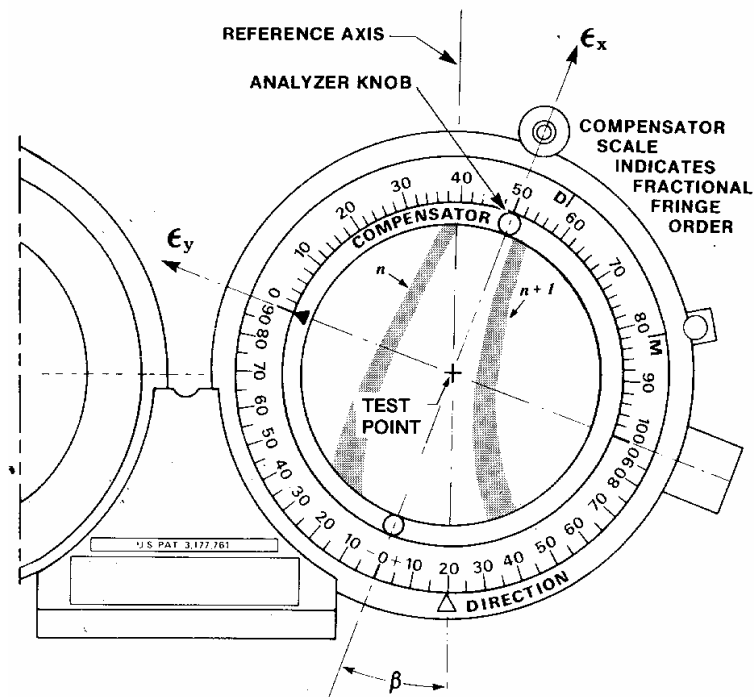


Figura 12.10. Compensación tardía: polarizador y analizador alineados con las direcciones principales. Girar el analizador en la dirección de las agujas del reloj.

En cada caso:

$$\varepsilon_x - \varepsilon_y = Nf$$

y,

$$\sigma_x - \sigma_y = Nf \frac{E}{1+\nu}$$

12.5.2.2. Medidas de tensión principal en contornos libres usando compensación tardía

El signo y magnitud de las tensiones principales en un campo uniaxial, y además en un campo uniaxial, y además en un extremo libre o contorno libre, se pueden determinar directamente desde que una de las tensiones sea cero.

El procedimiento es el siguiente:

1. Alinear el eje ε_x del analizador (Fig. 10) con la dirección del borde.
2. Identificar las franjas n y $n+1$ en cada lado del punto.
3. Girar el analizador en la dirección de las agujas del reloj. Si la franja más baja de orden n se desplaza hacia el punto de medida, el signo de la tensión es positiva y la lectura total será $N = -[(n+1)-r]$. En cualquier caso la tensión será:

$$\sigma = Nf \frac{E}{1 + \nu}$$

donde: σ = tensión, si es positivo;
compresión, si es negativo.

12.5.2.3. Medida usando el método de compensación de balance-nulo

La compensación de balance-nulo opera sobre el principio de introducir en el trayecto de luz del polariscopio una birrefringencia calibrada variable de signo contrario al inducido en el revestimiento fotoelástico por el campo de deformación. Cuando la birrefringencia variable de signo contrario se ajusta de forma precisa a la magnitud de la birrefringencia inducida por deformación, ocurre una cancelación total, y la birrefringencia neta en el trayecto de luz será cero. La condición de birrefringencia neta cero se reconoce fácil porque produce una franja negra en el diagrama isocromático donde, antes de introducir la birrefringencia compensadora, existía una franja de color

(Fig. 11). El dispositivo para sintetizar una birrefringencia variable calibrada se conoce como compensador de balance-nulo.

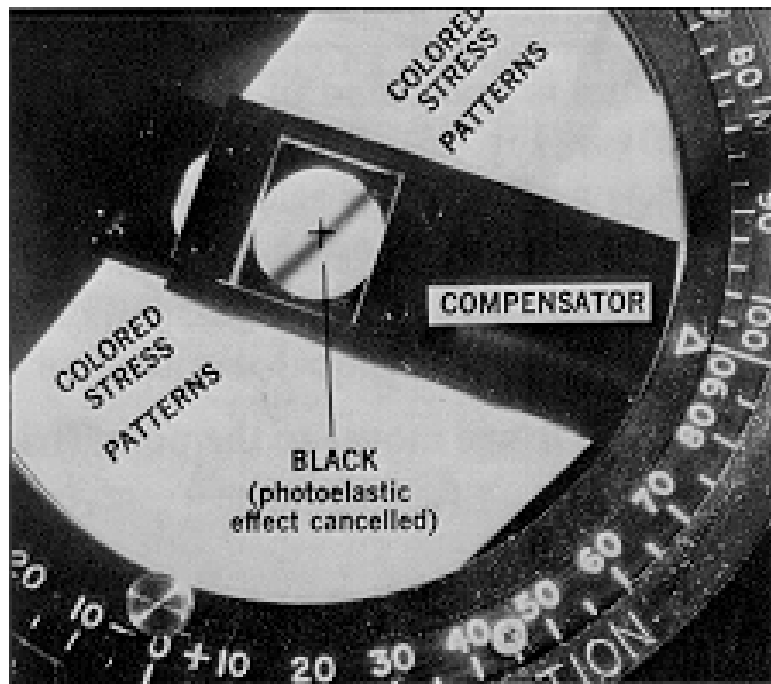


Figura 12.11. La franja inicialmente coloreada se convierte en negra mediante el compensador de balance-nulo.

La forma en la cual un compensador de balance nulo opera se ilustra esquemáticamente en la figura 12 por analogía con el balance común “knife-edge”. La birrefringencia inducida por deformación (o “señal” óptica) se representa para una masa desconocida en el recipiente de la izquierda de la balanza, donde produce un momento en el sentido contrario al de las agujas del reloj, moviendo el puntero desde el centro hacia la izquierda. Masas conocidas se pueden situar en el recipiente de la derecha (introduciendo un momento en el sentido de las agujas del reloj) hasta que el puntero vuelve al centro de nuevo. Cuando el puntero está centrado, la suma de las masas calibradas conocidas iguala a la masa desconocida. La operación del compensador pone en paralelo el balance – esto es, compensar la birrefringencia se añade al trayecto de luz hasta que exactamente se compensa la birrefringencia inducida en el revestimiento por el campo de deformación en la superficie del elemento revestido.

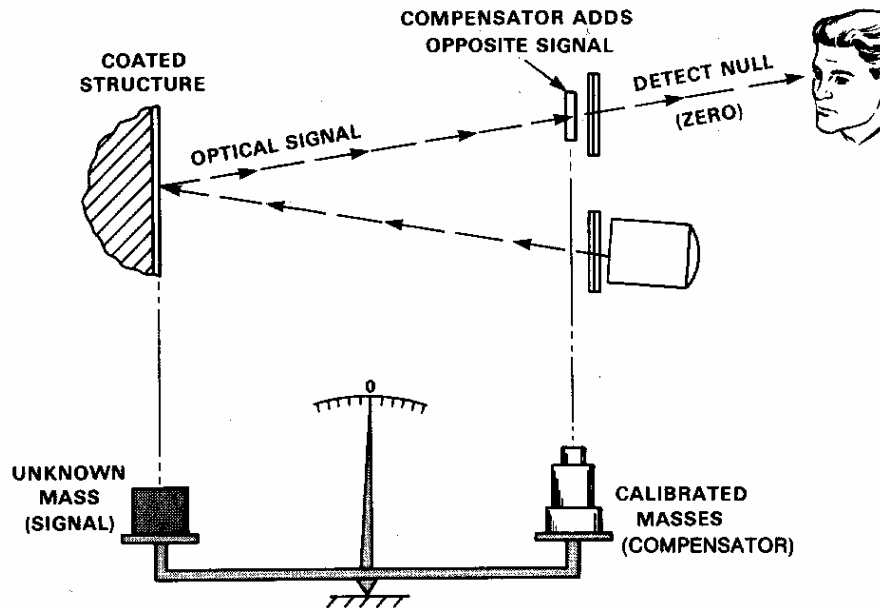


Figura 12.12. Principio del método de compensación mediante balance-nulo.

12.6. Métodos de Separación de deformación/tensión principal

En las secciones anteriores, se ha mostrado cómo medir diferencias de deformación principal y luego calcular las siguientes tensiones:

- La magnitud de la diferencia de las tensiones principales $\sigma_x - \sigma_y$;
- La tensión tangencial máxima $\tau_{MAX} = (\sigma_x - \sigma_y)/2$;
- Los valores por separado de la tensión principal distinta de cero en bordes y contornos libres donde normalmente ocurren las tensiones máximas ya que en esos puntos la otra tensión principal es cero.

Para obtener los valores individuales de las tensiones principales en puntos no localizados en contornos libres se requieren medidas adicionales. Hay dos técnicas disponibles; el método de incidencia oblicua, y el método separador de galga extensométrica. El de incidencia oblicua es el más difícil de usar, y está restringido a medidas en localizaciones a las que permiten el acceso mecánico del adaptador de incidencia oblicua. La técnica de incidencia oblicua se debe usar en revestimientos PhotoStress de módulo medio y bajo, ya que el método separador de galga extensométrica es únicamente aplicable a revestimientos de módulo alto.

12.6.1. Método de incidencia oblicua

El término incidencia oblicua significa que la luz del polarizador atraviesa el revestimiento fotoelástico bajo un cierto ángulo, y la birrefringencia medida de la deformación principal secundaria en el plano perpendicular al trayecto de luz. Entonces, una lectura de incidencia oblicua (N_o), combinada con la lectura de incidencia normal (N_N), provee la información necesaria para determinar los valores por separado de σ_x y σ_y en otros puntos que en contornos libres. La figura 13 muestra el trayecto de luz emergiendo desde el polarizador, reflejado por el espejo de incidencia oblicua, atravesando el revestimiento fotoelástico, reflejado hacia el espejo, y finalmente de vuelta al analizador.

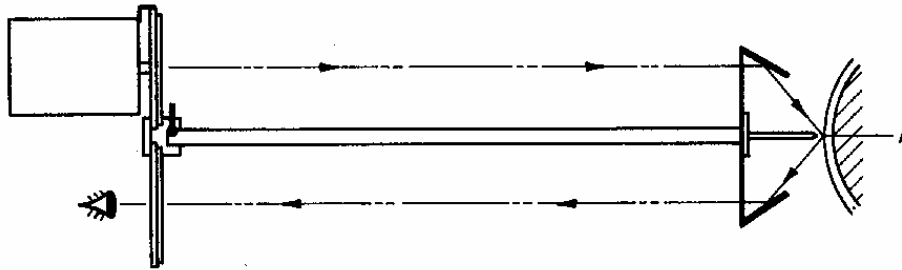


Figura 12.13. Método de incidencia oblicua.

En incidencia normal N_N , la medida es:

$$N_{N\lambda} = \delta_{\text{NORMAL}} = 2tK(\varepsilon_x - \varepsilon_y)$$

En incidencia oblicua:

$$N_{O\lambda} = \delta_{\text{OBLICUA}} = 2tK(A\varepsilon_x - B\varepsilon_y)$$

Los coeficientes A y B dependen del coeficiente de Poisson del revestimiento, y del ángulo θ utilizado. Resolviendo estas ecuaciones en términos de ε_x y ε_y :

$$\varepsilon_x = f(1.5N_o - N_N) \quad (16)$$

$$\varepsilon_y = f(1.5N_o - 2N_N) \quad (17)$$

(16) y (17) para revestimientos de alto módulo

Los valores numéricos de 1, 1.5, y 2 son coeficientes derivados del desarrollo de las ecuaciones para medidas de incidencia oblicua.

Una vez que se han determinado las deformaciones principales, se calculan las tensiones principales.

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_y + \nu\varepsilon_x)$$

Donde E y ν son el módulo de elasticidad y el de Poisson, respectivamente, del elemento de ensayo.

12.6.2. Método separador de galga extensométrica

Si se puede determinar la suma de las deformaciones principales en el mismo punto donde se mide la diferencia de deformaciones principales. Luego los valores de deformación principal por separado son obtenidos simplemente resolviendo ecuaciones simultáneamente.

La galga separador PhotoStress está basada en este principio fundamental de la mecánica. Como se muestra en la figura 14, la placa de galga consiste en dos elementos perpendiculares conectados en serie. La deformación indicada de la galga entonces corresponde a $(\varepsilon_x + \varepsilon_y)/2$ sin tener en cuenta la orientación de la galga en la superficie del elemento revestido. Representando la señal de salida con el símbolo S_G por conveniencia en la manipulación algebraica,



Figura 12.14. Galga separadora.

$$S_G = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \quad (18)$$

$$y \quad \varepsilon_x + \varepsilon_y = 2S_G$$

Sumando y restando de, la medida de la diferencia de deformaciones principales,

$$\varepsilon_x - \varepsilon_y = N_N f$$

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y = 2S_G$$

$$\varepsilon_x = S_G + \frac{N_N f}{2} \quad (19)$$

y

$$\varepsilon_x - \varepsilon_y = N_N f$$

$$-\varepsilon_x - \varepsilon_y = -2S_G$$

$$\varepsilon_y = S_G - \frac{N_N f}{2} \quad (20)$$

En aplicaciones prácticas el procedimiento usual es primero completar todas las observaciones y medidas de incidencia normal (N_N) en el elemento de ensayo revestido. Siguiendo a esto, se instalan las galgas separador en el revestimiento y los puntos críticos potencialmente establecidos por el análisis PhotoStress. La carga se aplica de nuevo en el elemento de ensayo, y se graban las medidas de galga del separador.

La galga separador PhotoStress (para uso exclusivo en revestimientos de alto módulo) incluye un número de características especiales diseñadas para facilitar el uso y el funcionamiento óptimo en las aplicaciones PhotoStress. Primero en importancia, por supuesto, es que la galga no requiere orientación angular particular. Es simplemente unida en el punto donde se desean las medidas de separación. Se proveen hilos conductores preadosados para evitar problemas que los usuarios puedan tener al soldar los hilos a la galga antes de la instalación, o intentar hacerlo después de que la galga esté unida al revestimiento fotoelástico. La placa de la galga está además encapsulado en poliamida para eliminar la necesidad de un revestimiento de protección en la mayoría de aplicaciones de PhotoStress. La resistencia de la placa de la galga separadora es de 200Ω .