

EL NUEVO APARATO FOTOELASTICO DEL LABORATORIO CENTRAL^(*)

Por LEONARDO VILLENA, Doctor en Ciencias Físicas.

Se describe en este trabajo el nuevo aparato instalado en el Laboratorio de Fotoelasticidad, que constituye una innovación por sus grandes ventajas frente a los aparatos anteriormente utilizados, presentando el autor un estudio de los filtros polarizadores de grandes dimensiones, elemento principal del aparato.

En los últimos años, y a la par que evolucionaba la fotoelasticidad abarcando problemas cada vez más complicados y simplificando sus métodos operativos, han cambiado totalmente la concepción y la realización de las instalaciones utilizadas en la investigación fotoelástica. Quizá haya sido éste el principal motivo de los avances que la fotoelasticidad ha experimentado en el terreno práctico. Pero, sea cual fuere la causa, el doble resultado obtenido ha sido: métodos rápidos y sencillos y aparatos simplificados y eficientes.

Las instalaciones para el examen fotoelástico consisten, esencialmente, en un polariscopio. Tal aparato consta de dos filtros polarizadores, cuyos ejes ópticos están cruzados entre sí, de tal manera que la luz que les atraviese sea totalmente extinguida. Si miramos a través de un polariscopio veremos el campo oscurecido, pero si introducimos entre los dos polarizadores una placa de material birrefringente, cesará la extinción y la placa aparecerá iluminada. Ello es debido a que la luz polarizada, proveniente del primer filtro (llamado abreviadamente polarizador), se descompone en dos rayos, polarizados en planos perpendiculares entre sí, que ya no pueden ser extinguidos por el segundo filtro (llamado abreviadamente analizador). Sin embargo, algunas zonas de la placa continúan oscurecidas, porque en ellas el rayo que proviene del polarizador no es afectado por el fenómeno de la birrefringencia; éstas son las llamadas bandas o líneas isoclinas que nos hablan de la dirección que los ejes ópticos tienen en cada punto de la placa. Además, si la birrefringencia es suficiente, aparecen, cruzando la placa, línea de interferencia, semejantes a los anillos de Newton, que se llaman isocromas y que nos hablan de la magnitud de la birrefringencia principal en cada punto. El estudio de

unas y otras líneas permite, pues, conocer el estado de birrefringencia en cada punto, caracterizado por la dirección de los ejes ópticos y por el valor de la birrefringencia principal (diferencia entre los índices de refracción correspondientes a los dos rayos extraordinario y ordinario). Sabido es que la fotoelasticidad aprovecha este estudio para deducir la dirección de los ejes elásticos, es decir, las direcciones principales de tensión, y el valor de la tensión tangencial máxima, o de la diferencia entre las tensiones principales.

Como filtros polarizadores han venido utilizándose, en tal clase de instalaciones, los prismas de Nicol o de Glazebrook. Pero estos elementos tienen un campo óptico muy pequeño, de tan sólo algunos milímetros, por lo que es necesario utilizar una serie de lentes, encargadas de concentrar el haz luminoso, para que pueda pasar a través de estos prismas, y tornarle luego paralelo, en la zona donde deba ser utilizado.

Los aparatos fotoelásticos han de ser algo más complicados que el sencillo polariscopio a que acabamos de aludir, puesto que éste permite solamente examinar el modelo fotoelástico en luz rectilíneamente polarizada, conveniente para hacer el trazado de isoclinas. Dichos aparatos han de permitir también trabajar con luz circularmente polarizada, como conviene para el trazado de isocromas. Para ello van equipados de dos láminas cuarto de onda, que pueden situarse después del polarizador y antes del analizador, con sus ejes ópticos a 45° con los de estos elementos, constituyendo, así, un polariscopio circular (1).

En las instalaciones clásicas de fotoelasticidad se partía de un banco de óptica, equipándole con todos estos elementos, además de un compensador cristalino para medir birrefringencias y un marco para someter el modelo a cargas. El conjunto así obtenido respondía a las reglas más exigentes de la

(*) Publicación del Laboratorio Central, núm. 33.

óptica y de la elasticidad, pudiéndose esperar de él una elevada precisión.

Pero es difícil conseguir el perfecto ajuste de esta instalación. Y cuando se consigue, todavía subsisten una serie de reflexiones parásitas y de aberraciones cromáticas que es imposible evitar sin encarecer extraordinariamente el coste del aparato. Así se obtiene un campo óptico de unos 8 cm. de diámetro, en el que la extinción de la luz no es total, ni existe una perfecta homogeneidad, viniendo perturbada la observación fotoelástica por imágenes de reflexiones parásitas y por irisaciones de refracciones igualmente parásitas. El manejo de instalación es complicado y lento. Por tanto, el partido que puede sacarse para un trabajo continuado en ensayos de estructuras, y aun en pequeñas investigaciones, es realmente deficiente.

Modernamente, las instalaciones fotoelásticas han ganado en sencillez aunque limitando su margen de exactitud, debido, principalmente, al empleo de filtros polarizadores artificiales, de grandes dimensiones, que permiten construir aparatos de manejo mucho más sencillo y de campo óptico mucho mayor.

Estos elementos se designan en inglés bajo el nombre de *polaroid* (suministrados por la firma Bausch & Lomb Optical Co., de Rochester) y en alemán por *Polarisationsfilter* (suministrados por la firma Zeiss Ikon, de Dresden). Los filtros americanos superan a los alemanes, tanto en calidad como en dimensiones.

Ya en el año 1852 Herapath estudia el comportamiento óptico del poliyoduro-sulfato de quinina $(C_{20}H_{24}N_2O_2)_4 (H_2SO_4)_3 (HI)_2 I_4 + 3 H_2O$, hoy conocido bajo el nombre de herapatita. Esta sal tiene la propiedad de ser birrefringente; es decir, que cada rayo que la atraviesa es descompuesto en dos rayos rectilíneamente polarizados, según planos perpendiculares. Pero además tiene la propiedad de ser dicroica; es decir, de absorber de manera diferente cada uno de éstos dos rayos. Su dicroísmo es tan grande que basta un espesor de 0,1 mm. para absorber completamente uno de los dos rayos polarizados, mientras que el otro es transmitido para casi todas las radiaciones del espectro visible.

Sin embargo, hasta 1932 no se inventaron los llamados "polaroides". Lang, en dicha fecha, consiguió depositar un estrato de herapatita, constituido por millares de cristales polarizadores con todos sus ejes paralelos. La aparición de estos filtros polarizadores artificiales ha sido la causa de que,

poco a poco, hayan ido desapareciendo los polarizadores tradicionales, pues los nuevos elementos eliminan todos los inconvenientes de éstos, a saber: débil intensidad luminosa, bajo porcentaje de luz polarizada, dimensiones embarazosas, escasa adaptabilidad a los sistemas ópticos, apertura limitada y elevado coste.

Los polaroides se pueden imaginar como una sección sutil de un hipotético cristal gigantesco de herapatita. Ya hemos visto que en realidad se trata de una trama de cristales microscópicos orientados de forma uniforme, que tienen un orden de magnitud muy superior al que caracteriza a los elementos de un retículo cristalino ordinario, cuya disposición solamente imita de una manera superficial. A veces se puede considerar como un verdadero monocristal de dos dimensiones.

Para conservar y proteger mecánicamente el estrato polarizante se fija con gelatina o acetato de celulosa y se protege con dos láminas de celuloide o, mejor, con dos placas de vidrio. Los polaroides o filtros polarizadores así conservados transmiten cerca del 36 por 100 de la luz recibida. La polarización es uniforme y completa en toda su superficie, que, en los tipos mayores llega a alcanzar 75 centímetros cuadrados. La polarización es también uniforme para el 99,5 por 100 del espectro visible, presentando únicamente anomalías en los extremos del rojo y del violeta. En la parte del rojo, la absorción de uno de los dos rayos no es completa, mientras que en el extremo del violeta los dos

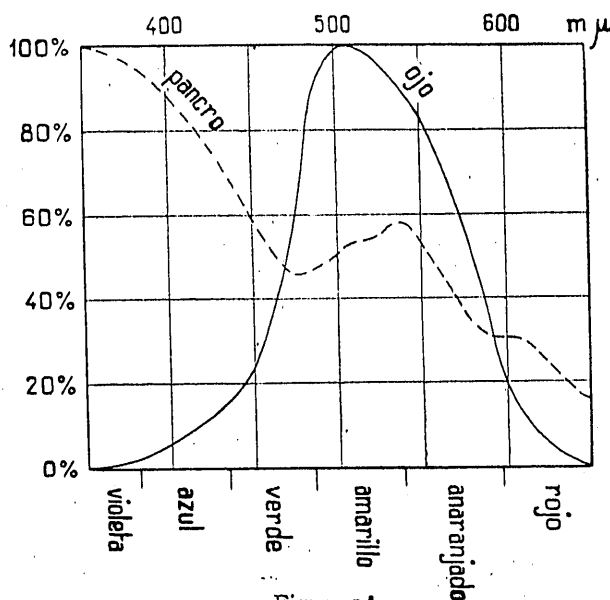


Figura 1.ª

rayos son absorbidos. Por ello la luz que pasa a través de un solo polarizador no es blanca, sino amarillenta verdosa, sin que ello tenga mucha importancia, puesto que tanto el ojo como las placas pancromáticas tienen su máxima sensibilidad para estas radiaciones (figura 1.^a). Por la misma causa, cuando se cruzan dos polaroides no se obtiene una extinción completa, sino que persiste una débil luminosidad de color rojo oscuro que, sin embargo, no tiene importancia alguna, puesto que el ojo tiene, para estas longitudes de onda un coeficiente de visibilidad muy bajo y las placas fotográficas apenas son impresionadas por estas radiaciones.

El frecuente empleo de filtros polarizadores de grandes dimensiones ha creado la necesidad de disponer de láminas cuarto de onda de la misma superficie. Esto se ha conseguido, unas veces, sometiendo una placa de cristal a un esfuerzo de tracción uniforme, de valor conveniente para que el retardo óptico valga $\lambda/4$. Más generalmente se utilizan placas en las que se ha efectuado un depósito birrefringente de espesor conveniente para que introduzca esta misma diferencia de marcha entre los dos rayos. Las láminas así obtenidas son totalmente incoloras y transparentes, aunque suelen presentar pequeñas irregularidades, por lo que el campo óptico varía débilmente de intensidad de unos a otros puntos. Hoy se las emplea siempre allí donde hay polarizadores artificiales para trabajar con luz circular.

En los años 1936 y 1937, Haase (3) se ocupa de estos filtros polarizadores y de su empleo en la fotoelasticidad.

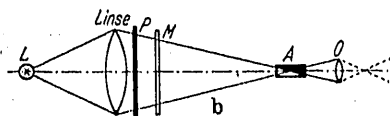


Figura 2.^a

En este último año, Tuzi y Nisida (4) dan cuenta de un nuevo aparato fotoelástico equipado con estos nuevos elementos (figs. 2.^a y 3.^a), aunque respondiendo a un esquema muy parecido a los antiguos y conservando sus mismas características. Dichos autores estudian la luminosidad que emerge de dos polarizadores cruzados, comparándola con la que se obtenía en el caso de utilizar prismas de Nicol; la extinción es, en el segundo caso, 11,6

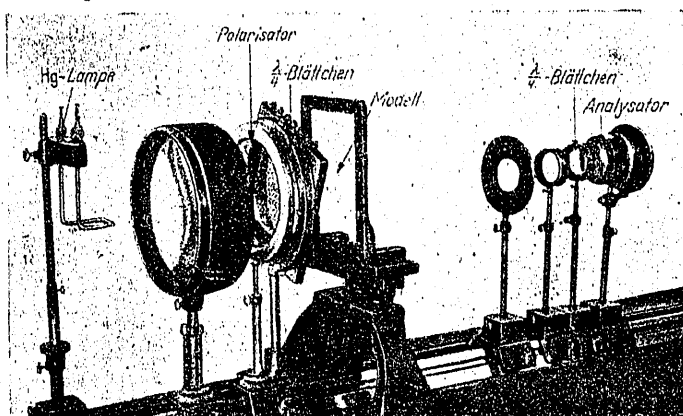


Figura 3.^a

veces mayor que en el primero. Sin embargo, añadiendo en ambos casos las láminas $\lambda/4$ para formar polarizadores circulares, esta superioridad de los nicols disminuye a 1,06 veces la obtenida con filtros polarizadores.

Al año siguiente, Kusque (5) y Sauer (6) se ocupan también del empleo de los polaroides en fotoelasticidad.

Sin embargo, hasta 1939 no aparece el primer esquema de un aparato fotoelástico simplificado, que responde a una nueva idea y que ha sido equipado con polaroides y láminas cuarto de onda de grandes dimensiones. Se trata del aparato utilizado en el Laboratorio de Mecánica Técnica de la Escuela Técnica Superior de Munich (fig. 4.^a), descrito casi simultáneamente por Föppl y Müller-Lufft (7) y por Föppl y Hiltcher (8). La figu-

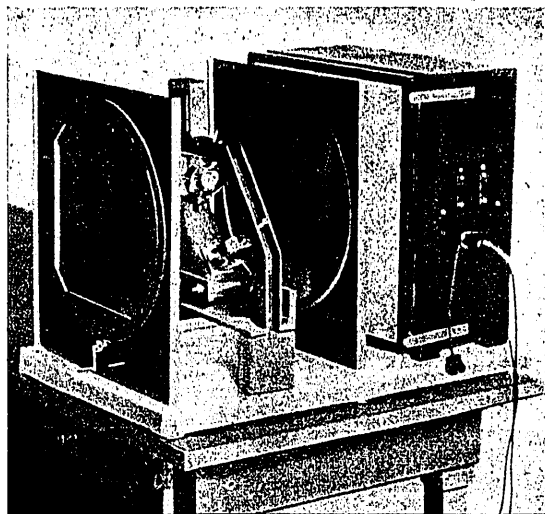


Figura 4.^a

ra 5.^a representa el esquema de dicho aparato, en el que L es una linterna que puede ser iluminada con luz blanca o amarilla; O, es un vidrio opal encargado de distribuir uniformemente la luz; P_1 y

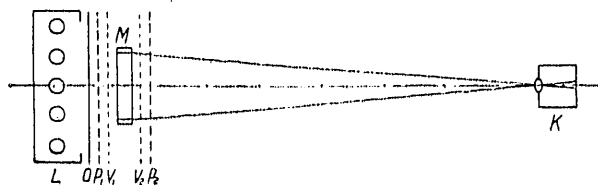


Figura 5.^a

P_2 , son los filtros polarizadores que actúan, respectivamente, de polarizador y analizador; y V_1 y V_2 las láminas cuarto de onda que convierten a aquéllos en polarizador y analizador circulares. Finalmente, M, es el modelo observado, y K, la máquina fotográfica encargada de reproducir las redes de líneas isoclinas e isocromas. En los mencionados artículos se explica la disposición mecánica del con-

junto, que permite analizar el modelo bajo cualquier ángulo, se justifica el empleo de luz amarilla de sodio en lugar del arco de mercurio y se describen las ventajas de este aparato frente a los antiguos.

Paralelamente se han construido en Norteamérica aparatos de grandes dimensiones y con toda clase de ventajas. Desgraciadamente sólo han llegado hasta nosotros referencias indirectas (9) y (10), pero no dudamos en afirmar que en este aspecto, como en los demás de la fotoelasticidad, siguen estando a la cabeza los Estados Unidos.

Como ejemplo de los modernos aparatos simplificados puede tomarse el que acabamos de construir para el Laboratorio Central, puesto que tiene el mismo esquema óptico de los mencionados últimamente, aunque responde a concepciones nuevas y tiene una disposición mecánica totalmente distinta.

Las figuras 6.^a y 7.^a representan la vista y el alzado del conjunto, formado por una fuente luminosa y el aparato fotoelástico propiamente dicho.

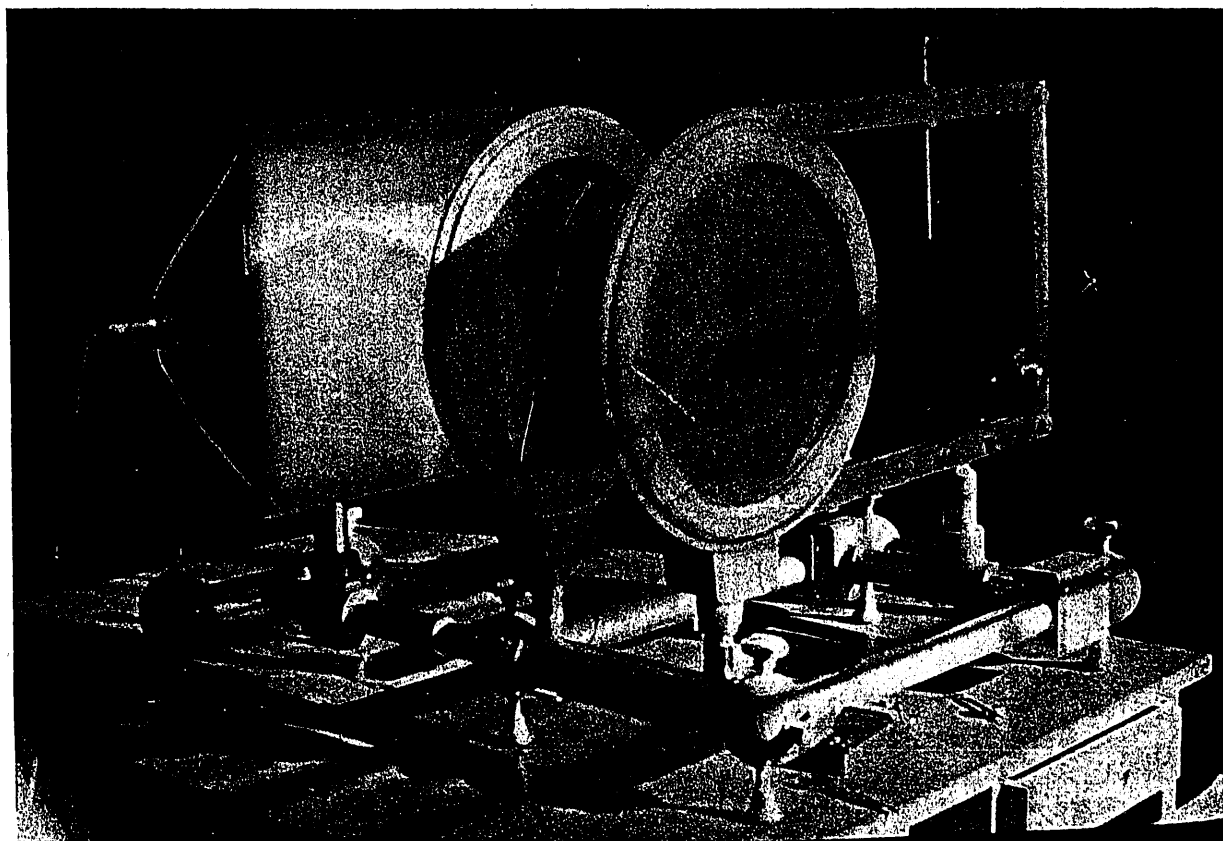


Figura 6.^a

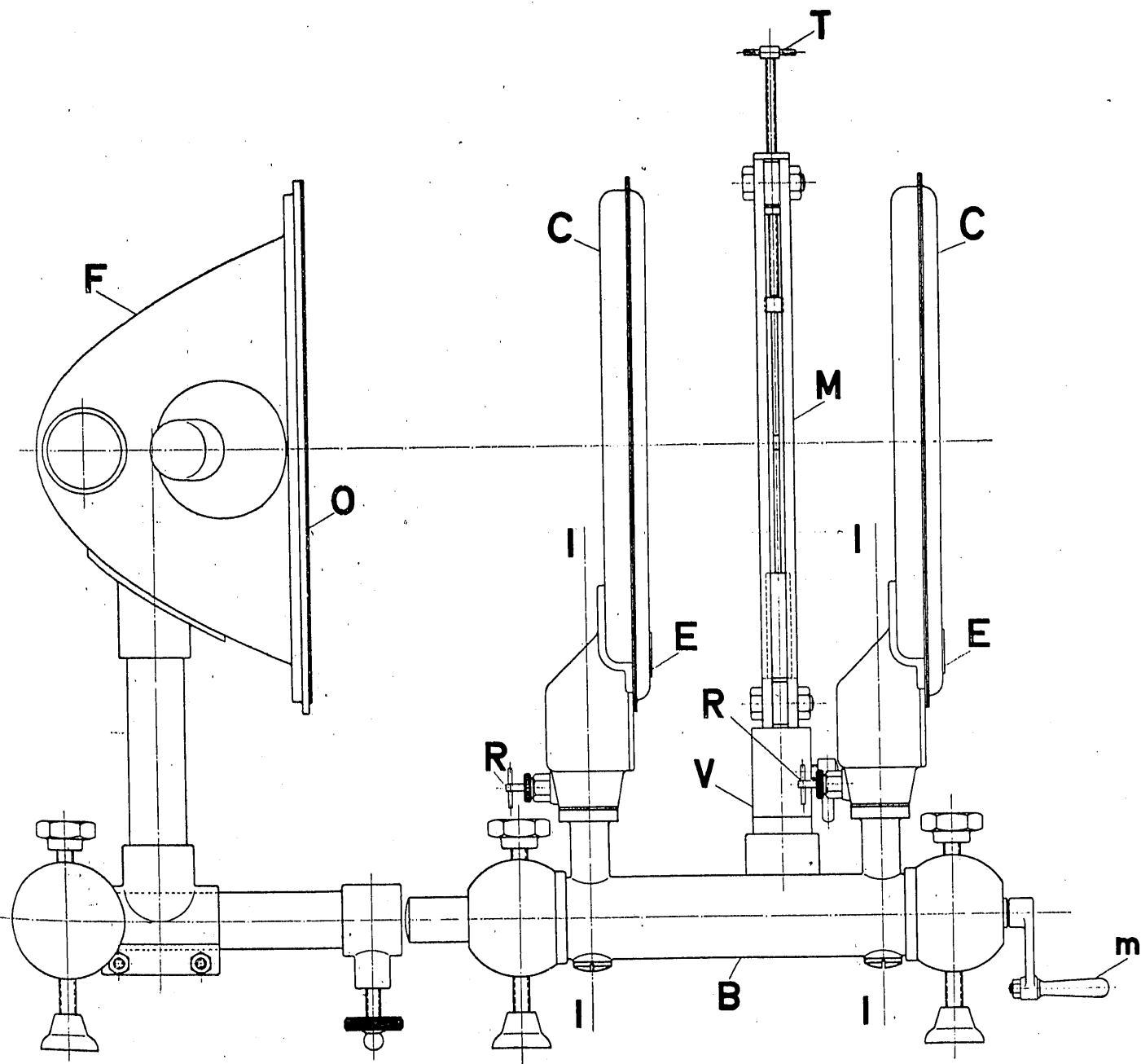


Figura 7.ª

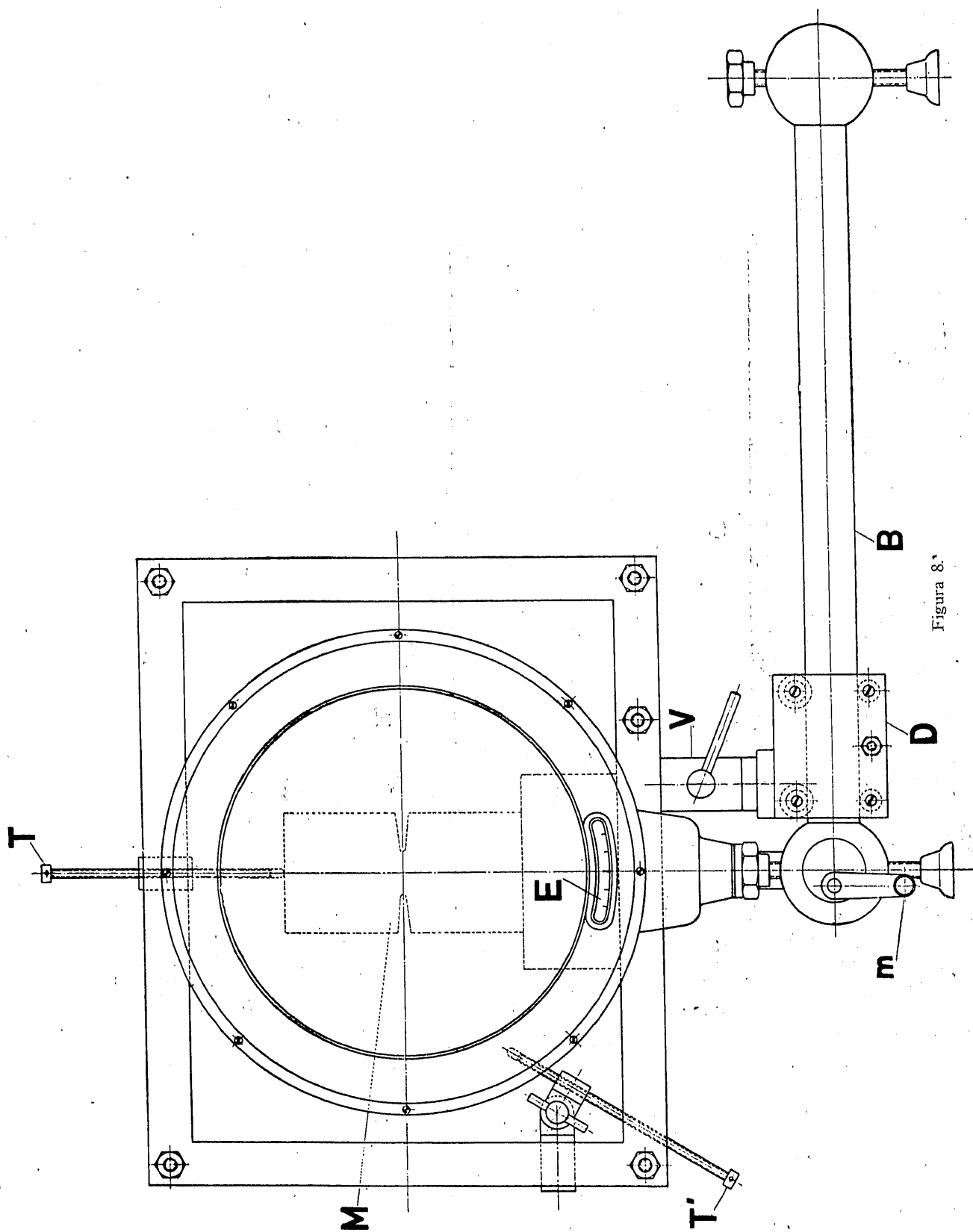


Figura 8.

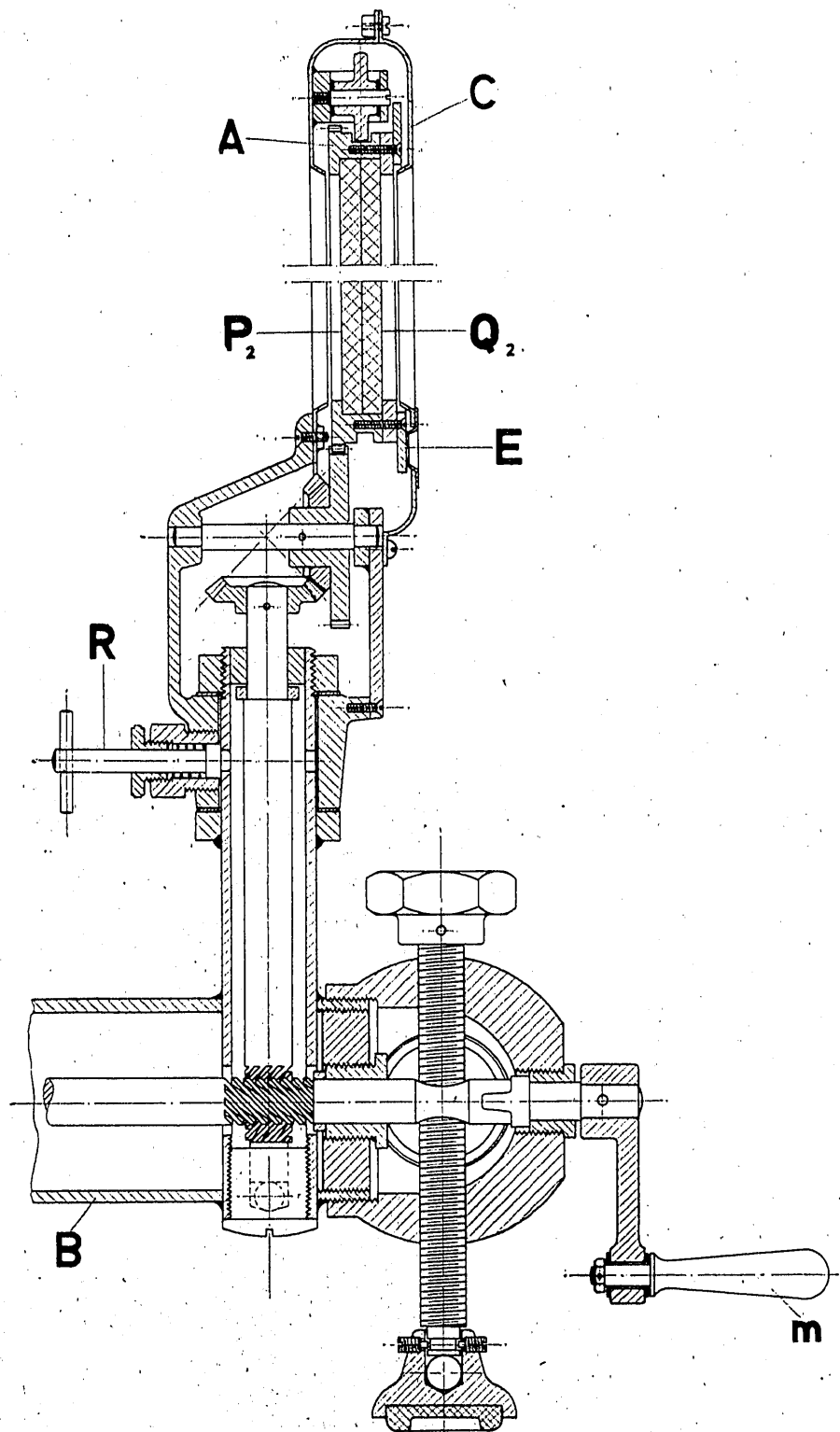


Figura 9.^a

La figura 8.^a representa la proyección frontal del aparato, sin sistema de iluminación.

La fuente luminosa, F, está constituida por un reflector de chapa cromada interiormente, que presenta una sección vertical parabólica. En el eje de esta parábola está situada una lámpara de sodio, prácticamente lineal, de tal manera que el cristal opal, O, está uniformemente iluminado. Existen, además, dos lámparas ordinarias, alojadas en otros tantos bulbos laterales, que permiten utilizar la luz blanca, si bien en este caso la iluminación del cristal opal no es rigurosamente uniforme. El reflector reposa sobre un bastidor tubular que posee tres pies y que, además, puede ser enchufado al bastidor tubular sobre el que está montado el aparato fotoelástico.

El aparato fotoelástico consta de dos corazas, C_1 y C_2 , que contienen los elementos polarizadores y analizadores, respectivamente, y que están exteriormente pintadas de negro mate para evitar reflexiones parásitas. En el interior de estas corazas se encuentran los sistemas que permiten la fijación y

rotación de los mencionados elementos. Así, por ejemplo, en el interior de la coraza C_2 , correspondiente al analizador (fig. 9.^a) está situado un anillo, A, que se apoya sobre cinco rodamientos, en una ranura central destinada a guiar aquéllos. Este anillo aprisiona un filtro polarizador, P_2 , y una lámina cuarto de onda, Q_2 , con sus ejes ópticos formando un ángulo de 45° . El anillo va provisto de una corona dentada que, por un sistema de engranajes alojado dentro del bastidor tubular, B, está unida a la manivela m , que engrana también con el anillo correspondiente del polarizador. Mediante esta manivela se puede hacer girar simultáneamente a ambos anillos, leyendo su posición angular en la escala E, visible a través de una ventana situada en la parte baja anterior de la coraza. El filtro analizador, P_2 , se coloca de tal manera que el ángulo marcado en E sea el que forme su eje óptico con la vertical. El filtro polarizador, P_1 , tiene su eje óptico cruzado con P_2 y formando, también, un ángulo de 45° con la lámina Q_1 . En esta disposición, representada por las figuras 9.^a a 12, las lámi-

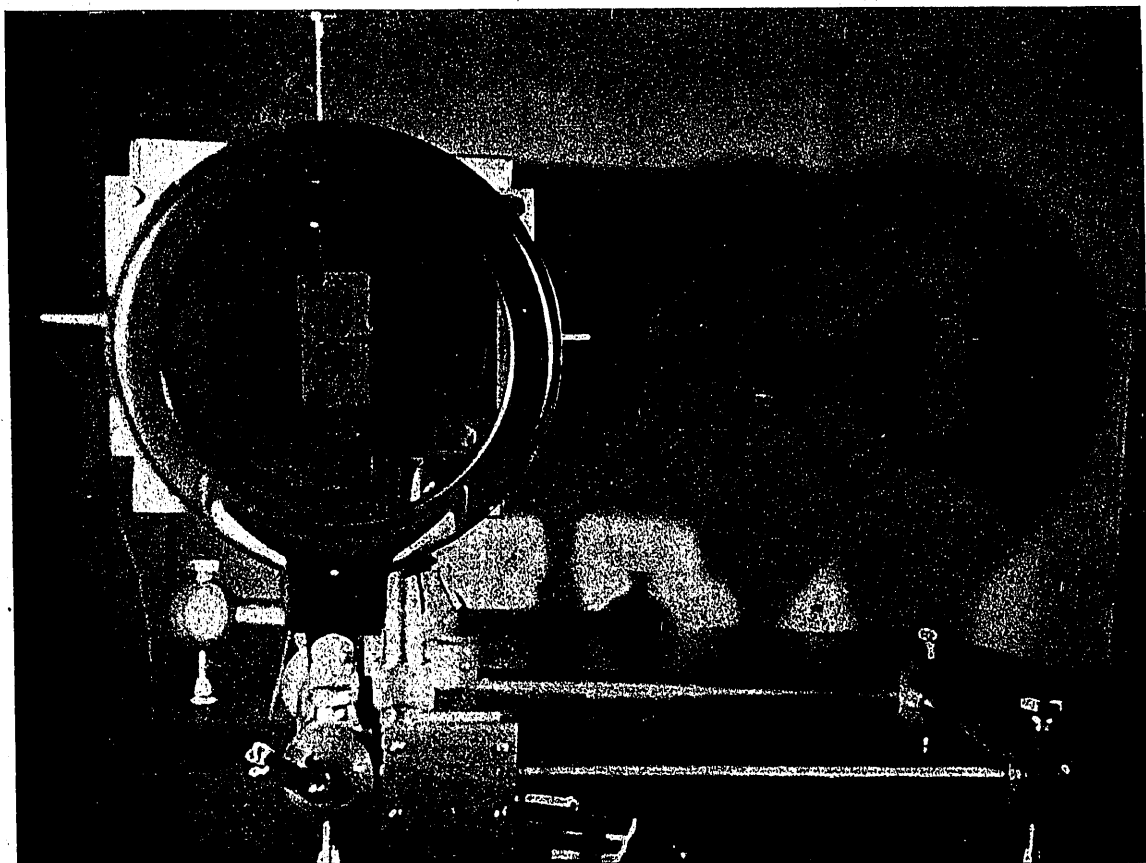


Figura 10.

nas Q_1 y Q_2 están por fuera de los filtros P_1 y P_2 , quedando el conjunto dispuesto para trabajar en luz rectilíneamente polarizada, como es necesario en el trazado de isoclinas.

Haciendo girar a las corazas C_1 y C_2 alrededor de sus ejes verticales, II , las láminas cuarto de onda quedarán en el interior de los filtros polarizadores, no siendo ya visibles las escalas E , tal como representa la figura 10. Si el giro se ha hecho en el mismo sentido para las dos corazas, los filtros P_1 y P_2 continúan teniendo cruzados sus ejes ópticos y el conjunto funciona en luz circularmente polarizada, tal como interesa en el trazado de isocromas.

A fin de acortar en lo posible el espacio comprendido entre las dos corazas, para que ambos anillos cubran sensiblemente el mismo campo óptico, se ha dejado la distancia mínima para que pueda girar una de ellas. Sólo entonces podrá hacerlo la otra, ya que son excéntricas. Las corazas quedan fijas en las posiciones convenientes mediante los muelles de retención, R , que se encajan impidiendo movimiento alguno mientras no se tire de ellos hacia fuera.

Las dos corazas están montadas sobre un bastidor tubular, B , que descansa sobre una serie de tornillos mediante los cuales puede ser nivelado. Deslizándose sobre los tubos longitudinales de este bastidor se mueve un doble carro que, por intermedio del vástago telescópico, V , soporta un marco de robustas pletinas de acero, destinado a contener el modelo fotoelástico, M , y los tornillos, T y T' , encargados de aplicar sobre aquél cargas normales o inclinadas, respectivamente.

La figura 11 da el esquema óptico del aparato, dispuesto para operar en luz circularmente polarizada; es decir, con las corazas mirando hacia atrás. F , indica el foco luminoso, y O , el cristal opal; P_1

y P_2 son, respectivamente, los filtros polarizador y analizador, y Q_1 y Q_2 las láminas cuarto de onda correspondientes; finalmente, M representa el modelo, y K la máquina fotográfica.

La luz de sodio que proviene del cristal opal, O , es rectilíneamente polarizada por P_1 . Encuentra, entonces, la lámina cuarto de onda Q_1 , con su eje a 45° con el plano de polarización del haz, y emerge circularmente polarizada.

En estas condiciones atraviesa el modelo, se descompone en dos rayos, polarizados en planos perpendiculares, que emergen con una cierta diferencia de marcha, dependiente del estado de polarización de cada punto del modelo.

Tras de atravesar esta luz el analizador circular, formado por Q_2 y P_2 , impresiona la placa en la máquina fotográfica. Las imágenes obtenidas no pueden depender de la dirección de las deformaciones en cada punto del modelo, puesto que la luz utilizada posee simetría de revolución. Solamente se obtiene la red de isocromas, que nos habla del valor que aquéllas toman en cada punto.

Si ahora hacemos girar a las corazas alrededor de los ejes II hasta dejarlas en la posición indicada por las figuras 6.^a a 9.^a y utilizamos luz blanca, el fenómeno observado será mucho más complejo.

La luz difusa que emerge el cristal opal, O , atraviesa la lámina Q_1 sin sufrir variación alguna, y es rectilíneamente polarizada por P_1 .

Después de atravesar el modelo, en el que sufre la birrefringencia antes mencionada, es analizada por el analizador P_2 , atraviesa la segunda lámina cuarto de onda Q_2 , sin sufrir modificación alguna, y va a impresionar la placa de la cámara fotográfica, K .

Ahora se verán superpuestas las líneas isoclinas,

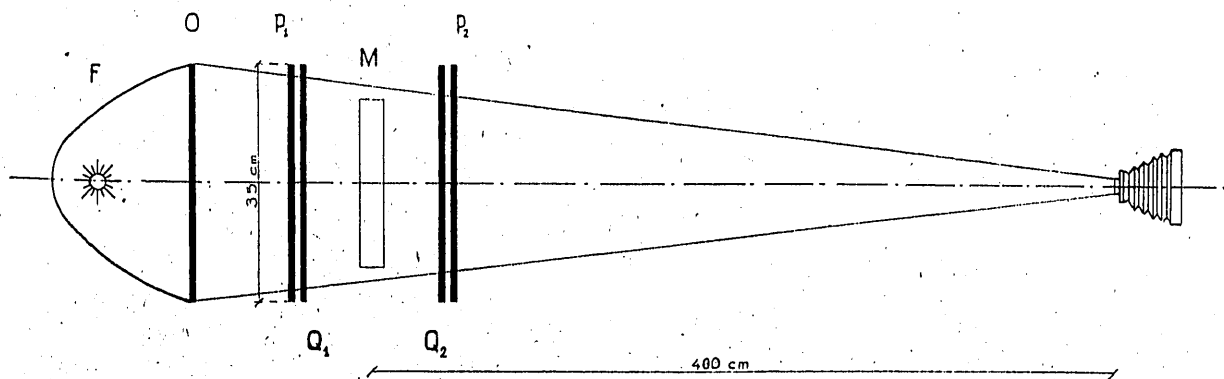


Figura 11.

en negro, con las líneas isocromas, que recorren toda la gama de colores de la escala de Newton. Pero, si utilizamos un modelo de poca sensibilidad fotoelástica, como el vidrio o el plexiglás, para los que apenas aparecen estas últimas líneas coloreadas, podremos trazar cómodamente el conjunto de las líneas isoclinas sin más que hacer rodar a los dos anillos mediante la manivela *m* e ir anotando, junto a cada línea, la correspondiente lectura angular, hecha en *E*.

Terminada la descripción del aparato hemos de hacer resaltar las diferencias y ventajas que posee sobre los antiguos. En primer lugar, su extraordinaria sencillez de manejo, ya que el aparato se ajusta de una vez para siempre. En segundo lugar, la magnitud de su campo óptico, que alcanza 35 centímetros de diámetro, frente a los 8 cm. de nuestra antigua instalación. Estos dos hechos, combinados, permiten realizar de una vez y con extraordinaria rapidez la observación de un modelo, por grande y complicado que éste sea. Solamente en casos extremos será necesario recurrir a los movimientos vertical y horizontal que el marco de carga posee para hacer el examen en etapas sucesivas. Otras ventajas son la ausencia de reflexiones y refracciones parásitas y la gran luminosidad debida a este hecho y a la existencia de una lámpara de gran intensidad y un reflector bien diseñado, gracias a lo cual se pueden efectuar fotografías instantáneas de los modelos examinados. El marco de cargas es de un tipo universal, pudiendo montarse sobre él los dispositivos correspondientes a cada caso de cargas.

Existe aún otra circunstancia que, aunque aparentemente sea desventajosa, produce indudables ventajas. En los aparatos clásicos la luz que atraviesa el modelo forma un haz paralelo, tal como exige la teoría de la fotoelasticidad, al objeto de que cada rayo atraviere puntos que estén en idéntico estado de deformación. Ello tiene como desventaja que la más mínima imperfección en el pulido del modelo se traduce en una línea o mancha negra en la fotografía de él obtenida, ya que el rayo correspondiente es desviado por el pequeño prisma que se forma en la raya.

En los aparatos modernos, por el contrario, la luz proviene de una gran superficie, y, por tanto, atraviesa el modelo en todas direcciones. Si la observación se hace desde muy cerca solamente tienen valor las líneas de una zona muy pequeña, situada enfrente del objetivo de la cámara fotográfica, pues

de lo contrario cada rayo atravesaría puntos en los que existen estados de deformación distintos. Pero si la observación se hace desde alguna distancia, cuatro metros, y se utiliza un objetivo de gran distancia focal, 15 ó 18 cm., se puede fotografiar de una vez el campo total del aparato sin preocuparse de la anterior salvedad, puesto que el ángulo máximo formado por los rayos extremos no pasa de 2 grados. Junto a esta salvedad se presenta una circunstancia muy favorable, pues aunque el pulido del modelo sea imperfecto y sus superficies límites no sean rigurosamente planas, no se observarán manchas ni líneas negras, ya que siempre habrá algún rayo que, tras de atravesar el modelo y de refractarse en la superficie inclinada formada por la raya, llegue al objetivo de la cámara fotográfica.

Por tanto, se puede emplear este tipo de aparato con modelos imperfectamente pulidos sin que, por ello, pierda la fotoelasticidad en exactitud práctica. Aunque, naturalmente, quedará limitado el carácter riguroso que en un principio se quería dar al método y se convertirá, únicamente, en un procedimiento experimental aproximado, pero muy sencillo, cómodo y rápido, para determinar las tensiones en un modelo.

Creemos que bien merece la pena sacrificar algo en esa hipotética exactitud, que sólo en muy cuidadas experiencias puede lograrse, en favor de la comodidad, rapidez y economía de un ensayo que tiende a realizarse miles y miles de veces.

Respecto al montaje mecánico hemos de señalar las ventajas que nuestro aparato posee sobre todos los demás que conocemos. Si se opera con luz rectilínea, el giro simultáneo de polarizador y analizador se consigue fácilmente, y se puede leer la posición angular de estos elementos en una escala graduada.

El paso de luz rectilínea a la luz circular se hace rápidamente, sin más que tirar de los tornillos de retención y hacer girar sobre sí mismas a las dos corazas. El modelo se coloca en el marco con toda comodidad, situándolo a la derecha, fuera del campo óptico, y se le aplica la carga deseada. Entonces, suavemente y sin esfuerzo alguno, se introduce en el campo óptico.

Este deslizamiento horizontal y la presencia del vástago telescópico permiten situar en el centro óptico del sistema cualquier punto del modelo en estudio.

Finalmente, hemos de hacer notar la solidez que el conjunto tiene, a pesar de su poco peso y volumen, sobre todo comparado con otras instalaciones.

No hemos de acabar este artículo sin expresar

nuestro más cordial agradecimiento a la Casa ICON (Investigaciones de la Construcción, S. A.), que se ha encargado de llevar a la realidad nuestra idea y construir el aparato que acabamos de describir, merced por ello nuestras felicitaciones.

BIBLIOGRAFÍA

1. Para mayor inteligencia de estas afirmaciones, puede consultarse nuestra obra *Fotoelasticidad*, Madrid, Publ. Inst. Téc. Constr. Edif. (1944). Capítulo III.
 2. TARDY, H. L.: "Méthode pratique d'examen et de mesure de la biréfringence des verres d'Optique". *Rev. Opt.*, 8 (1929), págs. 59-69. Un resumen de este artículo puede encontrarse en la citada obra *Fotoelasticidad*, págs. 210-212.
 3. HAASE, M.: "Dichroitische Kristalle und ihre Verwendung für Polarisationsfilter". *Zeiss Nachrichten*, 2.^a serie, cuaderno 2 (1936).
 - "Filterpolarisatoren und ihre Anwendungsgebiete". *Glastech. Ber.*, 15 (1937), págs. 295-299.
 4. TUZI, Z. y M. NISIDA: "On a new apparatus for photoelasticity-stresstype quarter wave plate of a large field". *Sci. Pap. Inst. Phys. Chem. Res.*, Tokio, 31 (1937), págs. 99-107.
 5. SAUER, H.: "Polarisiertes Licht in der Kraftfahrzeug-Beleuchtung". *V. D. I.*, 82 (1938), pág. 201.
 6. KUSKE, A.: "Neue Beobachtungs- und Aufnahmeverfahren in der ebenen Spannungsoptik". *V. D. I.*, 82 (1938), págs. 1.437-1.438.
 7. FÖPPL, L., y R. MÜLLER-LUFFT: "Spannungsoptische Einrichtung mit Polarisationsfiltern". *A. T. M. V* 137-1 (1939), págs. T 125-T 126.
 8. FÖPPL, L., y R. HILTSCHER: "Die neue spannungsoptische Apparatur des mechanisch-technischen Laboratorium der Technischen Hochschule München". *Bauing.*, 20 (1939), págs. 231-232.
 9. FROCHT, M. M.: *Photoelasticity*. New York. John Willey & Sons.
 10. HETÉNYI, M.: "Photoelasticity". *Photo Technique*. Nov. 1940.
-