

párrafo precedente, la regulación del caudal evacuado por la presa debe hacerse: maniobrando primero una sola de las alzas, con preferencia la de la compuerta inmediata a la toma, lo cual podrá hacerse hasta alcanzar la capacidad evacuatoria de tal compuerta. Agotada ésta, deberá empezarse a regular con el alza de la compuerta-vertedero inmediata, si es que hay dos montadas, y, como anteriormente, hasta agotar su capacidad evacuatoria. Si el caudal a desaguar ex-

Los ensayos de referencia, ejecutados en las vacaciones estivales de la Escuela de Ingenieros de Caminos, se han repetido por los alumnos de cuarto año del curso corriente, a título de práctica y a fin de que con tal ejemplo pudieran darse cuenta de la impor-

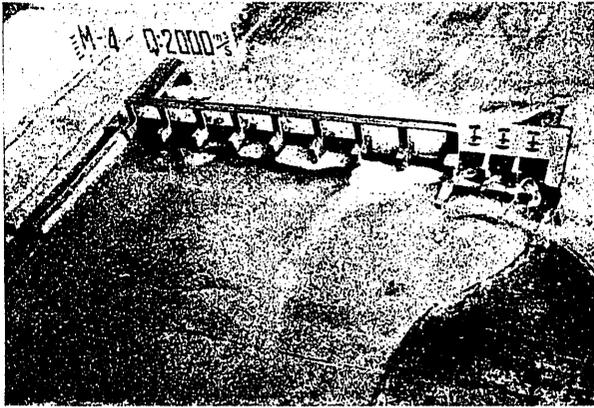


Foto 24
Caudal de 1 850 m³/s por la presa. Acumulación de brozas aguas arriba y aguas abajo de la presa, pero alejada de la central. Vista desde aguas arriba.

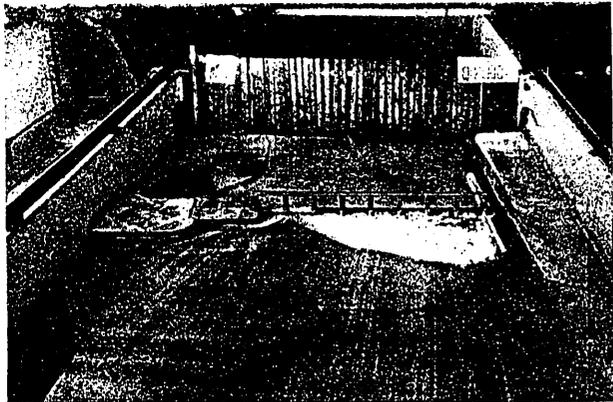


Foto 25
Caudal de 1 850 m³/s por la presa. Acumulación de brozas aguas arriba y aguas abajo de la presa, pero alejada de la central. Vista desde aguas arriba.

cediera del anterior lo suficiente, debe desaguar por el fondo de las otras compuertas del modo más igual posible.

* * *

tancia de la experimentación hidráulica y aprendieran sus métodos operatorios.

La Escuela de Ingenieros de Caminos viene dedicando especial atención a estas cuestiones, mejorando y completando las instalaciones de su Laboratorio de Hidráulica, que hoy se encuentra en condiciones de prestar un servicio interesante a la enseñanza y a la profesión en asuntos sencillos como el relatado.

A. DEL AGUILA
Profesor de la Escuela
de Ingenieros de Caminos

Fotoelasticimetría¹

El Laboratorio de la Escuela de «Ponts et Chaussées», París²

A este laboratorio le corresponde la prioridad, pues, como ya vimos en el artículo anterior, fué Mesnager quien primero dió una solución definitiva al problema de investigación fotoelástica para los casos de sollicitación en dos dimensiones. Esto fué en 1900, y desde entonces se han llevado a cabo interesantes experiencias bajo la dirección del citado Mesnager, con la colaboración de los ingenieros Belawsky, Marcotte y Tesar. Este último es el actual encargado de las investigaciones que se verifican en la sección correspondiente del Laboratorio de Mecánica de la Escuela de «Ponts et Chaussées».

El método empleado es el de Mesnager, o sea: utilización de las líneas isoclinas y las isocromáticas, determinando el valor absoluto de estas últimas mediante compensador y obteniendo la segunda relación entre las tensiones principales, por medición del cam-

bio de espesor de la placa con un aparato denominado *latómetro*.

En la foto número 1 aparece el aparato de polari-



Fig. 1. Aparato de polarización.

¹ Véase el número anterior, página 29.

² Debemos la información del presente artículo a los señores Marcotte y Tesar, respectivamente, director del Laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Escuela de Ponts et Chaussées, y director del Laboratorio de Fotoelasticidad en dicho departamento.

zación, distinguiéndose la fuente luminosa, un filtro de agua, los dos juegos de nicols, con sus correspondientes mecanismos de accionamiento por manivela y ruedas dentadas, para conseguir la perfecta cuadratura en todas las posiciones; el marco portamodelos, situado entre ambos juegos, y, al final, la cámara fotográfica.

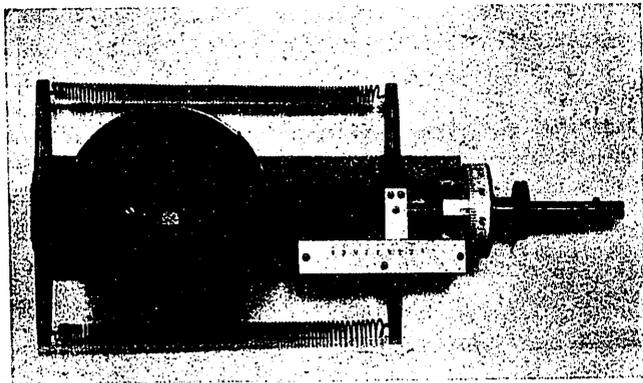


Fig. 2. Compensador de Babinet.

Ya vimos era sencillo deducir las curvas isostáticas mediante un número suficiente de curvas isoclinas (en las experiencias se han tomado generalmente cada 20°); únicamente es preciso tener cuidado en los *puntos singulares*, que son aquellos en que las dos tensiones principales tienen el mismo valor absoluto y, por consiguiente, la elipse de elasticidad se convierte en circunferencia, y cualquier dirección es principal. Por ellos pasa siempre una isoclina para todos los planos de polarización, pudiendo ser puntos singulares de primera o de segunda especie, según que al girar este plano el giro de la isoclina sea en el mismo sen-

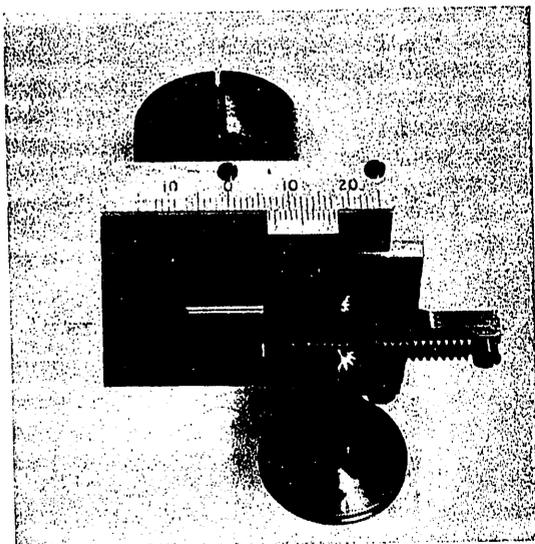


Fig. 3. Compensador de Bravais.

tido o en el contrario. En el primer caso, las isostáticas vuelven su concavidad hacia el punto, tienen la forma de parábola en su proximidad; en el segundo caso, vuelven su convexidad y son como hipérbolas cuyas asíntotas pasaran por el punto. Los puntos singulares pueden formar curvas (caso del contorno de un cilindro solicitado por fuerzas opuestas), y hasta

ocupar toda la superficie del cuerpo (solicitud a presión uniforme en todas direcciones). Cuando las tensiones en el punto singular son nulas, se tienen los

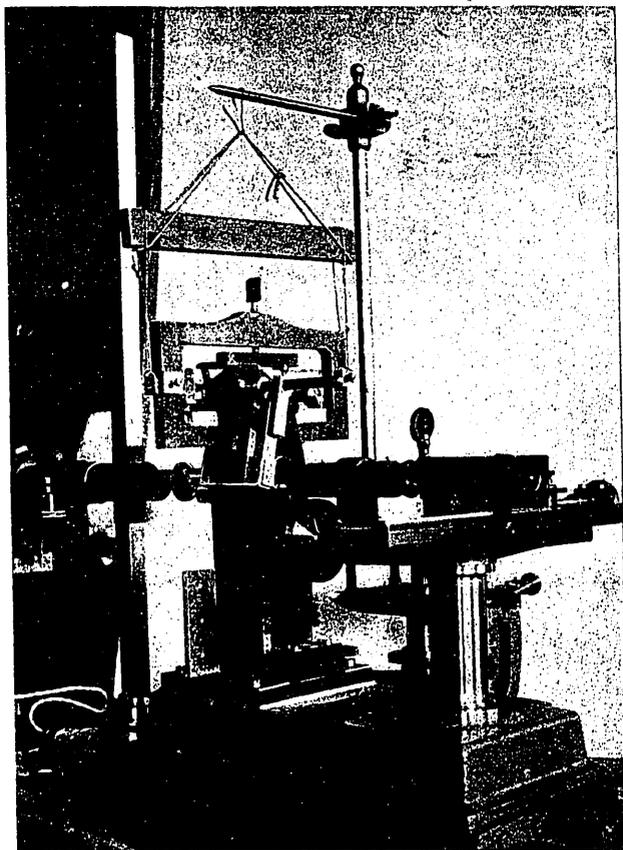


Fig. 4. Latómetro de Mesnager, con un dispositivo de Tesar para orientación de los modelos.

puntos neutros, que a veces se agrupan, constituyendo las *líneas neutras* (fibra media de las vigas y arcos) (figura 6). Una propiedad de las isoclinas fácilmente demostrable es la de ser normales a la tensión principal correspondiente cuando ésta pasa por un má-

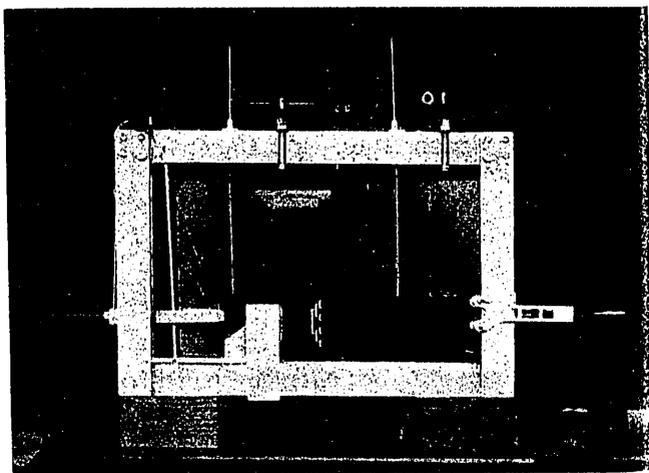


Fig. 5. Cuadro portamodelos, con el correspondiente a experiencias en presas triangulares.

ximo o un mínimo, lo que proporciona un medio para encontrar estos puntos, pues basta disponer una retícula de hilos paralelos a las direcciones de polariza-

ción de los dos juegos de nicoles y buscar para cada familia de isoclinas las tangentes según dichas direcciones. En particular, para obtener los máximos y mínimos de las tensiones de contorno habrá que buscar

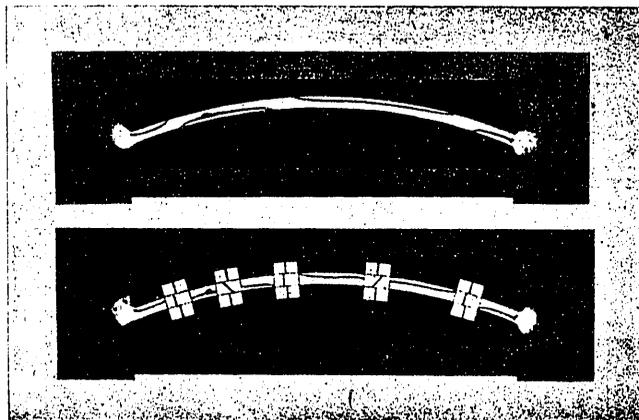


Fig. 6. Mesnager: Experiencias para comprobación de las fórmulas de Bressou en arcos empotrados. Línea neutra y líneas de las tensiones interiores obtenidas por superposición del compensador de Babinet.

los puntos donde las isoclinas cortan perpendicularmente a dicho contorno.

Para la obtención de las isocromáticas es preciso suprimir las isoclinas, lo que al principio se consiguió haciendo girar rápidamente el sistema de nicoles, y ahora, mediante la interposición de dos láminas de

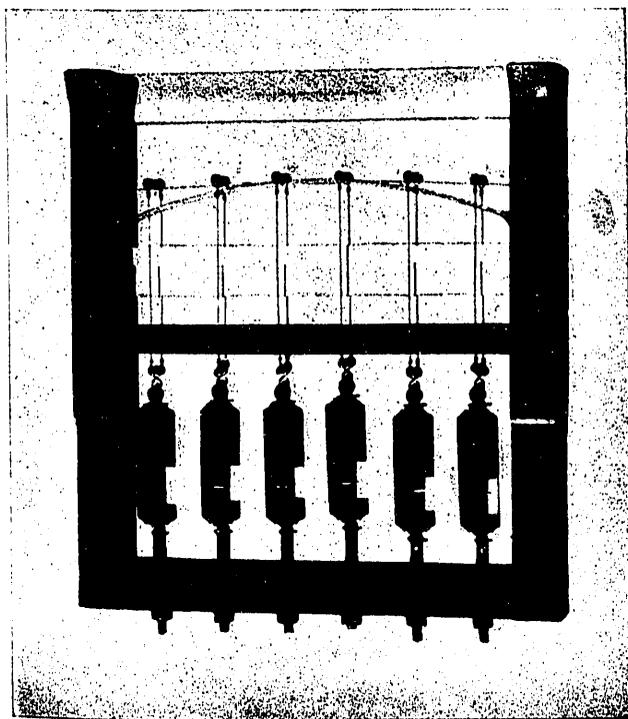


Fig. 7. Mesnager: Modelo de puente sobre el Ródano, en Balme y dispositivos para realización de los esfuerzos.

mica talladas a 45°, que, estableciendo dos desfases de $\frac{\pi}{4}$, producen la polarización circular de la luz en la zona donde está situado el modelo. Cuando se utiliza luz blanca se obtienen las isocromáticas en

todos los colores del iris, repitiéndose los colores a tensiones crecientes de un modo proporcional; en

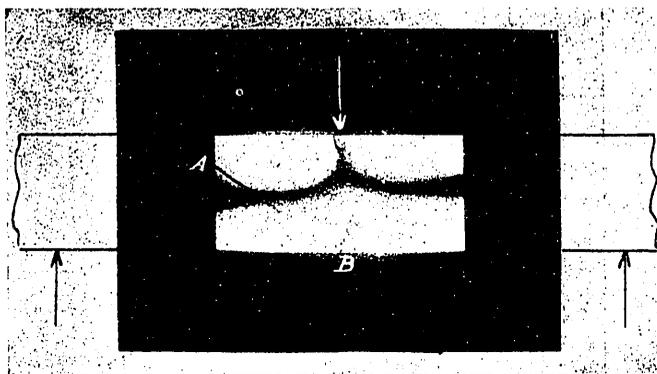


Fig. 8. Mesnager-Tesar, 1925-1926: Isoclinas en un modelo de viga apoyada, con carga central. AB, traza del plano de polarización.

cambio, empleando luz monocromática se obtienen zonas blancas y negras, alternándose para diferencias

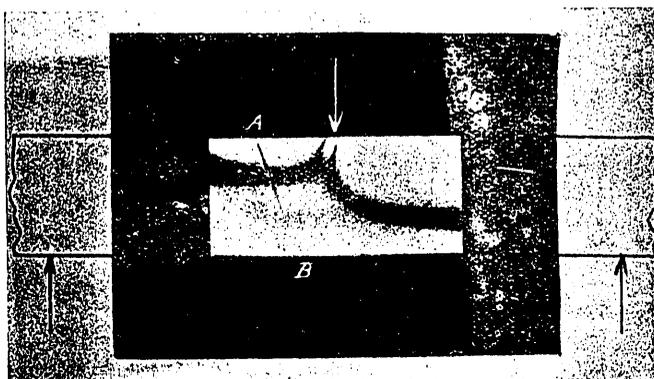


Fig. 8 bis. Mesnager-Tesar, 1925-1926: Isoclinas en un modelo de viga apoyada, con carga central. AB, traza del plano de polarización.

de fase: $\frac{\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \frac{5\lambda}{2}$, etc., formando así una superficie topográfica que da directamente la diferencia de fase

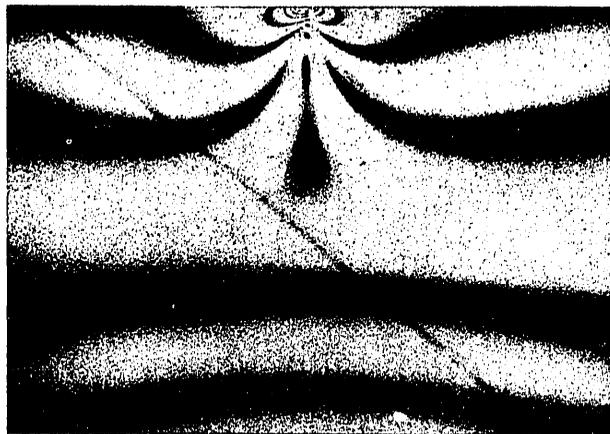
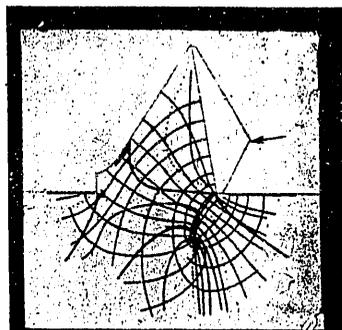
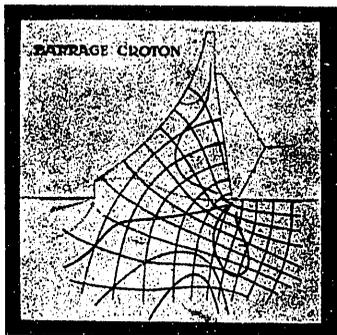
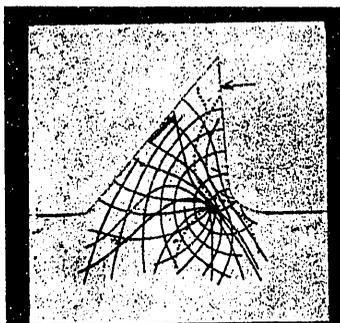
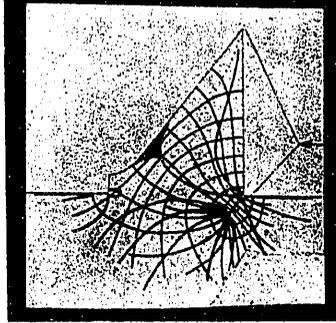


Fig. 9. Mesnager-Tesar, 1925-26: Isocromáticas en un modelo de viga apoyada, con carga central. $\frac{H}{L} = 5$.

y, por consiguiente, la diferencia de las tensiones principales en cada punto. La equidistancia de las curvas se deduce de la ley de Wertheim.

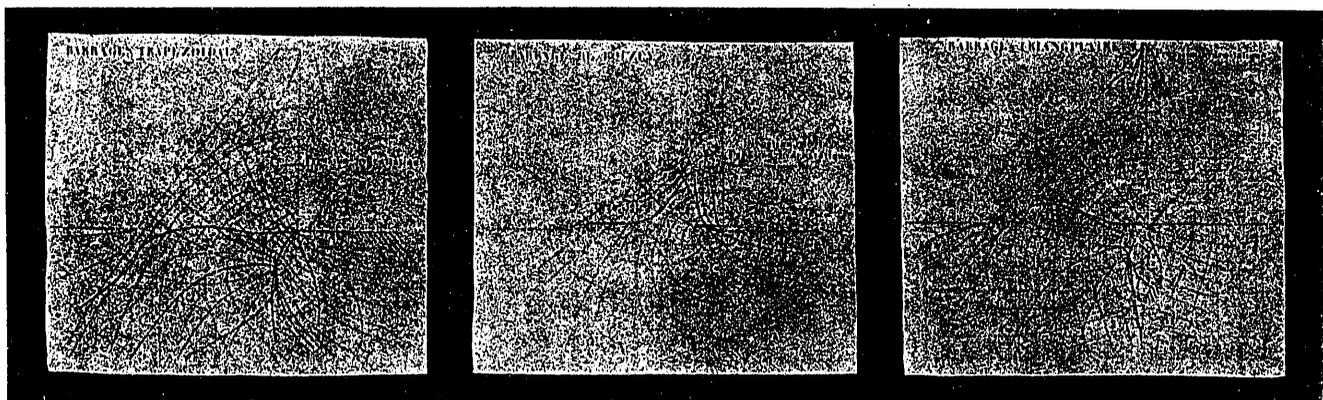


Mesnager-Tesar, 1925-1926:
Experiencias sobre modelos de presas-gravedad. Curvas isoclinas e isostáticas.



Pero el procedimiento de lectura empleado más corrientemente, sobre todo si las tensiones son pequeñas,

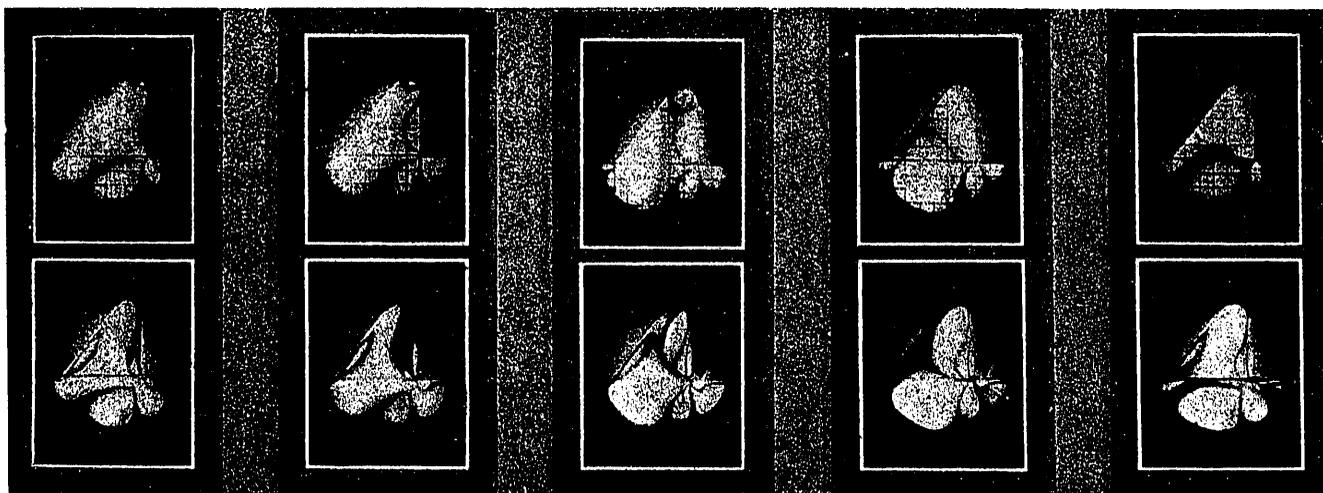
son del tipo de birrefringencia natural; es decir, que utilizan un material poseyendo esta cualidad, siendo



Mesnager-Belawsky: Experiencias sobre modelos de presas-gravedad. Líneas isoclinas e isostáticas.

es la *compensación*, utilizándose los *compensadores* de *Babinet* o de *Bravais* (figuras 2.^a y 3.^a). Ambos

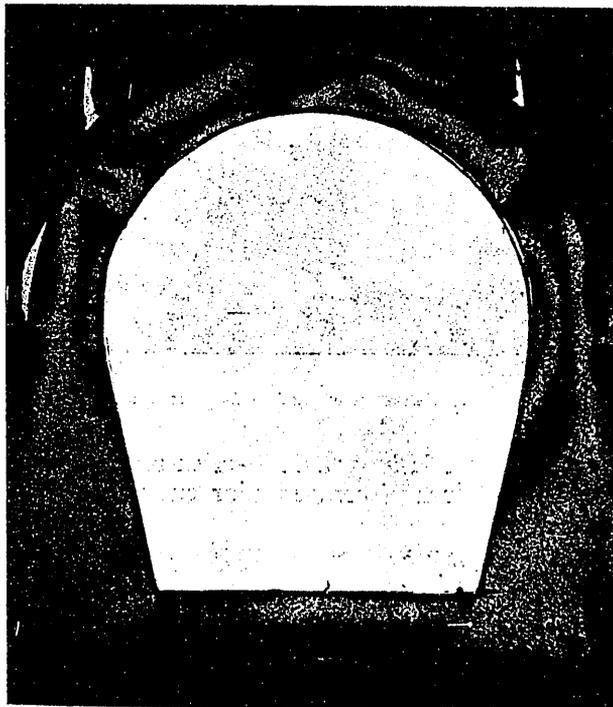
para los dos el cuarzo. En el de Babinet existen dos cuñas triangulares iguales, que, unidas, forman un



Mesnager-Belawsky: Experiencias en modelos de presas de sección triangular. Fotografías de las isoclinas.

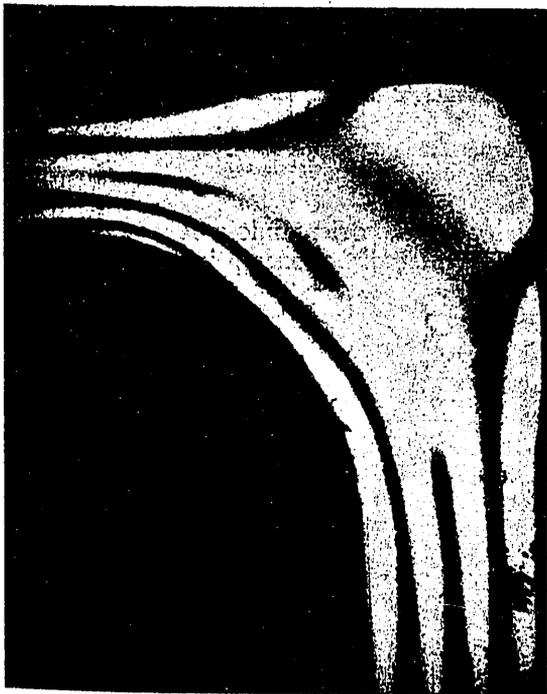
paralelepípedo recto, rectángulo, y cortadas de tal modo que sus ejes ópticos se encuentren en cuadratura. Así, cuando un rayo de luz polarizada lo atraviese en

rayo a dicho plano. Debido a esta propiedad de variación lineal con la distancia, se verifica que al super-



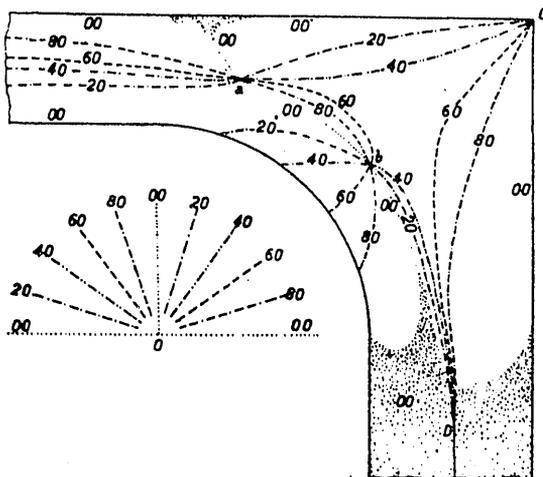
Tesar, 1927: Isocromáticas en un modelo de revestimiento de túnel.

dirección perpendicular al plano de dichos ejes, experimentará dos defasamientos de signo contrario y de magnitudes proporcionales al espesor respectivo de las



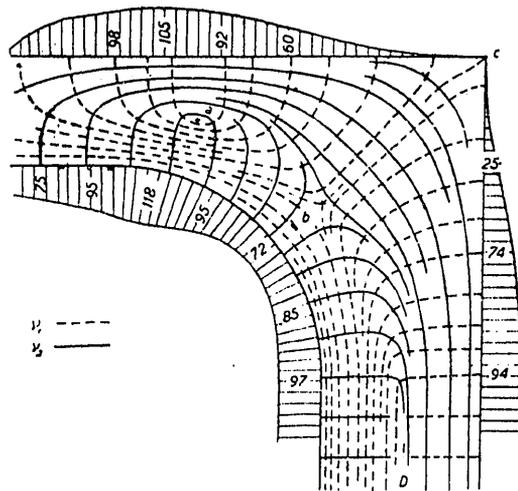
Tesar, 1926-1928: Isocromáticas en un modelo de pieza acodada.

cuñas en el punto de paso; por consiguiente, en el plano medio, el efecto del compensador es nulo, variando a los dos lados linealmente con la distancia del



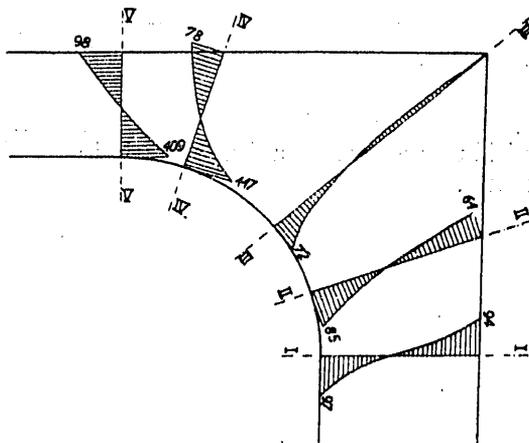
Tesar, 1926-1928: Isoclinas en un modelo de pieza acodada.

poner el compensador en el estudio de un modelo se obtiene directamente la ley de variación de la diferen-



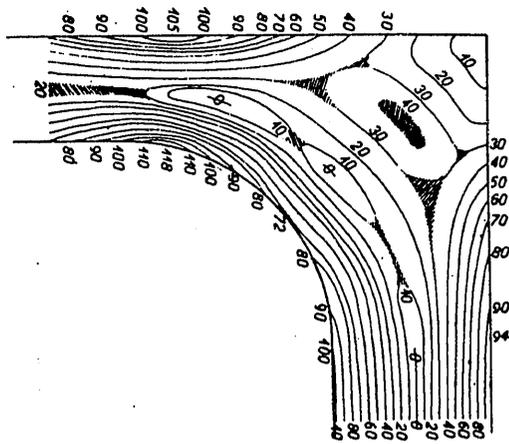
Tesar, 1926-1928: Isostáticas y tensiones de contorno en una pieza acodada.

cia ($\sigma_1 - \sigma_2$) en los distintos puntos de la sección que intercepta el plano medio, mediante una línea oscura



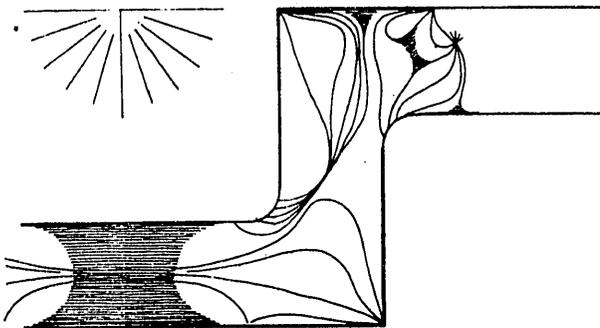
Tesar, 1926-1928: Diagramas de las tensiones normales en varias secciones de una pieza acodada.

en que se transforma la primitiva línea recta del plano medio del compensador. Si éste desborda al mode-



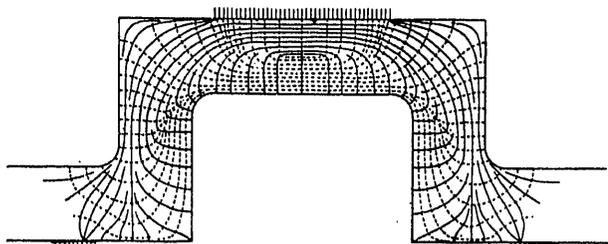
Tesar, 1926-1928: Curvas de iguales tensiones en una pieza acodada.

lo, aparecerán trozos de dicha recta sin alteración, que sirven de referencia, como puede verse en la figura 6, donde se ha superpuesto el compensador en



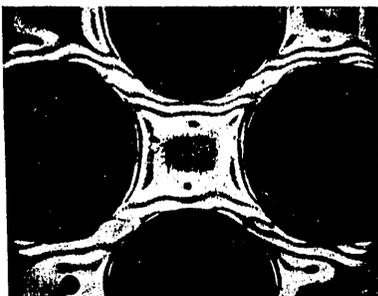
Tesar, 1929: Isoelinas en un modelo de pieza doblemente acodada.

varias secciones del modelo, que es un arco sometido a una fuerza aislada, comprobándose la ley lineal de

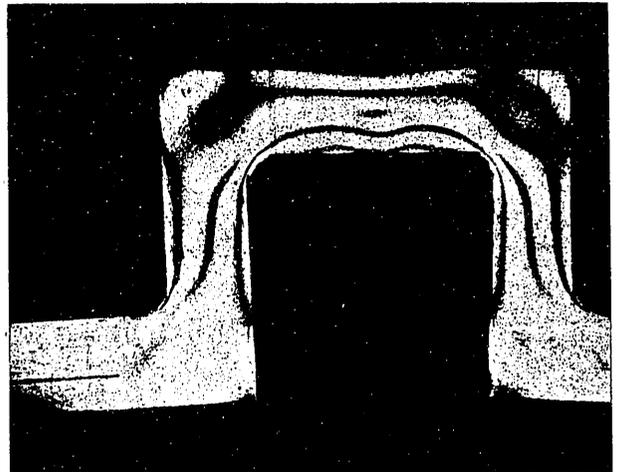


Tesar, 1929: Isostáticas en una pieza doblemente acodada.

repartición de las tensiones y los diferentes casos de repartición que corresponden al trabajo en flexión compuesta.

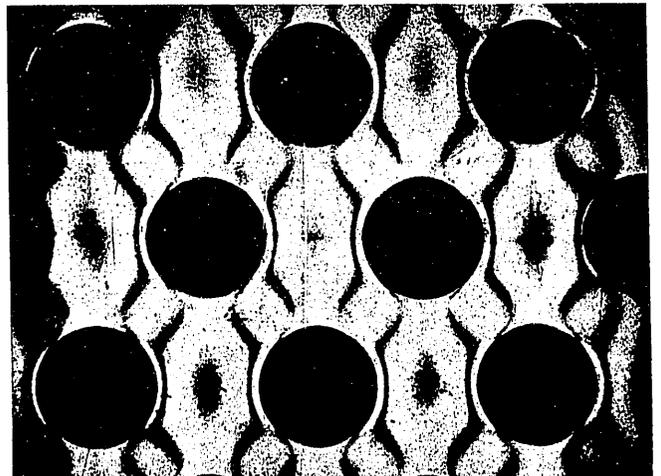


Tesar, 1929: Detalle de las isocromáticas en un modelo de chapa con orificios circulares.



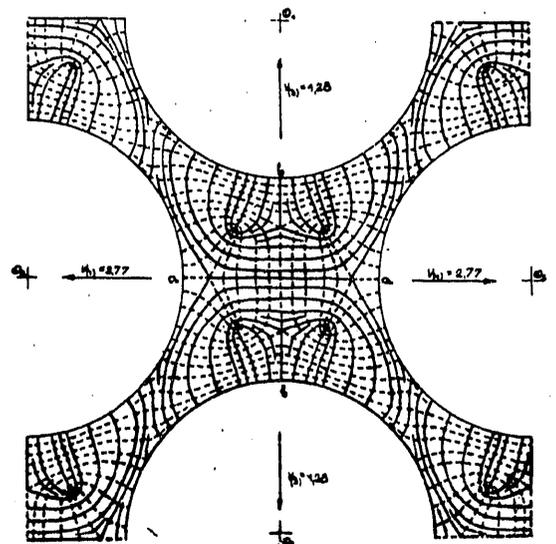
Tesar, 1929: Isocromáticas en un modelo de pieza doblemente acodada.

Para obtener la lectura de $\sigma_1 - \sigma_2$ en un punto determinado se coloca el compensador entre el modelo y



Tesar, 1929: Isocromáticas en un modelo de chapa con orificios circulares.

el nícol analizador, orientándolo de modo que sus ejes coincidan con las direcciones principales de la tensión



Tesar, 1929: Isostáticas en una placa con orificios circulares.

en el punto; se orienta el sistema de nicoles de modo que sus planos de polarización estén aproximadamente a 45° con estas direcciones (con objeto de obtener el máximo de paso de luz a través del modelo). Así existirá en el punto el color correspondiente con la máxima intensidad luminosa, procediéndose a su anulación mediante desplazamiento de las cuñas de cuarzo, lo que se obtiene por accionamiento de tambor y cremallera. Este deslizamiento se lee en una escala que va desde -3λ a 3λ (λ longitud de onda de la luz verde del mercurio), con divisiones de $1/10\lambda$ y nonius al $1/10$.

El compensador de Bravais reposa en el mismo principio y su funcionamiento es idéntico; únicamente se diferencia en que lleva además una lámina de cuarzo de espesor uniforme superpuesta a las cuñas. Permite realizar las lecturas con error menor de tres milésimas de la longitud de onda que corresponde también a la luz verde del mercurio.

En la figura 5 aparece el bastidor portamodelos (corresponde a las experiencias en presas de sección triangular), pudiendo apreciarse los dispositivos para la realización de las cargas puntuales.

Los aparatos descritos han sido realizados por la casa Jobin & Ibon, que ha industrializado el procedimiento Mesnager, habiendo fabricado últimamente las instalaciones del Instituto de Optica de París, otra en Milán y la del Laboratorio de Moscú, que es la más importante del mundo.

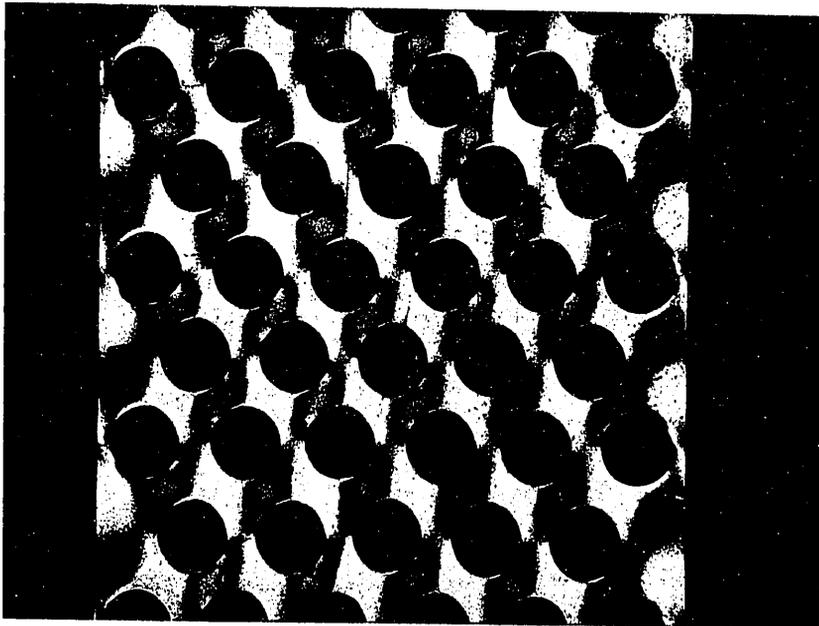
En las figuras aparecen las fotografías obtenidas y resultados deducidos en algunas de las experiencias llevadas a cabo en este Laboratorio, que claramente expresan su valor y la extraordinaria importancia de los estudios fotoelásticos en la resolución de los problemas estructurales, no sólo en cuanto a la investigación se refiere, sino en los planteados por la construcción en casos que se presentan muy a menudo, y que unas veces son inabordables directamente, y otras, a costa de hipótesis, cuyo valor no puede controlarse sino *a posteriori*, de no utilizar el método que nos ocupa, el cual, por la extraordinaria faci-

lidad y baratura en la realización de modelos, permite la experimentación en una amplísima escala de esfuerzos y en un ilimitado repertorio de formas y dimensiones.

Carlos FERNANDEZ CASADO
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

ARTICULOS DE REVISTAS

Mesnager: "Contribution a l'étude de la déformation élastique des solides". *Annales des Ponts et Chaussées*, 1901.



Tesar: 1929. Isoclinas en un modelo de vidrio con orificios circulares.

- "Etude complète sur un model réduit des tensions qui se produiront dans un ouvrage". *Annales des Ponts et Chaussées*, 1913.
 - "Mesure expérimentale des efforts intérieurs dans les solides et résultats". *Compte Rendu des Troisième et Quatrième "Reunions de l'Institut d'Optique"*, Avril, 1930.
- López Franco: REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS, 25 julio 1918, número 2235.
- Tardy: "Méthode pratique d'examen et de mesure de la birrefringence des verres d'optique". *Revue d'Optique Théorique et instrumentale*, 8-1929.
- Tesar: Representation simple et complète en grandeur et en direction des efforts intérieurs dans les problèmes d'élasticité plane". *Génie Civil*, 20 junio 1931.

Experiencias sobre la presa-bóveda de Isber

Con el título "Las presas-bóvedas" publicamos, en el número de 1.º de mayo de 1927 de esta REVISTA, un artículo en el que describíamos la manera de resolver el problema de las presas-bóvedas desde un punto de vista sencillísimo en el cálculo y la construcción, que, además, permitía disminuir espesores hasta un límite extraordinario.

Aunque sobre esta misma interesante cuestión hemos insistido posteriormente en las publicaciones presentadas al Congreso de Lieja de 1930 y en el tratado de *Mecánica Elástica* (segunda edición) del mismo

año, resumiremos en dos palabras el concepto que sirvió de base a este sistema.

La insuperable dificultad de estudiar una presa-bóveda como sistema elástico triple, por la gran complicación de las ecuaciones y, sobre todo, de los límites, ha sido la causa de que se estudie el sólido elástico por métodos de cálculo simplificados que se basan en hipótesis más o menos realizables. Como la dificultad consiste en enlazar la deformación en el sentido vertical con la horizontal, o, dicho de otro modo, en apreciar lo que resiste el macizo considerado como