

# Fotoelasticimetría<sup>1</sup>

## El Laboratorio de la Escuela Politécnica de Zurich<sup>2</sup>

Este Laboratorio se instaló en 1926, por iniciativa de M. A. Rohm, presidente del Consejo de la Escuela Politécnica Federal, y bajo la dirección del profesor doctor Tank, aportando los fondos necesarios la Sociedad para el Desarrollo de la Economía Nacional Suiza. En su organización se llevaron a la práctica las teorías de H. Favre, quien ha llegado a perfeccionarlas de tal modo, que su método denominado "puramente óptico" es actualmente el más racional y exacto.

Las características del método de Favre son:

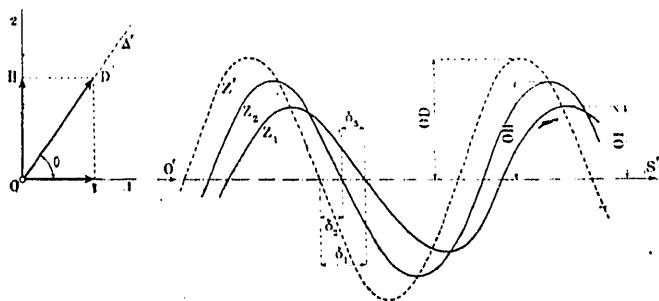


Fig. 1

- Es puramente óptico, deduciéndose todos los datos experimentales sin necesidad de entrar en contacto material con el modelo;
- se opera por mediciones puntuales, deduciéndose de una vez para cada punto, todos los datos experimentales precisos para las determinaciones analíticas;
- se obtienen tres relaciones entre  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$ , lo que permite obtener un error probable más reducido.

En el artículo de introducción expusimos los fundamentos del método; insistiremos ahora sobre ellos, detallando el modo de aplicarlos.

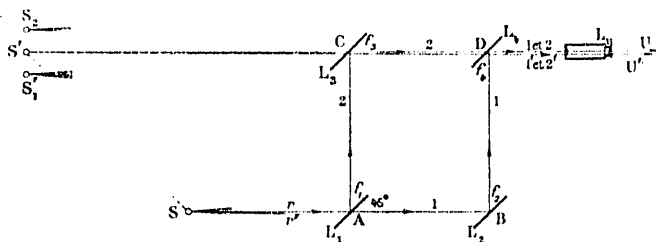


Fig. 2. Esquema del interferómetro

Cuando un rayo de luz polarizada linealmente atraviesa una sustancia birrefringente, se convierte en otros dos, defasados entre sí y con respecto al inicial (fig. 1). La ley de Wertheim valora el defasamiento mutuo de los emergentes en función de las tensiones  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$ ; Favre obtiene los defasamientos de cada uno de éstos, con relación al incidente en

función de las mismas variables, llegando a las ecuaciones:

$$\begin{aligned} \delta_1 &= a\sigma_1 + b\sigma_2 \\ \delta_2 &= b\sigma_1 + a\sigma_2 \end{aligned}$$

cuando  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  varían entre límites determinados, siendo  $a$  y  $b$  constantes que dependen de las propie-

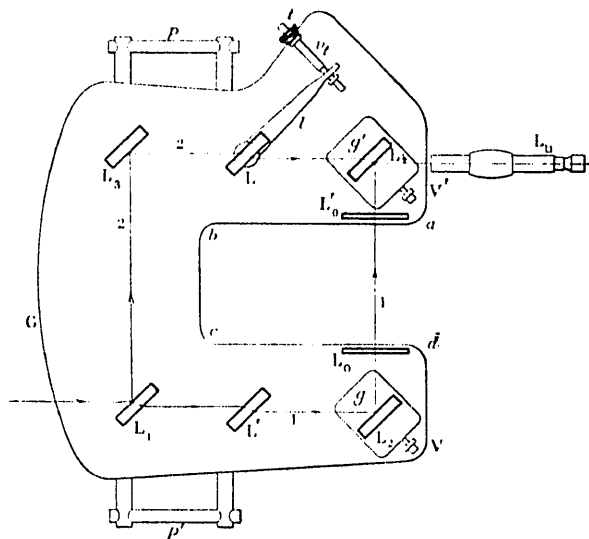


Fig. 3. Vista horizontal del interferómetro

dades ópticas y elásticas del material y de la longitud de onda del rayo incidente. (Para la deducción de estas ecuaciones, ver las publicaciones de Favre que se citan en la Bibliografía al final del artículo.)

Por consiguiente, para la determinación de  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  tenemos las tres relaciones siguientes:

Ecuaciones de Favre:

$$\begin{aligned} \delta_1 &= a\sigma_1 + b\sigma_2 \\ \delta_2 &= b\sigma_1 + a\sigma_2 \end{aligned}$$

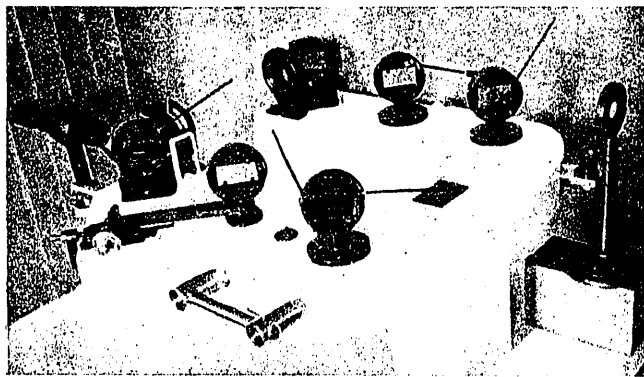


Fig. 4. Interferómetro

Ley de Wertheim:

$$\delta_3 = c(\sigma_1 - \sigma_2)$$

Determinados experimentalmente  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  y  $\delta_3$ , la superabundancia de ecuaciones permite, por aplica-

<sup>1</sup> Véase el número de 1.º de febrero, pág. 55.

<sup>2</sup> La información de este artículo se debe al Sr. Favre, actualmente encargado del Laboratorio de Hidráulica de la Escuela Politécnica y organizador del Laboratorio de Fotoelasticimetría.

ción de la teoría de errores de Gauss, calcular los valores de  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  más probables en relación con los da-

jas de interferencia denominadas anillos de Fresnel, que pueden observarse mediante un antejo  $L_v$ , cuyo

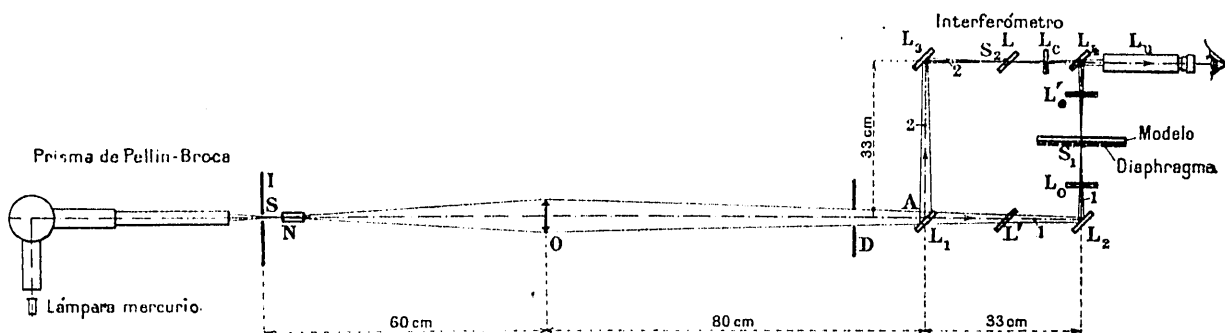


Fig. 5. Esquema de los aparatos utilizados en la determinación de  $\delta_1$  y  $\delta_2$ .

tos experimentales, y, además, determinar, en cada punto, el error medio de los resultados obtenidos.

Los valores de  $\delta_1$  y  $\delta_2$  se obtienen mediante interferómetro, utilizando Favre en sus experiencias uno de tipo Mach-Zehnder. Este aparato (figs. 2 y 3) consta esencialmente de cuatro placas de vidrio de caras paralelas  $L_1, L_2, L_3$  y  $L_4$ , dispuestas en los vértices de un rectángulo y formando ángulos de  $45^\circ$  con sus lados. Las placas  $L_1$  y  $L_4$  tienen sus caras  $f_1$  y  $f_4$  recubiertas de una ligera capa de platino, que deja pasar un 30 por 100 de la luz incidente y refleja igualmente un 30 por 100 de la misma (esto se verifica para una incidencia de  $45^\circ$  y una longitud de onda determinada). Las otras dos placas  $L_2$  y  $L_3$  tienen sus caras  $f_2$  y  $f_3$  recubiertas de una capa gruesa de platino, por lo que funcionan como espejos, reflejando más del 90 por 100 de la luz incidente.

eje coincida con  $DU$ , apareciendo como bandas negras, verticales y equidistantes, que se destacan sobre fondo claro.

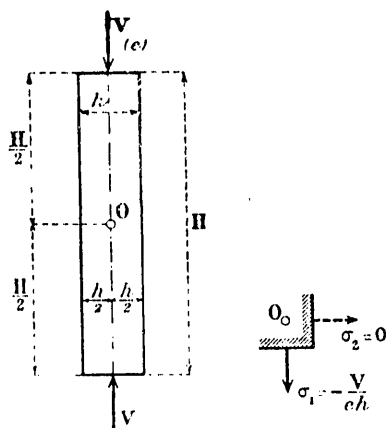


Fig. 6. Determinación de los coeficientes  $a, b$  y  $c$ .

Si consideramos un rayo de luz  $SA$  que emerge de una fuente luminosa puntual situada en la prolongación del lado  $AB$ , sufrirá al pasar por el interferómetro una serie de reflexiones y refracciones, que darán lugar a la obtención de dos rayos,  $DA'$  y  $DA''$ , coincidentes y de la misma intensidad, que observados en su dirección producirán la impresión de provenir de una fuente luminosa  $S'$ . Esto ocurre, puesto que los recorridos de ambos rayos,  $SA_1L_2L_4A'$  y  $SA_1L_3L_4A''$ , son idénticos; pero si hacemos girar ligeramente uno de los espejos  $L$  alrededor de la vertical, los rayos no coincidirán a la salida y parecerán provenir de dos fuentes luminosas distintas:  $S'_1$  y  $S'_2$ . Si en vez de suponer rayos únicos, suponemos haces muy concentrados, se obtendrán interferencias de los mismos, apareciendo en toda pantalla perpendicular a  $DU$  las fran-

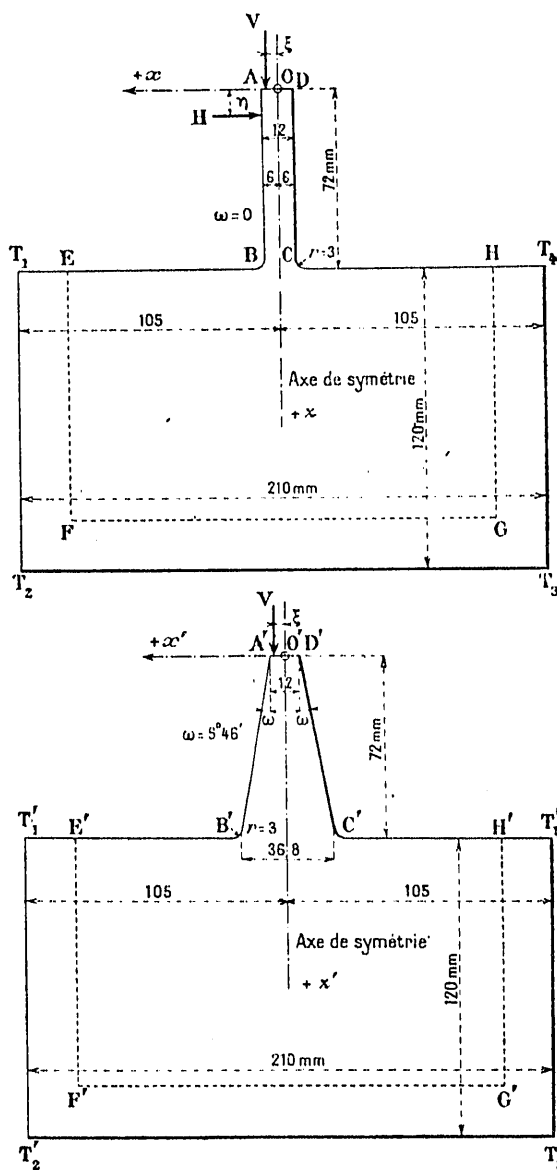


Fig. 7. Favre: Modelos utilizados en las investigaciones sobre muros empotrados.

Si por un procedimiento cualquiera se modifica el recorrido óptico del rayo 1 en su camino  $ABD$ , las franjas se desplazarán horizontalmente, a razón de

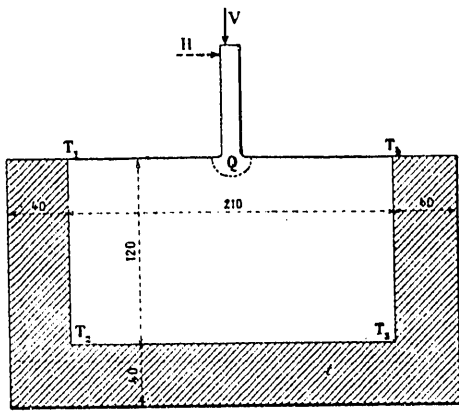


Fig. 8. Disposición de los macizos de empotramiento: t, chapa de acero

un intervalo por longitud de onda de variación. Lo mismo se verifica si ésta la experimenta el rayo 2 en el transcurso *ACD*. Esto nos permite determinar los

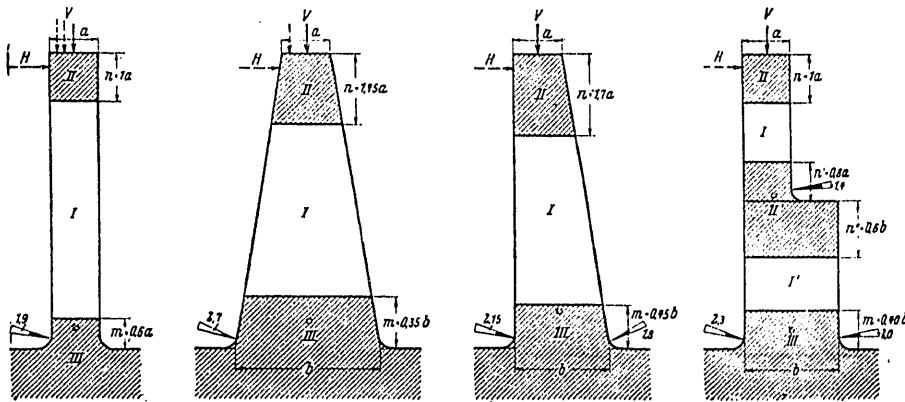


Fig. 9. Zonas consideradas en la investigación sobre modelos de muros empotrados

defasamientos  $\delta_1$  y  $\delta_2$ , puesto que si colocamos el modelo transversalmente en el recorrido  $l_{e2}l_{e3}$  convenientemente orientado, los rayos 1 y 2 son, respectivamente, el incidente y uno de los emergentes a tra-

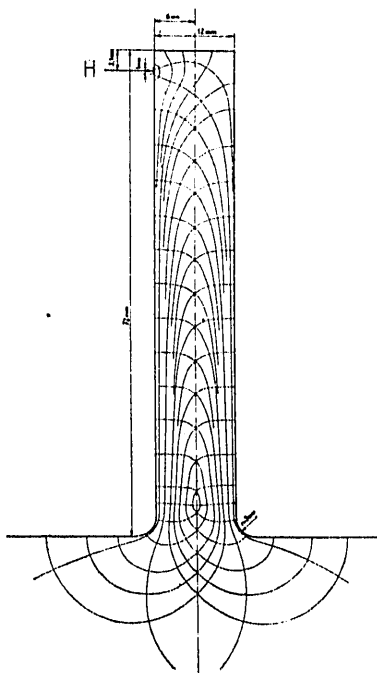


Fig. 10. Isostáticas en un modelo de muro empotrado

vés del modelo, deduciéndose del corrimiento de las franjas al intercalar el modelo el defasamiento respectivo en longitudes de onda.

En la figura 5 aparecen, esquemáticamente, los aparatos que se utilizan en la determinación de  $\delta_1$  y  $\delta_2$ . Se opera con luz polarizada, obtenida haciendo pasar a través de un juego de nicols *N* el rayo de luz concentrada por el diafragma puntual *I*, que procede de una lámpara de mercurio y que se purifica a través de un prisma Pellin-Broca montado en espectroscopio. La longitud de onda es:  $0,5461 \mu$ .

En el interferómetro tenemos, además de las cuatro placas  $l_1, l_2, l_3$  y  $l_4$ , una placa  $l_5$  denominada compensador, mediante la cual se obtiene la disimetría en los recorridos ópticos que da lugar a las interferencias; el espesor de esta placa se equilibra con la  $l_1'$  situada en el lado opuesto. El modelo se sitúa entre dos láminas de mica, giratorias alrededor de un eje vertical, mediante las cuales se consigue que entre ellas el plano de polarización del rayo coincida con una de las direcciones de birrefringencia del modelo en el punto considerado. El espesor del modelo se equilibra colocando en  $l_5$  un trozo de la misma placa que ha servido en su fabricación.

El plano de polarización del nicol *N* es vertical, de modo que los rayos 1 y 2 vibrarán también verticalmente (excepto el 1, en la zona comprendida entre las láminas de mica), pues en todas las reflexiones y refracciones el plano que las determina es perpendicular al de polarización.

Para la determinación de  $\delta_2$  se utiliza un compensador de Bravais, que ya hemos descrito en el artículo anterior.

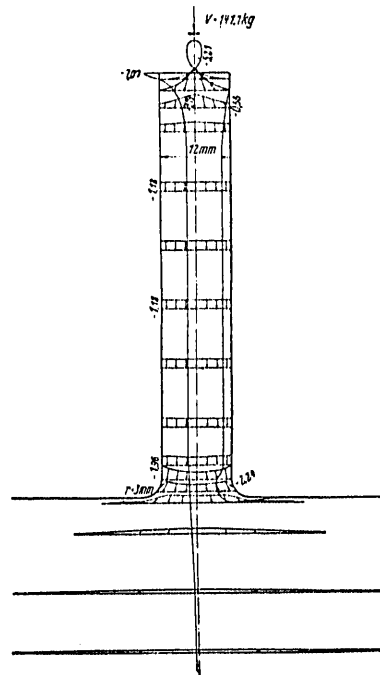


Fig. 11. Curvas de las tensiones principales en un modelo de muro empotrado

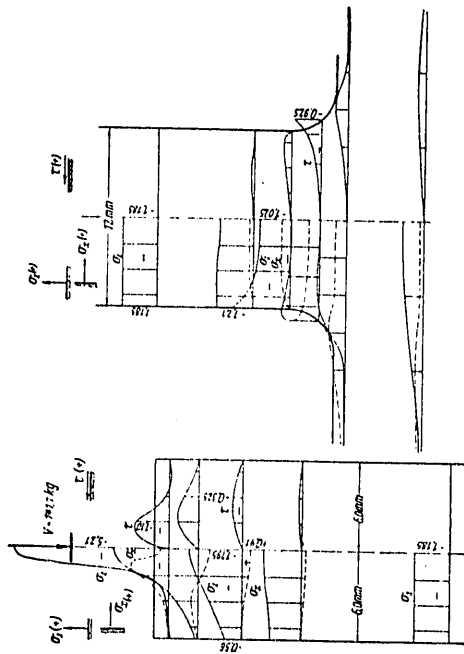


Fig. 12. Componentes normales y tangenciales de las tensiones correspondientes a las secciones principales extremas del modelo de la figura 11

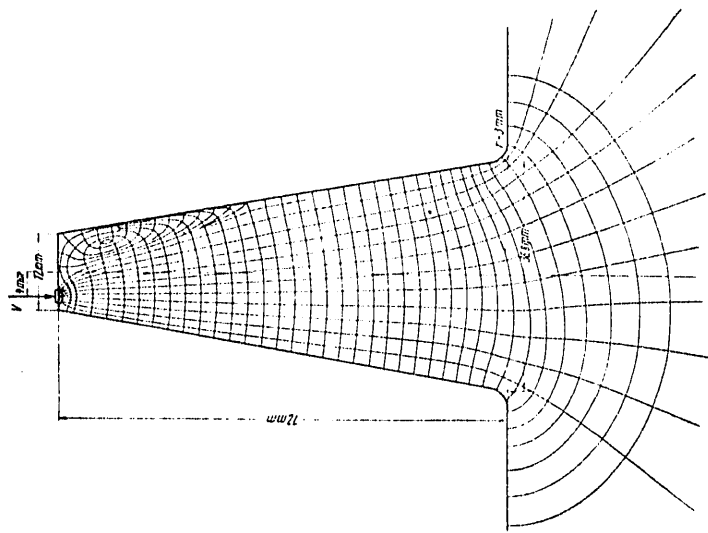


Fig. 13. Isostáticas en un modelo de muro empotrado

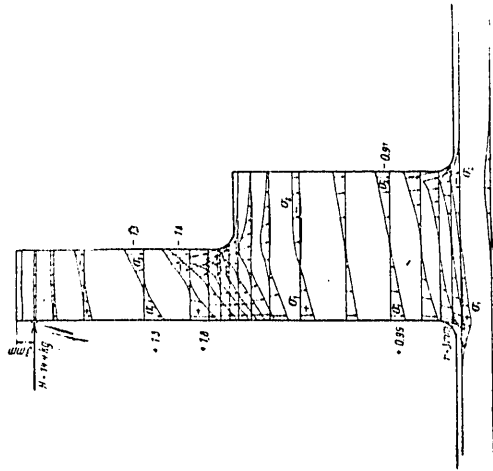


Fig. 16. Curvas de las tensiones principales en un modelo de muro empotrado

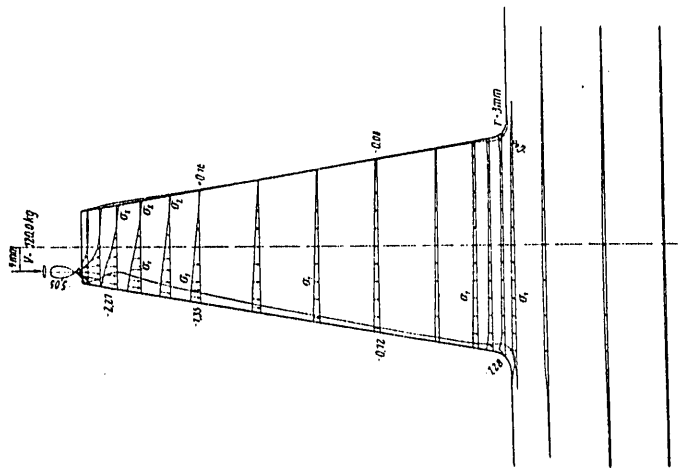


Fig. 14. Curvas de las tensiones principales en un modelo de muro empotrado

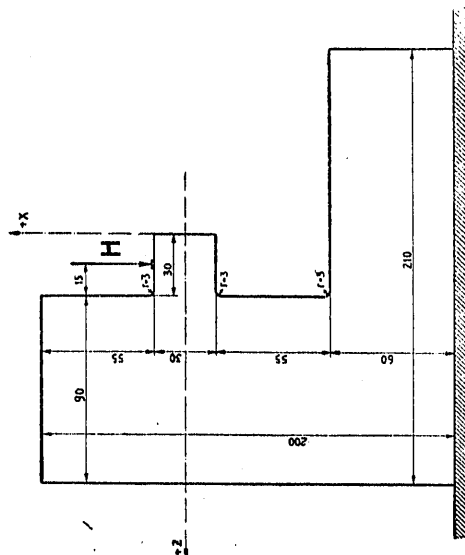


Fig. 17. *Tenk y Miller*: Modelo para el estudio de la flexión de una pieza prismática coria empotrada

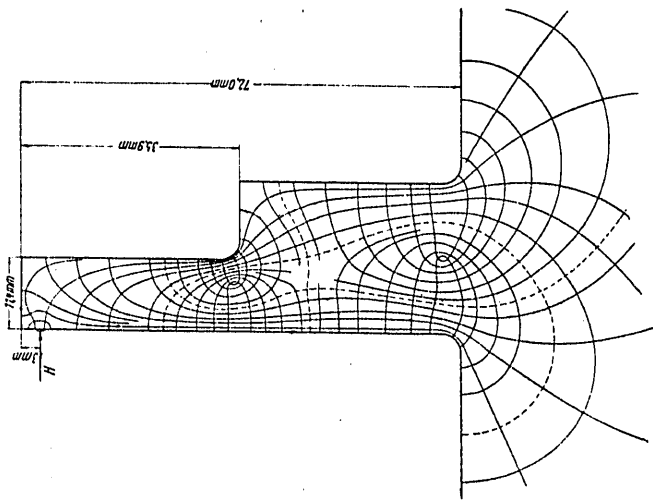


Fig. 15. Isostáticas en un modelo de muro empotrado

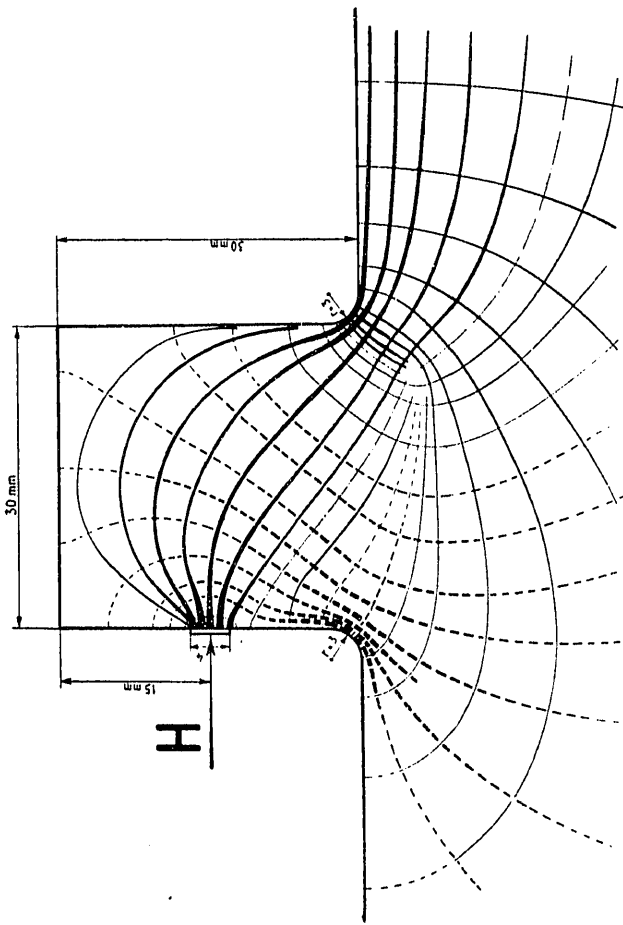


Fig. 18. Isostáticas en un modelo de pieza curva empotrada, sometida a flexión

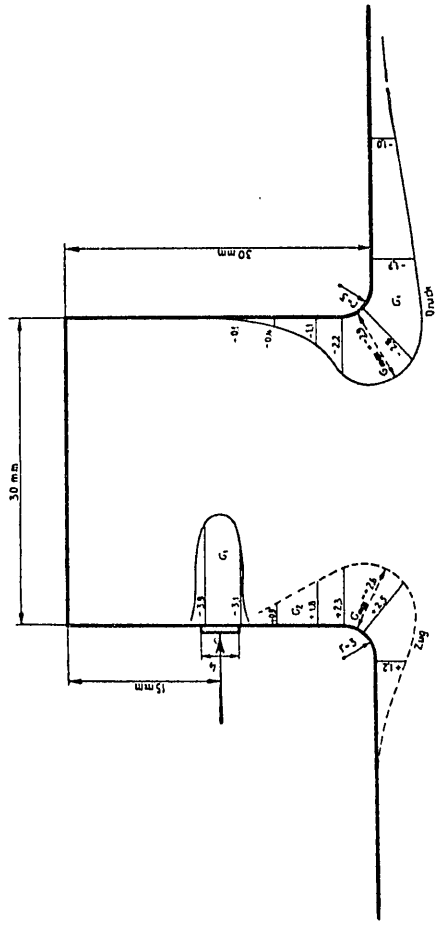


Fig. 20. Curvas de las tensiones de contorno

Druk: compresión  
Zug: tracción

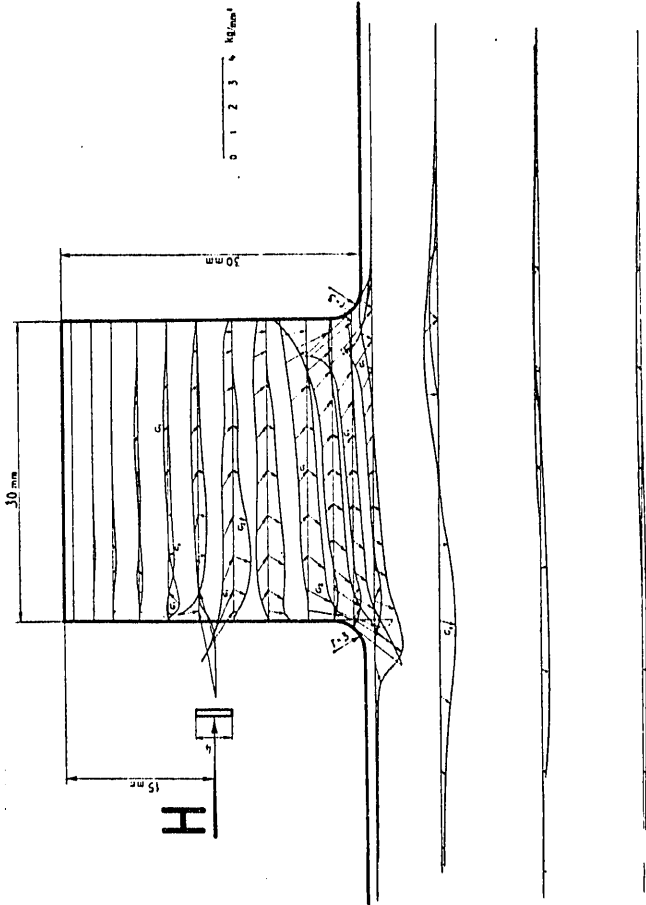


Fig. 19. Curvas de las tensiones principales correspondientes al modelo de la figura 18

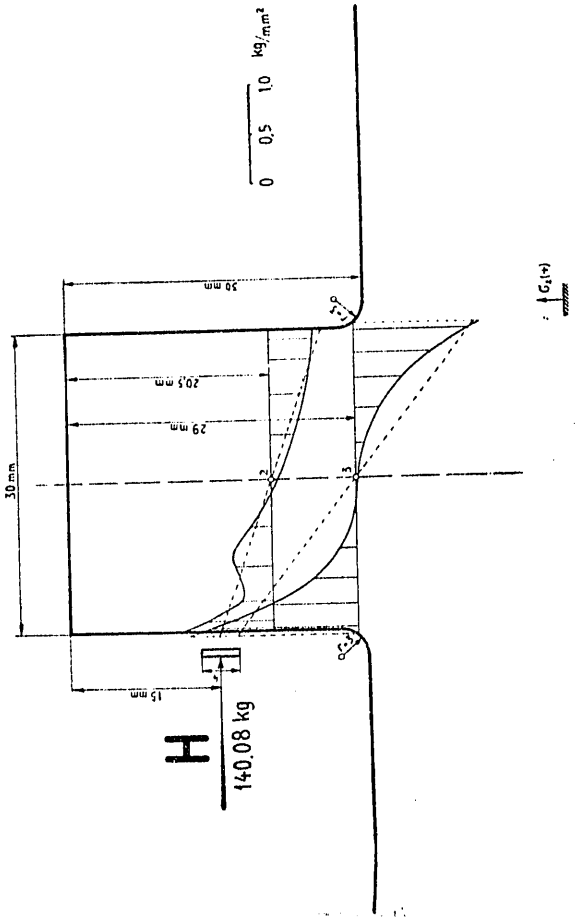


Fig. 21. Curvas de las componentes normales de las tensiones en dos secciones principales

$\sigma_{1,2}(r)$   
cm/cm

Estas operaciones, así como la determinación de los ángulos de las tensiones principales, se llevan a cabo sucesivamente, para cada uno de los puntos a estudiar en el modelo, empezando, claro está, por la obtención de los ángulos que se precisan en las otras determinaciones (pues tanto el compensador como los prismas de mica se han de orientar según los planos de las di-

y las ecuaciones se transforman en:

$$\begin{aligned} \delta_1 &= a c \sigma_1 \\ \delta_2 &= b e \sigma_1 \\ \delta_3 &= c e \sigma_2 \end{aligned}$$

Por consiguiente, midiendo directamente  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  y  $\delta_3$  para distintos valores de  $V$ , obtenemos los de  $a$ ,  $b$ ,  $c$  con la aproximación que se desee.

El material empleado en la fabricación de modelos es el vidrio, adoptado por Favre, pues además de las ventajas generales que expusimos, tiene particularmente para su método la de comprobar experimentalmente las tres ecuaciones fundamentales. El portamodelos es un bastidor doble de acero que prensa la base del mismo a través de tiras de papel y a una distancia suficiente de la región útil para las investigaciones. Los esfuerzos aplicados son siempre fuerza única horizontal o vertical, obtenida mediante dispositivo de báscula y placa de contacto de aluminio.

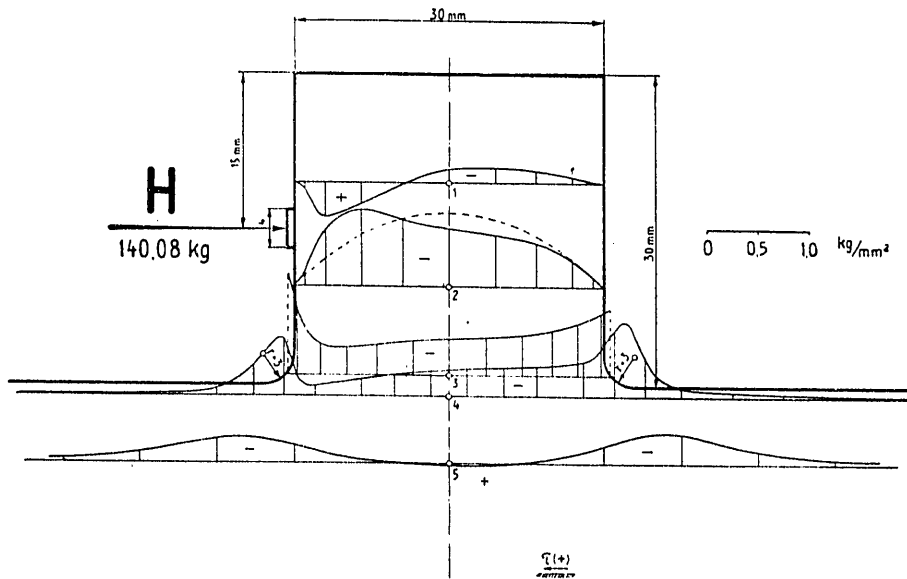


Fig. 22. Curvas de las componentes tangenciales de las tensiones en varias secciones principales

recciones principales). Para materializar los puntos en que han de realizarse las investigaciones se recubre el modelo con una chapa metálica perforada con orificios circulares de 0,5 mm de diámetro.

La determinación de los coeficientes  $a$ ,  $b$  y  $c$ , que aparecen en las fórmulas, se lleva a cabo experimentando sobre una muestra del material sometida a esfuerzos simples (tracción o compresión), en la que las

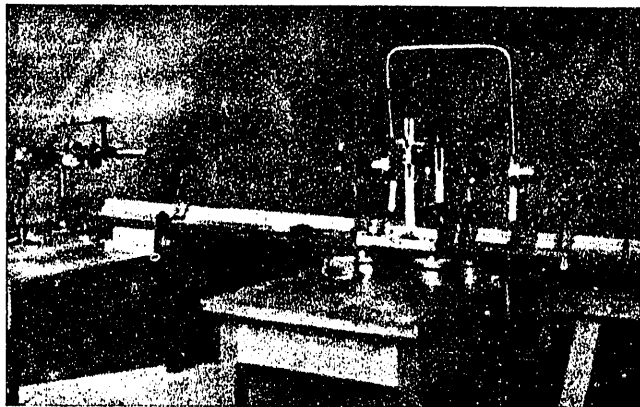


Fig. 23. Disposición de los aparatos durante la medición de los ángulos de las tensiones principales

tensiones puedan obtenerse analíticamente, procediéndose, por consiguiente, a posteriori. Consideremos, por ejemplo (fig. 6), un paralelepípedo de dimensiones  $H$ ,  $h$ ,  $e$ , sometido a dos fuerzas  $N$ , iguales y opuestas, aplicadas en sus bases; si la altura es, al menos, cinco veces la mayor de las otras dimensiones, podemos suponer que en el punto  $O$  el régimen de tensión es:

$$\sigma_1 = -\frac{V}{eh} \quad \sigma_2 = 0,$$

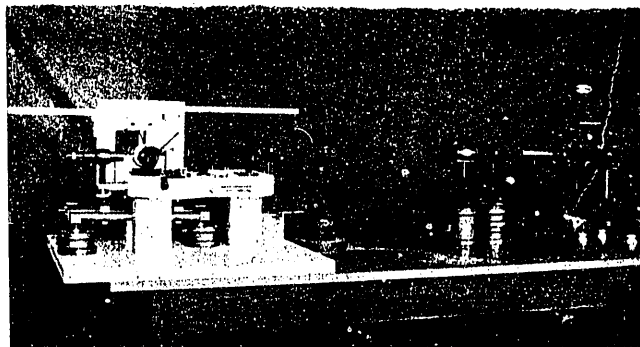


Fig. 24. Disposición de los aparatos durante la determinación de los defasamientos

En las figuras aparecen los resultados de algunas investigaciones llevadas a cabo en este laboratorio.

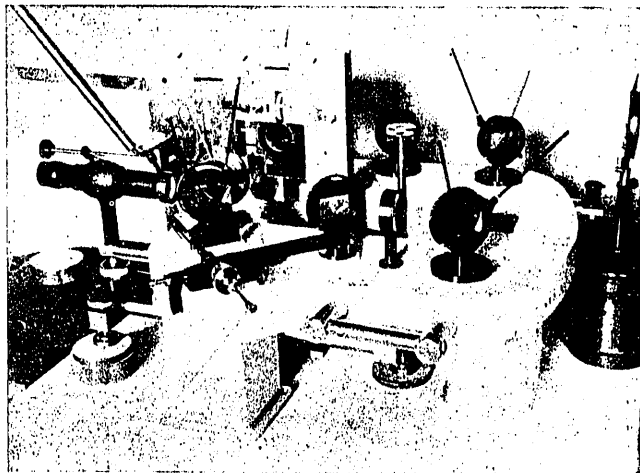


Fig. 25. Interferómetro con un modelo de muro empotrado

Desde la 7 a la 16 corresponden a modelos de muros empotrados, deduciéndose las isostáticas y curvas de las tensiones principales, así como las de los componentes normales y tangenciales de las tensiones correspondientes a varias secciones principales, considerando el muro como pieza prismática empotrada. Se hicieron estudios analíticos, deduciéndose los valores de las tensiones interiores mediante las fórmulas corrientes de la Resistencia de materiales; la comparación de estos resultados con los experimentados da lugar a la consideración de tres zonas en los macizos que representan los modelos:

*Zona I*, donde las fórmulas corrientes de la Resistencia de materiales son aplicables, resultando divergencia entre los valores teóricos y experimentales inferiores al 3 por 100.

*Zona II*, de influencia directa de los esfuerzos, donde no pueden aplicarse las fórmulas de la Resistencia de materiales, y que el método experimental resuelve perfectamente.

*Zona III*, en la que los resultados analíticos obtenidos aplicando la teoría de Boussinesq, concuerdan perfectamente con los experimentales.

Las figuras 17 a 22 corresponden al estudio de una pieza prismática corta empotrada sometida a tracción, problema que se presenta muy a menudo en construc-

ción, y muy difícil de abordar analíticamente. En las figuras 21 y 22 se expone la comparación entre las componentes normales y tangenciales de las tensiones en varias secciones principales, obtenidas experimentalmente, y las que debían resultar aceptando las hipótesis corrientes de flexión.

El procedimiento de Favre lo ha industrializado la Casa Schiltknecht, de Zurich, que estaba fabricando, cuando nuestra visita, dos instalaciones para las Universidades de Buenos Aires y Montreal, respectivamente.

Carlos FERNANDEZ CASADO  
Ingeniero de C., C. y P.

#### BIBLIOGRAFIA

- Favre.—*Sur une nouvelle méthode optique de détermination des tensions intérieures*. Editions de la *Revue d'Optique Théorique et Instrumentale*.
- Favre.—*Sur les possibilités d'application de la Photoélasticité aux problèmes d'Elasticité en trois dimensions*. *Revue d'Optique*.
- Tank, Favre y Jenny Dürst.—*Aus dem Laboratorium für photoelastische Untersuchungen an der Eidgen. Tech. Hochschule, Zurich, Die Bautechnik*, 7 noviembre 1930.
- Tank y Müller.—*Spannungs-optische Untersuchung eines kurzen, auf biegunig beanspruchten Stabes*. "Memoria presentada con motivo del 50.º aniversario del Laboratorio Federal del Politécnico de Zurich". Noviembre 1930.

## La pretendida influencia de los bosques en la lluvia

Cuando añejas preocupaciones han sido victoriosamente refutadas por la ciencia, no desaparecen sin dejar rastro, y con frecuencia reviven, cuando alguna circunstancia inesperada o algún fenómeno de interpretación dudosa viene aparentemente a devolverles un poco de probabilidad. Tal acontece con la opinión que atribuye a los bosques influencia considerable en la lluvia.

Es hoy perfectamente sabido que la lluvia, por lo menos las lluvias importantes, son solamente debidas a corrientes ascendentes del aire que, al dilatarse, se enfría, provocando la condensación del vapor de agua que contiene; pero estas condensaciones habrán de constituir masa suficiente para que la precipitación pueda producirse y la lluvia llegar al suelo. De lo contrario, no habrá más que nubes, que el sol disipará, o que, si tienden a descender, serán consumidas por la evaporación, en las capas más bajas de la atmósfera, que rara vez están saturadas, y que, cuando lo están, como ocurre durante las nieblas, es en períodos de calmas, poco favorables para la producción de grandes condensaciones, que ordinariamente en estos casos tienen espesor insuficiente para que su acumulación dé lugar a lluvias apreciables.

La consecuencia de ello es que la lluvia se forma a alturas sobre el suelo, y por causas generales sobre las cuales la acción del bosque es absolutamente insignificante. Por eso decía ya con razón Cézanne que *había que contar los bosques entre los infinitamente pequeños de la Meteorología*. Después de se-

senta años, estos infinitamente pequeños, en la consideración de los meteorólogos, casi podríamos decir que han pasado a ser de segundo orden.

Pero no faltan apasionados defensores del árbol, que ven con disgusto mermarse en lo más mínimo las excelencias que atribuyen al objeto de su entusiasmo, y que aprovechan todos los argumentos, hasta los más inverosímiles, para conservarles un prestigio que no quieren ver en peligro.

Sugiere-me estas consideraciones una nota publicada a fines del año pasado en los *Comptes rendus* de la Academia de Ciencias de París, en la que el autor, E. Mathias, pretende interpretar en sentido favorable a la supuesta influencia dos series de observaciones pluviométricas de largo período, efectuadas en el departamento francés de Puy de Dôme<sup>1</sup>.

No había dado demasiada importancia a esa nota, que, como tantas otras, acoge la Academia en las páginas de su publicación, bajo la responsabilidad de sus propios autores, sin ampararlas con su autoridad, y al solo efecto de dejar sentados hechos u opiniones sobre los cuales podrán surgir, en su día, reclamaciones de prioridad; pero como la he visto recogida por alguna autorizada revista española, me ha parecido oportuno analizarla, y ese es el objeto del presente artículo.

Las dos series de referencia son la de Ambert y

<sup>1</sup> *Sur l'utilité des longues périodes d'observations de la pluie en un lieu donné*. Séance du 19 octobre 1931.