

Contribución al estudio de inhomogeneidades en vidrios industriales (*)

Parte I

M. A. ANTOLIN MAZARIEGOS

Laboratorio Central de Cristalería Española, S. A., Avilés

RESUMEN

Se describe la construcción y el funcionamiento de un estriómetro, consistente en un dispositivo óptico para determinaciones muy precisas de la distribución del índice de refracción en vidrios industriales plano-paralelos. El sistema se basa en la propiedad óptica de desviación de la luz por medios homogéneos estratificados. Los resultados presentan muy buena concordancia con los obtenidos por métodos interferométricos. El estriómetro descrito ha sido empleado para identificar, de forma rápida, en un vidrio, el origen de algunos tipos de cuerdas, mostrándose su aplicación directa al control de producción de vidrio.

SUMMARY

A device "Striometer" to measure very accurately the refractive index distribution in industrial plane-parallel glasses is built and analyzed. It is based upon the optical property of light deviation by stratified homogenous media. Results are in very good agreement with those obtained by interferometric methods. The Striometer has been used to identify the origin of some kinds of strings in a fast way and a direct application to glass production control is shown.

RÉSUMÉ

On décrit la construction et le fonctionnement d'un striomètre, qui consiste en un dispositif optique pour des déterminations fort précises de la distribution de l'indice de réfraction dans les verres industriels plans et parallèles. Le système est basé sur la propriété optique de déviation de la lumière par des milieux homogènes stratifiés. Les résultats présentent une fort bonne concordance avec les résultats obtenus par les méthodes interférométriques. Le striomètre décrit a été employé pour identifier d'une façon rapide dans un verre l'origine de certain types de cordes et l'on en montre l'application directe au contrôle de production de verre.

ZUSAMMENFASSUNG

Es wird die Anordnung und die Anwendbarkeit eines Striometers beschrieben, das aus einer optischen Vorrichtung zur sehr genauen Bestimmung der Verteilung des Brechungsindex bei plan-parallelen industriellen Gläsern besteht. Das System gründet sich auf die optische Ablenkungseigenschaft des Lichtes in einem geschichteten Medium. Die erzielten Ergebnisse stimmen sehr gut mit den auf Grund der interferometrischen Methoden erreichten Resultaten überein. Das beschriebene Striometer ist zur schnellen Identifizierung des Ursprunges einiger Arten von Schlieren im Glas benutzt worden, und es wird seine direkte Anwendung auf die Kontrolle der Glasherstellung hervorgehoben.

1. INTRODUCCION

En relación con la determinación de defectos de homogeneidad en medios transparentes existe en la literatura abundante aportación científica (1 á 7a), con estudios y métodos fundamentados en diferentes principios físicos. Estos métodos han aportado la base para el desarrollo tecnológico de aparatos

de investigación y son de aplicación directa al control industrial, algunos de los cuales se fabrican comercialmente y son de uso ordinario.

Las inhomogeneidades en el vidrio son defectos inherentes a la masa y no incluyen los defectos de planimetría o prismaticidad en el acabado del vidrio plano. Se producen normalmente en el curso de la elaboración del vidrio y son comunes a todas las fabricaciones.

Estamos interesados principalmente en el estudio

(*) Recibido el 2 de diciembre de 1971.

de los defectos de masa, si bien como veremos, el método aquí desarrollado puede ser aplicado igualmente a los defectos de planimetría.

En cuanto a los principios utilizados podemos decir que la mayoría tienen como base la óptica (7a), aún cuando existe algún autor que utiliza métodos mecánicos (8). Dentro del estudio de inhomogeneidades en vidrios, podemos distinguir los métodos según el tipo de inhomogeneidad que quiere ponerse en evidencia: a) Inhomogeneidades aleatorias, como la presencia de infundidos, burbujas o desvirificados. b) Existencia de tensiones permanentes. c) Inhomogeneidades más o menos ordenadas, como cuerdas y ondas. Las primeras tienen su origen en el proceso de fusión y afinado del vidrio; las segundas pueden aparecer en el proceso de enfriamiento controlado o recocido industrial y en las últimas, que están relacionadas con las citadas en segundo lugar, tiene influencia casi todo el proceso de fabricación.

Hay numerosa literatura que describe procedimientos para la identificación y procedencia de inhomogeneidades aleatorias o defectos; existen métodos de tipo mixto químico-ópticos, por medio de ataque de ácido fluorhídrico seguido de observación óptica, métodos interferenciales (9) (10) (método de Löffler), siendo en general los aparatos análogos a los empleados en Mineralogía: microscopio polarizante, contraste de fase, compensador Berek, etcétera.

En cuanto al estudio de tensiones permanentes, su fundamento es la aplicación de los métodos modernos para el estudio de anisotropías: observación de la muestra entre polaroides cruzados con adición de lámina de tinte sensible o con un compensador de Babinet según se trate, de apreciación de la existencia de tensiones o medida de éstas, respectivamente (11 á 15).

Finalmente en las últimas, en las que está cen-

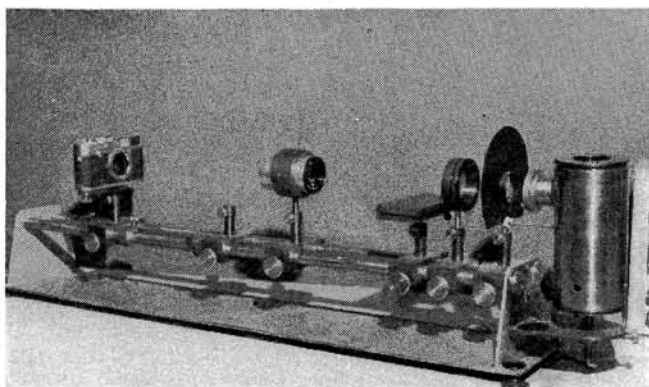


Fig. 1.—Banco de ombroscopia.

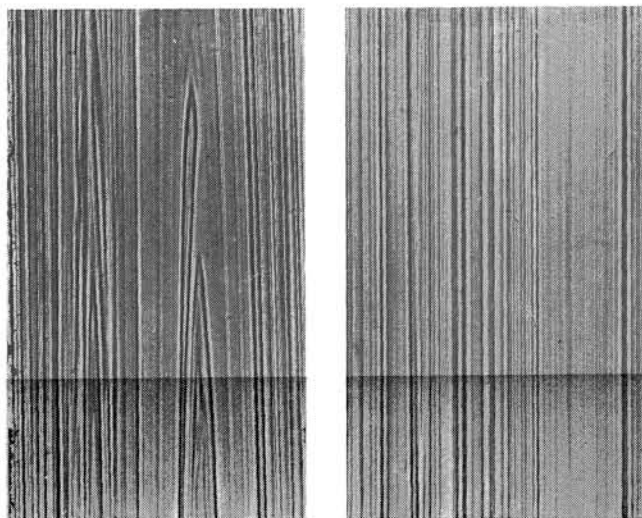


Fig. 2.

trado el interés de este trabajo, podemos hacer una separación en los fundamentos teóricos atendiendo a la finalidad del método, según sea para poner de manifiesto las inhomogeneidades en forma cualitativa o bien lo sea para localizarlas, medirlas e identificar su origen.

Entre los métodos cualitativos, uno de los más utilizados por su sencillez es el de sombras u "ombroscopía", conocido como método de Boys-Dvořak (16), descrito por Schardin (7a) (17) y que consiste en formar la sombra de un objeto sobre una pantalla de observación o placa fotográfica.

Para obtener una sombra de bordes nítidos emplea una fuente de luz casi puntual, de unos 0,75 milímetros de diámetro y una lámpara de mercurio. En el caso de estrías formadas por planos más o menos paralelos a las superficies de una hoja de vidrio, la mejor observación ombroscópica se efectúa mediante un haz de luz paralela, que lo es también a las dos superficies naturales de aquélla.

El banco montado para este tipo de observación se muestra en la figura 1, en el que se emplea una lámpara de arco y una lente con su foco en la fuente luminosa para producir un haz prácticamente paralelo. Dos imágenes típicas se dan en la figura 2.

Otro método de los más conocidos de desviación pero con objetivo, es el de Töpler-Foucauld (18) (19), que utiliza dos sistemas ópticos diferentes: una lente de campo produce una imagen de una arista, que delimita la fuente de luz sobre una segunda arista y el segundo objetivo forma la imagen del objeto sobre la placa sensible. Una descripción del método está en el trabajo de Schardin (17) y en el de H. Wolter (7a).

Una modificación sobre el anterior es el método

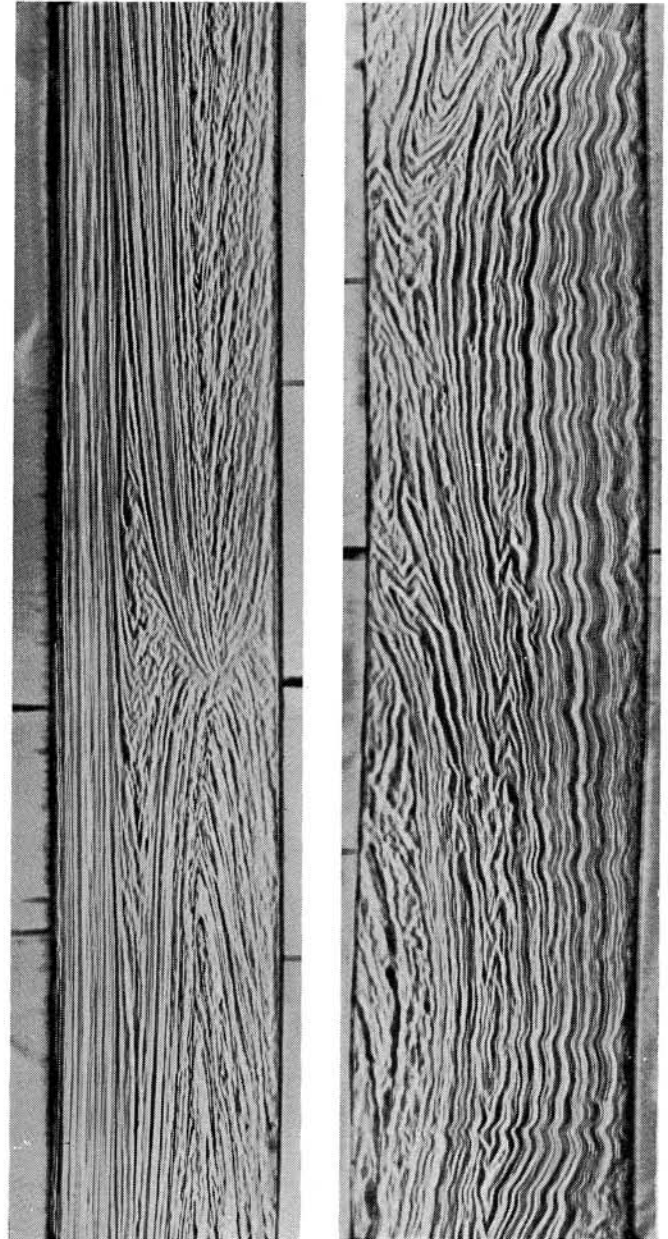
de la rejilla (17), que consiste en sustituir la primera arista por una rendija y la segunda por una rejilla de espaciado uniforme en las partes opacas y transparentes, de modo que en ausencia de estrías el campo es uniforme. Finalmente citaremos uno de los más recientes, el del Laboratorio de Corsico (Milán), de la Compañía de Saint Gobain, debido a los trabajos de Tettamanzi y Tribuno (20), que tiene la particularidad de poder observar fragmentos de 90×3 cm. en una sola fotografía, reduciendo la longitud a una quinta parte y aumentando el espesor en un factor siete, lo que proporciona una idea global de una gran parte de la banda de vidrio fabricada (fig. 3).

A diferencia con los métodos antes reseñados, en los cuales el haz principal de luz es detenido por una pequeña pantalla opaca que deja pasar únicamente la luz difractada, se utiliza también el método de contraste de fase (21) (Método de Zernike), en el cual la pantalla es transparente o parcialmente opaca y a la luz directa le produce una modificación adecuada de fase, pudiendo obtener un contraste ya positivo o negativo. Las ventajas del método son una gran luminosidad y que permite determinar el sentido de variación del camino óptico y aún medir dicha variación.

Entre los métodos cuantitativos, mencionaremos el de Sheljubskij (22) (23), el cual no obstante, tiene el inconveniente de ser destructivo y no localizar la inhomogeneidad. Utiliza la medida de transmisión de un filtro dispersivo de Christiansen, siendo el parámetro que caracteriza la inhomogeneidad la densidad óptica.

Podemos señalar que, en general, los métodos cuantitativos están fundados en métodos interferenciales a dos ondas, ya sea con luz natural o luz polarizada. Entre los primeros podemos destacar, por mencionar alguno, el interferómetro de Twyman que permite localizar y medir las inhomogeneidades ya sea en la superficie o en la masa del vidrio. En éstos, la onda objeto se determina por interferencia de ésta con una onda de referencia plana y se obtiene el perfil normal de la onda. No obstante, todo interferómetro normal puede transformarse en uno diferencial, en el cual se hace interferir la onda en estudio con otra idéntica pero con un cambio en las coordenadas.

Los interferómetros a luz polarizada utilizan el fenómeno de la doble refracción para obtener una separación pequeña de los haces. Así el refractómetro diferencial de Jamin (24) sirvió de base a Lebedeff para realizar el primer microinterferómetro diferencial con luz polarizada (25) y recientemente Françon (26) (27) ha simplificado y perfeccionado los dispositivos de Jamin aumentando las posibilida-



Vidrio flotado.

Vidrio de lunas.

Fig. 3.—Ombrosopia realizada con el banco de "Corsico".

des de utilización. Estos aparatos utilizan láminas cristalinas con caras planas y paralelas, funcionando en forma análoga a la del interferómetro de Mach, produciendo directamente el desdoblamiento en dos ondas objeto.

Como pone de manifiesto Françon (28), según el valor del desplazamiento y la inhomogeneidad, el método puede considerarse de resolución total o como método diferencial.

Mencionaremos especialmente el aparato de Nomarski (29), el cual utiliza un prisma de Wollaston modificado como dispositivo para juntar las ondas

de salida, de modo que puede utilizar el objetivo de un microscopio de alto poder.

Finalmente, Françon (30) utiliza para el desdoblamiento un polariscopio de Savart, pudiendo variar el desplazamiento de las ondas, inclinando el polariscopio muy ligeramente, de una forma continua. Este dispositivo puede utilizarse en un microscopio ordinario, colocando el polariscopio de Savart en el ocular y añadiendo dos polarizadores, uno entre la fuente y el condensador y otro detrás del ocular, sin tener que modificar el resto del microscopio.

Como ya hemos mencionado, estos últimos métodos permiten localizar y determinar las inhomogeneidades y si bien dan una información detallada de toda la muestra en conjunto, la medida ha de efectuarse punto por punto, ya sea registrando la figura interferencial en una placa fotográfica o analizándola a simple vista mediante algún procedimiento. Además, en el método diferencial pueden exagerarse algunos defectos, dependiendo del desplazamiento de las dos ondas, lo cual puede inducir a errores en una primera interpretación.

2. PROPOSITO DE ESTE TRABAJO

En la fabricación de vidrios industriales el proceso de control de calidad se efectúa en primer lugar por métodos visuales ordinarios, pero en cuanto aparecen defectos específicos interesa determinar la naturaleza y procedencia de los mismos para su posible corrección. En los vidrios planos de tipo estirado o de ventana, laminado o luna y "floatglass" aparecen, por el proceso de fabricación, inhomogeneidades estratificadas en el sentido de las caras de la hoja de vidrio, que pueden suministrar alta información del reparto de vidrios diferentes, dando origen principalmente a cuerdas u ondas de tipo aluminoso o silíceo, siendo las primeras causadas principalmente por la disgregación del refractario en contacto con el vidrio fundido.

El estudio se realiza generalmente en el espesor de la hoja de vidrio, cortando una muestra en sentido normal a las caras de aquélla y con diferente grueso según el método de análisis utilizado.

La interpretación de las inhomogeneidades estratificadas en el vidrio es varia, como se indica en el trabajo de Tettamanzi y Tribuno (20) y es de gran importancia la determinación cuantitativa de los defectos.

Partimos de la base de diseñar y construir un aparato que sirva para hacer medidas cuantitativas de defectos estratificados. El aparato debe ser de funcionamiento y manejo sencillos, que unido a rapidez y sensibilidad variable, permita una determinación

clara de los defectos, suministrando un registro continuo de las inhomogeneidades sin que sea necesario destruir la muestra. Su concepción nos ha llevado a realizar un aparato, de relativamente poco costo, que en adelante denominaremos "estriómetro", pues en principio permite determinar estrías cualquiera que sea la causa de las mismas.

Los defectos de masa estratificados se traducen, desde el punto de vista óptico, en una variación del índice en la dirección normal a la estratificación. Es la propiedad de desviación de los rayos luminosos, en el sentido del gradiente del índice, la que queremos aprovechar para efectuar el estudio de estas inhomogeneidades.

Teniendo presente que las estrías observadas en los vidrios suelen tener un tamaño transversal del orden de unas decenas de micras, habremos de utilizar un haz estrecho, en forma de rendija, en la dirección de las estrías y, para que no integre los efectos de las adyacentes, deberá ser lo más estrecha posible.

Las modificaciones producidas en el haz explorador por la muestra, nos suministra la información respecto a la variación de índice. Para facilitar el registro, hemos utilizado un procedimiento que es susceptible de transformar estas modificaciones en señales eléctricas. Ello permite un fácil registro y se puede, además, efectuar operaciones matemáticas mediante el acoplo de circuitos eléctricos apropiados a la salida del detector eléctrico. Por ser una detección eléctrica y para que el cociente señal/ruido sea alto, la fuente luminosa deberá ser intensa.

Se pretende, asimismo, determinar la posición relativa de las estrías respecto a las caras de las hojas de vidrio, por lo que el barrido del haz explorador deberá efectuarse a velocidad constante; esta velocidad tendrá que ser pequeña si no se quiere utilizar detectores de respuesta muy rápida.

Por todo lo anterior, necesitaremos un sistema óptico para concentrar la luz en un pincel fino y otro para poder llevar este haz, después de atravesar la muestra, a incidir sobre un elemento detector de los utilizados normalmente.

En fin, nos hemos propuesto construir un instrumento óptico de medida no destructiva, que presente ventajas notables sobre los desarrollados hasta ahora y que tenga aplicación inmediata a la industria del vidrio. Además pretendemos en este trabajo, utilizando nuestro estriómetro, poder analizar la naturaleza de los defectos estratiformes que aparecen con frecuencia en el vidrio plano. Estos defectos tienen orígenes diversos no bien conocidos todos y deseamos aclarar algunos de los más interesantes en nuestra industria vidriera.

3. FUNDAMENTO TEORICO

El estudio de los medios ópticos isótropos no homogéneos, dentro de la aproximación de la Óptica geométrica, tiene su base en el principio de Fermat. Aplicando principios variacionales puede obtenerse la ecuación de la trayectoria (31) (32) en función del índice de refracción, único parámetro que caracteriza a los medios, transparentes desde el punto de vista de la Óptica geométrica.

La ecuación diferencial de los rayos en su forma vectorial es:

$$\vec{\text{grad}} n = \frac{dn}{ds} \vec{T} + n \frac{\vec{N}}{\rho} \quad [1]$$

donde n es el índice de refracción (función de punto). \vec{T} y \vec{N} los vectores unitarios tangente y normal respectivamente a la trayectoria, ρ el radio de curvatura de la trayectoria en el punto considerado y $\frac{dn}{ds}$ es la derivada del índice sobre la trayectoria.

Multiplicando escalarmente ambos miembros de la ecuación [1] por \vec{N} , obtenemos la expresión del radio de curvatura de la trayectoria en cada punto, dado por:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{n} \vec{\text{grad}} n \cdot \vec{N} \quad [2]$$

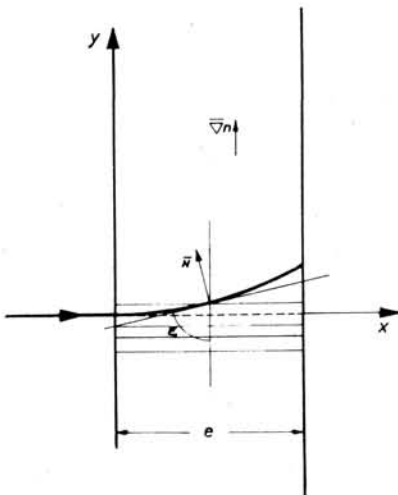


Fig. 4.

En el caso de vidrios industriales que nos ocupa, las estratificaciones suelen ser planas y paralelas a las caras naturales de las hojas. Supongamos, por tanto, para fijar ideas (fig. 4), una lámina plano-paralela cortada normal al plano XOY (plano del di-

bujo), siendo el índice únicamente función de y , es decir, $n = f(y)$. Se puede poner en este caso la ecuación anterior [2] en la forma:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{n} \cdot \frac{dn}{dy} \text{sen } \epsilon \quad [3]$$

y expresando el $\text{sen } \epsilon$ en función de la tangente a la trayectoria obtenemos finalmente:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{n} \cdot \frac{dn}{dy} \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad [4]$$

A la misma solución hubiéramos llegado tomando como punto de partida la relación de Bourger (31) para estratificaciones planas:

$$n \text{sen } \epsilon = \text{cte.} = q \quad [5]$$

que permite, no obstante, manejar más cómodamente las condiciones en los límites de la lámina, como puede verse sustituyendo $\text{sen } \epsilon$ por $\frac{q}{n}$ en la fórmula [3].

La ecuación [4] permite determinar la desviación de un rayo cualquiera en función del índice y del ángulo de incidencia del rayo sobre la cara de entrada de la lámina en el punto de incidencia. Como en el proceso utilizado, esta incidencia es prácticamente normal a las caras de la muestra y por lo tanto los rayos a la entrada son paralelos a la estratificación, tendremos que $\left(\frac{dy}{dx} \right)_{x=0} = 0$ en el origen. La lámina que utilizaremos tiene un espesor e del orden de medio milímetro y como las variaciones del índice suelen afectar a la quinta cifra decimal, se puede tomar en buena aproximación que $\frac{dy}{dx} \ll 1$ en todo el espesor, quedando por lo tanto para el radio de curvatura ρ de la trayectoria

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{n} \cdot \frac{dn}{dy} \quad [6]$$

La anterior suposición nos lleva a considerar que la $\frac{d^2n}{dy^2}$ es constante y prácticamente nula, o lo que es lo mismo, para cada rayo, siempre que no sea muy inclinado respecto a la estratificación, la $\frac{dn}{dy}$ es constante. En el caso de que esta derivada sea positiva (gradiente en la dirección de las ordenadas crecientes), el rayo se curva hacia arriba en la figu-

ra 5; si es negativo, en sentido opuesto, es decir, siempre en el sentido de los índices crecientes. En esta aproximación tomamos ρ constante, y pequeño el ángulo α_s de desviación del rayo en el punto de contacto en la segunda cara.

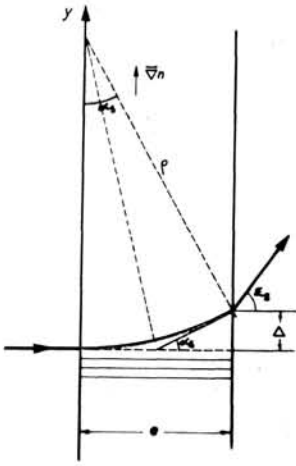


Fig. 5.

Por lo tanto y considerando el arco igual al espesor e , con lo que nos mantenemos en esta primera aproximación, obtenemos:

$$\alpha_s = \frac{e}{\rho} \quad \Delta = \frac{e}{2} \alpha_s = \frac{e^2}{2\rho} \quad [7]$$

siendo Δ el desplazamiento lateral del rayo.

Asimismo obtenemos para la desviación angular del rayo a la salida de la lámina, aplicando la ley de Snellius

$$\epsilon_s = n \alpha_s = n \frac{e}{\rho} \quad [8]$$

que puestas en función del índice y de su gradiente dan, respectivamente

$$\Delta = \frac{e^2}{2} \cdot \frac{1}{n} \cdot \frac{dn}{dy} \quad \epsilon_s = e \frac{dn}{dy} \quad [9]$$

El desplazamiento Δ lo hemos considerado para un rayo o haz paralelo, normal a la lámina, mas en nuestro caso tendremos en cada punto de la cara de entrada un pincel de pequeña abertura angular. Si la lámina fuese de índice constante, sin estratificaciones planas, de cada punto de la cara de entrada daría una imagen astigmática (dentro de la aproximación de Gauss) en un punto situado a una distancia de la primera cara dada por $d = e \frac{n-1}{n}$

siendo e el espesor de la lámina y n su índice respecto al medio que la rodea (fig. 6). Cuando

existe un gradiente en la lámina, siempre que el pincel sea de pequeña abertura angular, la lámina produce una imagen de cada punto de la cara de entrada sobre un plano paralelo a la misma y a una distancia $d = e \frac{n-1}{n}$, pero desplazado en la misma dirección y en sentido contrario al gradiente en una cantidad igual al desplazamiento sufrido en la

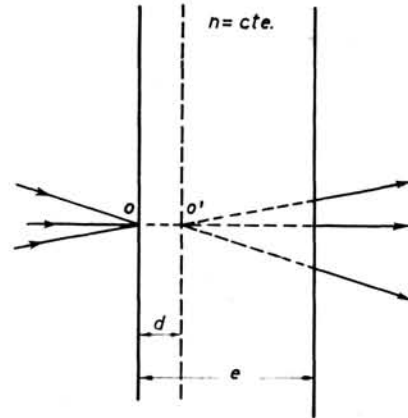


Fig. 6.

cara de salida por el rayo normal a la lámina (fig. 7). Para ver el grado de validez de esta afirmación en función del ángulo del haz, suponiendo, como hasta ahora, que el gradiente es constante, se ha realizado un cálculo numérico con un ordena-

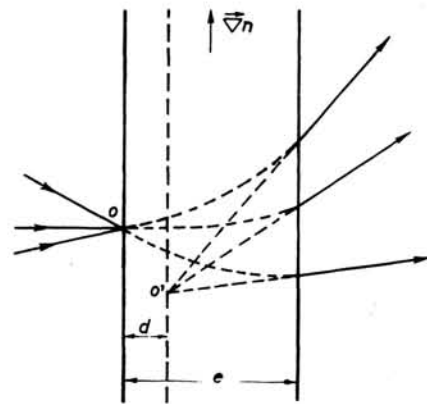


Fig. 7.

dor IBM 360/40. De los resultados se concluye que el desplazamiento de la imagen varía en menos de un 2 % hasta para ángulos de incidencia de, aproximadamente, 10° .

El desplazamiento Δ sobre el plano a la distancia d de la primera cara es, por tanto:

$$\Delta = - \frac{e^2}{2} \cdot \frac{1}{n} \cdot \frac{dn}{dy} \quad [10]$$

Esto nos permite ver que, en este caso, si proyectamos la imagen del plano a la distancia d de la

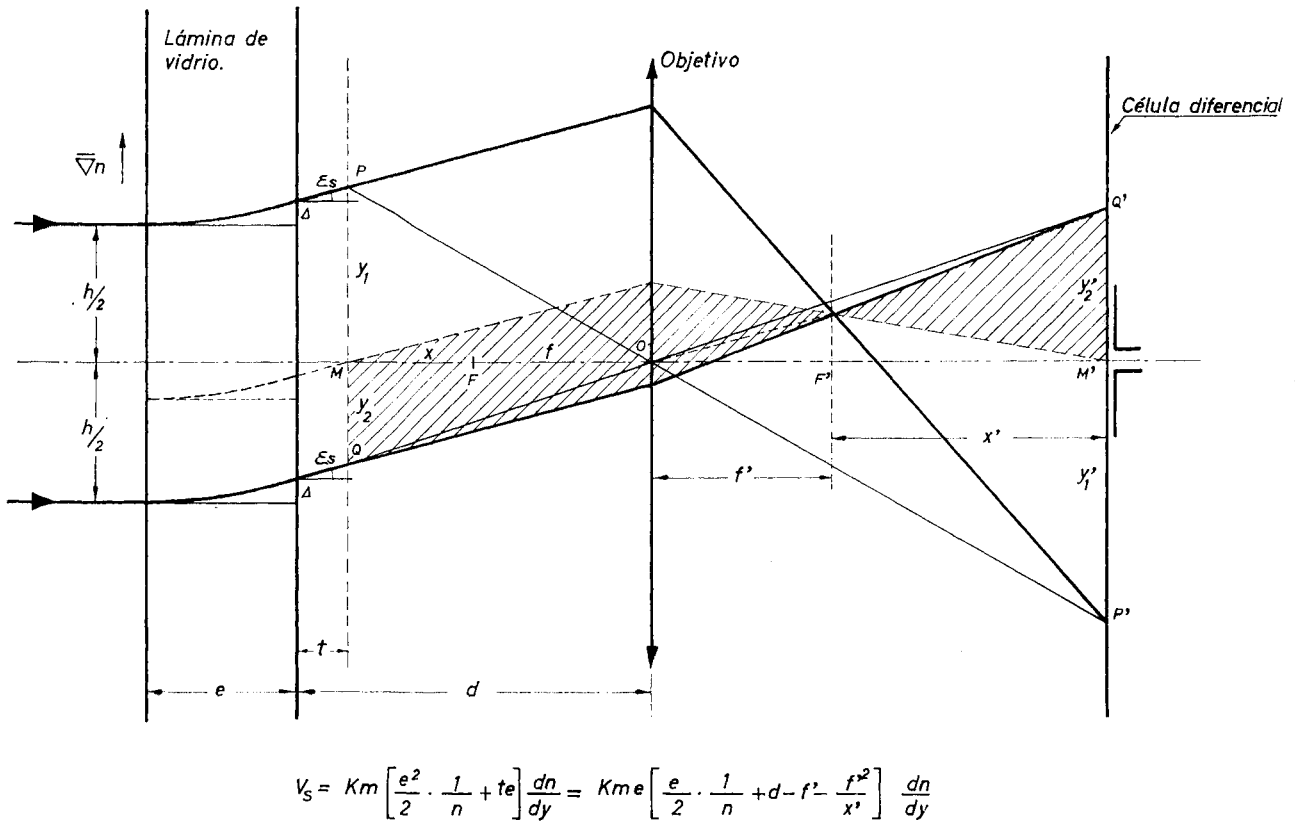


Fig. 8.—Marcha de rayos.

primera cara sobre la célula sensible, mediante un sistema óptico adecuado, tendremos una señal proporcional al gradiente del índice.

3.1. Haz paralelo.

Analicemos en primer lugar, por simplicidad, el caso de un haz paralelo de anchura h que incida sobre la lámina perpendicularmente a ella, utilizando una lente colectora para proyectar la luz sobre el elemento sensible (fig. 8).

Suponiendo la célula detectora centrada en el eje, montando un dispositivo que nos permita transformar la desviación en una señal, por ejemplo tapando media célula o montando una célula diferencial, un sencillo cálculo geométrico nos lleva a la expresión siguiente:

$$S = C \left[\Delta + \epsilon_s \left(d - f' - \frac{f'^2}{D} \right) \right] \quad [11]$$

donde C es una constante que depende del dispositivo utilizado, de la intensidad luminosa y de la sensibilidad de la célula.

Poniendo Δ y ϵ_s en función del gradiente [9] queda finalmente

$$S = C e \left[\frac{e}{2} \cdot \frac{1}{n} + \left(d - f' - \frac{f'^2}{D} \right) \right] \frac{dn}{dy} \quad [12]$$

Es decir, la señal es proporcional al gradiente del índice y al espesor, con un término que puede modificarse al variar d supuestas constantes la posición de la célula y la focal del sistema; esto proporciona flexibilidad a éste ya que se puede modificar la sensibilidad del mismo.

3.2. Proyección de una rendija sobre la muestra.

En el caso de proyectar una rendija sobre la muestra y formar la imagen modificada por la lámina mediante una lente sobre la célula sensible, debemos utilizar la fórmula [10] y en este caso la señal, como fácilmente se infiere, será:

$$S = C \cdot \Delta \quad (13)$$

y poniendo Δ en función del gradiente [9] obtenemos:

$$S = C \cdot \frac{e^2}{2} \cdot \frac{1}{n} \cdot \frac{dn}{dy} \quad [14]$$

es decir, proporcional al gradiente como en el caso anterior.

4. PROYECTO Y REALIZACION DEL ESTRÍOMETRO

4.1. Descripción del aparato.

Como hemos indicado en el apartado segundo, necesitamos un elemento condensador que produzca un haz estrecho cuyos rayos tengan una inclinación relativamente pequeña y que el "spot" sobre la muestra sea intenso. El estudio de elementos comerciales existentes nos llevó a la elección de un lector de banda sonora cinematográfica de la casa Som-Berthiot (Modelo T3667A), que, adecuadamente iluminado, suministra un "spot" de forma rectangular de 2,3 mm. de largo por 14 μ de ancho y que cumple las condiciones anteriores. Para sistema colector se empleó un dispositivo convergente de corta focal $f' = 5$ mm modelo 6714 F-NI utilizado por la casa Philips para un lector de sonido.

El empleo de un colector de corta focal proporciona las siguientes ventajas: producir una imagen

aumentada del "spot" sobre el elemento sensible, poder situar este último a una distancia adecuada y utilizar una lente de poco diámetro sin que viñetee el haz en el sentido de la desviación, aun a valores relativamente grandes de ésta.

En la figura 9 se muestra la disposición relativa de los diferentes elementos ópticos que constituyen el estrímetro. La fuente de luz, el condensador, el colector y el elemento fotosensible se hallan ópticamente alineados, pudiendo efectuar desplazamientos del colector sobre el eje óptico para aumentar o disminuir la sensibilidad del dispositivo.

La muestra, que consiste en una lámina de vidrio de 0,5 mm de espesor y de anchura el espesor de la hoja de vidrio en estudio, se sitúa normal al eje óptico del sistema entre el condensador y el colector, de modo que el "spot" luminoso quede enfocado sobre la cara próxima al condensador. La exploración de la muestra se efectúa en dirección normal a las caras naturales de la hoja de vidrio; para ello va montada sobre un elevador movido lentamente por un pequeño motor eléctrico, de velocidad prácticamente constante, pudiendo efectuar la exploración en los dos sentidos.

4.2. Preparación de la muestra.

La muestra al ser explorada se corta según dos planos perpendiculares a las superficies naturales de la hoja de vidrio y separados por una distancia de 0,5 mm. El corte se efectúa por medio de una

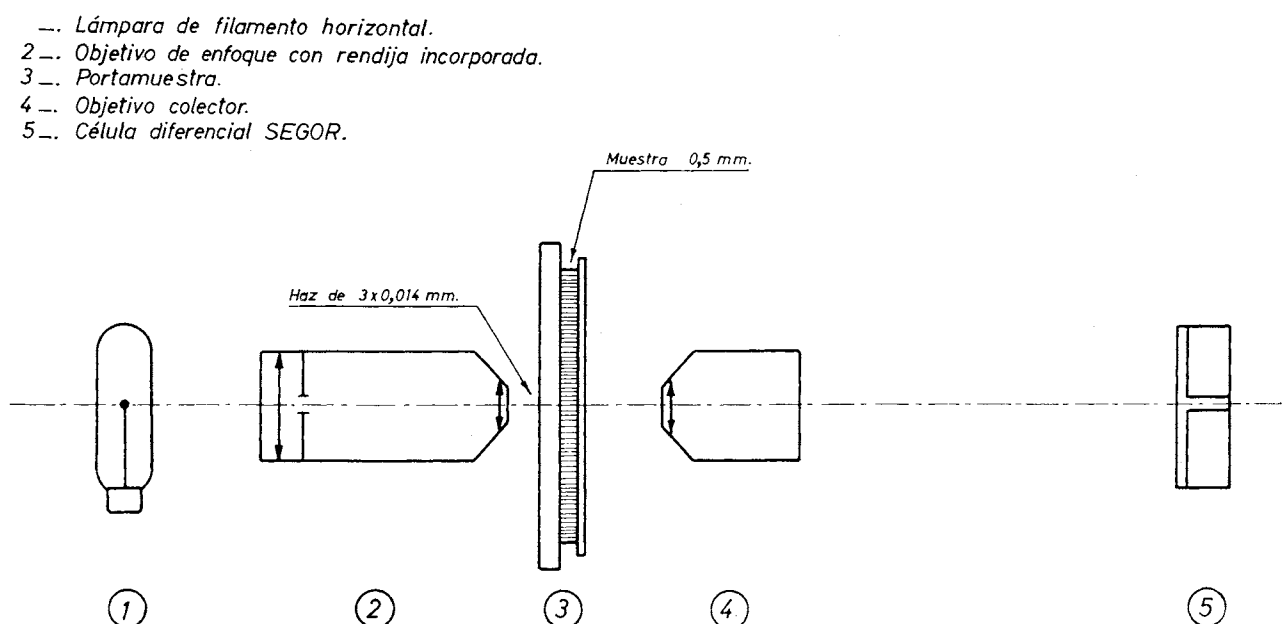


Fig. 9.—Estrímetro: Esquema de elementos.

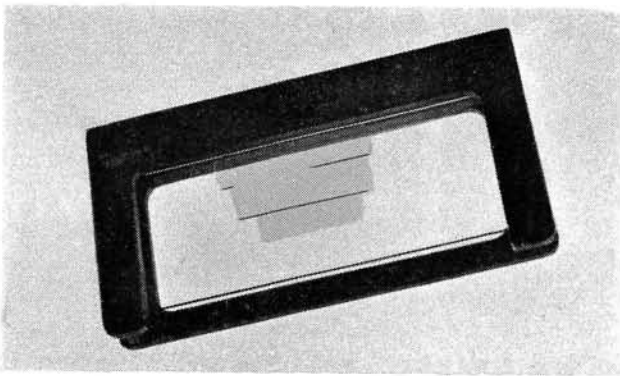


Fig. 10.

sierra de disco diamantado sobre un espesor ligeramente superior a 0,5 mm. Una aceptable planimetría de las superficies de corte se mantienen desbastando a mano la muestra sobre ambas caras con polvo de carborundum, de grano progresivamente decreciente, y agua sobre un vidrio plano. Una vez comprobado el espesor en bordes y centro por medio de un tornillo micrométrico y admitiendo una tolerancia de $5 \cdot 10^{-3}$ mm., la muestra está lista para explorar.

Así preparada, se coloca sobre un vidrio portaobjetos y está exenta de burbujas interfaciales.

En forma análoga se coloca sobre la superficie libre de la muestra un cubreobjetos. El vidrio portaobjetos lleva adherida permanentemente sobre una cara y rasante con el borde de aquel, una lámina soporte rectangular de 0,4 mm. de espesor, para que el borde inferior de la muestra descansa sobre este soporte y tome una posición aproximadamente horizontal.

El líquido de índice cumple así dos condiciones necesarias para la buena exploración: produce la perfecta transparencia de la muestra, que debido al desbastado previo sólo era translúcida, y por otra parte la sujeta a los vidrios porta y cubreobjetos, formando un "sandwich" el cual se fija sobre un portamuestras metálico adecuado (fig. 10). Este portamuestras se aloja finalmente en unas escotaduras de la plataforma elevadora.

4.3. Elementos detectores.

Al hacer el estudio teórico vimos que, debido a la presencia de inhomogeneidades estratificadas, se producía una desigualdad de la iluminación de los semiplanos en que una recta, normal al eje óptico y paralela a la estratificación, divide a la superficie fotosensible. Esta desigualdad, proporcional al gradiente del índice, es la que suministra la información sobre las inhomogeneidades. El elemento de-

lector transforma aquella desigualdad en una señal eléctrica sobre la cual se puede operar y efectuar un fácil registro.

Teniendo esto presente, el elemento fotosensible debe comportarse de forma que distinga la diferente iluminación de los dos semiplanos; para ello, se han utilizado tres tipos de detectores con diferentes dispositivos que pasamos a distribuir:

4.3.1. CELULA SOLAR HOFFMAN, TIPO 2A.

Las características de esta célula son una alta sensibilidad, reproductividad y área fotosensible circular, de 4,75 cm². Se utiliza el semicírculo superior, cubriendo el inferior con una pantalla opaca y haciendo incidir el "spot" luminoso rectangular simétricamente respecto de la línea de división del borde de la pantalla, con lo que se consigue una disminución o aumento de la señal de salida, proporcional al gradiente del índice, según sea el sentido de la desviación.

La figura 11 es un ejemplo del registro obtenido con este dispositivo y se compara con una fotografía del interferograma de la misma muestra realizada con el interferómetro Nomarski.

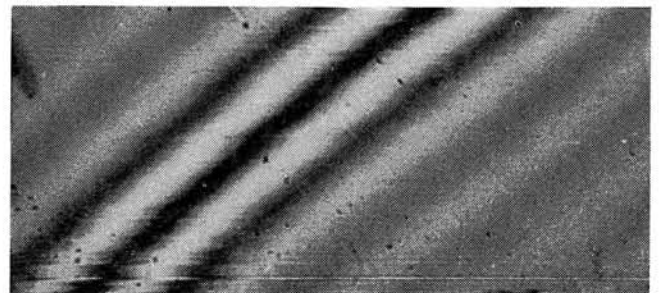
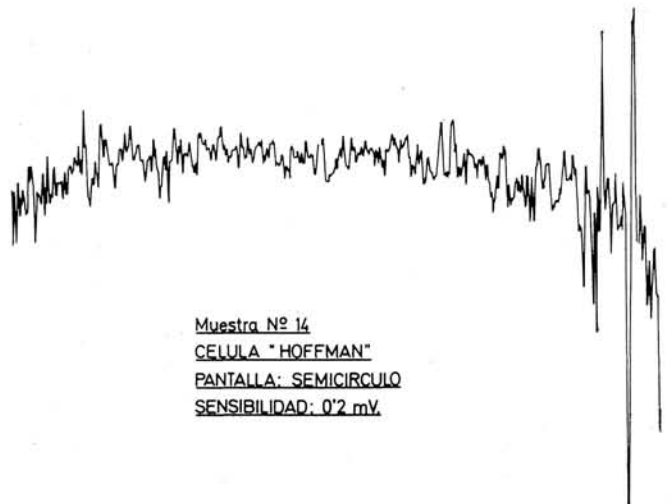


Fig. 11.—Registro con célula Hoffman apantallada en un semicírculo. Interferograma Nomarski .

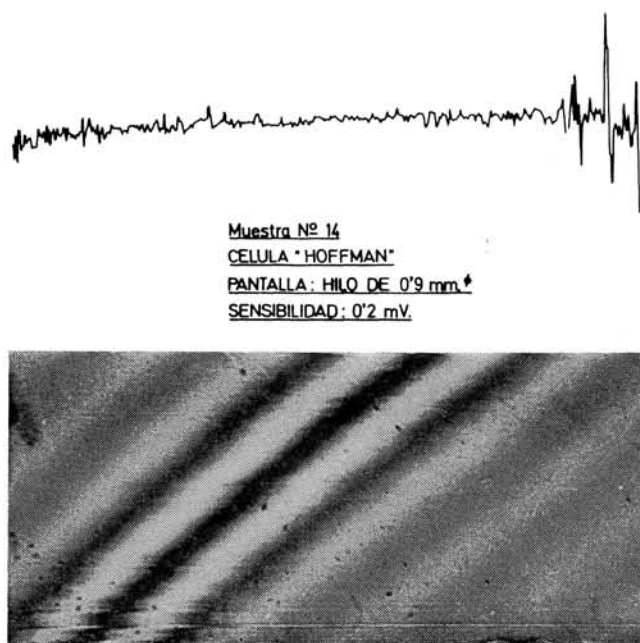


Fig. 12.—Registro con célula Hoffman interponiendo un hilo de 0,9 mm. Interferograma Nomarski.

Un cálculo aproximado, teniendo presente las dimensiones del dispositivo, nos lleva a la conclusión de que en el caso del haz casi paralelo y formando la imagen de la cara de salida de la lámina sobre la célula fotoeléctrica, se puede medir como máximo una variación del índice de $10^{-1}/\text{mm}$ y de $10^{-2}/\text{mm}$ en el caso de no focalización; estos valores no son alcanzables, generalmente, en los vidrios industriales.

Un segundo ensayo se efectuó interponiendo un hilo grueso metálico de 0,9 mm. para tapar la mitad del "spot" luminoso. Si el desplazamiento es del orden previsto, menor que el correspondiente a una variación del índice de 10^{-1} mm. , la respuesta debe ser análoga a la del caso anterior, lo que así ocurre como puede observarse en la figura 12. No obstante los buenos resultados obtenidos, esta célula presenta el inconveniente de ser bastante sensible a los cambios de temperatura y por ello se pensó en utilizar otro elemento que fuera más estable.

4.3.2. CELULA FOTOCONDUCTORA.

Esta célula, de la casa Miniwatt, LDRO3, tipo B8-731-03, se eligió por ser menos sensible a la temperatura y por tener dispuesto un enrejillado (fig. 13) que permitía utilizarla directamente sin ningún dispositivo adicional.

La anchura de las barras no sensibles es de, aproximadamente, 0,25 mm. superior a la mitad de la anchura de la imagen del "spot" luminoso en las condiciones utilizadas.

Moviendo la célula paralelamente a sí misma, y en dirección normal al eje óptico, se consigue que la resistencia de la célula fotoconductora alcance el valor medio entre el máximo y el mínimo, con lo que cada mitad del "spot" luminoso queda sobre una zona sensible y la no sensible adyacente.

El registro de la misma muestra que la empleada en el apartado anterior puede observarse en la figura 14 y vemos que proporciona una respuesta similar a las anteriores. No obstante, puede apreciarse que no aparecen con el mismo detalle algunos de los saltos de índice, lo que es debido a una dificultad en el centrado de la célula que ha de efectuarse por tanteos.

4.3.3. CELULA FOTORRESISTIVA DIFERENCIAL SEGOR X-66.

A la vista de los resultados anteriores y teniendo presente la pequeña área utilizada de los elementos fotosensibles, se pensó en el empleo de esta célula diferencial que permite medir muy pequeños desplazamientos del "spot", dando señales positivas o negativas sobre un nivel cero de referencia. Por el contrario, las células anteriores daban una señal de salida sobre un nivel medio distinto de cero.

Por otra parte, las células diferenciales, son mucho menos sensibles a las variaciones de temperatura y aunque necesitan una polarización estable para la alimentación del puente eléctrico asociado a ella, presentan una mayor relación señal/ruido y una respuesta rápida. El empleo de este tipo de células había quedado hasta ahora restringido a su utilización como elemento seguidor de "spot", sin

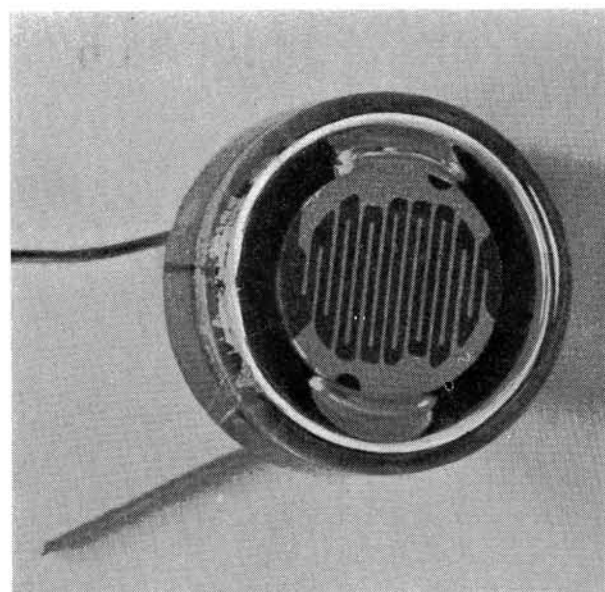
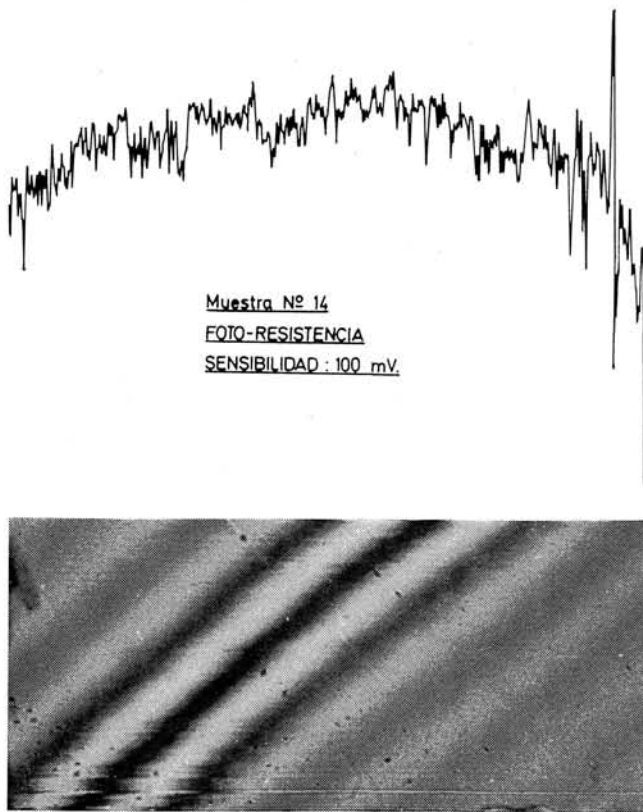


Fig. 13.



Muestra Nº 14
FOTO-RESISTENCIA
SENSIBILIDAD : 100 mV.

Fig. 14.—Registro con célula fotoconductora. Interferograma de 0,9 mm.

pretender una medida cuantitativa de los desplazamientos; pensamos en un principio, dados los pequeños desplazamientos puestos en juego, que podía dar una respuesta lineal en el rango en que nos movíamos.

Más adelante exponemos un detallado análisis de la célula diferencial, determinando el intervalo en el que bajo diferentes condiciones su comportamiento es lineal.

Los resultados muy satisfactorios obtenidos con esta célula en múltiples ensayos, así como las propiedades señaladas anteriormente, nos han inclinado definitivamente por el empleo de la célula fotoresistiva diferencial Segor como elemento fotosensible.

4.4. Elementos y circuitos eléctricos auxiliares.

Describiremos únicamente los elementos tal y como han quedado en el proyecto definitivo.

Para obtener la conveniente señal eléctrica se utiliza un montaje en puente de Wheastone (figura 15), donde la célula sustituye a dos brazos contiguos del puente, cuya resistencia total permanece constante.

Un desplazamiento del "spot" luminoso, sin abandonar totalmente uno de los cuadrantes de la célula, produce un aumento de la resistencia en uno de los sectores y una disminución del mismo valor en el otro sector.

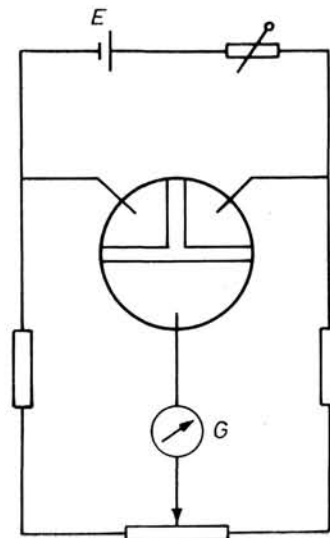


Fig. 15.

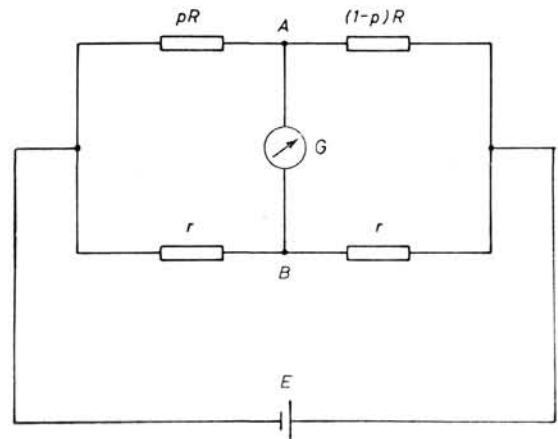


Fig. 16.

Bajo estas hipótesis y supuesto el medidor G de alta impedancia se puede deducir fácilmente en el circuito equivalente (fig. 16), que es:

$$V_S = V_{AC} - V_{BC} = \frac{E}{R} pR - \frac{E}{2r} r = pE - \frac{E}{2} \tag{15}$$

donde p es un factor que toma en la posición de equilibrio el valor de 0,5 y que está acotado entre cero y la unidad.

De [15] se deduce que la señal de salida es proporcional a p y será lineal con el desplazamiento del "spot" sobre la célula diferencial mientras lo sea p.

En la figura 17, pueden observarse las gráficas obtenidas con la célula diferencial y con la Hoffman

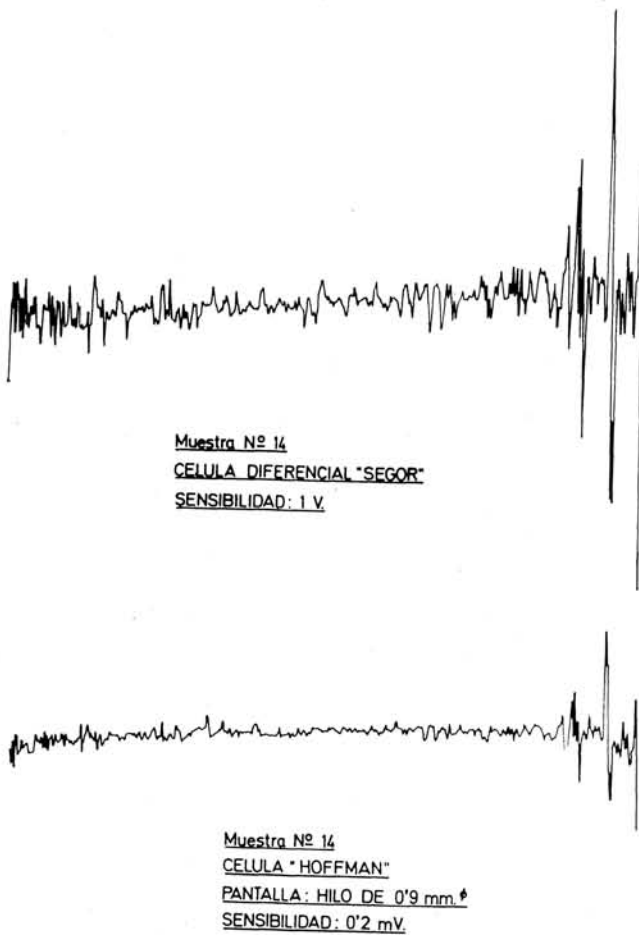


Fig. 17.—Registro efectuado con célula diferencial. Registro con célula Hoffman más la interposición de un hilo metálico de 0,9 mm.

más la interposición de un hilo metálico de 0,9 mm. La semejanza entre ambas curvas es evidente.

4.4.1. ESTUDIO Y CALIBRADO DE LA CELULA DIFERENCIAL.

La célula diferencial (fig. 18), consiste en un círculo de metal depositado sobre una base no conductora. Está dividida en tres partes a, b y c, separadas por una banda diametral de sustancia fotorresistiva y una banda radial d de un material aislante. Si sobre la célula se hace incidir un "spot" luminoso de dimensiones x, y, indicada en la figura 19, la resistencia entre el cuadrante a y el semicírculo, c y análogamente entre b y c varía según la iluminación y posición del "spot" respecto de la banda no conductora d.

Como se señaló, la célula diferencial Segor se emplea normalmente como elemento de cero y hemos de analizar su comportamiento. Para realizar el estudio de la zona en la cual la respuesta es lineal con el desplazamiento del "spot", se ha montado

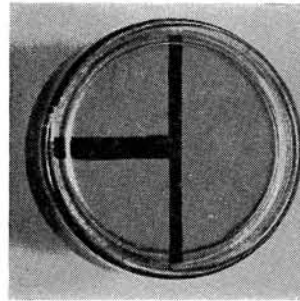


Fig. 18.

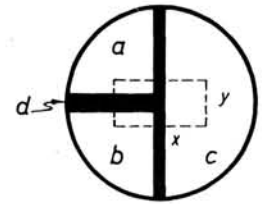
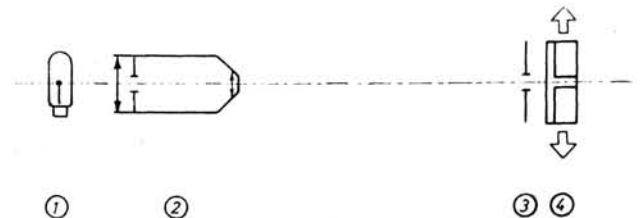


Fig. 19.

un dispositivo sobre la propia bancada del Estriómetro, como se indica en la figura 20.

Se han realizado tres series de medidas con diferentes anchos de "spot" luminoso: la primera con un ancho de 2,5 mm, aproximadamente igual al de la banda no conductora de la célula y las siguientes con anchos de 4 y 6 mm respectivamente.

Hemos considerado de gran interés la posible influencia en la señal de salida debida a una variación de la intensidad luminosa emitida por la lámpara. Tal modificación de intensidad luminosa se realiza interponiendo delante de la célula tres diferentes filtros neutros, dos de la casa Kodak, de densidades ópticas $D_1 = 0,2$ y $D_2 = 0,7$ respectivamente y uno de MTO, de densidad $D_3 = 0,12$. Los resulta-



- 1 Lámpara
- 2 Condensador con rendija incorporada
- 3 Rendija variable
- 4 Célula diferencial desplazable

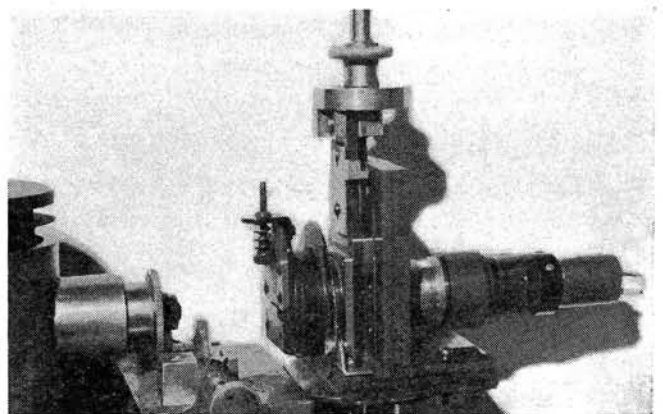


Fig. 20.—Dispositivo esquemático y su realización para la obtención de la respuesta de la célula diferencial.

dos (fig. 21), muestran la zona en la cual la respuesta es lineal en función del desplazamiento del "spot" y la influencia del ancho del mismo. Se constata que una variación en la iluminación no influye apreciablemente en la respuesta de la célula, por lo que no es necesaria una gran estabilidad en la alimentación de la fuente luminosa.

A la vista de estos resultados podemos concluir que:

1.º La sensibilidad en la respuesta para iguales desplazamientos del "spot" luminoso sobre la célula decrece al aumentar la dimensión y del mismo. (Ver las pendientes de las curvas A, B y C de la figura 21.)

2.º Los intervalos máximos de desplazamiento del "spot" con respuesta lineal aumentan al hacerlo la dimensión y.

3.º La respuesta a diferentes iluminaciones de la célula, obtenidas por interposición de filtros neutros de densidades ópticas $D_1 = 0,2$, $D_2 = 0,7$ y $D_3 = 0,12$ no alteran sensiblemente las curvas obtenidas en el tramo lineal de las mismas.

4.4.2. FUENTE DE ALIMENTACION DE LA LAMPARA Y REGISTRADOR.

Como se indicó en el Capítulo III, ecuación [12], la constante C, que interviene en la expresión de la señal de salida, depende entre otros factores de la intensidad luminosa de la fuente.

Para mantener con cualquier detector la estabilidad y reproductividad de la respuesta, se alimenta la lámpara con una fuente estabilizada de tensión, seguida de una estabilización de intensidad, de modo que pueden variarse ambas indistintamente. Esta fuente es el modelo 6961A de la casa Hewlett-Packard, que tiene un factor de estabilización de 0,03 %.

Hemos visto que en el caso de la célula diferencial Segor no es tan necesaria una gran estabilización en la alimentación de la lámpara.

Como registrador se ha utilizado un Honeywell-19 de alta impedencia de entrada, siendo infinita en el equilibrio.

En la figura 22 se puede apreciar el montaje funcional eléctrico y los diferentes elementos componentes.

4.4.3. CIRCUITO INTEGRADOR.

Para obtener la variación de índice en el espesor de la muestra y dado que el estriómetro proporciona como señal primaria la función gradiente del mismo, es necesario efectuar una integración de la señal eléctrica que proviene del puente eléctrico. Para ello se hace uso de una red a resistencia-capacidad, en la que la constante de tiempo es del orden de

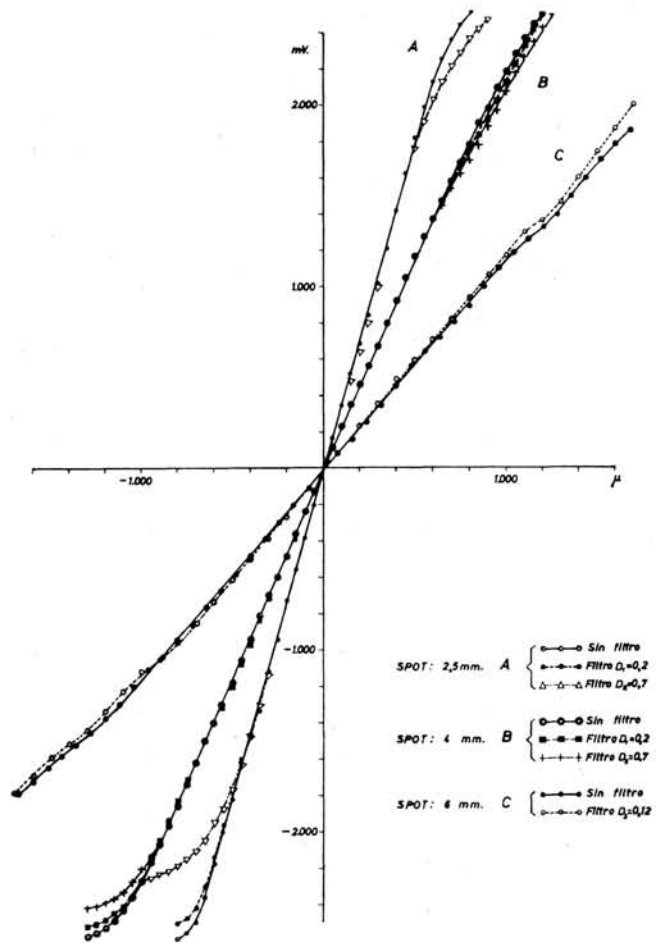


Fig. 21.—Curvas de sensibilidad de la célula diferencial.

diez veces la frecuencia mayor que pueda aparecer en la señal (fig. 22); también puede emplearse un amplificador operacional con la conveniente realimentación a capacidad.

4.5. Descripción de los elementos mecánicos.

El conjunto total del aparato (fig. 23), está montado sobre una rígida plataforma de hierro de

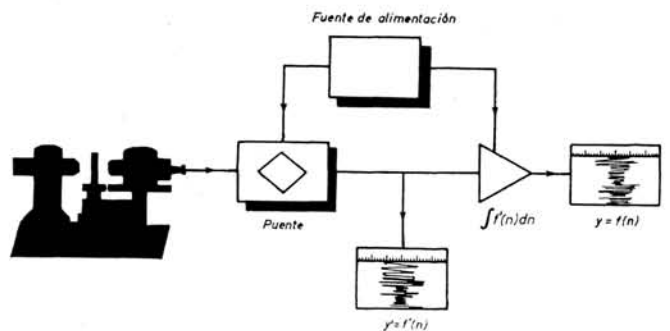


Fig. 22.—Estriómetro: esquema completo de unidades constituyentes.

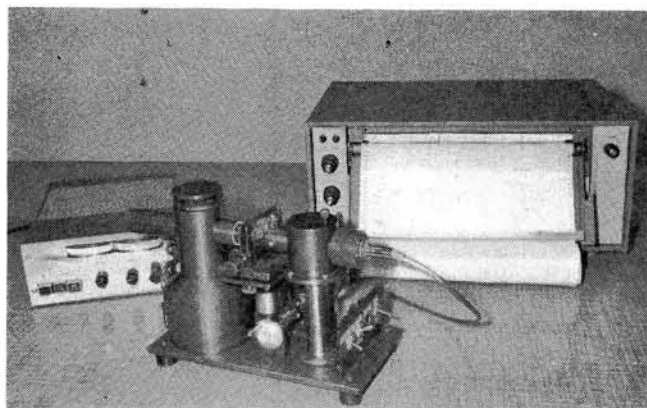


Fig. 23.—Conjunto de instrumentos.

260 × 148 × 8 mm. y sobre ella están asentados los tres elementos mecánicos principales:

4.5.1. TORRETA.

Contiene la fuente de luz y soporta también el condensador.

La fuente de luz está constituida por una lámpara de filamento horizontal, alimentada en corriente continua a 6 V. y 0,8 Amp., que puede reglarse en posición mediante un tornillo prisionero sobre la torreta, como puede apreciarse en la figura 24. El condensador puede desplazarse axialmente con el fin de poder enfocar el pincel luminoso sobre la muestra. En la base de la torreta está alojado un pequeño ventilador eléctrico, alimentado a 220 V, corriente alterna, que proporciona una refrigeración forzada de la lámpara.

4.5.2. ELEVADOR PORTAMUESTRAS.

Está constituido por una platina horizontal, nivelable por tres tornillos, sobre la cual se aloja el portamuestras a fricción. Esta platina es solidaria de un cilindro roscado perpendicular a ella. El conjunto puede desplazarse verticalmente y en ambos sentidos dentro de una pieza fija a la plataforma.

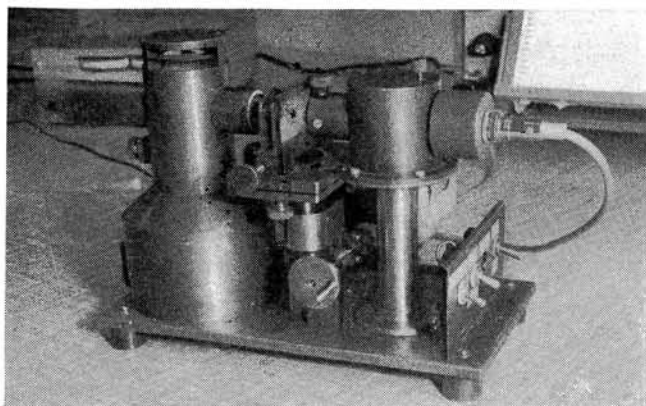


Fig. 24.—Detalle del estrímetro.

Sobre el cilindro roscado se acopla una corona dentada y a ésta un tornillo sinfín, movido por un pequeño motor eléctrico que puede funcionar en los dos sentidos con igual velocidad. De esta forma el portamuestras puede desplazarse a velocidad constante de 16 μ /seg. El eje del tornillo sinfín es solidario a un pequeño volante que permite elegir una determinada posición de la muestra a mano, según puede observarse en la figura 24. El portamuestras está constituido por un pequeño bastidor de bronce de 80 × 40 mm de medida exterior y una ventana de 62 × 25 mm (fig.10), que puede alojarse a fricción sobre dos piezas "ad-hoc" de la plataforma nivelable. Este bastidor comporta dos resortes a lámina vertical en sus extremos para poder fijar el "sandwich" formado por la lámina portaobjetos, la muestra y el cubreobjetos de microscopía, adheridos por unas gotas de líquido de índice apropiado (mezcla de alcohol bencílico y glicerina triacética en la proporción de 80 y 20 % respectivamente).

El portamuestras puede desplazarse horizontalmente sobre los dos alojamientos mediante un tornillo con cabeza graduada e índice de referencia.

4.5.3. SOPORTE DEL SISTEMA DETECTOR

Está formado por una columna cilíndrica de acero, de 25 mm. de diámetro, fijada a la plataforma del aparato. En su extremo superior se asienta una cabeza de bronce que soporta el sistema colector y la célula diferencial fotoeléctrica. El sistema colector-célula puede desplazarse axialmente permitiendo así el enfoque deseado, y pudiendo conocerse su posición mediante una referencia asociada a una pequeña escala.

El conjunto de torreta y cabeza detectora está dispuesto de forma que todos los elementos queden ópticamente alineados y de manera que el pincel luminoso, en ausencia de muestra, incida simétricamente sobre la célula diferencial.

En un costado de la plataforma principal del aparato se ha fijado un pequeño panel metálico sobre el que están dispuestos los interruptores siguientes: el general de alimentación a 220 V., el de la corriente de alimentación de la lámpara, el del ventilador, el del motor de arrastre de la muestra y un conmutador para poder variar el sentido de desplazamiento del portamuestras.

En la parte posterior de la plataforma existe una ficha de conexiones, exteriores al aparato, para la tensión de 220 V c. a. y para la entrada de corriente de la lámpara.

La conexión entre la célula y el puente eléctrico, así como entre éste y el registrador, se realiza con cable blindado.