

ALGUNAS APLICACIONES DEL LASER
FOTOELASTICIMETRIA, INTERFEROMETRIA Y HOLOGRAFIA *

Dr. J. A. E. Calatroni **

Lic. J. J. Lunazzi ***

Lic. H. J. Rabal ****

Dr. M. Garavaglia **

- * Trabajo realizado en el Laboratorio de Espectroscopía, Óptica y Láser (LEOL), Facultad de Ciencias Exactas, UNLP.**
- ** Miembro de la Carrera del Investigador Científico del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).**
- *** Becario del CONICET**
- **** Laboratorio de Ensayo de Materiales e Investigaciones Tecnológicas, Ministerio de Obras Públicas de la Provincia de Buenos Aires.**

INTRODUCCION GENERAL

Las características sobresalientes de la radiación emitida por el láser son las siguientes: elevada coherencia temporal y espacial, gran monocromaticidad, notable intensidad, distribución gaussiana de la intensidad a través del haz, escasísima divergencia y excelente definición del plano de polarización (1). En general, estas características son cumplidas por diferentes tipos de láseres. La diversa asociación de algunas de tales características permite la realización de experiencias de fotoelasticidad, difracción, interferencia y holografía. La aplicación del láser a estos campos de la ciencia y la tecnología ha dado como resultado un avance notable en cuanto a la modificación y perfeccionamiento de métodos y técnicas ya conocidos o, directamente, al desarrollo de algunos nuevos.

En las secciones que siguen, se ponen de manifiesto aquellas posibilidades de aplicación del láser y se comunican algunos desarrollos realizados hasta el presente en nuestro medio.

La Sección I, está dedicada a la fotoelasticimetría (2). En este caso las características aprovechables de la radiación láser son su intensidad, monocromaticidad, direccionalidad y polarización lineal, por cuanto permite atacar el problema tridimensional con el uso de la técnica de dispersión de radiación.

En la Sección II se presenta un variado material dedicado a la interferometría. Aquí son la coherencia, la intensidad y la direccionalidad las características conspicuas de la radiación láser, las que permiten las aplicaciones descritas. Se incluye un método goniointerferométrico de elevadísima precisión para determinar el espesor de láminas delgadas de caras planoparalelas o el índice de refracción de la sustancia translúcida con que ellas han sido fabricadas (3). Además, se describe un interferómetro rasante que posibilitará el estudio de la calidad de la superficie de las mesas metrológicas o "mármoles", como así también su de-

formación cuando se las carga para la realización de mediciones (4).

La Sección III está dedicada a la holografía. La coherencia espacial, la coherencia temporal y la intensidad de la radiación son las características esenciales para que las experiencias de holografía resulten exitosas. Las técnicas de holointerferometría por doble exposición y holointerferometría simultánea son aplicadas a un ensayo no destructivo (5).

I - FOTOELASTICIMETRIA

Introducción

La fotoelasticimetría se basa en el fenómeno de birrefringencia accidental: todas las sustancias que inicialmente son ópticamente isótropas se vuelven temporariamente más o menos birrefringentes al ser sometidas a una acción mecánica exterior que le produce una deformación elástica. En fotoelasticimetría bidimensional se trabaja con modelos planos confeccionados en vidrios o plásticos adecuados que representan cortes de las piezas sujetas a estudio. Al ser sometidos a un estado de tensión doble o plano se modifican las propiedades ópticas del material, comportándose como las láminas retardadoras, es decir exhibiendo birrefringencia.

Teniendo en cuenta que los índices de refracción son funciones lineales de las tensiones aplicadas, es posible obtener información sobre éstas al analizar la birrefringencia del modelo con un polariscopio. Cuando la complejidad del modelo a estudiar no permite hacer un análisis fotoelástico bidimensional, se construye un modelo tridimensional y se analizan ciertos planos del mismo, previo un fijado de las tensiones aplicadas. Este último proceso de congelamiento de tensiones ha constituido la base de la fotoelasticimetría tridimensional. Permite tomar un modelo, cortarlo según ciertas orientaciones. analizar bidimensionalmente cada

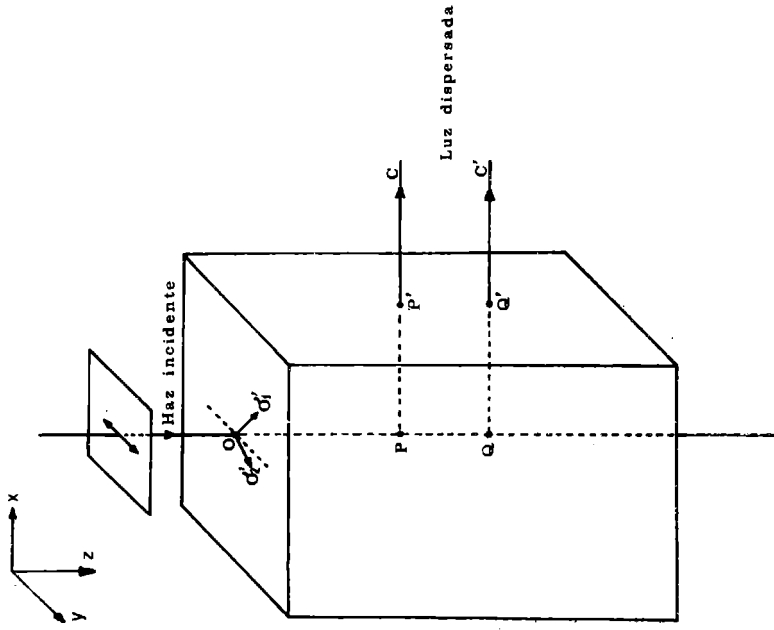


Fig. 2.- Transmisión de luz polarizada a través de un medio tensionado. σ_1 y σ_2 representan las direcciones de las tensiones principales secundarias.

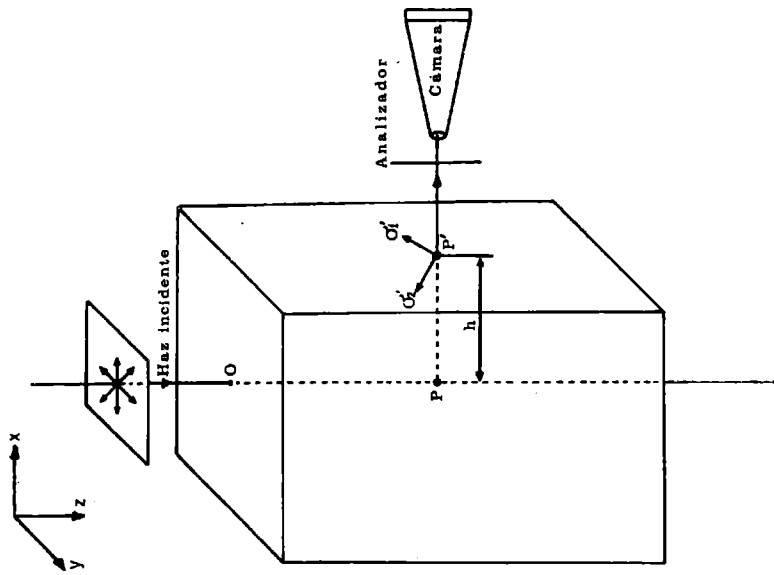


Fig. 1.- Ilustración del fenómeno de dispersión de luz por un medio artificialmente anisótropo.

elemento y componer luego el régimen de tensiones del modelo completo.

Por un método totalmente diferente puede encararse el estudio tridimensional, sin necesidad de recurrir al uso de materiales con tensiones congeladas. Este método se basa en la dispersión de luz producida en medios transparentes. El fenómeno de dispersión de luz se ilustra en la Figura 1. Una onda de luz que se propaga en dirección z y vibra en el plano xy incide normalmente sobre el modelo; frecuentemente esta onda lo atraviesa, pero una variedad de materiales no transmite la luz perfectamente y tiene lugar cierta dispersión de radiación. Esta dispersión puede ser observada como vibraciones secundarias que son excitadas por la onda principal; cuando ésta se propaga en la dirección z las vibraciones asociadas con la luz dispersada están en planos normales al eje z y se propagan radialmente desde el centro emisor de dispersión. Así, la radiación dispersada puede ser observada desde cualquier dirección normal al eje z y su estado de polarización será lineal, como se muestra en la Figura 1. Cuando la observación se realiza en una dirección que no es normal al eje z , el grado de polarización disminuye a medida que disminuye el ángulo formado con dicho eje.

Para el propósito de la fotoelasticimetría puede suponerse que el material fotoelástico tiene un número infinito de fuentes dispersoras distribuidas a través del material. De este modo, la luz incidente será dispersada en todos los puntos y producirá la emisión de luz polarizada que se propaga radialmente desde los centros de dispersión. El empleo de esta luz dispersada, que es equivalente a ubicar un polarizador y un analizador dentro del modelo, suministra una vía de solución al análisis tridimensional de tensiones. Como la observación puede realizarse sobre planos arbitrarios del modelo fotoelástico se puede obtener información de las tensiones en secciones sin necesidad de congelarlas y cortar el modelo. La Figura 2 ilustra el empleo de la radiación dispersada en un análisis fotoelástico de tensiones. Un haz de luz incidente linealmente polarizado es dirigido hacia el modelo. Al penetrar en él, puede resolverse en dos componentes a lo largo de los ejes principales; esas dos componentes se propagan con distintas velocidades al atravesar el modelo desde O a P . La radiación observada en la dirección PC tendrá una

intensidad que depende del retardo relativo de las componentes y es función de las tensiones aplicadas. Si la dirección de observación se traslada a QC, cambia el retardo relativo suministrando información sobre el estado de tensiones en otra zona. De esta manera, con un único registro fotográfico es posible observar y analizar la magnitud de las tensiones en las zonas del modelo que haya sido iluminado.

Con el método expuesto, ha sido realizado en el LEOL un análisis fotoelástico empleando radiación láser. Esta última es particularmente adecuada por cuanto la intensidad de la luz dispersada es función de la intensidad de la fuente de iluminación. Además, la emisión del láser es altamente monocromática, lo que es un requisito indispensable para este tipo de análisis, evitando así el empleo de filtros. Por último la emisión del láser posee un elevado grado de polarización lineal, que hace innecesario el uso de polarizadores que inevitablemente atenúan la radiación.

Observación de franjas isocromáticas por dispersión de radiación láser.

La observación experimental se realizó sobre un modelo anular de 41,7 mm de radio externo, 21,8 mm de radio interno y 5 mm de espesor. Este modelo se confeccionó en resina epoxi y fue tensionado radialmente, manteniendo el borde externo libre, por medio de un anillo de caucho que, colocado en su centro, fue comprimido en forma normal al plano del modelo. Además, se lo flexionó según un diámetro, para contar con un sistema de tensiones en planos normales. La figura 3 muestra esquemáticamente la situación experimental. Como fuente luminosa se empleó un láser de He-Ne de 2 mW de potencia de emisión en 632,8 nm, esta disposición permite observar las franjas que muestran la variación de las tensiones en el seno del material. El haz del láser incidió sobre el borde del modelo, según una dirección radial, formando su plano de polarización un ángulo de 45° con los ejes principales del modelo.

La observación se realizó perpendicularmente al haz láser incidente y a 45° de los ejes principales. Esta disposición permitió registrar sólo las franjas isocromáticas (6). Dichas franjas fueron fotografiadas, obteniéndose los

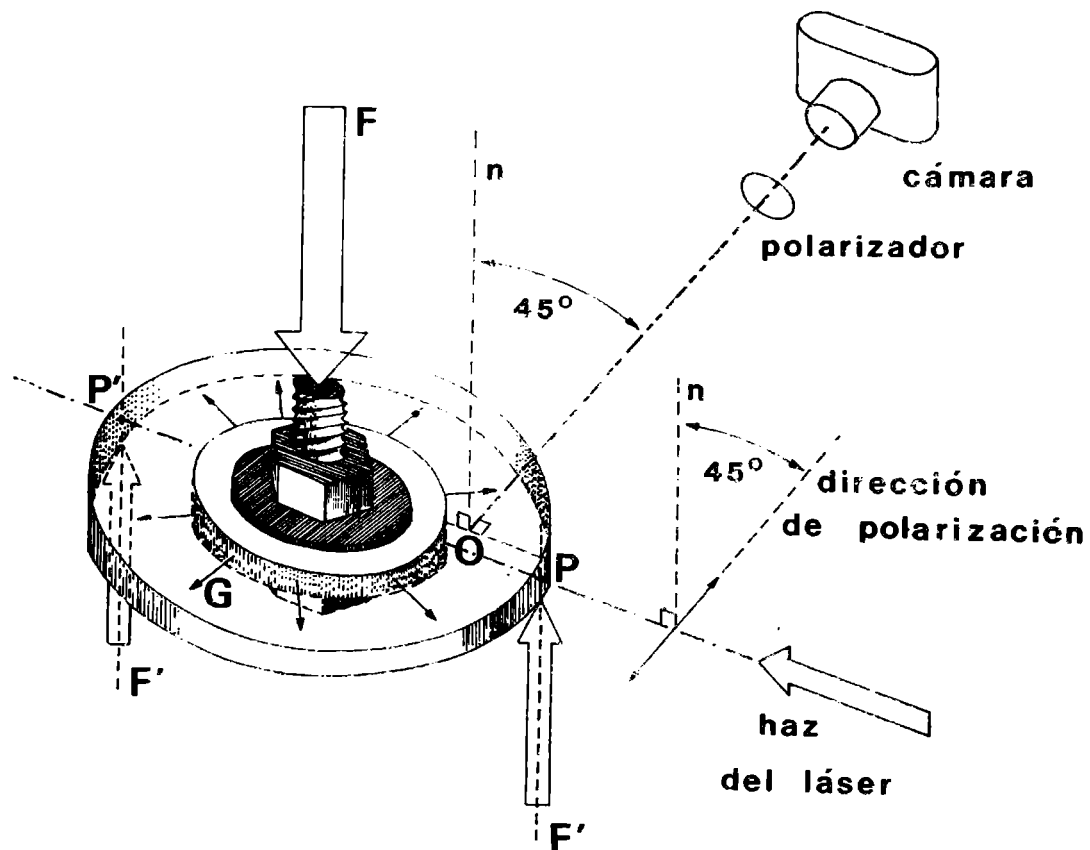


Fig. 3.- Modelo sometido a esfuerzos radiales G o a una combinación de esfuerzos radiales G y esfuerzos de flexión F aplicados según un diámetro. La radiación láser incide en la dirección radial PP' y la radiación dispersada se fotografió enfocando la superficie del modelo en el punto O .

registros A y B que se muestran en la figura 4, para distintas posiciones del haz luminoso respecto de las superficies límites del modelo. Para ello se desplazó, en cada caso, el haz del láser paralelo a sí mismo y verticalmente. Los registros mostrados en A corresponden al estado de tensiones radiales, mientras que los de B muestran la influencia de la superposición de las tensiones radiales y de flexión. Se verificó que el contraste y definición de las franjas isocromáticas aumentó notablemente cuando se las

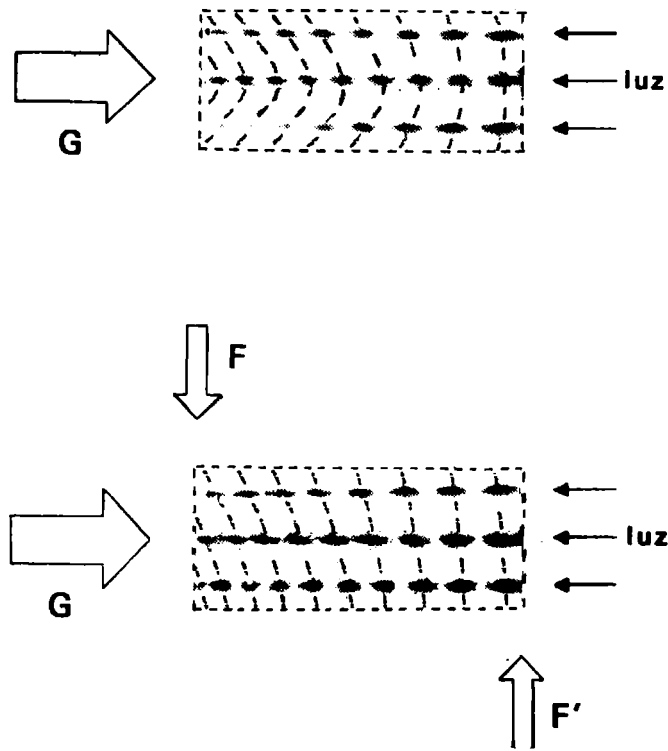


Fig. 4.- Sistemas de franjas isocromáticas obtenidas con la situación experimental ilustrada en la Fig. 3. A: estado de tensiones radiales para tres posiciones del haz luminoso respecto de la superficie límite del modelo. B: estado de tensiones radiales y de flexión para las mismas posiciones del haz luminoso que en A.

observó a través de un polarizador, con lo que se incrementa la exactitud del trazado del diagrama de las tensiones. Las aplicaciones más variadas del método discutido a la ingeniería mecánica y civil, pueden preverse sin inconvenientes de realización en nuestro país.

II - INTERFEROMETRIA

Introducción

La interferometría ha sido desde sus comienzos una técnica de la más alta precisión en las mediciones físicas. Basta recordar las famosas experiencias de Michelson sobre determinación de la velocidad de la luz, imposibilidad de observación del movimiento absoluto y establecimiento de la equivalencia óptica del metro patrón, para convencerse de ello.

La posibilidad de contar con fuentes luminosas coherentes permite obtener figuras de interferencia que dependen de la diferencia de camino óptico entre dos haces de luz, medida en unidades de longitud de onda. Es el rango de esta unidad donde pueden medirse los fenómenos ópticos ligados con las distancias y los índices de refracción. La longitud de onda de la luz es del orden de $0,5 \mu\text{m}$, de modo que la interferometría releva a las mediciones mecánicas de precisión en tareas que éstas ya no pueden cumplir. Se pueden medir así longitudes sin alterar en lo más mínimo al objeto a medir.

En el comienzo era tarea muy delicada la puesta a punto de una experiencia interferométrica debido a la poca longitud de coherencia de las fuentes luminosas disponibles. Afortunadamente ya no lo es tanto, gracias a la invención del láser, el que, con longitudes de coherencia superiores al metro, simplifica estos montajes añadiendo, empero, algunas complicaciones propias de menor cuantía.

a) Medición interferométrica de pequeños espesores o índices de refracción de materiales translúcidos.

Es sabido que la interferometría es la técnica más precisa para la determinación de estas dos magnitudes, por lo que, pensando en su determinación para los materiales con que se construyen los modelos de piezas mecánicas para fotoelasticimetría, se revisaron los métodos existentes. Entre los

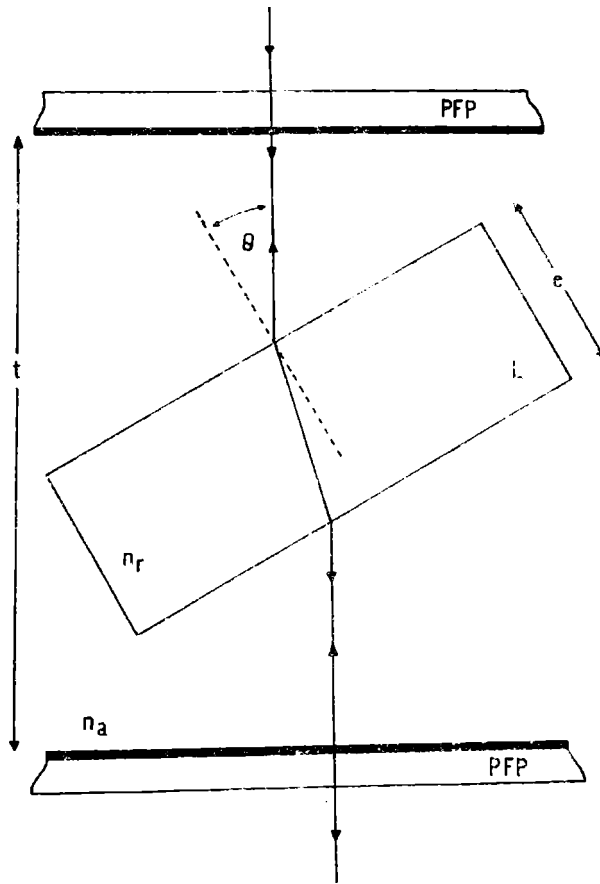


Fig. 5.- Interferómetro de Fabry - Perot conteniendo una lámina transparente planoparalela. PFP: placas del Fabry-Perot, L: lámina en estudio, n_a : índice de refracción del aire y n_r : índice de refracción del material de la lámina relativo al aire

no interferométricos uno de los más comunes y precisos es el del refractómetro de Abbe, que basado en el fenómeno de reflexión total, permite medir con una exactitud que falla ya en asegurar la tercera cifra decimal. Entre los interferométricos, resulta apropiado el sustentado por Andréasson et al (7) pero, motivados por la experiencia con el interferómetro del tipo Fabry-Perot se vislumbró la posibilidad de perfeccionarlo. De ello obtúvose un nuevo sistema (3) consistente en introducir en la cavidad de un interferómetro Fabry-Perot una lámina del material con sus caras muy pulidas y bien paralelas, montada sobre un goniómetro de pre-

cisión. Este sistema está esquematizado en la figura 5 donde se ve el pasaje (múltiple) de un rayo de luz láser dentro de la cavidad perfectamente alineada. Al salir de la cavidad la luz incide en un fotodetector y un circuito electrónico cuenta el número de máximos interferenciales que se producen al rotar la lámina. El pasaje múltiple aumenta la precisión en la detección de franjas de dos maneras: en un factor 2, desde el punto de vista cuantitativo, y en la obtención de un perfil mucho más estrecho de dichas "franjas", que en este caso no son tales, sino la distribución de intensidad dada por la fórmula de Airy para un punto sobre la pantalla, en función del camino óptico recorrido dentro de la cavidad.

El empleo de un haz muy estrecho de luz láser de suficiente longitud de coherencia y escasa divergencia permite afirmar la validez del esquema mostrado y concluir que la diferencia de órdenes interferenciales j entre la posición inicial en la cual la lámina está ubicada paralelamente a los espejos de la cavidad y la posición final correspondiente a una rotación de ángulo θ alrededor de un eje paralelo a dichos espejos vale:

$$j = \frac{2e}{\lambda} n_a \left[1 - n_r - \cos \theta + (n_r^2 - \text{sen}^2 \theta)^{1/2} \right] \quad (1)$$

donde: e espesor
 n_a índice de refracción del medio que rodea la lámina, normalmente aire.
 n_r índice de refracción de la lámina respecto a dicho medio.
 λ longitud de onda.

La posición inicial está asegurada con este sistema mejor que con ningún otro, pues la determinan la interferencia producida por reflexiones en los espejos y las caras de las láminas, por lo que sólo resta asegurar la posición final y que el eje de giro sea efectivamente paralelo a los espejos por autocolimación con el anteojo del goniómetro alrededor de toda la platina del mismo.

Así se tiene que:

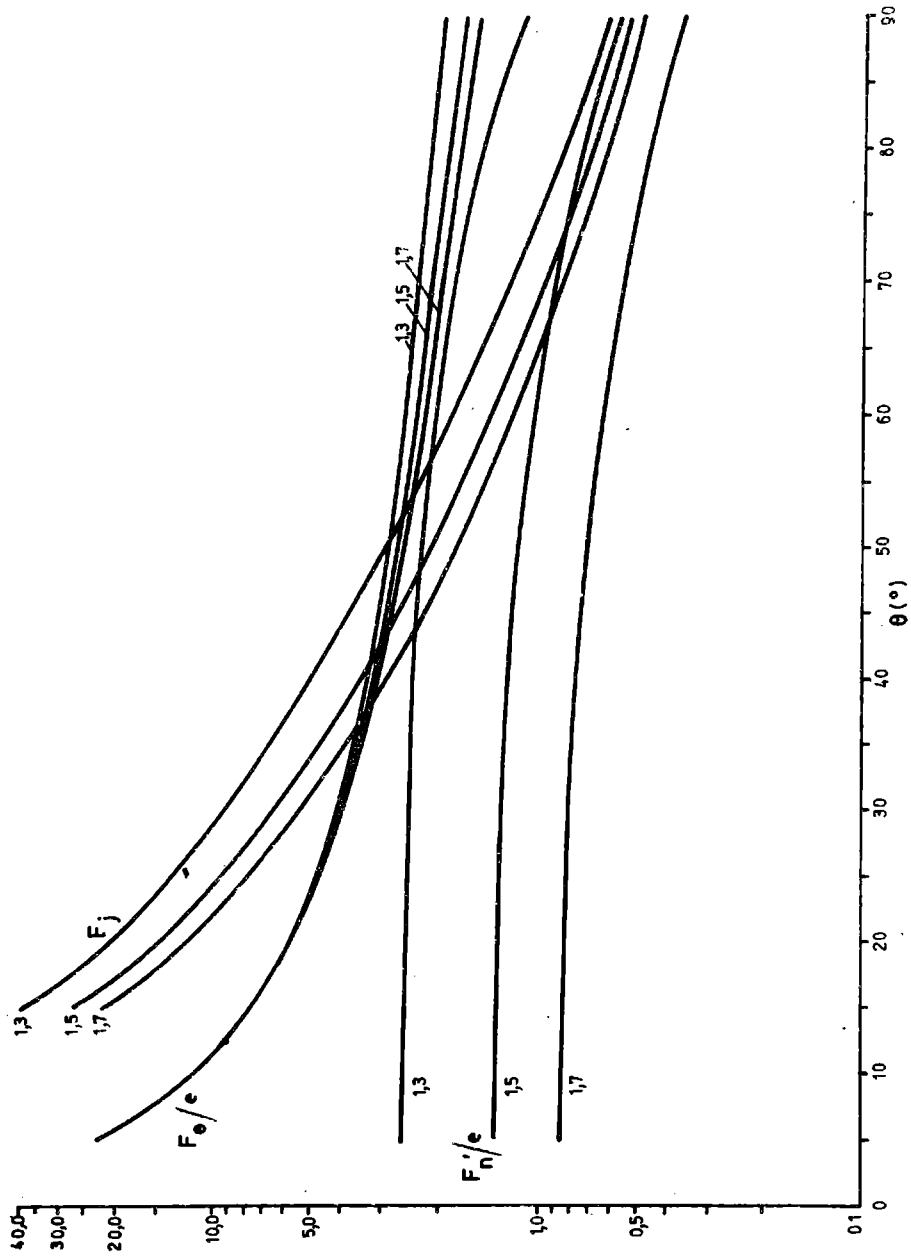


Fig. 6.- Factores de propagación de los errores en función del ángulo θ de rotación para las medidas de espesor.

$$e = \frac{e}{2n_a} \left[1 - n_r - \cos \theta - (n_r^2 - \sin^2 \theta)^{1/2} \right]^{-1} \quad (2)$$

$$n = n_a n_r = \frac{n_a}{2} \frac{\sin^2 \theta + (1 - \cos \theta - \lambda_j / 2 e n_a)^2}{1 - \cos \theta - \lambda_j / 2 e n_a} \quad (3)$$

donde n = índice de refracción absoluto de la lámina.

Del análisis de la fórmula (2) se obtienen los factores de propagación del error en la medición del espesor de una lámina cuyo índice de refracción es conocido, F_θ , F_n , F_j y F_λ correspondientes a las magnitudes señaladas con subíndices. Los tres primeros están graficados en función de θ en la figura 6 y el cuarto es directamente $F_\lambda = e/\lambda$. Los valores elegidos para n fueron de 1,3; 1,5 y 1,7. Debido a que F_θ , F_n y F_λ son proporcionales al espesor es que esta comunicación se refiere a la medición de espesores pequeños. Valores típicos del error están dados en la Tabla I. $\Delta \theta$ corresponde a la exactitud del goniómetro, Δn a la del refractómetro (por lo general al de Abbe) y Δj a la del sistema de detección de la intensidad de las franjas. Típicamente si $e = 100 \mu\text{m}$ y $\Delta j = 1 \cdot 10^{-3}$, resulta $\Delta e = 0,024 \mu\text{m}$.

Para obtener buenos valores de Δj se requieren buenas condiciones de estabilidad instrumental, y el valor asignado a $\Delta \lambda$ es el correspondiente al de cualquier láser de He-Ne de 30 cm de longitud de cavidad.

Para la medición de índices de refracción; de la fórmula (3) se obtienen los factores de error F'_θ , F'_e y F'_j que están graficados en la figura 7 en función de θ y tomando como valores paramétricos típicos para el índice de refracción los mismos: 1,3; 1,5 y 1,7. F'_λ no está representado pues vale $F'_\lambda = e F'_e / \lambda$.

Puesto que F'_e y F'_j son inversamente proporcionales a e , la muestra a emplear debe ser de gran espesor y ello ha-

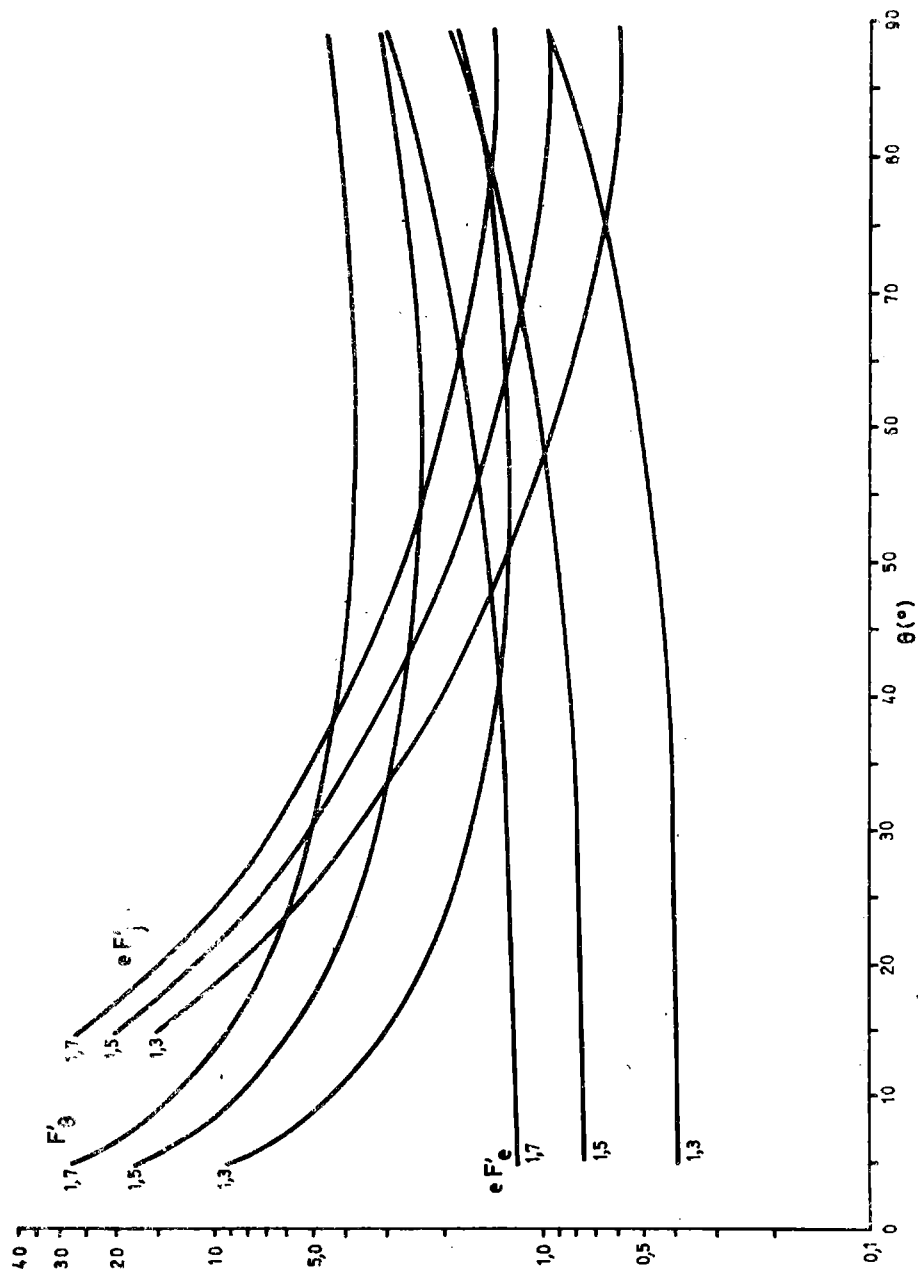


Fig. 7.-- Factores de propagación de los errores en función del ángulo θ de rotación para las medidas de índice de refracción.

T A B L A I

ERRORES PARCIALES QUE AFECTAN EL ESPESOR e

Para los valores típicos de $\lambda = 0,632816 \mu\text{m}$, $n = 1,5$
y $\theta = 60^\circ$ (espesor expresado en micrómetros)

$\Delta\theta = 2 \times 1'' = 2 \times 4,85 \times 10^{-6} \text{ rad}$	$\Delta e_\theta = e \times 2,2 \times 10^{-5}$
$\Delta n = 2 \times 10^{-4}$	$\Delta e_n = 2e \times 10^{-4}$
$\Delta j = 1 \times 10^{-3}$	$\Delta e_j = 1,4 \times 10^{-3}$
$\Delta\lambda = 6,7 \times 10^{-7} \mu\text{m}$	$\Delta e_\lambda = e \times 10^{-6}$

T A B L A II

ERRORES PARCIALES QUE AFECTAN EL INDICE DE REFRACCION n

Para los valores típicos de $\lambda = 0,632816 \mu\text{m}$, $n = 1,5$
y $\theta = 60^\circ$ (espesor expresado en micrómetros)

$\Delta\theta = 2 \times 4,58 \times 10^{-6} \text{ rad}$	$\Delta n_\theta = 2,2 \times 10^{-5}$
$\Delta e = 1 \mu\text{m}$	$\Delta n_e = 1,65/e$
$\Delta j = 1 \times 10^{-1}$	$\Delta n_j = 0,14/e$
$\Delta\lambda = 1,3 \times 10^{-8} \mu\text{m}$	$\Delta n_\lambda = 2,3 \times 10^{-8}$

ce que el desplazamiento lateral de la luz durante la rotación sea grande, llegando a ser incompatible con la apertura de las lentes utilizadas en otros métodos.

La tabla II muestra los valores obtenidos y que se constataron con placas de 8 a 25 mm de espesor. Las precisiones $\Delta e = 1 \mu\text{m}$ y $\Delta j = 1 \cdot 10^{-1}$ se obtuvieron con tornillo micrométrico y fotodetector comunes. Si e fuera menor que 1 cm, Δe deberá reducirse con métodos más elaborados. Se ve también que la condición de estabilidad en longitud de onda es mucho más rigurosa, requiriéndose un láser estabilizado.

Con este dispositivo es posible también inclinar una de las placas del interferómetro un ángulo Φ según un eje de giro paralelo al de la lámina y reducir F_j y F'_j en un factor i al recombinar el primer rayo que emerge del interferómetro, con el que se ha reflejado $2i$ veces dentro de la cavidad (3). Esto aumenta Δj pero el resultado final Δe_j o Δn_j mejora y la operación es conveniente para medir espesores, pues en ese caso, Δe_j es el más importante de los errores. Para operar así se debe medir Φ , lo que no es difícil, y la incidencia Δe_Φ o Δn_Φ de esta medición en el error está graficada como F_Φ y F'_Φ en la figura 8. Típicamente es $\Delta \Phi = 1''$.

Detalles experimentales

Los espejos empleados estaban aluminizados, dándoles un coeficiente de reflexión del 97 %; del primero de ellos se empleó sólo una abertura útil de menos de 3 mm de diámetro y del segundo una de 5 cm de diámetro.

La separación entre espejos variaba entre 5 y 20 cm y entre el láser y el primer espejo se intercalaron un prisma polarizador y una lámina cuarto de onda de modo de evitar que las reflexiones en el interferómetro retornasen al láser.

Las alineaciones interferométricas de los espejos y la posición inicial de la placa se optimizaron al detectar la máxima amplitud de pequeñas vibraciones introducidas transitoriamente en el sistema mediante débiles golpes efectuados en el elemento que interesaba alinear.

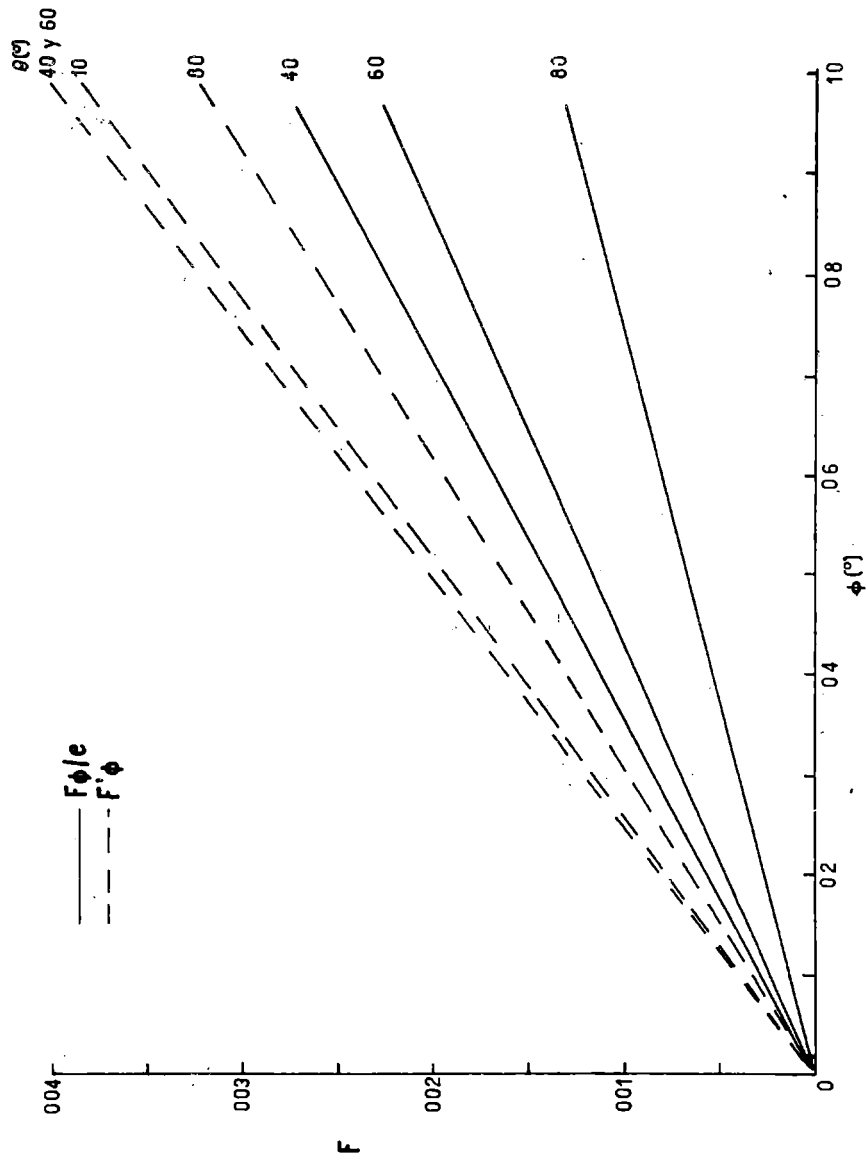


Fig. 8.- Factores de propagación F_{ϕ} y F'_{ϕ} en función de ϕ , para $n = 1,5$

Conclusiones

Se logró un método de la máxima precisión para medir estas magnitudes y de muy simple implementación, con la única excepción de requerir que la muestra del material a medir debe estar ópticamente pulida en sus dos caras ultra-paralelas. Su costo es reducido, teniendo en cuenta la exactitud alcanzada y puede ser mucho menor aún con menos pretensiones de exactitud. El elemento más caro es el láser estabilizado en frecuencia necesario sólo para medir índices de refracción y, salvo éste y el goniómetro, todos los demás elementos fueron íntegramente fabricados en la Universidad Nacional de La Plata y pueden ser reproducidos en varios otros lugares de nuestro país. Para la medición de espesores, el láser empleado puede ser de los construidos en el país por algunos laboratorios de investigación. Pueden con él controlarse láminas delgadas, obteniéndose, si el paralelismo de sus caras no es muy riguroso, el valor promedio de su espesor en una pequeña zona de unos 3 mm de diámetro. Puede también aplicarse a líquidos sumergiendo una lámina de prueba patrón en el líquido y así determinar su índice de refracción n_a , como en el trabajo de Wendelöv et al (8).

b) Estudio interferométrico de la calidad de planos patrones metrológicos.

Este estudio es necesario ya que el método convencional de control de mármoles patrones metrológicos por auto-colimación sólo provee información en puntos aislados de la superficie, de modo tal que si se quiere conocer a ésta con mayor detalle, la cantidad de medidas se incrementa tanto que el método se torna demasiado laborioso. Además, no aporta información sobre el estado de la superficie entre dos puntos consecutivos por más próximos que éstos se hallen y no es fácilmente aplicable si el mármol se halla cargado, en condiciones de trabajo. Es en este caso cuando más necesario resulta tener una superficie de referencia confiable porque el perfil del mármol se encontrará probablemente modificado por efecto de la carga.

El método expuesto provee información sobre toda un

área relativamente extensa y puede utilizarse con el mármol cargado. Esto, por supuesto, además de obtener una precisión tan alta como la interferométrica de modo relativamente simple. El método puede instrumentarse como para que resulte lo suficientemente práctico de modo de permitirle al fabricante de este tipo de superficies una inspección rápida durante el terminado, lo que mejoraría la calidad y aumentaría la velocidad de esta etapa de la fabricación.

Las experiencias descritas a continuación fueron realizadas sobre un plano patrón de diabasa, marca Johansson, calidad AA, propiedad del Laboratorio de Ensayo de Materiales e Investigaciones Tecnológicas, Ministerio de Obras Públicas, Provincia de Buenos Aires.

En primer término, para estudiar la posibilidad de aplicar un método interferométrico, fue necesario obtener una idea de la proporción de luz reflejada por el mármol en distintas condiciones. Con este propósito se hizo incidir sobre el mármol, luz proveniente de un láser de He-Ne bajo distintos ángulos, comprobándose que la luz reflejada variaba según el plano de polarización de la luz incidente, siendo máximo cuando éste era paralelo a la superficie y variaba también notablemente con el ángulo de incidencia, siendo máxima cuando éste, medido con respecto al plano de la superficie, era próximo a cero y disminuyendo progresivamente hasta anularse en las proximidades de los $26,5^{\circ}$. No se pudieron obtener resultados numéricos debido a la fluctuación de la intensidad del láser, pero se estima una reflectividad promedio del orden del 20 %.

Este hecho de que la superficie sólo refleje luz en cantidad apreciable para ángulos de incidencia por debajo de los 26° no hace posible intentar su estudio por medio de un interferómetro de incidencia normal, como el de Twyman-Green.

El estudio de la superficie del mármol usando planos ópticos sólo resulta aplicable cuando ésta tiene una reflectividad comparable a la del plano óptico. En caso contrario el contraste de las franjas es muy bajo, y resultan muy difíciles de observar, siendo prácticamente enmascaradas por la fuerte reflexión en la cara superior del plano óptico. De todos modos se intentó la observación de franjas interferenciales apoyando planos ópticos sobre la superficie del már-

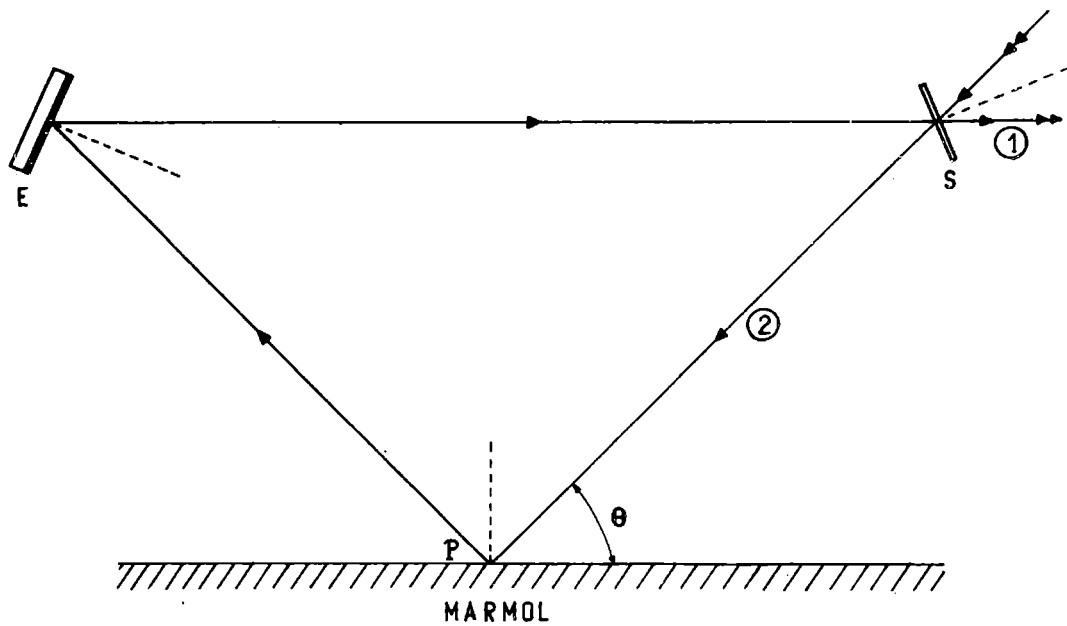


Fig. 9.- Representación esquemática del interferómetro rascante. Los haces 1 y 2 se recombinan después de las reflexiones en el semiespejo S, el mármol y el espejo E.

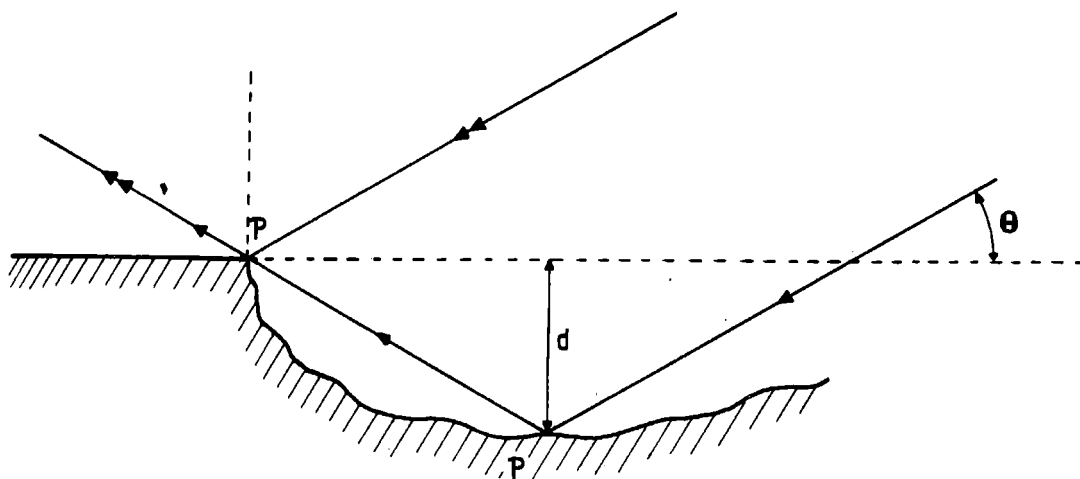


Fig. 10.- Trayectoria de los haces en la zona analizada. Se supone un defecto en la superficie del mármol consistente en una depresión de profundidad d.

mol e iluminándolos, en un primer caso, con luz de mercurio. Las figuras multicolores de interferencia resultaron muy difíciles de observar e imposibles de fotografiar por las razones enunciadas más arriba. Utilizando luz láser, en un segundo intento, las reflexiones se pudieron proyectar en una pantalla y resultaron más fáciles de observar, pero su forma variaba según la presión que se ejerciera sobre el plano óptico y no era posible estudiar lo que sucedía cuando el mármol era cargado porque el desplazamiento relativo era nulo.

Interferómetro rasante

Para obviar estos inconvenientes se diseñó el dispositivo que está indicado en la figura 9. El principio de funcionamiento es como sigue: la luz proveniente del láser incide sobre la superficie parcialmente reflectora S consistente en una lámina de caras paralelas muy bien pulidas, donde una parte se refleja, lo que se indica como rayo 1, y otra se transmite como rayo 2 en la figura 9. Este último rayo incide sobre el mármol formando un ángulo θ , se refleja, incide en el espejo E y vuelve a S en aproximadamente la misma dirección del rayo 1. Si en este trayecto no se ha superado la longitud de coherencia de la fuente, los dos rayos interferirán dando lugar a un fenómeno análogo al que sucedía en los planos ópticos. La superposición de los rayos 1 y 2 pueden proyectarse sobre una pantalla u observarse directamente con un instrumento óptico.

La trayectoria de los rayos en la vecindad de la superficie estudiada se muestra en la figura 10. Si se trabaja con haces de luz paralela, la situación es análoga a la de la interferencia de un frente de onda proveniente de la superficie estudiada y otro proveniente del infinito en la misma dirección. La diferencia de camino en cada punto toma la forma:

$$\Delta x = 2 d \text{ sen } \theta \quad (4)$$

donde d, como indica la figura 10 es la profundidad de una eventual imperfección de la superficie.

Teniendo en cuenta esta corrección, la interpretación

de las figuras de interferencia obtenidas es la misma que en el caso de los planos ópticos. El factor $\text{sen } \theta$ reduce la sensibilidad del interferómetro permitiendo observar simples interferogramas de superficie cuya microestructura es varias veces mayor que la longitud de onda empleada.

Si la superficie estudiada es un plano perfecto y las dos ondas planas tienen la misma dirección, habrá zonas del espacio transversales a ambas ondas en que habrá interferencia constructiva y por lo tanto intensidad máxima uniforme; otras zonas, separadas de las anteriores por un número impar de semilongitudes de onda corresponderán a regiones de interferencia destructiva y allí la intensidad será mínima o nula si ambas ondas tienen igual amplitud. Si las dos ondas forman un pequeño ángulo, la situación es análoga a la que se encuentra en el interferómetro de Twyman-Green cuando los espejos no están exactamente perpendiculares y la figura que se observa es una serie de franjas rectilíneas, alternativamente oscuras y brillantes, cuyo espaciado es función del ángulo entre las dos ondas planas, tendiendo a infinito a medida que este ángulo tiende a cero.

Si la superficie no es perfectamente plana, los apartamientos de la planitud se traducirán en variaciones en la forma y espaciado de las franjas.

En la figura 11 se muestran los resultados obtenidos con el dispositivo experimental de la figura 12, trabajando sobre el mármol antes mencionado y sobre dos bloques patrones de diferente calidad. En el caso de estos últimos se observan franjas paralelas debidas al pequeño ángulo que formaban los haces interferenciales.

De la fotografía A, que corresponde a la figura de interferencia producida por la superficie del mármol, se han seleccionado las regiones B, C y D que se pueden interpretar como planitud, convexidad o concavidad y dos salientes con un valle o su imagen especular. Para decidir sobre el signo de la concavidad se debería haber inclinado apropiadamente la lámina S con respecto a la superficie estudiada y observado entonces el comportamiento de las franjas.

Se realizaron, además, experiencias cargando el mármol en distintos lugares y se comprobó que una carga de 50 kg

en los extremos producía un corrimiento de dos franjas en una porción del mármol situada a aproximadamente 80 cm de la carga.

Conclusiones

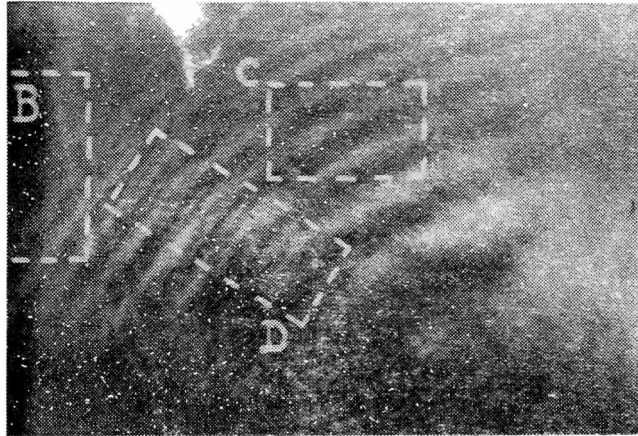
De las experiencias realizadas se puede extraer como conclusión que el interferómetro rasante provee algunas ventajas con respecto al autocolimador, con el que podría complementarse, y a los planos ópticos, en lo que se refiere al estudio de una superficie cuya reflectividad normal es baja. Por ejemplo, el que se pueda estudiar la superficie desde afuera y en condiciones de trabajo. Quedan abiertas una serie de posibilidades de estudio como la aplicabilidad del método de interferometría rasante a distintas superficies, el estudio de bancadas de máquinas - herramientas, la medición de deformaciones, etc.

III. HOLOGRAFIA

Introducción

La holografía es una técnica reciente basada en el principio clásico de interferencia de las ondas. Surgió a raíz de la profundización de estudios sobre microscopía electrónica llevados a cabo por Dennis Gabor, publicados en el año 1948, (10, 11, 12) pero tuvo un auge excepcional en el año 1960 debido a la invención del láser. Las propiedades excepcionales de éste como emisor de ondas luminosas hicieron que la actividad holográfica se desarrollase inicialmente en el terreno de la óptica, pero es igualmente aplicable a cualquier tipo de ondas capaces de interferir (coherentes).

La trascendencia que ha tenido la holografía fue enorme pues influyó profundamente en la óptica y le permitió extender sus aplicaciones a un gran número de ramas de la ciencia y de la técnica, por lo que Gabor obtuvo el



A

Fig. 11.- Registros obtenidos con el montaje experimental de la Fig. 12. A: figura de interferencia producida por una región de la superficie del mármol. B, C y D algunas zonas selectas de A. B: zona plana, C: zona cóncava o convexa y D: zona de dos protuberancias y un valle o su imagen especular.

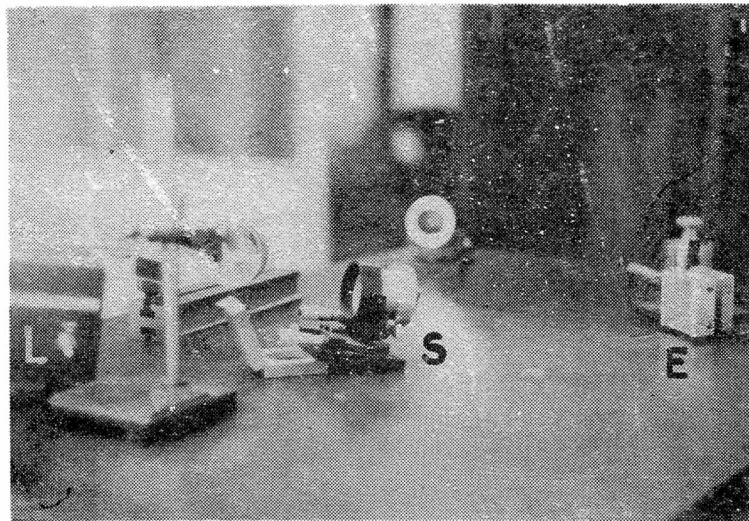


Fig. 12.- Fotografía de la instalación experimental del interferómetro rasante montado sobre un mármol. L: láser, S: semiespejo y E: espejo.

Premio Nobel de Física en el año 1971.

La holografía logra la reconstrucción de un frente de onda de la siguiente manera: en la toma del holograma, un haz monocromático coherente se divide en dos partes, una de las cuales incide directamente sobre la superficie de registro (onda de referencia) y la otra ilumina al objeto produciendo así otra onda (onda objeto) que también incide sobre la misma superficie de registro. Un esquema representativo de esta situación es el de la figura 13. Se obtiene así el registro de la interferencia entre la onda de referencia y las provenientes de cada punto del objeto, que es el holograma.

La reconstrucción holográfica se realiza con una onda igual o semejante a la de referencia (figura 14) y se producen por difracción de ésta en el holograma dos nuevas ondas, una de las cuales, onda reconstruida, es una perfecta réplica de la onda objeto, en intensidad y en fase, mientras que la otra, onda conjugada, posee una antisimetría respecto de aquélla, la que le otorga propiedades muy singulares.

La superficie de registro empleada frecuentemente en holografía de ondas luminosas es la de placas fotográficas de alta resolución.

En el caso de un holograma óptico si se pusieran los ojos detrás de la placa de modo de ver la onda reconstruida, se vería una imagen perfecta del objeto en el lugar donde estuvo la toma. Esta imagen tridimensional no tendrá el color del objeto si se trata de un holograma simple, como el descrito, sino el de la luz empleada para su reconstrucción. Por lo demás, la situación es equivalente a ver el objeto a través de una ventana cuya abertura está delimitada por la placa fotográfica.

La figura 15 reproduce dos enfoques de una misma imagen holográfica.

Al observar la onda conjugada, la imagen que se vería del objeto sería desconcertante, pues tiene propiedades únicas, llamadas de pseudoscopia, que crean una total inversión de relieve respecto de la del objeto; sería como mirar un molde del mismo.

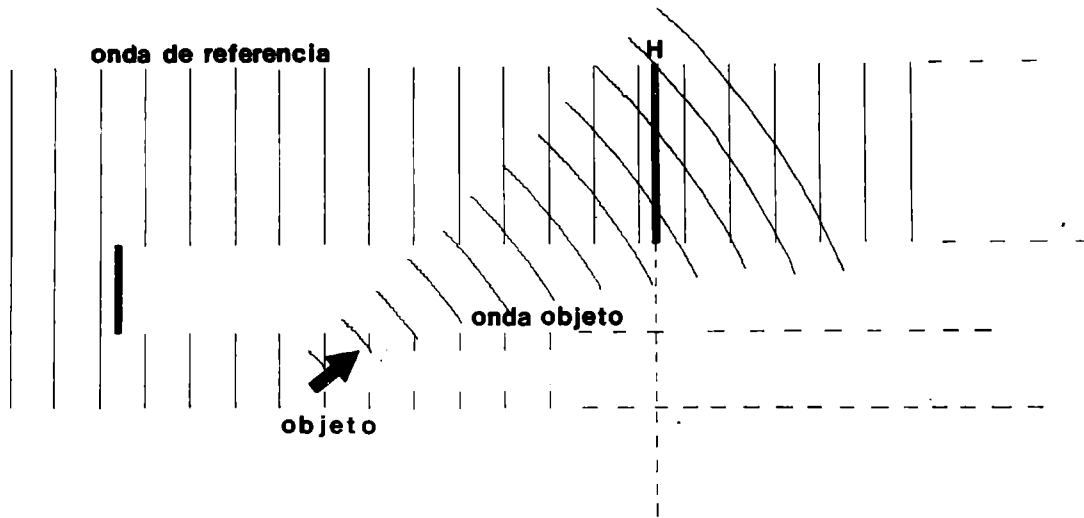


Fig. 13.- Esquema experimental para registrar un holograma H.

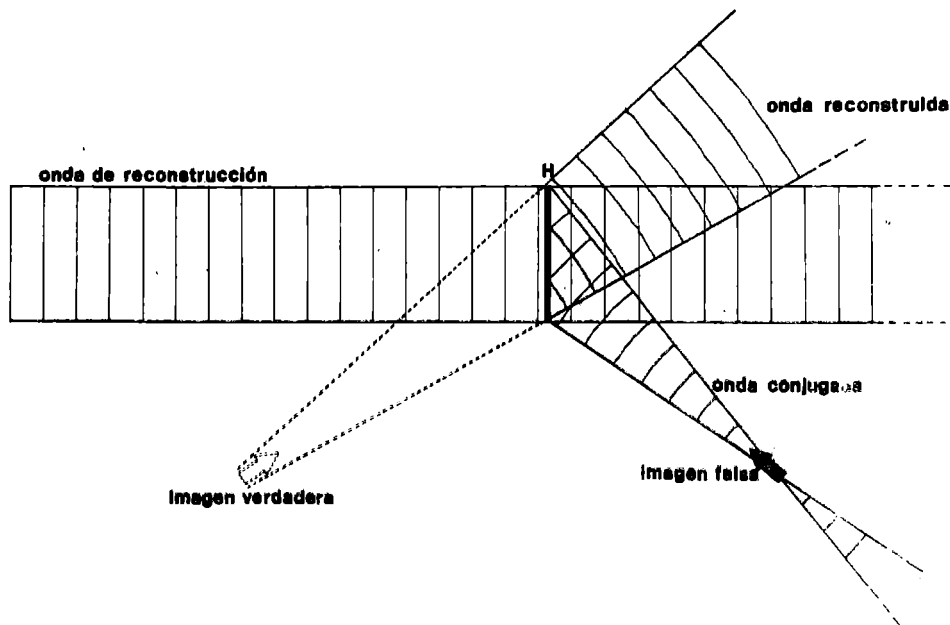


Fig. 14.- Esquema de la reconstrucción holográfica a partir del holograma H.

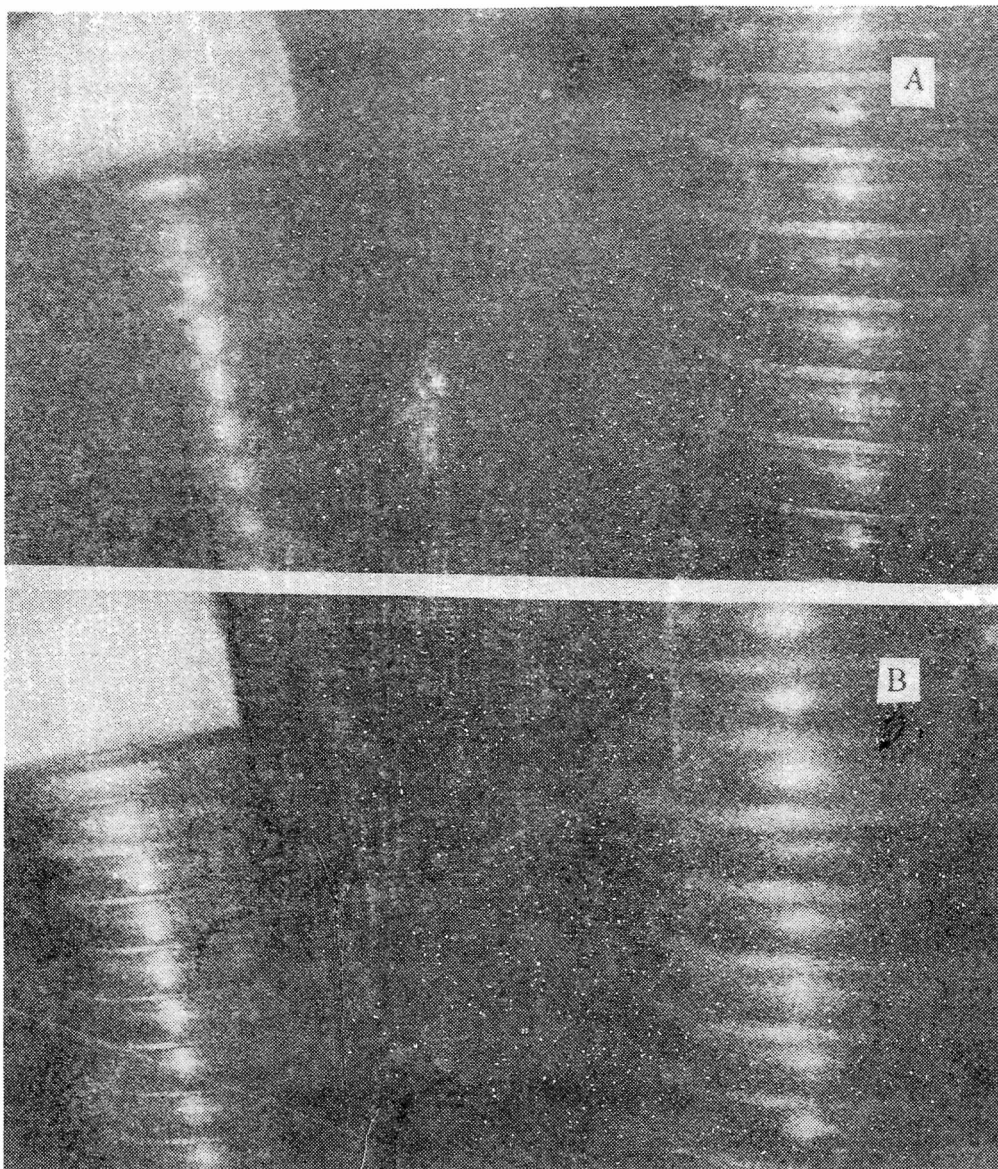


Fig. 15.- Dos fotografías de una misma imagen holográfica obtenidas enfocando la cámara sobre A: el tornillo más lejano, el de la derecha, y B: el tornillo más cercano, el de la izquierda. Se muestra así la profundidad de foco de la imagen holográfica, la que, además, es tridimensional. El efecto de moteado que cubre ambas fotos no se debe al grano de la emulsión fotográfica, sino a que se reconstruyó la imagen empleando una porción del holograma de sólo 2 mm de diámetro.

La ventaja de una toma holográfica respecto de la fotográfica reside en que es posible obtener en un solo registro todos los enfoques posibles del objeto y observarlo en forma tridimensional. Piénsese en la importancia de ésto para la microscopía de especímenes vivos, por ejemplo.

La máxima dimensión permisible en el objeto a holografíar está dada por la propiedad llamada longitud de coherencia del láser empleado en la toma del holograma y esta propiedad se encuentra en situación de compromiso con la potencia luminosa que es la que determina la superficie máxima del objeto a holografíar. De allí que para cada aplicación sea más conveniente determinado tipo de láser frente a los demás.

Las experiencias holográficas en el LEOL tuvieron comienzo en el año 1969. Luego de un período de aprendizaje, prolongado debido a la falta de antecedentes en Sudamérica sobre este tema, se encararon técnicas interferométricas con miras a su aplicación. La holografía interferométrica u holointerferometría permite obtener la interferencia de dos frentes de onda que provienen de dos posiciones no simultáneas de un mismo objeto. En esta interferencia se producen franjas que sólo dan cuenta de la diferencia entre ambas posiciones y no de la estructura detallada de la superficie del objeto, siendo ésta la única manera de lograr franjas de interferencia con cualquier clase de objetos. Esta precisa medición puede aplicarse a objetos tales como especímenes microscópicos, piezas metálicas en deformación, vibración o movimiento leve, variaciones del índice de refracción de cualquier sustancia y muchísimas otras.

Medición de la deformación de una barra metálica por medio de la holografía interferométrica.

La experiencia encarada consistió en sostener una barra metálica de $193 \times 21,5 \times 4 \text{ mm}^3$ por uno de sus extremos y someterla a esfuerzos de tensión por flexión, analizándola por medio de hologramas obtenidos con un láser de He-Ne de 2 mW de potencia luminosa y empleando placas Kodak 649-F (5).

Se construyó un soporte que constituía una unidad mecánica con el portaplaca (figura 16) y se aplicaron dos técni-

cas: la holointerferometría por doble exposición y la holointerferometría simultánea ("real time"). La primera consistió en superponer en un mismo holograma una toma de la barra sin flexionar con una toma de la barra flexionada por acción de una carga de 330 g por su extremo libre. Dos fotografías de estos hologramas se muestran en las figuras 18 y 19. La figura 18 que es una toma de la barra vista de arriba; la mordaza, permite observar parte de la barra en una zona lateral cercana a su sujeción, en la que también se notan algunas franjas. La figura 19 es una vista lateral y en la zona mencionada se ve el mismo tipo de franjas. Esto denota la gran sensibilidad del método, que demostró la necesidad de construcción del soporte empleado, ya que una mordaza común como las empleadas para sujetar y trabajar piezas mecánicas era insuficientemente rígida.

El esquema de la figura 17 permite calcular la diferencia de camino entre los dos rayos de luz que parecen provenir de un mismo punto del objeto en ambas situaciones y que vale:

$$\Delta s = D \left[\cos (\alpha + \varphi) + \cos (\alpha - \varphi) \right] = 2 D \cos \alpha \cos \varphi \quad (5)$$

por lo que, siendo el número de orden de las franjas $j = \Delta s / \lambda$, el sistema de franjas observado depende de la magnitud del desplazamiento y de su dirección pero no de su sentido, e importan la posición desde la que se ilumina y la de observación, pero siempre es del orden de $\lambda/2$ que representa unos 0,3 μm entre una franja y la siguiente. En el caso de las pequeñas deformaciones de esta barra, el movimiento puede suponerse aproximadamente perpendicular a la superficie de la misma.

La holointerferometría simultánea se llevó a cabo revelando la placa por goteo en el mismo portaplacas de modo de observar luego la superposición interferencial de la onda reconstruida por el holograma con la proveniente del objeto. Así se vio, en forma simultánea con la deformación, el corrimiento de las franjas de interferencia para valores de la carga de flexión que variaban en forma continua de 0 a 500 g.

Esta técnica es aún más interesante que la anterior, pues permite realizar múltiples observaciones con una sola

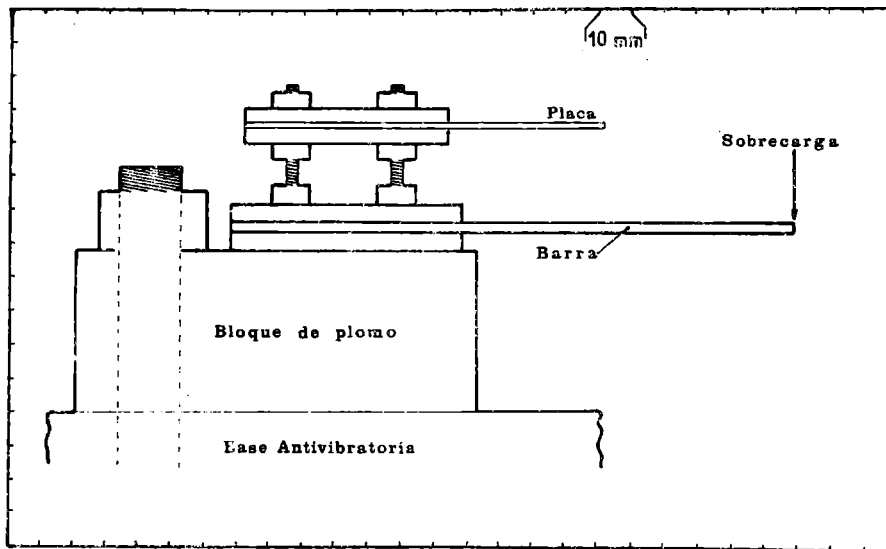


Fig. 16.- Esquema del soporte utilizado para realizar el análisis de la deformación de una barra metálica por medio de la holointerferometría.

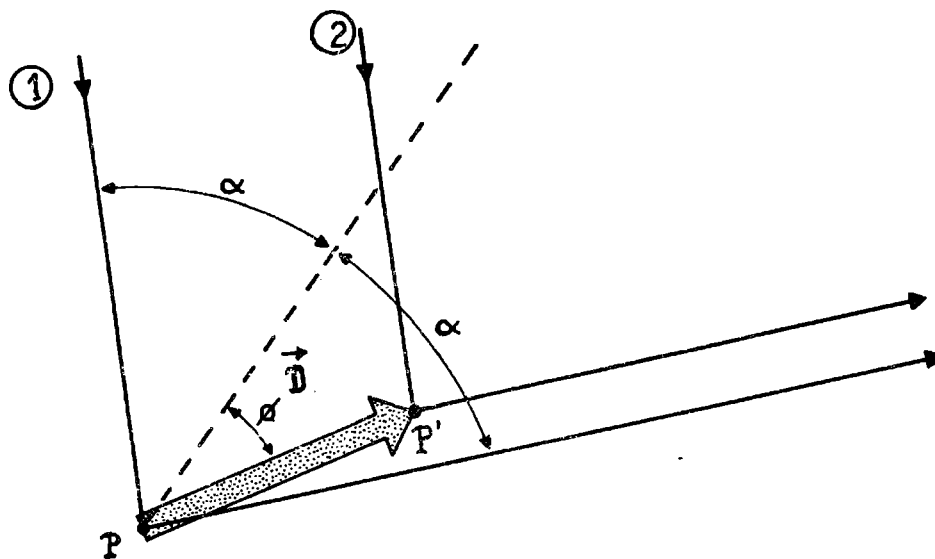


Fig. 17.- Desplazamiento de un punto P de la superficie de un objeto entre dos tomas holográficas. P: posición original del punto, P': posición a la que se desplazó dicho punto y \vec{D} : vector de desplazamiento. Los rayos 1 y 2 iluminan al objeto según la dirección de observación. α : ángulo bisector entre dichas direcciones y ϕ : ángulo entre el vector desplazamiento \vec{D} y la bisectriz.

toma, pero es muy sofisticada, pues deben mantenerse las condiciones de la toma, como la temperatura, la rigidez, etc., en la observación. También produce más franjas residuales que se deben principalmente al encogimiento de la emulsión fotográfica por el proceso de revelado. Sin embargo este inconveniente puede obviarse con técnicas adecuadas.

Conclusiones

La holointerferometría puede ser hecha en nuestro país con láseres continuos de He - Ne de 2 mW de potencia en objetos de pocos centímetros cuadrados de superficie, requiriéndose para ello buenas condiciones de estabilidad mecánica y térmica. Los láseres de la potencia citada y aun mayores son ya construidos por algunos laboratorios de investigación en nuestro país.

Todos los elementos citados, salvo las placas holográficas de alta resolución, pueden fabricarse en el país y se vislumbra que esta técnica es importante para el desarrollo de aplicaciones, tales como la ingeniería mecánica y la microscopía, al permitirles observaciones no destructivas de alta precisión.

REFERENCIAS

1. Garavaglia M., Gallardo M. y Massone C. A. - Comisión de investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, Informe nº 12, 1974.
2. Calatroni J. A. E. y Garavaglia M. - Informe presentado al Coloquio sobre Métodos de Análisis Experimental de Tensiones (COMAET), Rosario, 1974.
3. Lunazzi J. J. y Garavaglia M. - "Fabry - Perot laser interferometry to measure refractive index or thickness of transparent materials", Journal of Physics E - Scientific Instruments, 6, 237, 1973.
4. Rabal H. J. - "Resultados preliminares en el estudio de la

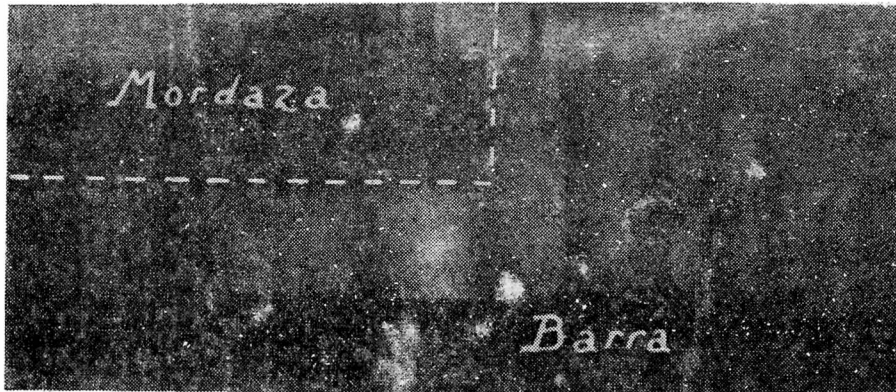


Fig. 18.- Fotografía de un holograma interferométrico de la barra vista desde arriba y de la mordaza de sujeción.

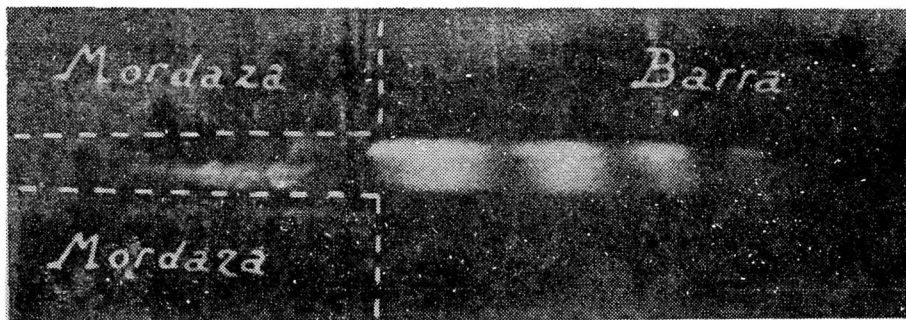


Fig. 19.- Fotografía de un holograma interferométrico de la barra vista lateralmente.

calidad de planos patrones usados en metrología", Informe correspondiente a la asignatura "Trabajo de Investigación I". Biblioteca del Departamento de Física, Universidad Nacional de La Plata, 1974.

5. Calatroni J. A. E., Lunazzi J. J., Rabal H. J. y Garavaglia M. - "Medición de la deformación de una barra metálica por medio de la holografía interferométrica". Comunicaciones de la Asociación Física Argentina, 1, 124, 1974.
6. Dally J. W. and Riley W. F. - "Experimental stress analysis", McGraw Hill Book Company, New York, 1965.
7. Andréasson S. D. H., Gustafsson S. E., and Halling N. O. - "Measurement of the refractive index of transparent solids and fluids". Journal of the Optical Society of America, 61, 595, 1971.
8. Wendelöv L. W., Wallin L. E. and Gustafsson S. E. - "Refractive index measurements of molten salts with wave-front-shearing interferometry (I - Test of apparatus and procedure)". Zeitschrift für Naturforschung, 22 A, 1180, 1967.
9. Rabal J., Lunazzi J. J. and Garavaglia M. - "Laser interferometric check-out of granite surface plates". Comunicación, presentada a la "1975 Conference on Laser Engineering and Applications", Washington, Estados Unidos de Norteamérica, organizada por "The Institute of Electrical and Electronic Engineers" y por la "Optical Society of America", 28-30 mayo 1975.
10. Gabor D. - "A new microscopic principle", Nature (Londres), 161, 771, 1948.
11. Gabor D. - "Microscopy by reconstructed wavefronts", Proceedings of the Royal Society (Londres), A197, 454, 1949.
12. Gabor D.- "Microscopy by reconstructed wavefronts", Proceedings of the Physical Society (Londres), B64, 449, 1951.

Agradecimientos.- Los autores expresan su agradecimiento al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, a la Comisión de Investigación Científica de la Universidad Nacional de La Plata, a la Comisión de Investigaciones Cientí-

ficas de la Provincia de Buenos Aires, a la Organización de los Estados Americanos y al Servicio Naval de Investigación y Desarrollo por los subsidios otorgados. La ayuda obtenida de la Organización de los Estados Americanos fue canalizada por el Programa Multinacional de Física.

Desean expresar además su gratitud al profesor Ricardo Platzeck, Jefe del Departamento de Óptica del Observatorio Astronómico (UNLP), al Ing. Carlos Christiansen, Jefe del Laboratorio de Electrónica del Departamento de Física (Facultad de Ciencias Exactas, UNLP) y a sus respectivos colaboradores, por la construcción de varias piezas ópticas y del contador electrónico de franjas, respectivamente; y al Ing. León Goldes, del Centro de Investigación y Servicio de Metrología de Córdoba por el hecho de haberles llamado la atención sobre la importancia y necesidad de atacar el problema del control óptico de las superficies de las mesas metroológicas o mármoles patrones.

Agradecen además a las autoridades del INTI y del LEMIT por la generosa hospitalidad brindada, la que hizo posible la realización de parte de esta investigación en los citados organismos.