

"DIRECT MEASUREMENT OF PHASE IN A FIZEAU INTERFEROMETER USING THE TRASLATION OF A RONCHI GRID".

"MEDIDA DIRECTA DE LA FASE EN UN INTERFEROMETRO FIZEAU MEDIANTE LA TRASLACION DE UNA RED RONCHI"

Dorrío, B.V., Fernández, J.L., Blanco-García, J., Doval, A.F., López, C., Pérez-Amor, M.

Dpto. de Física Aplicada, Lagoas-Marcosende, 9. E-36200 Vigo (Spain)

#### RESUMEN

Dentro de las técnicas de estudio de patrones de interferencia, el escalonamiento de fase ("phase stepping") se ha convertido en uno de los más potentes métodos de análisis automático de franjas. Usualmente el desfase entre el haz objeto y el haz de referencia se obtiene desplazando la superficie de referencia mediante un preciso sistema de cristales piezoeléctricos. Sin embargo, existe la posibilidad de obtener el mismo efecto mediante el empleo del efecto moiré, donde los movimientos de traslación de una red Ronchi permiten implementar las técnicas de escalonamiento de fase. Se presenta su aplicación a la medida directa de la fase en un interferómetro Fizeau.

#### ABSTRACT

Among the existing interference pattern evaluation methods, phase stepping became one of the most powerful ones for the automatic analysis of fringes. Usually the phase shifts between the object and the reference beams are obtained by moving the reference surface of the interferometer through an accurate system of piezoelectric crystals. However, it is possible to obtain the same effect through the moiré effect, where the "in plane" translation of a Ronchi grid allows to implement phase stepping techniques. The application to the direct measurement of phase in a Fizeau interferometer is presented.

## 1. INTRODUCCION.

Las conocidas ventajas de la interferometría Fizeau ( alta sensibilidad, baja susceptibilidad a perturbaciones ambientales, no requiere óptica de elevada calidad, ... ), la convierten en una técnica adecuada para la caracterización geométrica de superficies pulidas en general y, en particular, de películas delgadas. El desarrollo de un interferómetro Fizeau [1] por el Grupo de Metrología Óptica del Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Vigo ha sido fruto de la colaboración con otro grupo del mismo departamento dedicado a la fabricación de películas delgadas para opto y microelectrónica y metalurgia. Debido a los requerimientos específicos del grupo de producción de películas se ha dotado a dicho interferómetro de la capacidad de realizar medidas "in situ", cuantitativas y automáticas, mediante el uso de técnicas de escalonamiento de fase, objeto del presente trabajo.

## 2. METODO Y TEORIA.

Dentro de las técnicas de evaluación de fase [2,3] hemos elegido un método que se basa tanto en el escalonamiento de fase ("phase stepping") [4,5] como en el efecto moiré, donde éste último se usa auxiliariamente para obtener los desplazamientos de fase. Aunque este método ya ha sido referenciado en la literatura [2,6], no hemos encontrado ninguna descripción cuantitativa de su aplicación a un interferómetro Fizeau ni de los problemas del filtrado de la portadora.

El escalonamiento de fase presenta una serie de ventajas ( sencillez

experimental, precisiones típicas de  $\lambda/100$ , implementación en tiempo cuasi real, ... ) que lo hacen adecuado para nuestra aplicación. En particular, posibilita la cancelación de factores de escala y términos aditivos en la intensidad de cada pixel, como variaciones de sensibilidad en el sensor TV, iluminación no uniforme o reflectividad no uniforme. Como es sabido, el escalonamiento de fase se basa en el uso de un determinado número de patrones entre los que se ha introducido una cierta fase de referencia. Usualmente dicha fase de referencia se obtiene desplazando la superficie de referencia del interferómetro con un preciso sistema de cristales piezoeléctricos [7]. Sin embargo, existe la posibilidad de obtener el mismo efecto mediante el empleo de técnicas moiré. En este caso se obtiene la distribución de la fase  $\phi(x,y)$  mediante la formación de una imagen moiré entre el interferograma convenientemente modificado y una red Ronchi de paso  $p_r$  también escogido adecuadamente.

El diagrama de flujo de la Fig.1 muestra el proceso utilizado. En una primera etapa se introduce una portadora de paso arbitrario  $p_i$ , que resulta modulada en fase por la fase del interferograma primario, cuya expresión matemática es:

$$g_i(x,y) = m(x,y) + A \cos\left[\frac{2\pi}{p_i} x + \phi(x,y)\right] \quad (1)$$

siendo  $m(x,y)$  el valor medio local de la intensidad y  $A$  la profundidad de modulación de la intensidad sobre el nivel medio, que consideramos constante.

El proceso de demodulación se realiza con una red Ronchi de paso  $p_r$ , similar al de la portadora, cuya expresión en primer armónico es:

$$g_r = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \cos \left[ \frac{2\pi}{p_i} x + \alpha \right] \right\}$$

(2)

donde  $\alpha$  es un término adicional de fase producido por el desplazamiento de la red Ronchi en su plano.

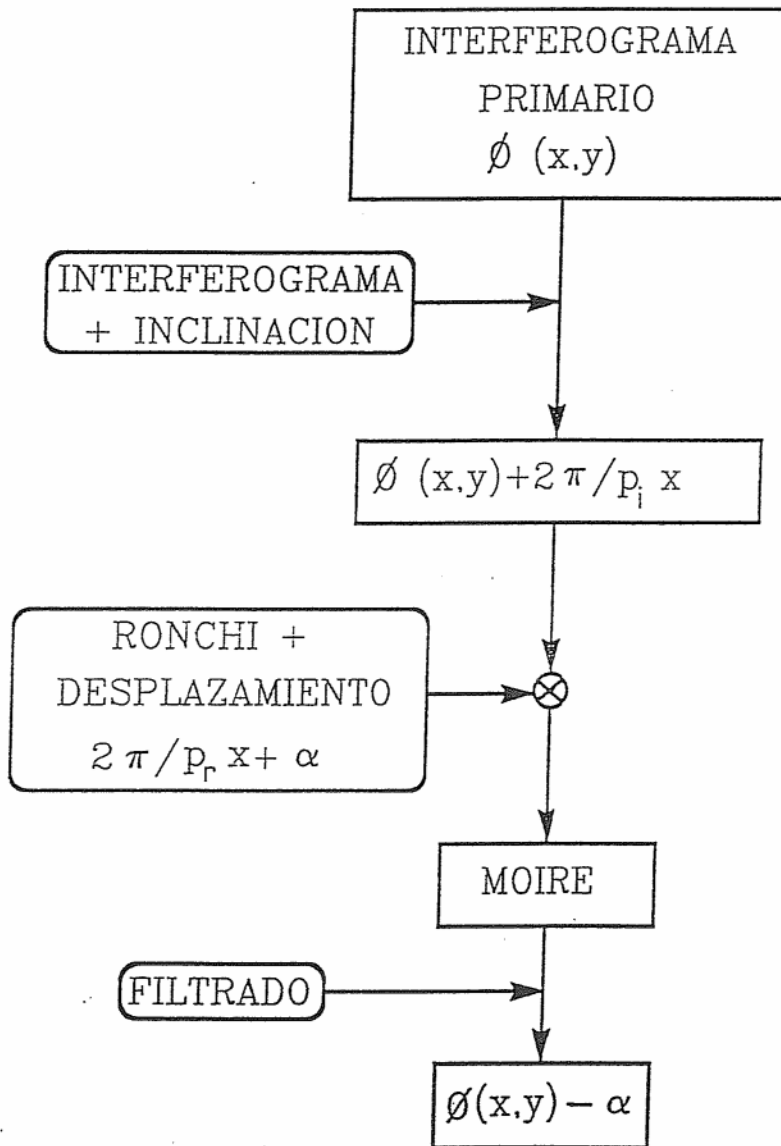


Fig. 1 Diagrama de flujo del proceso utilizado

La superposición del interferograma con portadora sobre la red Ronchi produce una imagen moiré multiplicativa. Dicho moiré multiplicativo [8] presenta una serie de ventajas: se forma en tiempo real, con un buen contraste, localizado en el plano de la red de referencia y, sobre todo, presenta un fácil filtrado óptico que se realiza con un simple paso bajo, con la ventaja adicional de que no es necesario que la cámara video resuelva la portadora para resolver el patrón moiré, lo que nos permite usar portadoras de gran frecuencia. Esto último, como veremos más adelante, redundará en una mayor capacidad del método para la medida de muestras con variaciones bruscas de perfil.

La formación de la imagen moiré puede expresarse de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 g_m(x,y) &= g_i(x,y) g_r(x,y) = \\
 &= \frac{1}{2} \left\{ m(x,y) \left( 1 + \cos \left[ \frac{2\pi}{p_r} x + \alpha \right] \right) + \right. \\
 &\quad A \left( \cos \left[ \frac{2\pi}{p_i} x + \alpha \right] + \right. \\
 &\quad \quad \left. \frac{1}{2} \cos \left[ \frac{2\pi}{p_i} x + \frac{2\pi}{p_r} x + \phi(x,y) + \alpha \right] + \right. \\
 &\quad \quad \left. \left. \frac{1}{2} \cos \left[ \frac{2\pi}{p_i} x - \frac{2\pi}{p_r} x + \phi(x,y) - \alpha \right] \right) \right\}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

El patrón moiré viene dado por el término de menor frecuencia, siendo su fase la diferencia entre las fases del interferograma con portadora y la de la red Ronchi. De esta forma queda introducida la fase de referencia para el escalonamiento de fase en el propio patrón moiré, que contiene esencialmente la información del interferograma primario  $\phi(x,y)$ . Un filtrado paso bajo nos

permite obtener el patrón moiré:

$$g_{mf}(x, y) = \frac{1}{2} \left\{ m(x, y) + \frac{A}{2} \cos \left[ \frac{2\pi}{p_i} x - \frac{2\pi}{p_r} x + \phi(x, y) - \alpha \right] \right\} \quad (4)$$

Analizaremos a continuación las condiciones bajo las que dicho filtrado es realizable y las consecuencias que se derivan de ellas. La Fig.2 muestra el espectro  $G_m$  de la imagen moiré. Podremos filtrar el término de interés siempre y cuando no se solape su espectro con los términos de mayor frecuencia. Esto nos conduce a definir una condición de separabilidad [9] :

$$2 \left| \frac{\partial \phi(x, y)}{\partial x} \right|_{\max} \leq \min \left\{ \frac{1}{p_i}, \frac{1}{p_r} \right\} - \left| \frac{1}{p_i} - \frac{1}{p_r} \right| \quad (5)$$

Podemos desglosar la anterior expresión en los siguientes casos:

a.  $p_i = p_r = p$  ( Franjas infinitas ).

$$\left| \frac{\partial \phi(x, y)}{\partial x} \right|_{\max} \leq \frac{1}{2p} \quad (6)$$

b.  $p_i > p_r$

$$2 \left| \frac{\partial \phi(x, y)}{\partial x} \right|_{\max} \leq \frac{2}{p_i} - \frac{1}{p_r} \quad (7)$$

c.  $p_r > p_i$

$$2 \left| \frac{\partial \phi(x, y)}{\partial x} \right|_{\max} \leq \frac{2}{p_r} - \frac{1}{p_i} \quad (8)$$

A la vista de las expresiones anteriores podemos concluir, como ya hemos dicho, que es ventajoso el empleo de una red Ronchi, y por tanto de una

portadora, de alta frecuencia espacial.

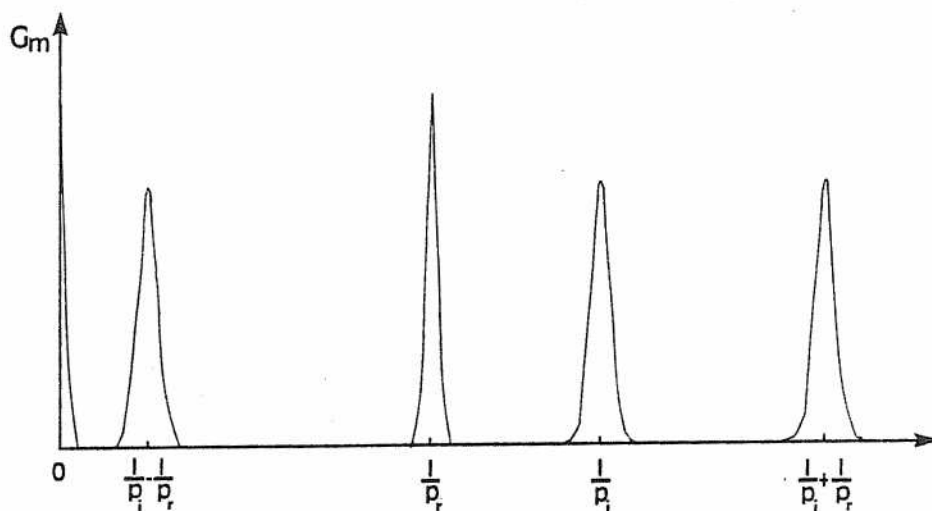


Fig. 2 Espectro espacial de la imagen moiré.

### 3. DISPOSICION EXPERIMENTAL Y RESULTADOS.

La Fig.3 muestra la disposición experimental utilizada. La configuración del interferómetro Fizeau construido consta de dos fuentes de iluminación  $F_1$ ,  $F_2$  seleccionables con un espejo  $E$ , una placa compensadora  $C$ , un divisor de haz  $D$ , una lente colimadora  $L$  y superficie patrón  $S$ . En este caso la fase a medir es proporcional a la distancia de los puntos de la superficie del objeto  $OB$  al plano de referencia. El interferograma que se forma entre el haz de referencia y el haz objeto se superpone con una red de transmisión  $G$  (300 líneas/pulgada) formando la imagen moiré. Estas franjas se adquieren mediante un sensor CCD, cuya salida se envía a un sistema de procesamiento de imagen  $DI$  donde se realiza el análisis de datos. Las franjas de la imagen moiré se

desplazan en fase trasladando la red Ronchi en su plano mecánicamente. En nuestro caso se han tomado cuatro imágenes desplazadas  $\pi/2$ , que han sido procesadas para obtener el mapa de fases del interferograma formado, tomando como objeto una ventana óptica con una cierta inclinación respecto al plano patrón.

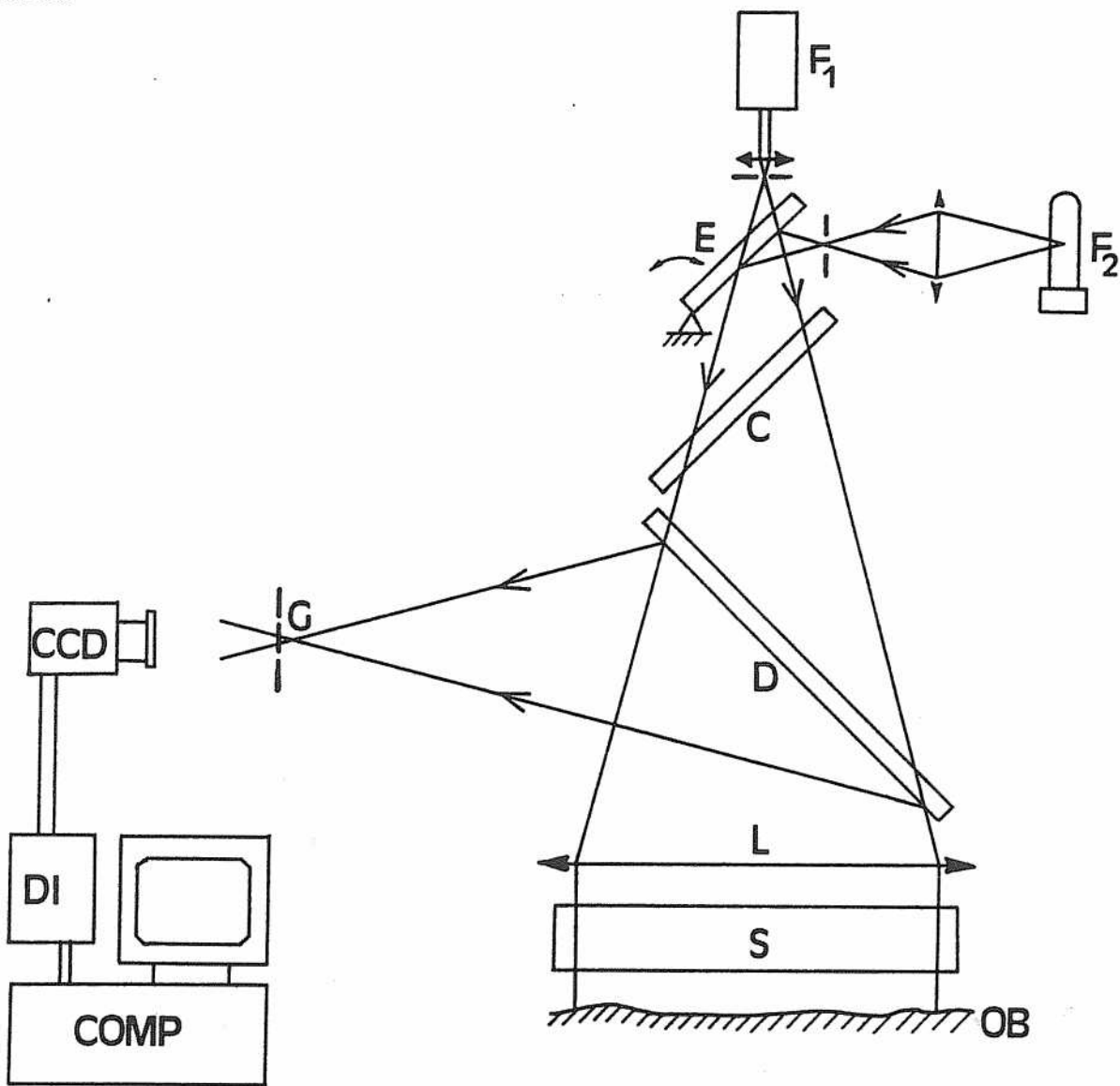


Fig. 3 Esquema experimental

La Fig.4 muestra el interferograma primario que tiene codificada la información de interés en su fase  $\phi(x,y)$ . La Fig.5 muestra una de las series



consistente en cuatro patrones moiré desplazados en  $\pi/2$  que se obtienen, como ya se ha dicho, moviendo transversalmente la red ( perpendicularmente a sus líneas ) un cuarto de período cada vez. La Fig.6 muestra un mapa de fases de un patrón con pocas franjas. La Fig.7 es análoga a la anterior en una configuración de más franjas.

Las Fig.8 y 9 representan el estudio cualitativo de la repetibilidad del método para distinto número de franjas. Se han hecho varias series consecutivas y calculado los correspondientes mapas de fase. Se han sustraído aleatoriamente por parejas. Si la repetibilidad fuera perfecta se obtendría de dicha sustracción una imagen con todos los pixels a nivel cero. En nuestro caso obtenemos este nivel próximo a cero en la mayoría de los pixels, excepto en franjas estrechas situadas aproximadamente en las posiciones de máxima fase de los mapas, espaciadas entre sí, por tanto, el ancho de franja. Según esto, una idea de la repetibilidad del método nos la proporciona el histograma de dicha sustracción ( Fig.8 y 9 ). Dentro de las posibles causas de error que influyen en la determinación en la fase por los métodos de escalonamiento de fase [10], los resultados experimentales presentados en este trabajo nos llevan a pensar que en nuestro caso es poco significativo el error en la fase de referencia para el escalonamiento de fase, siendo sin embargo las pequeñas variaciones de la propia fase del interferograma de partida de cada serie ( debido a inestabilidades mecánicas o ambientales ) las responsables de las mencionadas franjas en la imagen de la sustracción ( Fig. 8 y 9 ). Esta variación consiste básicamente en una traslación rígida de las franjas y, por tanto, del mapa de fases ( Fig. 10 ), lo que explica el perfil de la imagen de la sustracción.

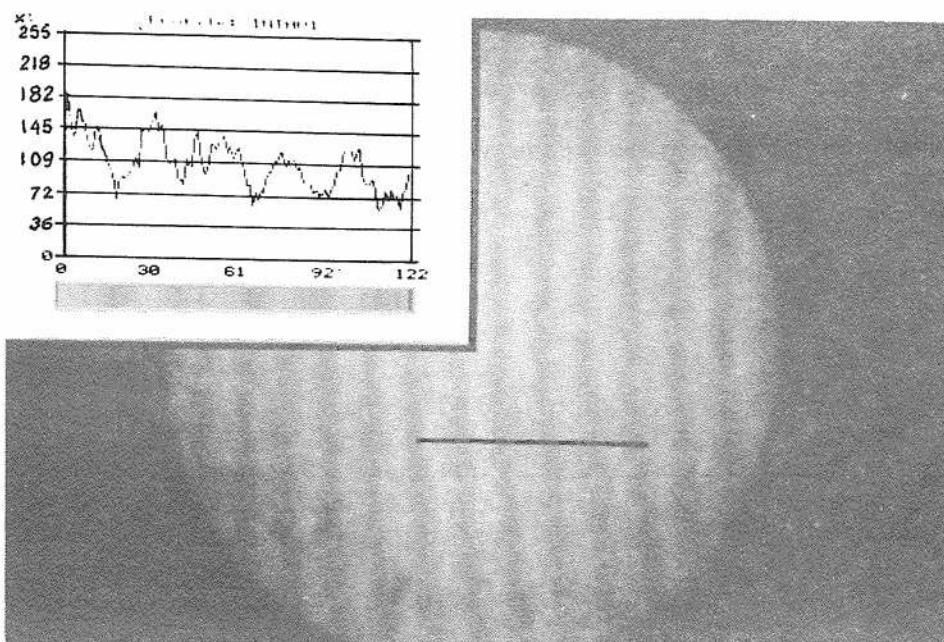


Fig.4 Interferograma de una ventana óptica. En el recuadro se muestra el perfil de intensidad de la sección marcada.

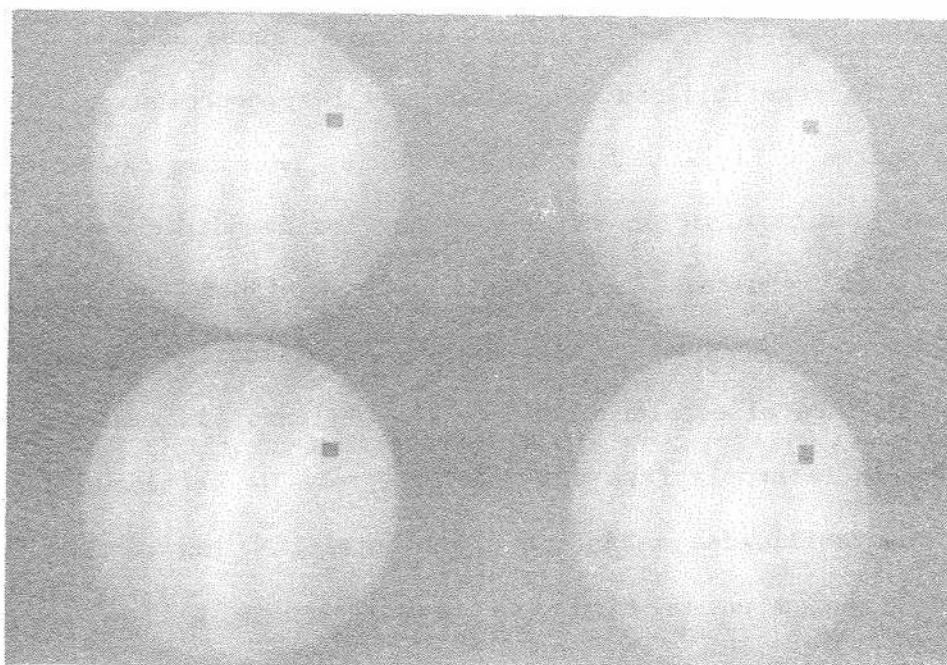


Fig.5 Patrones moiré desplazados  $\pi/2$ , en los cuales se ha marcado un punto de referencia.

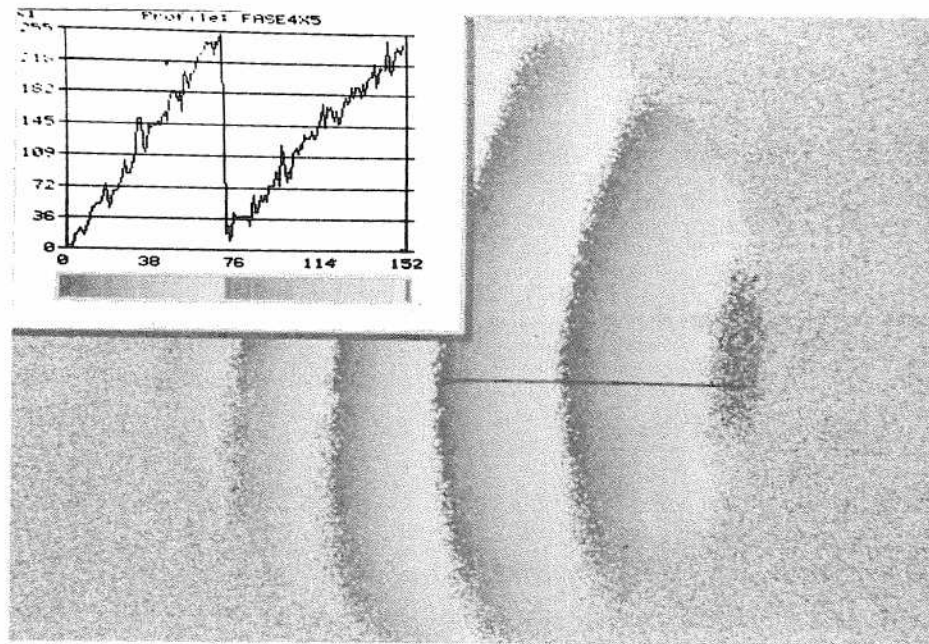


Fig. 6 Mapa de fases de un patrón de pocas franjas de la ventana óptica. En el recuadro se observan los valores principales de la sección marcada.

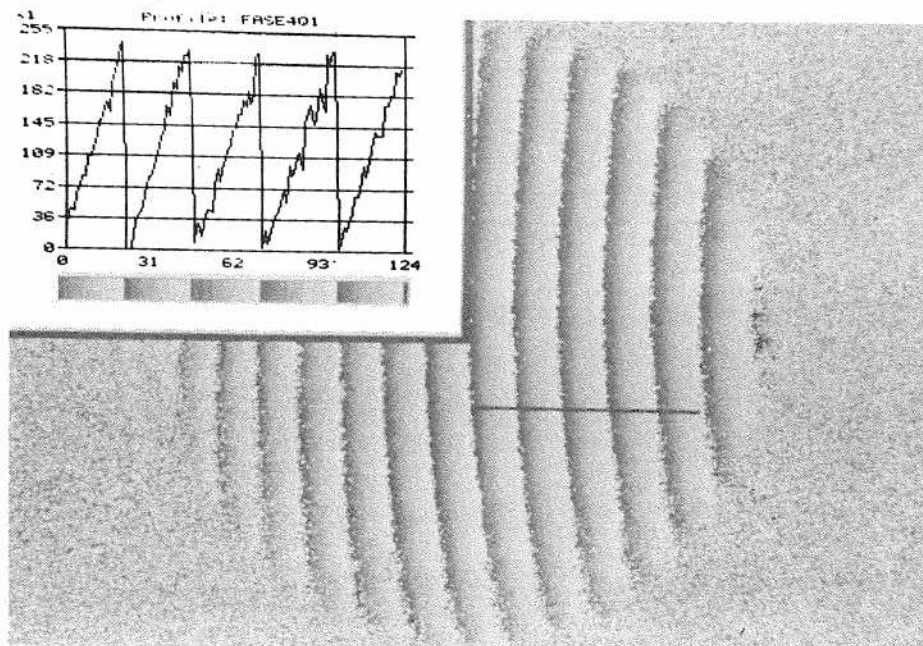


Fig. 7 Mapa de fases de un patrón de más franjas de la ventana óptica, con la fase de la sección marcada en el recuadro superior.

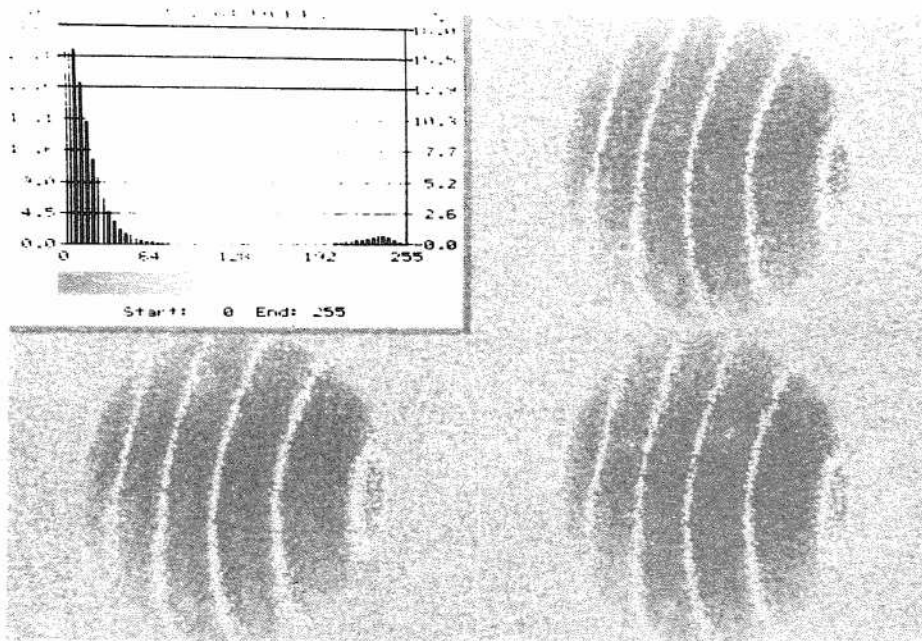


Fig. 8 Estudio de la repetibilidad de un mapa con pocas franjas. En el recuadro se observa el histograma de una de las diferencias.

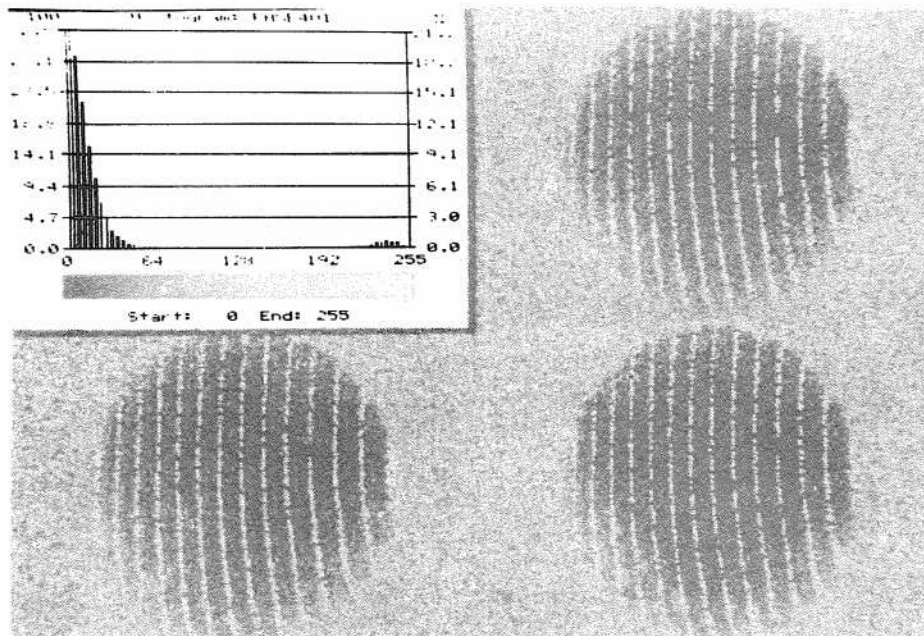
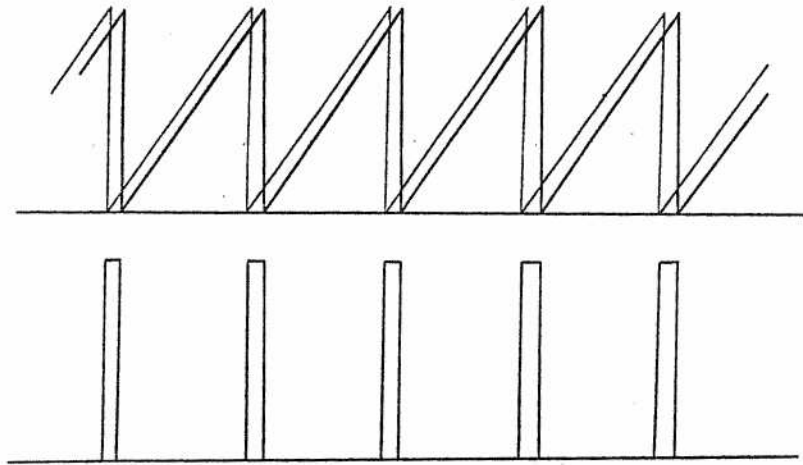


Fig. 9 Estudio de la repetibilidad de un mapa con más franjas. Se muestra el correspondiente histograma en el recuadro.



*Fig. 10 Traslación de los mapas de fase entre dos series consecutivas y su diferencia.*

#### 4. CONCLUSIONES

Se ha presentado la implantación de la técnica de escalonamiento de fase combinada con la técnica moiré como método de evaluación de fase de interferogramas Fizeau, demostrando la viabilidad de la misma para la evaluación de dichos interferogramas. Entre las ventajas que presenta sobre los métodos clásicos de escalonamiento destacan:

- Su sencillez experimental.
- Su buena relación prestaciones/coste.
- Su menor influencia sobre la diferencia de camino óptico en el interferograma, en tanto en cuanto los efectos del movimiento mecánico necesarios para crear el escalonamiento de fase se realizan lejos de la muestra.

## 5. BIBLIOGRAFIA.

1. J.L. FERNANDEZ, A. FEIJOO, B.V. DORRIO, J. BLANCO, C. LOPEZ, A.F. DOVAL, F. PINO y M. PEREZ-AMOR: Actas del IV Cong. Int. Metrología Ind., Zaragoza, 327 (1991).
2. G.T. REID: Opt. Las. Eng., 7, 37 (1986/7).
3. T.M. KREIS: SPIE, 863, 68 (1987).
4. J.C. WYANT: Las. Foc., 5, 65 (1982).
5. J.A. TOME, H.P. STAHL: SPIE, 954, 71 (1988).
6. K. PATORSKY: Opt. Las. Eng., 8, 147 (1988).
7. K. CREATH, E. WOLF ( ed. ): "Progress in Optics", XXVI, 351 ( North Holland, Amsterdam, 1988).
8. O. BRYNGDAHL: J. Opt. Soc. Am., 2, 87 (1976).
9. J. BLANCO-GARCIA: Tesis Doctoral, Santiago de Compostela (1992).
10. J. SCHWIDER, R. BUROW, K.E. EISSNER, J. GRZANN, R. SPOLACZYK y K. MERKEL: App. Opt., 21, 3421 (1983).

★ ★ ★