

## PERFILOMETRÍA DE SUPERFICIES TÓRICA MEDIANTE DEFLECTOMETRÍA RONCHI: CONSTANCIA DE LAS MEDIDAS BAJO ROTACIÓN DE LA MUESTRA

### TOROIDAL SURFACE PROFILOMETRY USING RONCHI DEFLECTOMETRY: CONSTANCY UNDER ROTATION OF THE SAMPLE

*Santiago Royo, Marisa Vera, Jesús Caum y Núria Tomás*

Departament d'Òptica i Optometria. Universitat Politècnica de Catalunya  
C/ Violinista Vellsolà 37 08222 Terrassa. Tel.: 93 739 8331. e-mail: royo@oo.upc.es

#### RESUMEN

En el presente artículo se expone un método de determinación de los radios de curvatura de los meridianos principales y de los perfiles topográficos de superficies cóncavas con geometría tórica, mediante el uso de la técnica de deflectometría Ronchi. Se han utilizado como muestras superficies tóricas cóncavas presentes en lentes oftálmicas. Asimismo, se muestra que la obtención de topografías de superficies tóricas no precisa de orientaciones específicas para dichas superficies, como se pone de manifiesto en el hecho de que la medida del radio de curvatura en los meridianos principales puede realizarse independientemente de la orientación de la superficie.

**Palabras clave:** Deflectometría Ronchi, superficie tórica, topografía de superficies, perfilometría.

#### ABSTRACT

In this paper a method for the measurement of the radius of curvature along the principal meridians of toroidal surfaces is presented using the Ronchi deflectometry setup. Toroidal surface profiles are obtained regardless the orientation of the sample surface, and radius of curvature measurements along the principal meridians are also performed regardless the orientation of the surface.

**Key words:** Ronchi deflectometry, toroidal surfaces, surface topography, profilometry.

## 1. INTRODUCCIÓN

La deflectometría Ronchi se basa en el muestreo del frente de onda medir, mediante la interposición de una red de líneas paralelas de baja frecuencia en su camino (red de Ronchi), dando como resultado un determinado patrón de sombras. Ello permite la medida simultánea de las posiciones y las pendientes de un conjunto de puntos del frente de onda, determinados por las zonas claras y/o oscuras de las sombras de la red de Ronchi. Para obtener pares de coordenadas y pendientes bidimensionales, usualmente se utilizan dos patrones de sombras obtenidos en dos posiciones de la red de Ronchi en los que las líneas de la red son ortogonales entre sí.

La deflectometría Ronchi tradicionalmente se ha aplicado al estudio de superficies de revolución, tanto esféricas como asféricas, en las que las medidas obtenidas son obviamente independientes de la orientación de la muestra debido a su simetría de revolución. En este tipo de superficies, los patrones de sombras obtenidos en dos orientaciones ortogonales de la red de Ronchi son también ortogonales entre sí.

Las superficies tóricas presentan solamente dos secciones circulares con un radio de curvatura bien definido. Estas secciones, perpendiculares entre sí, se denominan meridianos principales de la superficie. A diferencia del caso de las superficies con simetría de revolución, posiciones ortogonales de la red de Ronchi pueden no dar lugar a patrones de sombras cuyas líneas sean ortogonales entre sí.

El objetivo del presente artículo es mostrar que la obtención de la topografía de superficies tóricas mediante deflectometría Ronchi no requiere de una orientación específica de los meridianos principales de dicha superficie. También se pondrá de manifiesto que la medida del radio de curvatura en los meridianos principales de la superficie utilizando la deflectometría Ronchi puede realizarse independientemente de la orientación de la superficie.

## 2. MÉTODO

Presentaremos el método de medida dividido en tres apartados: montaje experimental, obtención de la perfilometría de la superficie tórica, y medida radio de curvatura de los meridianos principales.

### 2.1. Montaje experimental

En el montaje experimental (figura 1) se utiliza, como fuente de luz, una fibra óptica de 4  $\mu\text{m}$  conectada a un láser semiconductor de 670 nm y 5 mW de potencia. El uso de una fuente a través de fibra óptica garantiza tanto el conocimiento de la posición en que se encuentra la fuente luminosa como la estabilidad mecánica del montaje. Como elemento separador del haz de incidencia y el haz reflejado sobre la superficie, se utiliza una lámina semiespejada de 200 micras de grosor. La red de Ronchi utilizada es de una frecuencia de 50 líneas por pulgada (aproximadamente 2 líneas por milímetro), y el plano donde se encuentra la red está totalmente motorizado permitiendo desplazamientos micrométricos en las direcciones X e Y descritas en la figura 1, y también rotación alrededor del eje Z. Los motores son del tipo «encoder» y paso a paso, de manera que es posible su control remoto desde un ordenador. Estas motorizaciones, junto con el hecho de que en este montaje todas las posiciones mecánicas quedan prefijadas excepto la distancia de la red de Ronchi a la superficie, permiten una total repetitividad de las condiciones de medida. En cuanto al detector, se utiliza una cámara CCD con un objetivo de focal 50 mm, enfocado a infinito para el registro de los patrones de franjas que genera la red de Ronchi.

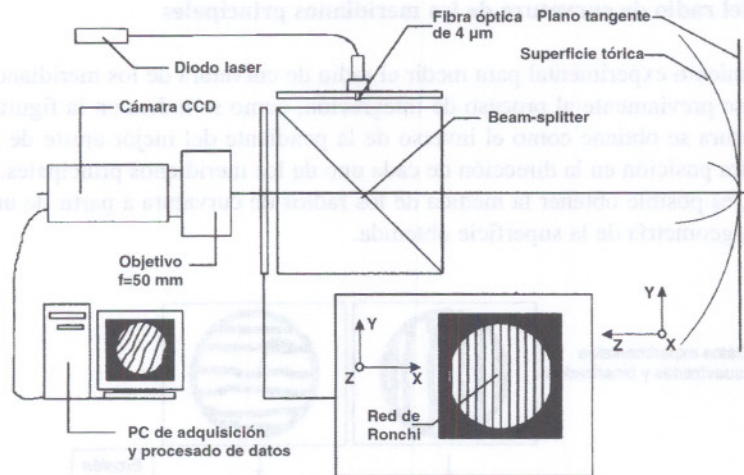


FIGURA 1. Montaje experimental utilizado para la reconstrucción de superficies mediante deflectometría Ronchi.

La luz, una vez pasada la lámina semiespejada, se refleja en la superficie tórica, vuelve a atravesar la lámina semiespejada y interacciona con la red de Ronchi situada delante de la cámara CCD, que registra el conjunto de pendientes emergentes de la red de Ronchi. Mediante la rotación de la red de Ronchi, el mismo montaje experimental permite obtener dos ronchigramas diferentes en que las líneas de la red de Ronchi estén en posiciones ortogonales entre sí.

A lo largo de este trabajo se utiliza un sistema de coordenadas con origen en la intersección de la superficie con su eje de simetría. La Z eje de coordenadas apunta hacia la red de Ronchi, el eje X es la coordenada horizontal, mientras que el eje Y es la coordenada vertical. Es de suma importancia que la superficie esté adecuadamente colocada y centrada, evitando en especial la inclinación de la superficie de manera que su eje óptico pudiera separarse eje Z definido.

## 2.2. Obtención de la perfilometría de la superficie tórica

El proceso de obtención de datos empieza con la obtención del patrón de sombras creado por la interacción de la red de Ronchi y el frente de onda a medir. Se obtiene un patrón de sombras en dos direcciones ortogonales de las líneas de la red de Ronchi, y a partir de él se reduce cada línea brillante a su línea de píxeles central por erosión, obteniendo un patrón de líneas de un píxel de anchura a partir de cada patrón de sombras. A continuación se buscan los puntos de intersecciones de los dos patrones de líneas, en los cuales disponemos de información de posición y pendiente correspondiente a dos posiciones ortogonales de la red de Ronchi. En este momento se dispone de la pendiente del frente de onda en dos direcciones ortogonales, para un conjunto de posiciones del plano en que está la red de Ronchi. Es por tanto posible realizar un trazado de rayos en sentido inverso a su propagación hasta llegar a la superficie, donde, utilizando la posición conocida de la fuente de luz, es posible calcular el vector normal a la superficie en cada uno de los puntos de intersección del rayo propagado con ella. Finalmente, se puede obtener la topografía de la superficie por integración del conjunto de vectores normales obtenido. En la figura 2 se muestra esquemáticamente el procedimiento seguido para la obtención de la perfilometría de una superficie tórica.

### 2.3. Medida del radio de curvatura de los meridianos principales

El procedimiento experimental para medir el radio de curvatura de los meridianos principales puede realizarse previamente al proceso de integración, como se indica en la figura 2, ya que el radio de curvatura se obtiene como el inverso de la pendiente del mejor ajuste de las curvas de pendiente contra posición en la dirección de cada uno de los meridianos principales. Como método alternativo, es posible obtener la medida de los radios de curvatura a partir de un ajuste tridimensional a la geometría de la superficie obtenida.

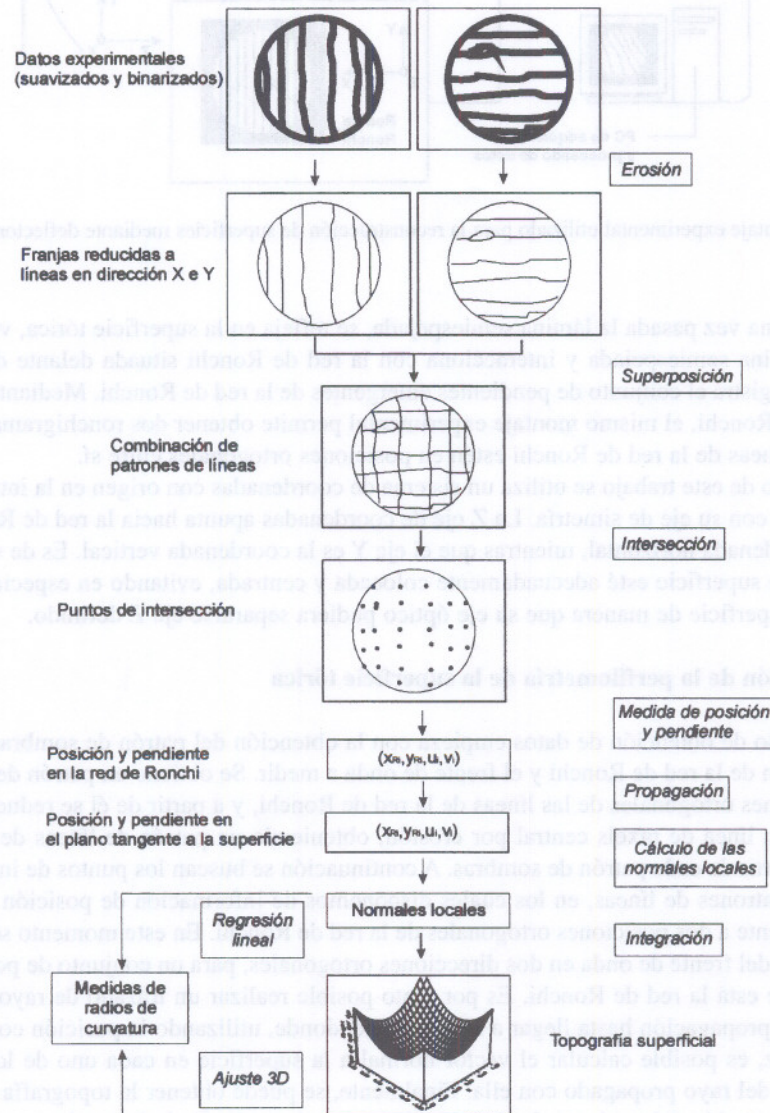


FIGURA 2. Esquema del procedimiento experimental en el que se muestran los pasos seguidos desde la captación experimental hasta la topografía de la superficie.

### 3. RESULTADOS

Para probar la estabilidad de las medidas del radio de curvatura bajo rotación de la muestra, se ha aplicado el proceso a una superficie tórica cóncava, que se ha girado alrededor del eje Z, en cuatro orientaciones distintas giradas entre sí un ángulo de  $30^\circ$ , a partir de una posición en la que los meridianos principales están en las direcciones de los ejes X e Y. Las orientaciones escogidas han sido  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $90^\circ$ , y el procedimiento se ha aplicado a dos superficies distintas, que se han caracterizado mediante un radioscopio Möller-Wedel de alta precisión. Los radios de curvatura obtenidos, que se usarán como valores de referencia, se muestran en la Tabla I.

TABLA I

Radio de curvatura de las superficies escogidas como muestras. Resultados obtenidos mediante un radioscopio Möller-Wedel de alta precisión.

|              | Superficie S1 | Superficie S2 |
|--------------|---------------|---------------|
| Meridiano M1 | 170.9 mm      | 201.4 mm      |
| Meridiano M2 | 148.8 mm      | 159.8 mm      |

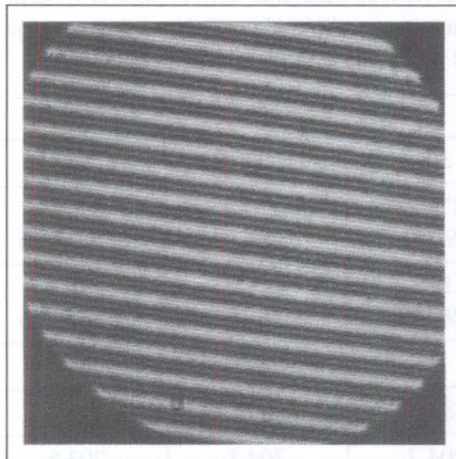


FIGURA 3a

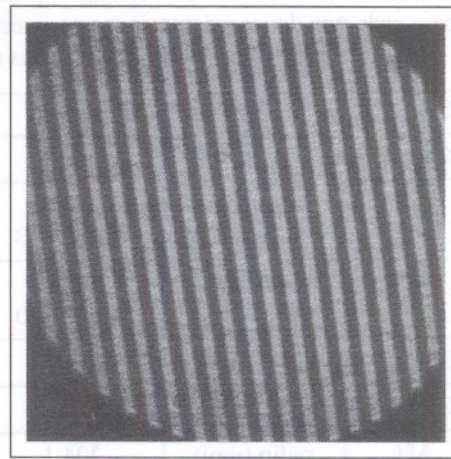


FIGURA 3b

FIGURA 3. Registro de las líneas obtenidas con la superficie tórica S1 a  $60^\circ$ : a) Líneas del test de Ronchi en dirección X; b) Líneas del test de Ronchi en dirección Y.

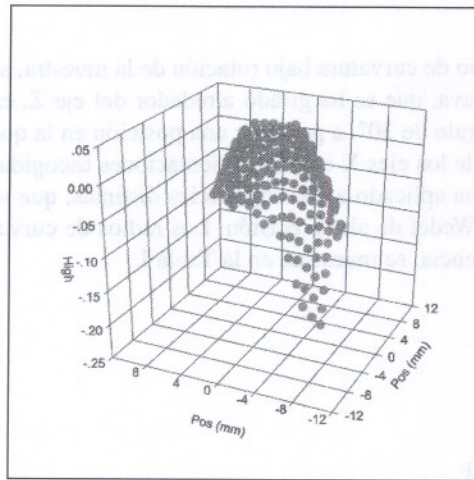


FIGURA 4a

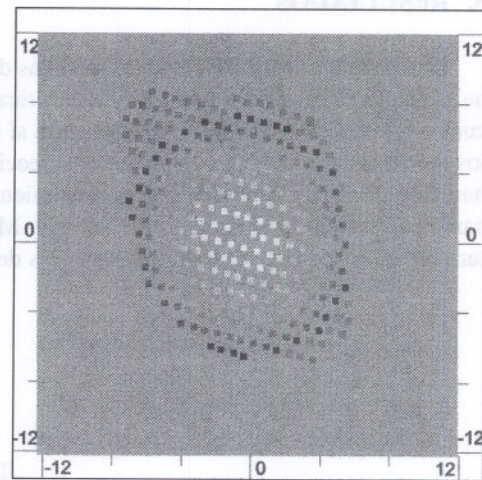


FIGURA 4b

FIGURA 4. Topografía de la superficie tórica S1 a 60°: a) Representación tridimensional; b) Representación en mapa de niveles en pseudocolor.

TABLA II

Radio de curvatura de los meridianos principales, obtenidos mediante deflectometría Ronchi, para cada una de las orientaciones propuestas. Se muestra también el coeficiente de regresión ( $r^2$ ) de la recta de mejor ajuste de las rectas de pendiente en función de la posición.

| S1 |            | 0°        | 30°       | 60°       | 90°       |
|----|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| M1 | radio (mm) | 170.3     | 170.3     | 170.2     | 170.0     |
|    | $r^2$      | 0.9999943 | 0.9999902 | 0.9999856 | 0.9999886 |
| M2 | radio (mm) | 148.9     | 149       | 149.2     | 149.5     |
|    | $r^2$      | 0.9999920 | 0.9999867 | 0.9999847 | 0.9999946 |
| S2 |            | 0°        | 30°       | 60°       | 90°       |
| M1 | radio (mm) | 204.1     | 204.2     | 204.1     | 203.8     |
|    | $r^2$      | 0.9999959 | 0.9999961 | 0.9999958 | 0.9999947 |
| M2 | radio (mm) | 160.8     | 160.8     | 161.1     | 161.1     |
|    | $r^2$      | 0.9999638 | 0.9999589 | 0.9999968 | 0.9999715 |

### Superficie S1 a 60. Meridiano 1

Rank 1 Eqn 1  $y=a+bx$   
 $r^2=0.99998578$  DF Adj  $r^2=0.99998532$  FitStdErr=9.8641076e-05 Fstat=4361349.4  
 $a=0.0007034853$   
 $b=0.0066998204$

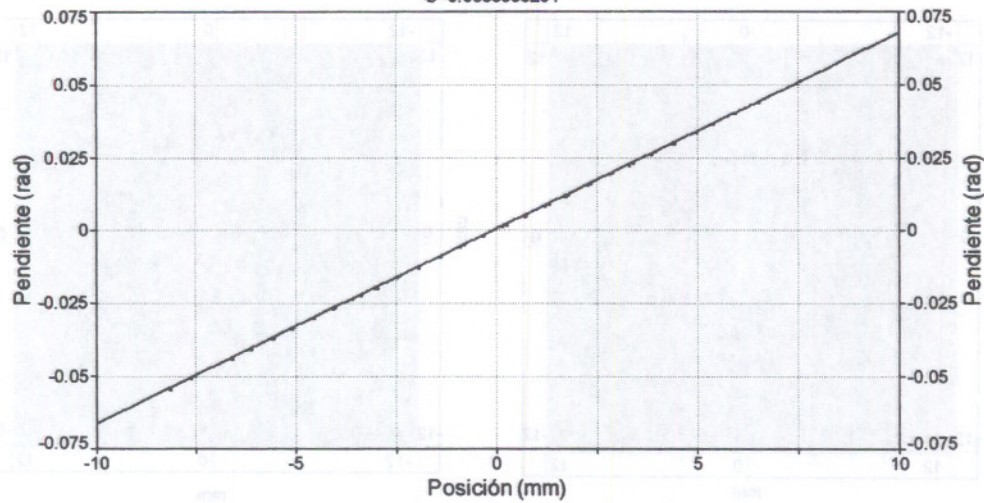


FIGURA 5a

### Superficie S1 a 60. M2

Rank 2 Eqn 1  $y=a+bx$   
 $r^2=0.99998719$  DF Adj  $r^2=0.99998677$  FitStdErr=0.00010751075 Fstat=4840165.9  
 $a=0.0046275486$   
 $b=0.0058721203$

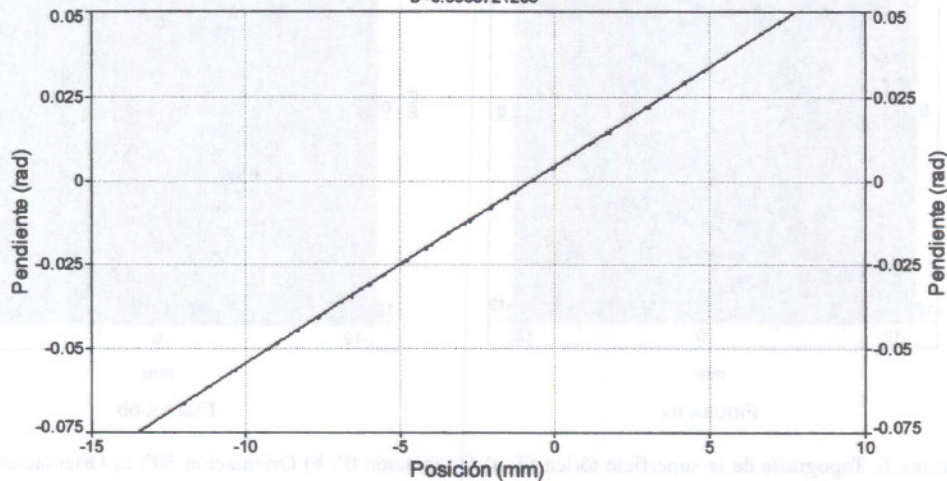


FIGURA 5b

FIGURA 5. Superficie S1 a 60°. Curvas de pendiente contra posición a lo largo de a) Meridiano M1 y b) Meridiano M2. En el eje X se representa la coordenada de posición del punto que se considera; en el eje Y se representa su pendiente en la dirección de M1.

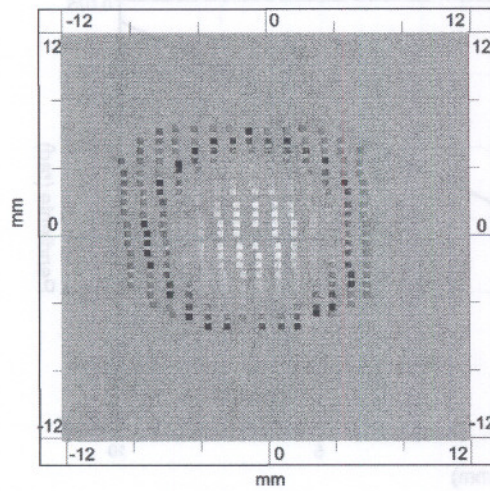


FIGURA 6a

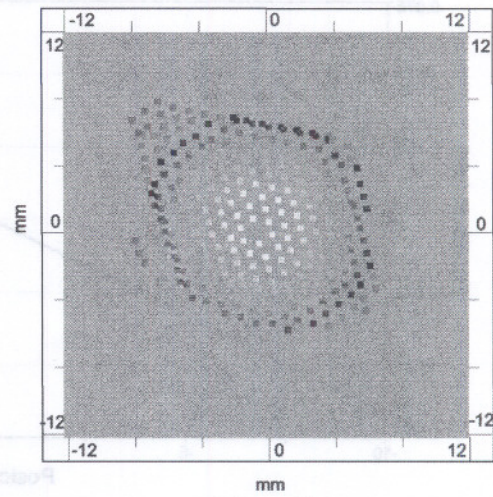


FIGURA 6b

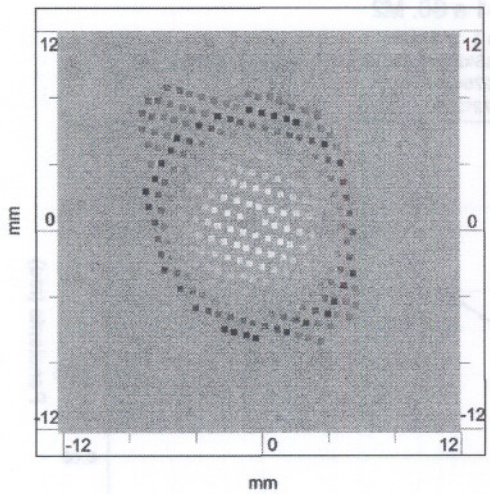


FIGURA 6a

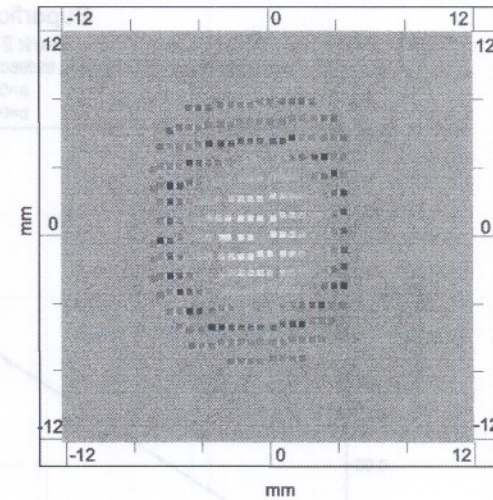


FIGURA 6b

FIGURA 6. Topografía de la superficie tórica SI: a) Orientación 0°; b) Orientación 30°; c) Orientación 60°; y d) Orientación 90°.



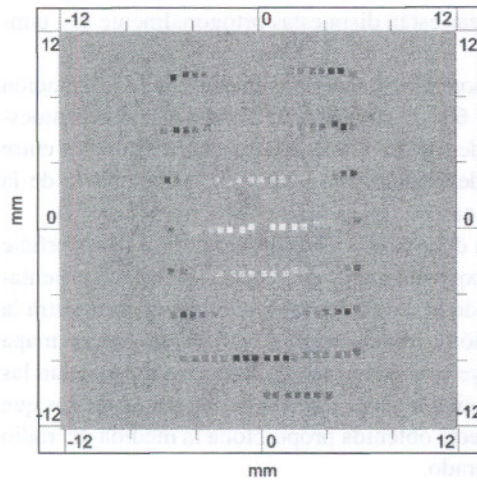


FIGURA 7a

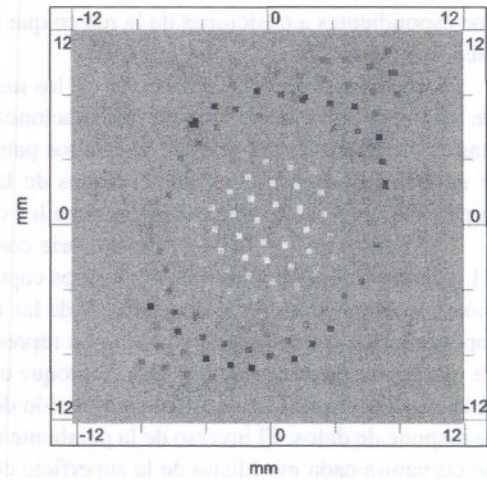


FIGURA 7b

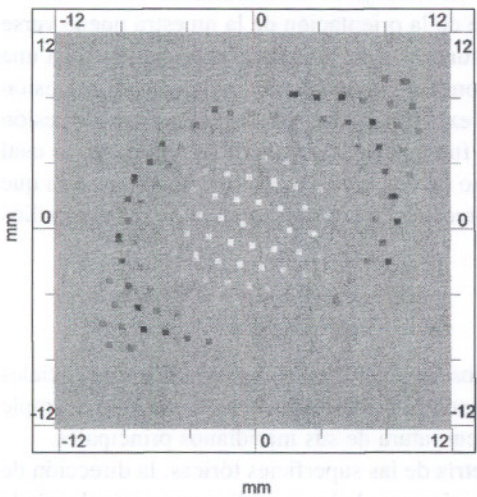


FIGURA 7a

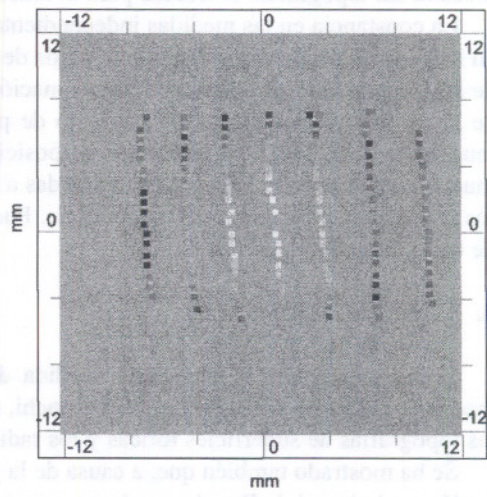


FIGURA 7b

FIGURA 7. Topografía de la superficie tórica S2: a) Orientación 0°; b) Orientación 30°; c) Orientación 60°; y d) Orientación 90°.

Para cada una de las cuatro orientaciones se han registrado los patrones de sombras con las líneas de la red de Ronchi orientadas en la dirección X y en la dirección Y. Cuando la orientación de las líneas de la red de Ronchi coincide con la de los meridianos principales (orientaciones  $0^\circ$  y  $90^\circ$ ), la única diferencia con el patrón de sombras de una muestra esférica es que el número de líneas brillantes va a ser distinto en cada uno de los meridianos debido a su distinta curvatura. Los registros correspondientes a posiciones de la red en que las líneas están dispuestas ortogonalmente son también ortogonales.

Sin embargo, cuando la dirección de los meridianos principales no coincide con la orientación de las líneas de la red de Ronchi (orientaciones  $30^\circ$  y  $60^\circ$ ), la situación es distinta a la de las muestras con simetría de revolución, ya que los patrones de franjas obtenidos no son ortogonales entre sí aunque los sean las dos orientaciones de la red de Ronchi. Sin embargo, la topografía de la superficie obtenida resulta equivalente en los cuatro casos.

Las figuras 3, 4 y 5 muestran una serie completa de medidas correspondientes a la superficie S1 girada  $60^\circ$ . La figura 3 muestra las dos capturas experimentales que corresponden a la orientación a lo largo de las direcciones X e Y de las líneas de la red de Ronchi, y la figura 4 muestra la topografía de la superficie, tanto en una representación tridimensional (fig.4a) como en un mapa de niveles en pseudocolor (fig.4b). El bloque concluye con la figura 5 en la que se representan las gráficas de los pares de pendiente en función de la posición para cada uno de los puntos en los que se dispone de datos. El inverso de la pendiente de la recta obtenida proporciona la medida del radio de curvatura cada meridiano de la superficie considerado.

La figura 6 muestra las topografías en falso color de la superficie tórica S1 para las diferentes orientaciones consideradas, incluyendo la orientación a  $60^\circ$  presentada previamente. La figura 7 muestra las topografías obtenidas para la muestra S2 en el conjunto de orientaciones descritas.

La constancia en las medidas independientemente de la orientación de la muestra puede verse en la Tabla II donde se muestran los radios de curvatura de cada meridiano medidos en cada una de las orientaciones propuestas. La información se completa mediante el coeficiente de regresión de la recta de mejor ajuste del conjunto de puntos experimentales. El coeficiente de regresión muestra la proximidad de las curvas de posición en función de la pendiente a una recta, lo cual muestra que estamos realizando las medidas a lo largo de una sección circular, que no es otra que los meridianos principales de la superficie. Puede apreciarse la constancia en la medida de radios de curvatura obtenidos.

#### 4. CONCLUSIONES

Se ha presentado la técnica de medida de radios de curvatura y topografías superficiales mediante la técnica de deflectometría Ronchi, mostrando la posibilidad de medir de forma simple las topografías de superficies tóricas y los radios de curvatura de sus meridianos principales.

Se ha mostrado también que, a causa de la geometría de las superficies tóricas, la dirección de las líneas de la red de Ronchi puede no coincidir con ninguno de los meridianos principales de la superficie, causando que las líneas de los patrones de sombras obtenidos con las líneas de la red dispuestas ortogonalmente no sean ortogonales entre sí. Cuando las líneas de la red están dispuestas en la misma dirección de los meridianos principales de la superficie, las líneas de los patrones de sombras sí resultan ortogonales.

También se ha mostrado la capacidad de la técnica de medida de determinar los radios de curvatura y las topografías superficiales independientemente de la orientación de la muestra, a pesar de las diferencias observadas entre los patrones de sombras obtenidos cuando las líneas de la red de Ronchi se alinean con los meridianos principales de la superficie o no.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ADACHI, I., *Atti. Fond. Giorgio Ronchi Contrib. Ist. Naz. Ottica* 15 461 (1960).
- [2] CORNEJO-RODRÍGUEZ, A. in *Optical Shop Testíng*, (John Wiley and Sons, Inc, New York) (1992).
- [3] WAN, D.S. and LIN, D.T. *Appl. Opt.* 29 3255 (1990).
- [4] CORNEJO-RODRÍGUEZ, A. and MALACARA, D. *Appl. Opt.* 9 1897 (1970).
- [5] HIBINO, K., FARRANT, D.I., WARD, B.K., and OREB, B.F. *Appl. Opt.* 36 6178 (1997).