



## Microtopografía laser para superficies planas

Elsa N Hogert, Mónica R Landau y  
Comisión Nacional de Energía Atómica,  
1429 Buenos Aires, Argentina  
Teléfono: 54-11-6772-7401  
Fax: 54-11-6772-7355  
[hogert@cnea.gov.ar](mailto:hogert@cnea.gov.ar), [landau@cnea.gov.ar](mailto:landau@cnea.gov.ar)

Néstor G Gaggioli  
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas  
Buenos Aires, Argentina

### Resumen

En la actualidad se observa una creciente demanda de nuevas y más precisas técnicas de control industrial no destructivas ni invasivas, que permitan la evaluación casi completamente automática del objeto a inspeccionar. Se requiere, además, que estos métodos posean una alta sensibilidad, precisión y sean capaces de hacer un análisis bajo condiciones industriales y en tiempo real. La triangulación óptica es un método que cumple con estos requisitos y resulta ser de gran utilidad en la inspección topográfica de superficies.

En el método de Triangulación Laser se ilumina con un haz láser en forma oblicua el objeto a estudiar. Una cámara CCD registra la mancha luminosa sobre la superficie del objeto, en la dirección normal. Cuando se traslada la muestra en una dirección paralela a su plano medio, la mancha luminosa sufre un desplazamiento debido a las variaciones de altura de la superficie.

En esta presentación se muestra la versión final del prototipo de Microtopógrafo por Triangulación Laser construido en el laboratorio. Se muestran algunas de las modificaciones realizadas al dispositivo experimental, disminuyendo los efectos de sombra, obteniéndose un prototipo más compacto y económico.

Se muestran los programas desarrollados para la calibración del equipo y para la adquisición y procesamiento de datos.

Se presentan los resultados obtenidos en superficies planas.

### 1. Introducción

El perfilómetro por triangulación láser<sup>(1-16)</sup> es un desarrollo que permite obtener microtopografías de superficies, para aplicarlo al análisis del estado de superficies y a la caracterización de defectos (fisura, corrosión, etc.).

En el método desarrollado en nuestro laboratorio se ilumina una superficie con un haz de luz láser bajo un dado ángulo y se captura la luz dispersada en la dirección normal. La relación entre la luz incidente y la luz capturada, puede ser vinculada fácilmente con la altura de la muestra en ese punto.

Se muestra el prototipo construido y se presentan los programas desarrollados en el laboratorio para la calibración del equipo y para la adquisición y procesamiento de datos.

## 2. Fundamento teórico

Se ilumina la muestra a analizar con un haz de luz láser bajo un cierto ángulo  $\eta$  y se observa la mancha luminosa sobre su superficie bajo un ángulo  $\theta$ . Al desplazar la superficie en  $\delta$ , varía la altura de la misma en el punto en que incide el haz en una cantidad  $Z$ , y por lo tanto se observa que la posición del spot luminoso en el punto de observación se desplaza de su posición inicial **1** a una posición **2** (Figura 1). Se puede demostrar<sup>(2,4-8)</sup> que la posición  $y'$  de la mancha en el plano imagen está relacionada con la altura  $Z$  de la superficie en ese punto, respecto de un nivel de referencia.

Si  $M$  es la magnificación del conjunto del sistema óptico y el factor de triangulación  $(\eta + \theta) > 5^\circ$ , se tiene que la relación entre la posición  $y'$  de la mancha luminosa y la altura  $Z$  está dada por:

$$y' = M \frac{Z \operatorname{sen}(\eta + \theta)}{\cos \eta} \quad (1)$$

Para lograr la mejor resolución, el factor triangulación  $(\eta + \theta)$  debe ser grande. Sin embargo, se deben tener en cuenta los problemas que aparecen debido a la sombra cuando alguno de estos ángulos es importante. Una manera de reducir las áreas de sombra es hacer cero el ángulo de incidencia o de observación.

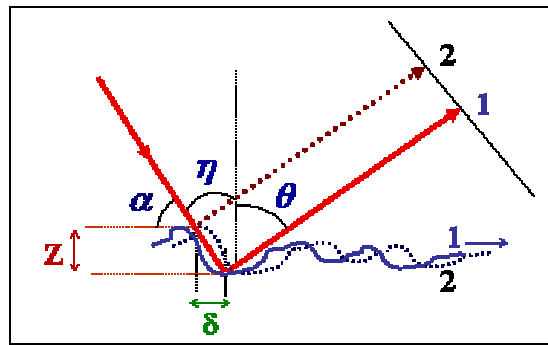


Figura 1. Geometría del sistema

Teniendo en cuenta lo anterior se tiene:

$$y' = MZ \operatorname{sen}\theta \quad (\text{para incidencia normal, } \eta = 0) \quad (2)$$

$$y' = MZ \operatorname{tg}\eta \quad (\text{para observación normal, } \theta = 0) \quad (3)$$

\* Autor a quien debe dirigirse la correspondencia

Comparando las ecuaciones (2) y (3) se puede ver que para el mismo ángulo de triangulación ( $\eta+\theta$ ) la opción de observación normal permite una mejor sensibilidad que la configuración con incidencia normal<sup>(8)</sup>.

Teniendo en cuenta la ecuación (3), se determina el conjunto de coordenadas<sup>(7-14)</sup> de la superficie del objeto en función del ángulo de incidencia  $\alpha$  del corrimiento de la mancha:

$$Z_n = y' \cdot (\text{tg } \alpha / M) \quad (4)$$

$$Y_n = n\delta \pm y' / M \quad (5)$$

donde:

$Z_n$  es la altura de la superficie en la posición de muestreo  $Y_n$ ,

$\alpha$  es el ángulo complemento del ángulo incidencia  $\eta$ ,

$y'$  es el corrimiento de la mancha brillante,

$M$  es la magnificación,

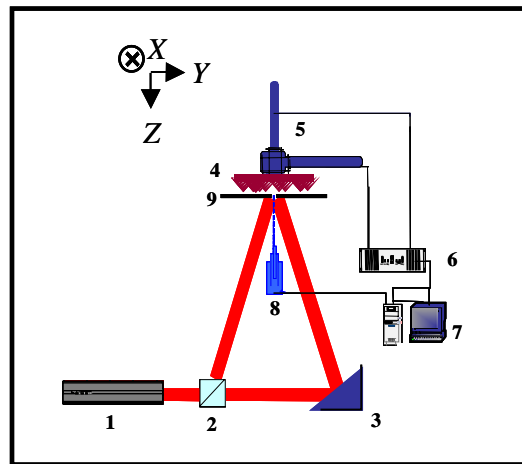
$n\delta$  es el desplazamiento realizado a la muestra, desde la posición inicial hasta la posición actual. Siendo  $n$  el número de mediciones realizadas y

$\delta$  es el paso del corrimiento de la superficie entre dos mediciones. El signo - corresponde a la situación en que la irregularidad se encuentra por encima del plano definido como cero de la superficie, mientras que el + corresponde a una irregularidad por debajo de este nivel.

$y' / M$  es el corrimiento real de la mancha luminosa, sin la magnificación  $M$

### 3. Perfilómetro

Como se busca lograr un diseño más versátil, minimizando los efectos de sombra, el modelo original fue sufriendo distintas modificaciones. El prototipo con que se trabaja actualmente se encuentra esquematizado en la figura 2.



**Figura 2. Esquema del microtopógrafo láser desarrollado en el laboratorio**

La luz del láser **1** se separa en dos haces con el divisor de haz **2**, y a través del espejo **3** se ilumina la muestra **4** simultáneamente bajo dos ángulos de incidencia opuestos. El portamuestra está montado sobre un conjunto de trasladadores **5**, que permiten desplazarlo en la dirección x-y, comandados por el controlador **6**, conectado a la PC **7**. Para poder alinear el plano medio de la superficie respecto a la dirección de traslación se coloca al portamuestra sobre un movimiento cardánico; y para la calibración del sistema, se lo ubica sobre un trasladador que lo desplaza en la dirección z. Se colocan las cuchillas **9** de manera de trabajar en la zona de difracción de Fresnel. Se tiene así mejor definido el borde de la mancha, reduciendo sustancialmente el error en la determinación de la posición del spot luminoso<sup>(15-19)</sup>. De este modo no hay necesidad de utilizar lentes para enfocar el haz, lográndose un dispositivo más compacto. Desde la PC, mediante programas desarrollados en el laboratorio, se imparten las órdenes para el funcionamiento del perfilómetro y la adquisición de las imágenes obtenidas con la cámara CCD **8**. Otro programa procesa estas fotografías, determinando el perfil de la muestra.

#### 4. Programas desarrollados en el laboratorio

Se realizaron en el laboratorio dos programas de procesamiento de imágenes para determinar el perfil de la muestra. Uno de ellos realiza la calibración de los parámetros del perfilómetro: ángulo de incidencia sobre la muestra y factor de magnificación del sistema. El otro programa determina el perfil de la superficie a estudiar. En la figura 3a se tiene una imagen tomada con la CCD de una muestra y en la figura 3b el perfil de la misma obtenido para el punto Y.

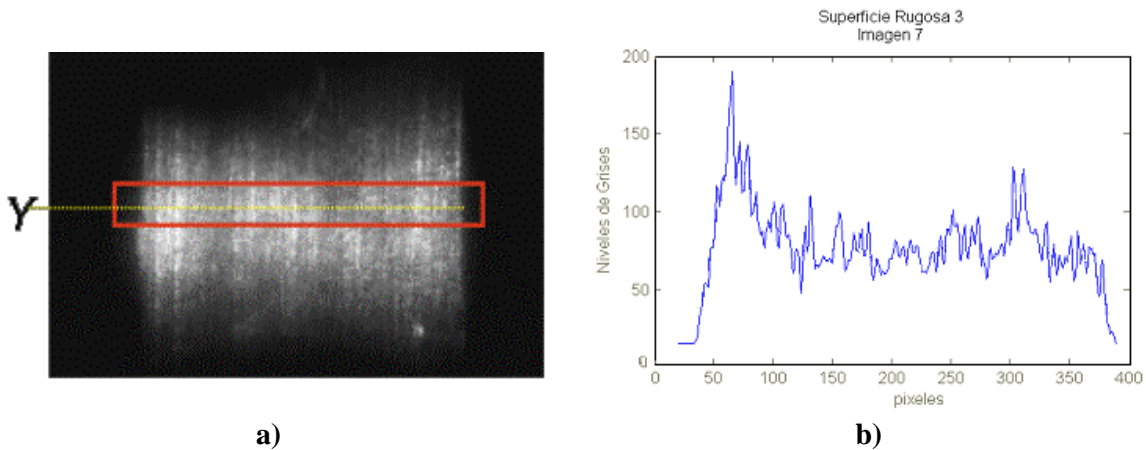
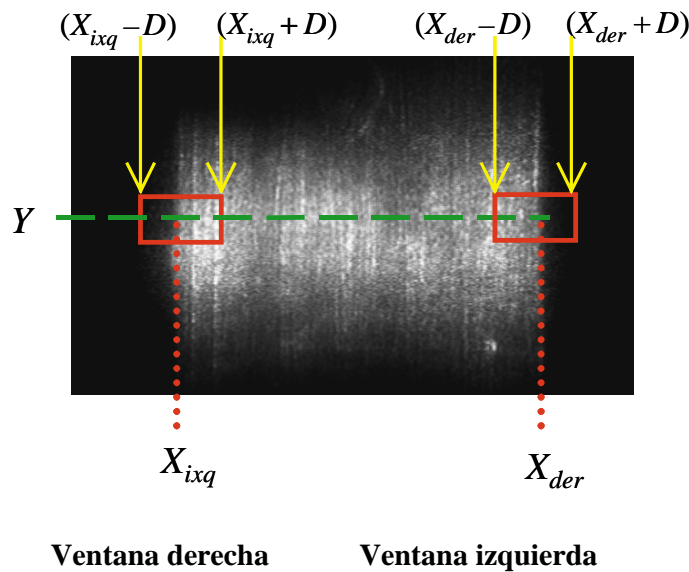


Figura 3. Perfil intensidades obtenido para Y

##### 4.1 Calibración del perfilómetro

Para calibrar el perfilómetro se desplaza un espejo (rugosidad mucho menor que la longitud de onda incidente) en la dirección Z en pasos conocidos. Se toman varias series de fotografías para hacer una estadística de los resultados obtenidos.

Dada una serie fotográfica, se toma la primera foto para recortarla, de modo de trabajar con la información más relevante. Como el objetivo es poder determinar la posición de los bordes externos de ambas manchas luminosas para obtener el perfil de la superficie, se tomarán dos ventanas de trabajo. Para elegir el tamaño de las ventanas de recorte se busca sobre la fotografía los valores de  $X$  para cada uno de los bordes de mancha: izquierda  $X_{izq}$  y derecha,  $X_{der}$ . Sobre cada uno de estos puntos se indica un margen  $D$  que debe tener en cuenta las máximas variaciones permitidas de la mancha luminosa debido a la profundidad de campo del sistema óptico. Se elige además el punto  $Y$  de la fotografía donde vamos a pararnos, y un margen de filas alrededor del mismo para promediar los valores obtenidos, evitando por ejemplo puntos brillantes que puedan confundir la medición. Una vez elegidas las ventanas de trabajo (figura 4), las restantes fotografías de esa serie serán recortadas con estas mismas ventanas.

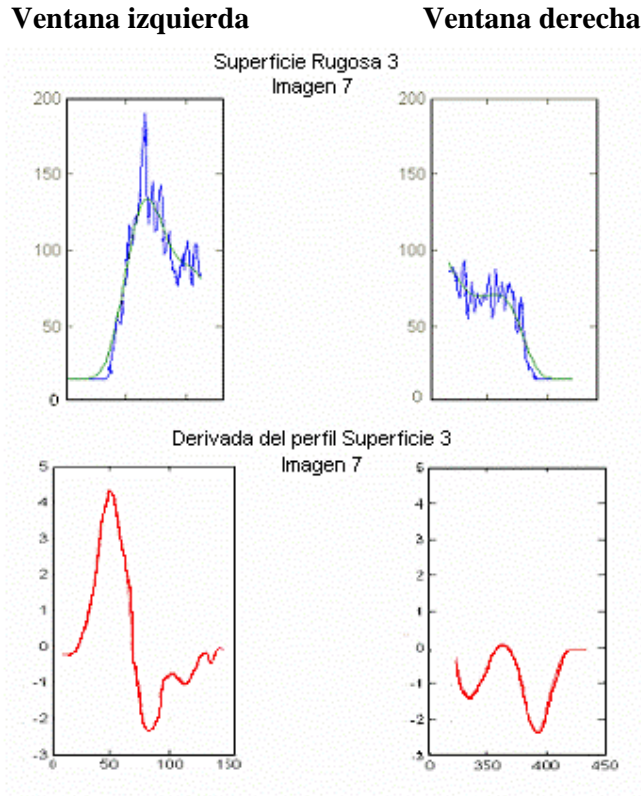


**Figura 4. Ventanas de trabajo**

Se arman entonces dos matrices de filas promedio de cada foto recortada. Luego se carga y recorta el resto de las fotos de la serie, completando así la matriz de borde derecho y la matriz de borde izquierdo.

Como pueden aparecer máximos y mínimos no deseados, se aplica una función filtro que promedia los valores de intensidad obtenidos en un cierto intervalo que se determina de acuerdo a las características de la curva de intensidad.

Luego se realiza la derivada del perfil de intensidades obtenido para cada ventana. La posición del máximo de la derivada en la ventana izquierda dará la ubicación del borde izquierdo, mientras que la posición del mínimo en la ventana derecha dará la ubicación del borde derecho (figura 5).



**Figura 5. Perfil y derivada en cada ventana de trabajo**

Por lo tanto, el paso siguiente del programa será armar la matriz de las derivadas. Luego se procede a calcular la posición de los bordes y los corrimientos que sufren al ir desplazando la muestra en pasos  $\delta$ . Se determina el factor de escala del sistema, que está dado por el producto entre la magnificación del sistema óptico  $M$  y la  $\text{tg}\alpha$ . Con esto se realiza el cálculo de los ángulos de incidencia izquierdo y derecho, promediando entre todos los valores obtenidos en cada paso.

#### **4.2 Adquisición y procesamiento de datos**

Una vez calibrado el perfilómetro, se necesita un programa que, dadas las imágenes obtenidas con la CCD, las procese para tener finalmente el perfil de la superficie a estudiar.

Se introducen los parámetros característicos de cada medición: cantidad de imágenes adquiridas, profundidad de campo del sistema, ángulos de incidencia, magnificación, factor de escala y paso del motor.

Se carga la primera foto, y análogamente a lo realizado en el programa de calibración, se eligen las ventanas que recortan la primera foto y luego se usa para las fotos siguientes. Siguiendo los pasos anteriores, se elige la función filtro, se construyen las matrices de las derivadas para cada ventana, se encuentra la posición de los bordes y se calcula el corrimiento que va sufriendo a medida que se desplaza la muestra en pasos  $\delta$ .

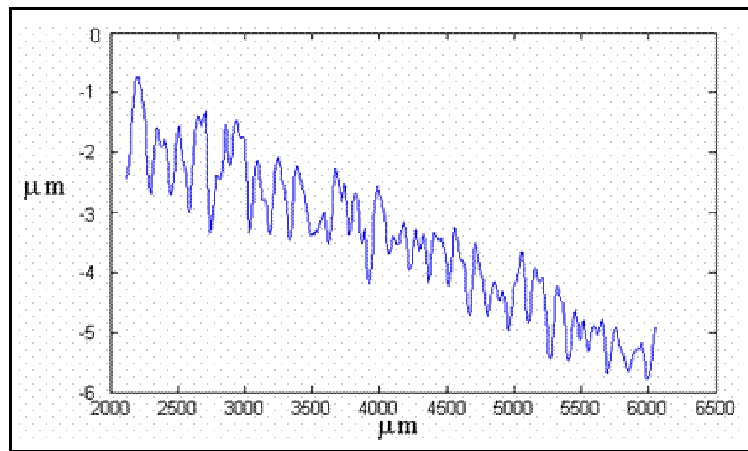
Se arman las matrices de dos columnas ( $Y_n \text{ der}$ ,  $Z_n \text{ der}$ ), y ( $Y_n \text{ izq}$ ,  $Z_n \text{ izq}$ ), para cada una de las ventanas. En cada ventana el cero en  $Y$  está definido en su margen izquierdo y el

cero de  $Z$  por la posición de los bordes de la primera imagen fotográfica. Por ello, para llevar todos los valores en  $Y$  a un mismo origen, se recalculan los valores obtenidos y se arma una única matriz.

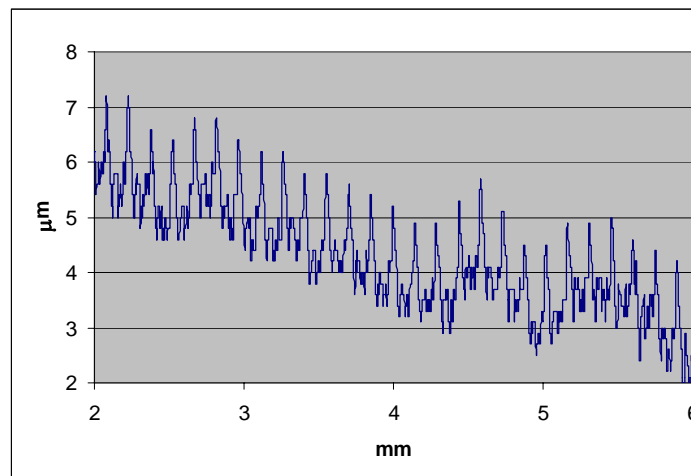
En todos los casos se evalúan los errores correspondientes.

## 5. Resultados

Se midieron diferentes superficies planas patrones con el perfilómetro óptico. Para confrontar los perfiles obtenidos se midieron estas mismas muestras con un perfilómetro mecánico. Las figuras 6 y 7 muestran el perfil de una de estas muestras, escaneada con el perfilómetro óptico en el primer caso, y por el mecánico en el segundo. Se observa una buena concordancia entre ambos perfiles.



**Figura 6. Perfil de una superficie patrón adquirida con el perfilómetro óptico**



**Figura 7. Perfil de una superficie patrón adquirida con el perfilómetro mecánico**

## 6. Conclusiones

Se mostró la construcción del dispositivo experimental para el perfilómetro óptico.

Se presentaron los programas desarrollados en el laboratorio para el procesado de imágenes para determinar el perfil de la muestra. Uno de ellos realiza la calibración de los parámetros del perfilómetro. El otro programa determina el perfil de la superficie a estudiar.

Se mostró el perfil obtenido para una muestra plana y su comparación con aquel tomado con un rugosímetro mecánico. Se comprobó una buena correspondencia entre ambos perfiles.

## Agradecimientos

Agradecemos al Licenciado Rodolfo Aparicio por su asesoramiento para el manejo del MATLAB para la confección de los programas.

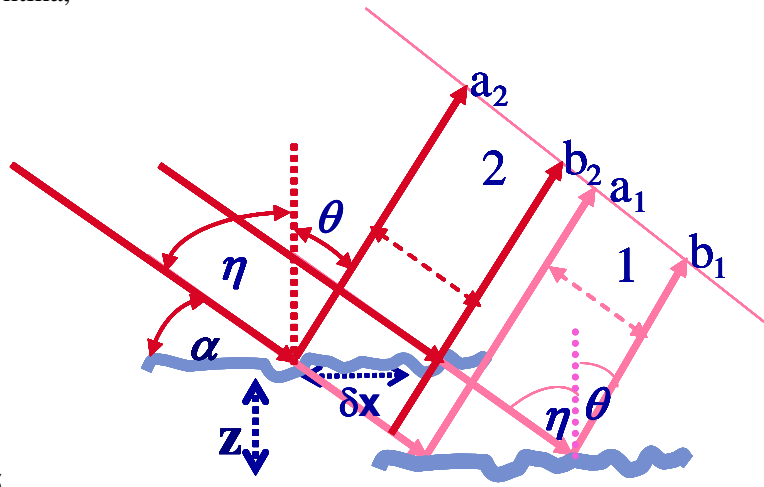
## Referencias

1. Arecchi, F.T., Bertani D. and Ciliberto. 'A fast Versatile Optical Profilometer'. *Op.Comm.* 31, 3, (1979).
2. Jalkio, J.A., Bolkom, J.E. and Case, S.K. 'High resolution triangulation based range sensing form metrology'. *SPIE* 814 (1987).
3. Doyle, J.L. et al.; Informe Técnico 1991, Quest Integrated Inc., USA
4. Costa, M.F., 'System of Optical Non Contact Microtopography', *Appl. Opt.*, 32, 4860-4863 (1993).
5. Costa, M.F., Almeida, J, 'Application of optical triangulation of microtopographic inspection of rough surfaces', *ISLOE 93 Proceedings* (1993).
6. W.G.Clark et al., *Mat. Eval.* 997, Sep. (1993).
7. Costa, M.F., Almeida, J. 'An Optical sensor for microtopographic inspection of rough surfaces', *Proc. Int. Conf. on Optics '92: From Galileo to Optoelectronics*, 663-668, World Scientific (1992).
8. Stanley; K., 'Nondestructive Testing Handbook' Section 3, American Society for Nondestructive Testing, New York, (1995).
9. McCullough, R., Bondurant, W. P. and Doyle, J.L. 'Laser-Optical Triangulation Systems Provide New Capabilities for Remote Inspection of Interior Surfaces'. *Mat. Eval.* 8 Dic. (1995).
10. OPMEC Servicios Ópticos e Mecánicos Comercial Ltda. (Brasil), Informe sobre Levantamentos de Produção e Rendimiento de Maquinas de Papeis, (1995).
11. Costa, M.F., "Surface Inspection by an optical triangulation method". *Opt.Eng.* 35(9) (1996).
12. Jarvis, G. et al, Informe del Grupo COG, Ontario Canadá.
13. Doyle, J.L. et al.; *Mat. Eval.* december, 1338(1995).
14. Hogert, E.N. et al., Informe Técnico LOL, ENDE , CNEA 01/99 (1999).
15. Hogert, E.N. et al., Informe Técnico IN-13-E-010-IM/03 ENDE-CNEA (2003).
16. Costa, M.F 'Microtopografía Laser', Curso Euroform en Técnicas Ópticas(1993).
17. E. Hogert, M. Landau and N. Gaggioli, 'Construcción de un Microtopógrafo Laser para la Caracterización No Destructiva de Superficies', V CORENDE, Neuquén,



Argentina,

Nov



2005.