

MEDICION DE LA RUGOSIDAD DE SUPERFICIES POR MEDIO DE LA CORRELACION DIGITAL DE SPECKLES.

M.A.Rebollo.

Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Paseo Colón 850, 1063 Buenos Aires.

E.N.Hogert, M.Landau, N.G. Gaggioli.

Instituto de Ensayos No Destructivos, Comisión Nacional de Energía Atómica,

Av. Libertador 8250, 1429 Buenos Aires.

Se ha desarrollado un instrumento para la medición óptica de la rugosidad de superficies. Su funcionamiento está basado en el método de correlación angular de *speckles*. Las figuras de *speckle* registradas con un arreglo lineal de detectores, son procesadas por medio de un algoritmo de correlación a partir del cual se obtiene la rugosidad en tiempo real. Los errores de posicionamiento se corrigen calculando el máximo valor de la correlación de las figuras de *speckle*. Se efectuaron mediciones sobre muestras con diferentes rugosidades comparándose los resultados con los obtenidos por medios electromecánicos.

INTRODUCCION

En la medición de rugosidad de piezas es frecuente el uso de instrumentos electromecánicos. Estos instrumentos hacen uso, en su mayoría, de palpadores puestos en contacto con la superficie, lo que produce un deterioro de la misma. En la actualidad hay una creciente demanda de calidad en la terminación de los productos y una mayor automatización de los procesos de producción, lo que hace necesario pensar en nuevas técnicas que prescindan del contacto con las superficies a medir. En esta situación los métodos ópticos se convierten en la mejor opción.

En este trabajo, se aplica el método de correlación de *speckles*. Este método utiliza la dependencia de la rugosidad con el grado de correlación entre dos figuras de *speckles*, generadas en condiciones ligeramente diferentes variando el ángulo de incidencia.

El instrumento desarrollado se basa en el método de Léger et al.^{1,2}. Se hará una revisión de los conceptos teóricos fundamentales introduciendo la relación entre el parámetro de correlación y la medida de la rugosidad. Se describe el instrumento óptico utilizado y el procesamiento de las figuras de *speckle* digitalizadas.

TEORIA

Sea una superficie rugosa G en la que la distribución de alturas $\xi(x)$ es de tipo gaussiana con varianza característica σ (rugosidad), donde "x" es la coordenada en el plano de la superficie.

Al iluminar G con una onda plana coherente, bajo un ángulo de incidencia θ_1 , la distribución de amplitudes observada en la dirección de reflexión θ_2 , está dada por⁽³⁾:

$$A(\theta_2) = \frac{A_0}{2L} \int \exp[i V_x x + V_z \xi(x)] dx \quad (1)$$

donde:

$$V_x = \frac{2\pi}{\lambda} (\text{sen } \theta_1 - \text{sen } \theta_2)$$

$$V_z = - \frac{2\pi}{\lambda} (\text{cos } \theta_1 - \text{cos } \theta_2)$$

2L: tamaño de la pupila ilumina sobre la superficie

A₀: Amplitud de la onda incidente.

Si ahora se efectúa una rotación de la muestra rugosa en un pequeño ángulo $\delta\theta$ y se observa la distribución de amplitudes $A(\theta_2 + \delta\theta)$ en la nueva dirección de reflexión, se puede demostrar⁽¹⁾ que la correlación de las amplitudes correspondientes a las dos direcciones sucesivas da como resultado:

$$\gamma(\delta\theta_2) = \frac{\langle A(\theta_2) A^*(\theta_2 + \delta\theta_2) \rangle}{\langle A(\theta_2) A^*(\theta_2) \rangle} =$$

$$= \text{sinc}(\Delta V_x L) \exp\left(-\frac{\sigma^2}{2} \Delta V_z^2\right) \quad (2)$$

con $\Delta V_x = 2\pi/\lambda (\delta\theta_1 \cos \theta_1 - \delta\theta_2 \cos \theta_2)$

Se elige la condición $\Delta V_x = 0$ de tal manera que $\text{sinc}(\Delta V_x L) = 1$, entonces

$$\delta\theta_2 = \delta\theta_1 \frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_2}$$

y

$$\begin{aligned} \Delta V_z &= \frac{2\pi}{\lambda} (\delta\theta_1 \sin \theta_1 + \delta\theta_2 \sin \theta_2) = \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} \delta\theta_1 \frac{\sin(\theta_1 + \theta_2)}{\cos \theta_2} \end{aligned}$$

luego

$$\gamma(\delta\theta_2) = \exp\left(-\frac{\sigma^2}{2} \Delta V_z^2\right)$$

Para el caso en que se observa la figura de *speckle* en la dirección especular (Fig.1) $\theta_1 = \theta_2 = \theta$ y $\delta\theta_1 = \delta\theta_2 = \delta\theta$ entonces:

$$\begin{aligned} \gamma_A(\delta\theta) &= \exp\left[-\frac{\sigma^2}{2} \left(\frac{4\pi}{\lambda} \delta\theta \sin \theta\right)^2\right] = \\ &= \text{correlación de amplitudes} \end{aligned}$$

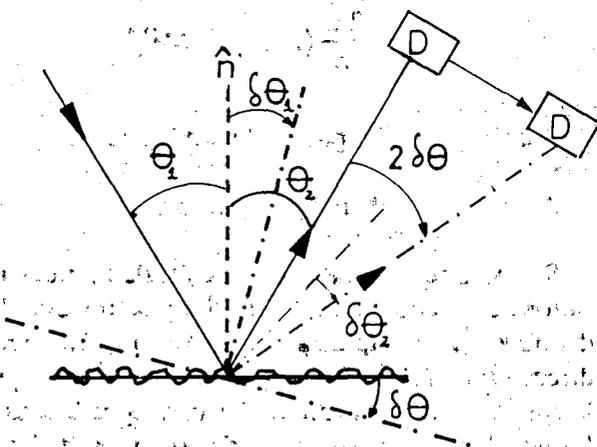


Fig. 1: Geometría del proceso óptico

Esta expresión muestra que la correlación de amplitudes está relacionada con la rugosidad σ . El resto de los parámetros están relacionados con la geometría del sistema.

En nuestro caso se realiza un registro de las intensidades, por lo que es necesario considerar la correlación de las intensidades en las dos posiciones, esto es:

$$\begin{aligned} \gamma_I(\delta\theta) &= \frac{\langle I(\theta) I(\theta + \delta\theta) \rangle - \langle I(\theta) \rangle \langle I(\theta + \delta\theta) \rangle}{\sqrt{(\langle I^2(\theta) \rangle - \langle I(\theta) \rangle^2)(\langle I^2(\theta + \delta\theta) \rangle - \langle I(\theta + \delta\theta) \rangle^2)}} = \\ &= \text{correlación de intensidades} \end{aligned}$$

con $I(\theta) = \langle A(\theta) \cdot A^*(\theta)^* \rangle$ y $I(\theta + \delta\theta) = \langle A(\theta + \delta\theta) \cdot A^*(\theta + \delta\theta)^* \rangle$ y según muestra Legér:

$$\gamma_I(\delta\theta) = \gamma_A^2(\delta\theta)$$

con lo que

$$\gamma_I(\delta\theta) = \exp[-\sigma^2(4\pi/\lambda \sin \theta \cdot \delta\theta)^2] \quad (3)$$

Esta es la expresión de la cual obtenemos nuestras mediciones de rugosidad.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Sobre la base de la teoría desarrollada en el capítulo anterior se construyó el dispositivo experimental.

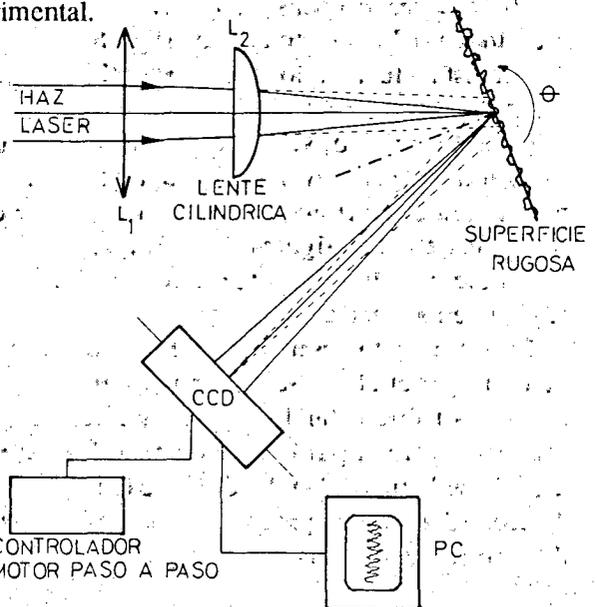


Figura 2: Montaje del dispositivo.

Un haz láser de He-Ne (Fig.2) incide sobre la superficie rugosa, a través de un sistema óptico compuesto por dos lentes: la primera, L_1 , una lente esférica que determina el plano de Fourier sobre el detector; la segunda, L_2 , una lente cilíndrica cuyo

foco se halla sobre la superficie rugosa. Esta última lente produce una deformación de los granos de *speckle*, los que al ser alargados en el sentido transversal del detector, hacen que el sistema sea insensible a cualquier desplazamiento en esta dirección.

Una cámara CCD con arreglo lineal de 512 detectores registra la intensidad del *speckle* en el plano de Fourier de la lente L_1 .

La muestra rugosa se halla montada sobre un goniómetro, y cada rotación de ésta, es acompañada por un desplazamiento del detector efectuado con un motor de pasos.

El monitor de una computadora personal muestra la intensidad de las sucesivas figuras de *speckle* (Fig.3) y estos registros son almacenados para cada posición $\delta\theta$ de la muestra.

Posteriormente, a través de un algoritmo de computación, desarrollado en este laboratorio, se efectúa la correlación de las sucesivas distribuciones del *speckle* y se encuentra el máximo de dicha correlación, compensando así el error que puede introducir el reposicionamiento del detector. Luego se calcula a partir de la ecuación (3) la rugosidad de la muestra. La Fig. 4 muestra los resultados de estas operaciones tal cual se ven en el monitor de la computadora.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

La Tabla 1 muestra los resultados obtenidos, donde R_r es la rugosidad de las muestras medida con un rugosímetro Hommel - Werke, y σ es la rugosidad calculada por el método de correlación de *speckle*. Se puede ver que no existen diferencias significativas entre ambos resultados.

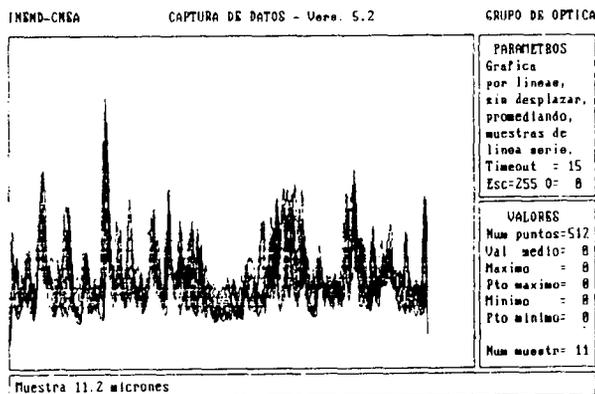


Figura 3: Pantalla de la computadora que muestra la superposición de los registros de intensidad.

σ ($\pm 4\%$) μm	R_r ($\pm 10\%$) μm
4,6	4,9
4,1	3,9
11,4	12,0

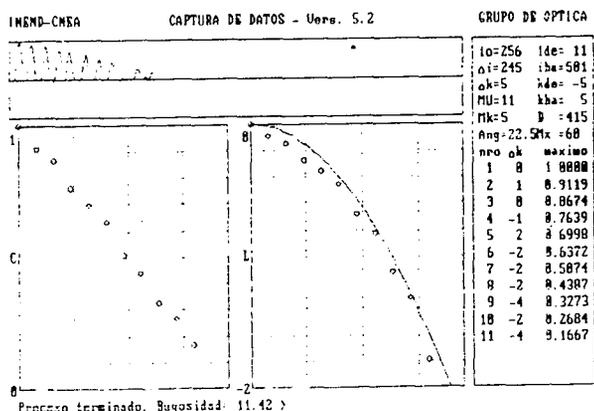


Figura 4: Pantalla de la computadora que muestra el cálculo de las sucesivas correlaciones, los valores máximos, los datos experimentales y el valor de la rugosidad en μm .

Tabla 1: Resultados obtenidos, donde σ es la rugosidad por el método de correlación de *speckles* y R_r es la medida con un rugosímetro mecánico.

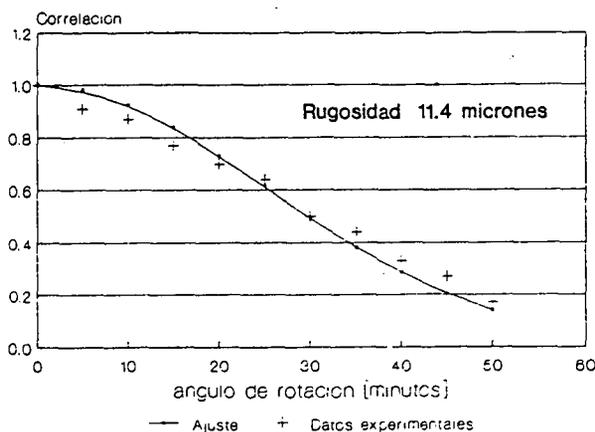


Fig. 5: Curvas gaussianas teóricas y datos experimentales.

En la Fig. 5 se trazó la curva gaussiana teórica con el parámetro σ calculado a partir de los datos experimentales. El apartamiento de los datos experimentales se debe a que las muestras no tienen un despulido óptimo de tipo gaussiano.

Se puede concluir que se ha desarrollado una nueva técnica de correlación de *speckle* que permite determinar la rugosidad de una muestra en tiempo real.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la valiosa colaboración del Lic. C.R. García en el desarrollo del proceso de adquisición de datos y el software.

REFERENCIAS

- 1) D.Leger; "*Deux methodes de mesure de rugosités par correlation de speckles*"; Tesis de Doctorado Universidad de Paris-Sud, Francia 1976.
- 2) D.Leger, E.Mathieu and P.C. Perrin; Appl. Opt. 14, 872 (1975)
- 3) P.Beckmann and A. Spizzichino; "*The scattering of electromagnetic waves from rough surface*"; Pergamon Press, N.Y. (1963).