

# MODELO TEORICO DE LA VARIACION DE LA RUGOSIDAD DE UNA SUPERFICIE EROSIONADA

M. F. Ruiz Gale, E. N. Hogert, M. R. Landau y N. G. Gaggioli

Laboratorio de Optica y Laser - IAMEND - ENDE- CNEA  
 Av. del Libertador 8250, Buenos Aires, ARGENTINA.  
 e-mail gaggioli@cnea.gov.ar

En el presente trabajo se describe un modelo teórico de superficie que tiene en cuenta el porcentaje de área electroerosionada.

Se mide la rugosidad de la superficie erosionada por medio de la técnica de correlación de speckle y utilizando un rugosímetro mecánico.

Se comparan los resultados teóricos obtenido por simulación numérica con los datos experimentales. Se analiza el rango de validez de este modelo y se discute su aplicación para la obtención de parámetros que caractericen el grado de erosión.

Se muestra que existe una buena concordancia entre los resultados experimentales y teóricos.

In this work we describe a theoretical model of surface having into account the corroded area.

We measure the eroded surface roughness by the speckle correlation method and using a mechanic rugosimeter.

We compare the theoretical results obtained by a numerical simulation using the experimental data. We analyze the validity range of this model and discuss its application for obtaining the parameter characterizing the erosion degree.

We show that good agreement exist between the experimental and theoretical results.

## I. INTRODUCCIÓN

La importancia de la detección de la erosión radica en que las anomalías en los materiales con frecuencia producen fallas imprevistas en diferentes clases de componentes mecánicos. Para estudiar este problema y prevenir accidentes, se utilizan diversas técnicas, en particular las técnicas ópticas de Ensayos No Destructivos (END).

Uno de los problemas que hay que enfrentar cuando se aborda el estudio de la rugosidad de un material erosionado es que muchos de los parámetros definidos, como la rugosidad  $s$  y la longitud de correlación  $T$ , están basados en la hipótesis de una distribución de alturas gaussianas de la superficie. Esto último es ampliamente utilizado por las técnicas ópticas que se basan en la teoría de Beckman<sup>(1)</sup> de la dispersión de ondas electromagnéticas por una superficie rugosa.

La suposición de que la superficie es gaussiana cuando en realidad no es así, es una buena aproximación en primera instancia. Sin embargo, si se le hacen algunas correcciones a esta hipótesis es posible obtener una mayor y mejor información acerca de la superficie.

En este trabajo se presenta un modelo de superficie que se aparta de la distribución de alturas gaussianas y que tiene en cuenta el estado de erosión de ella.

Para comprobar la validez del modelo propuesto para superficies erosionadas se simuló este daño sometiendo una muestra metálica a un proceso de electroerosión. Este tratamiento fue elegido debido a la morfología característica que se obtiene con ello y a la posibilidad de obtener una superficie erosionada de manera controlada.

## II. Estudio Teórico y Principio del Método

### Cálculo de la rugosidad

De manera general se define la rugosidad de una superficie como la dispersión cuadrática media de las

alturas. Es decir, si la superficie tiene una distribución aleatoria de alturas  $z(\mathbf{x})$  con una densidad de probabilidad  $F(z)$  y se considera un proceso estacionario, la rugosidad es

$$s = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} z^2 F(z) dz - \left( \int_{-\infty}^{\infty} z F(z) dz \right)^2} \quad (1)$$

$$= \sqrt{\langle z^2 \rangle - \langle z \rangle^2}$$

Para determinar  $s$  se necesita conocer la función densidad de probabilidad  $F(z)$  de la altura  $z(\mathbf{x})$  por lo que hay que realizar ciertas suposiciones acerca de la superficie. A fin de simplificar los cálculos y sin perder generalidad, se considera un modelo unidimensional.

Para representar una superficie electroerosionada se supone que la superficie original, sin atacar, está descrita por la función aleatoria  $z_1(\mathbf{x})$  que posee una distribución gaussiana  $N_1(s_1, 0)$  con rugosidad  $s_1$  y valor medio cero. Al atacar a la superficie, ya sea con electroerosión u otro método, se generan pozos de profundidad  $p=2h$  cuya base presenta otra distribución aleatoria de alturas,  $z_2(\mathbf{x})$  (altura de la superficie en el punto  $\mathbf{x}$  dentro del pozo); también se supone que  $z_2(\mathbf{x})$  está asociada con una estadística gaussiana,  $N_2(s_2, 0)$  (ver Figura 1).

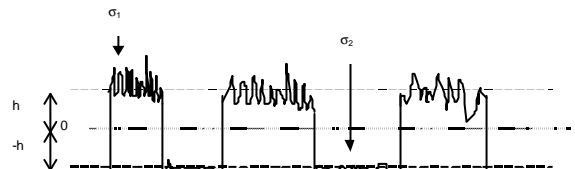


Figura 1. Representación esquemática de la superficie.

Eligiendo el eje  $x$  tal que se sitúe en la altura media del pozo, se definen las siguientes variables aleatorias:  $z_0(\mathbf{x})$ , puede tomar el valor  $-h$  o  $h$  según se esté dentro o fuera del pozo y está relacionada con la proporción de

superficie erosionada,  $s$ .

$z_1(\mathbf{x})$ , es la altura en el punto  $\mathbf{x}$  de la superficie sin electroerosionar. La distribución de alturas es gaussiana,  $N_1(s_1, \mathbf{0})$ .

$z_2(\mathbf{x})$ , es la altura del punto  $\mathbf{x}$  en el fondo del pozo generado por la chispa. Distribución de alturas gaussiana,  $N_2(s_2, \mathbf{0})$ .

De esta manera, la altura en un punto  $\mathbf{x}$  cualquiera de la superficie se puede escribir como

$$z(\mathbf{x}) = z_0(\mathbf{x}) + z_1(\mathbf{x}) \times d_{z_0, h} + z_2(\mathbf{x}) \times d_{z_0, -h} \quad (2)$$

donde  $d_{ij}$  es la delta de Kronecker.

Definiendo  $s$  como la fracción de superficie erosionada, ( $\mathbf{0} \leq s \leq 1$ ), la probabilidad asociada a la variable  $z_0$  es

$$p(z_0) = \begin{cases} (1-s) \delta(z_0 - h) \\ s \delta(z_0 - -h) \\ \delta(z_0 - 0) \end{cases} \quad (3)$$

Suponiendo, además, que  $z_0(\mathbf{x})$ ,  $z_1(\mathbf{x})$  y  $z_2(\mathbf{x})$  son independientes, la función densidad de probabilidad  $F(z)$  se puede escribir como

$$F(z) = p(z_0) N_1(s_1, \mathbf{0}) N_2(s_2, \mathbf{0}) \quad (4)$$

Reemplazando las expresiones (2) y (4) en la ecuación (1), se obtiene

$$s^2 = s_0^2 + (1-s) s_1^2 + s s_2^2 \quad (5)$$

donde se llamó  $s_0^2 = 4h^2 s (1-s)$ , que es la rugosidad en el caso de existir solamente  $z_0$ .

Si se define la profundidad del pozo  $p=2h$  se puede escribir la rugosidad total en función de la proporción de área electroerosionada como

$$s^2 = -p^2 s^2 + [p^2 - s_1^2 + s_2^2] s + s_1^2 \quad (6)$$

El modelo de superficie electroerosionada tratado aquí se puede aplicar también al estudio de la intensidad media de la luz dispersada por este tipo de superficies. Para ello se calcula la intensidad media dispersada,  $\langle \mathbf{E}_2 \mathbf{E}_2^* \rangle$ , donde  $\mathbf{E}_2$  es el campo dispersado y  $*$  significa complejo conjugado. Este desarrollo ya fue realizado para una superficie gaussiana<sup>(1)</sup>. En este trabajo se efectúan ciertas modificaciones para adaptarlo al presente problema.

Luego, partiendo de Beckmann<sup>(1)</sup> se tiene la siguiente expresión

$$\langle \mathbf{E}_2 \mathbf{E}_2^* \rangle = |\mathbf{K}_{2R}|^2 \hat{\mathbf{0}}_L^L \hat{\mathbf{0}}_L^L e^{j\mathbf{v}_x \cdot (\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2)} \langle e^{j\mathbf{v}_x \cdot [z(\mathbf{x}_1) - z(\mathbf{x}_2)]} \rangle d\mathbf{x}_1 d\mathbf{x}_2 \quad (7)$$

donde  $\mathbf{v} = (\mathbf{v}_x, \mathbf{v}_z) = [\mathbf{k}(\sin q_1 - \sin q_2), -\mathbf{k}(\cos q_1 + \cos q_2)]$   $q_1$  es el ángulo de incidencia y  $q_2$  el ángulo observación, ambos medidos desde la normal a la superficie media.

Para calcular el valor medio del segundo miembro de la Ec. (7) se utilizan las nuevas variables aleatorias definidas más arriba, por lo que la función característica bidimensional resulta

$$\begin{aligned} c_2(\mathbf{t}_1, \mathbf{t}_2) &= \langle e^{i\mathbf{t}_1 \cdot z_1 + i\mathbf{t}_2 \cdot z_2} \rangle \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p_2(z_1, z_2) e^{j\mathbf{t}_1 \cdot z_1 + j\mathbf{t}_2 \cdot z_2} dz_1 dz_2 \end{aligned} \quad (8)$$

con

$$z_1(\mathbf{x}_1) = z_0(\mathbf{x}_1) + z_1(\mathbf{x}_1) \times d_{z_0, h} + z_2(\mathbf{x}_1) \times d_{z_0, -h} \quad (9)$$

$$z_2(\mathbf{x}_2) = z_0(\mathbf{x}_2) + z_1(\mathbf{x}_2) \times d_{z_0, h} + z_2(\mathbf{x}_2) \times d_{z_0, -h} \quad (10)$$

Habíamos supuesto que  $z_0$ ,  $z_1$  y  $z_2$  son independientes, no así  $\mathbf{x}_1$  y  $\mathbf{x}_2$ , entonces, se puede escribir la probabilidad conjunta como

$$F_2(z_1, z_2) = p(z_0(\mathbf{x}_1), z_0(\mathbf{x}_2)) \cdot N_1[z_1(\mathbf{x}_1), z_1(\mathbf{x}_2)] \cdot N_2[z_2(\mathbf{x}_1), z_2(\mathbf{x}_2)] \quad (11)$$

donde  $N_1[z_1(\mathbf{x}_1), z_1(\mathbf{x}_2)]$  y  $N_2[z_2(\mathbf{x}_1), z_2(\mathbf{x}_2)]$  son probabilidades conjuntas gaussianas y  $p$  es

$$p(z_0(\mathbf{x}_1), z_0(\mathbf{x}_2)) = \begin{cases} (1-s)^2 \delta(z_0(\mathbf{x}_1) = z_0(\mathbf{x}_2) = h) \\ s^2 \delta(z_0(\mathbf{x}_1) = z_0(\mathbf{x}_2) = -h) \\ (1-s)s \delta(z_0(\mathbf{x}_1) = h, z_0(\mathbf{x}_2) = -h) \\ (1-s)s \delta(z_0(\mathbf{x}_1) = -h, z_0(\mathbf{x}_2) = h) \end{cases} \quad (12)$$

Entonces, la ecuación (8) queda

$$\begin{aligned} \langle e^{j\mathbf{v}_x \cdot [z(\mathbf{x}_1) - z(\mathbf{x}_2)]} \rangle &= (1-s)^2 C_{2,1}(\mathbf{v}_z, -\mathbf{v}_z) + s^2 C_{2,2}(\mathbf{v}_z, -\mathbf{v}_z) \\ &\quad - \frac{s_1^2 \mathbf{v}_z^2}{2} - \frac{s_2^2 \mathbf{v}_z^2}{2} \cos(2h\mathbf{v}_z) \\ &\quad + 2(1-s) s e \end{aligned} \quad (13)$$

Reemplazando (13) en la ecuación (7) y operando se llega a

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{I} \rangle &= (1-s)^2 \langle \mathbf{I}_1 \rangle + s^2 \langle \mathbf{I}_2 \rangle \\ &\quad + |\mathbf{K}_{2R}|^2 8L^2 (1-s) s e - \frac{s_1^2 \mathbf{v}_z^2}{2} - \frac{s_2^2 \mathbf{v}_z^2}{2} \cos(2h\mathbf{v}_z) \text{sinc}^2(\mathbf{v}_x L) \end{aligned} \quad (14)$$

donde

$$\langle \mathbf{I}_{1(2)} \rangle = |\mathbf{K}_{2R}|^2 \hat{\mathbf{0}}_L^L \hat{\mathbf{0}}_L^L e^{j\mathbf{v}_x \cdot (\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2)} C_{2,1(2)}(\mathbf{v}_z, -\mathbf{v}_z) \cdot d\mathbf{x}_1 d\mathbf{x}_2$$

$\langle \mathbf{I}_1 \rangle$  es la intensidad media dispersada por una superficie gaussiana igual que la superficie sin atacar,  $\langle \mathbf{I}_2 \rangle$  es la intensidad media dispersada por una superficie gaussiana con la misma estadística que la superficie del fondo del pozo.

En general, para superficies ópticamente rugosas y para la geometría comúnmente utilizada, el tercer término es mucho menor que los dos primeros. Por lo tanto, la intensidad media total se puede considerar como compuesta por las intensidades provenientes de las dos superficies involucradas (fuera y dentro del pozo), esto es

$$\langle \mathbf{I} \rangle = (1-s)^2 \langle \mathbf{I}_1 \rangle + s^2 \langle \mathbf{I}_2 \rangle \quad (15)$$

## Correlación de figuras de speckle

Cuando se ilumina una superficie rugosa con un haz láser la luz dispersada presenta una estructura granular, esto es, manchas de luz y oscuridad aleatoriamente distribuidas. A esta figura se la denomina "speckle". Esta es el resultado de la interferencia múltiple de la luz proveniente de cada una de las irregularidades que conforman la superficie ópticamente rugosa. Esto significa que el patrón de figuras de speckle está íntimamente relacionado con la estructura de la superficie, es decir, que depende de la rugosidad, la longitud de correlación, la reflectividad de la muestra, etc. como también de las condiciones de iluminación de ella.

Cuando el ángulo de iluminación varía ligeramente, la figura de speckle no solo se desplaza angularmente sino que los granos de speckle sufren una deformación.

Una medida de esa deformación se obtiene comparando los patrones de speckle mediante una operación de correlación antes y después de haber variado el ángulo de iluminación. Los cálculos de la correlación de speckle en función de la variación del ángulo de incidencia están basados en los trabajos de Léger <sup>(2)</sup> y las modificaciones de Rebollo et al. <sup>(3)</sup>.

La relación entre la correlación de intensidades del speckle  $r$  y la rugosidad de la superficie  $s$  es

$$r(dq) = \exp\left[-s^2 k^2 (2 \operatorname{sen} q dq)^2\right] \quad (16)$$

donde

$q$  es el ángulo inicial de incidencia

$dq$  es la variación del ángulo de incidencia

$k$  es el vector de onda.

Esta expresión se obtuvo considerando una superficie con una distribución de alturas gaussiana.

### III. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este trabajo se hizo un análisis del modelo propuesto estudiando el comportamiento de la rugosidad y de la luz dispersada en función del área electroerosionada.

#### Superficies electroerosionada

Se analizó el efecto de la electroerosión en dos tipos de muestras de bronce: una maquinada, a la que se denominó **A** (Figura 2a), y otra pulida electroquímicamente, a la que se la llamó **B** (Figura 2b). Ambas han sido electroerosionadas de modo de disponer de una serie de muestras con un grado de erosión (porcentaje erosionado de la superficie total) desde un **0%** hasta un **100%**.

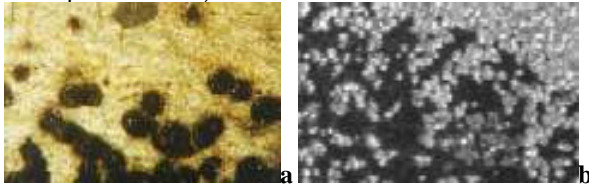


Figura 2. a) muestra A, 100x b) muestra B, 30x.

#### Medición de la rugosidad por correlación angular

El dispositivo experimental utilizado para medir rugosidades a través del método de correlación de speckle se muestra esquemáticamente en la Figura 3. Un haz láser de He-Ne ( $\lambda = 0,6328\text{mm}$ ) incide sobre la superficie rugosa a través de un sistema óptico compuesto por:

- Un objetivo de microscopio  $O_1$  que ensancha el haz.
- Una lente esférica  $O_2$  que determina el plano de Fourier sobre el detector.
- Una lente cilíndrica  $O_3$  que en combinación con  $O_2$  determina un foco sobre la muestra y hace que los granos de speckle sobre el detector sean alargados en el sentido transversal a la línea de detectores. Esto hace casi insensible la medición a posibles desplazamientos transversales que podrían introducir una decoherencia adicional.

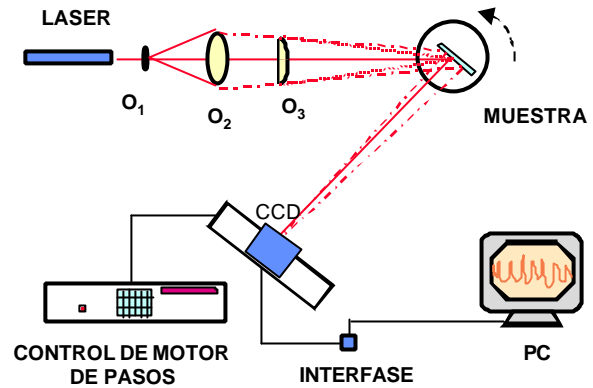


Figura 3. Diagrama esquemático del dispositivo para medir por correlación de speckles.

La muestra se encuentra montada sobre un goniómetro que le permite girar alrededor de un eje contenido en el plano medio de la superficie rugosa y perpendicular al haz incidente.

Un detector del tipo cámara CCD (charge coupled device) ubicado en la dirección de reflexión especular registra la distribución de intensidades del speckle. Dicha cámara está montada sobre una platina de traslación controlada por un motor de pasos de **2,5mm** de mínimo desplazamiento.

La cámara CCD está conectada mediante una interfase a una PC. El monitor de dicha computadora muestra la distribución de intensidad de los sucesivos registros de speckles.

Se rota la superficie un pequeño ángulo  $dq$  para cambiar las condiciones de iluminación como se explicó anteriormente. Luego se desplaza el detector para observar los mismos granos de speckle sólo que ligeramente deformados. Se repite la operación y se obtienen sucesivos registros para otros valores de  $dq$  y se los almacena en la PC. Utilizando un algoritmo se calcula la correlación de cada una de estas intensidades con la primera y de la relación  $r_I$  vs.  $dq$  (Ec. 16) se obtiene el valor de la rugosidad ajustando los valores experimentales por regresión numérica a la curva teórica.

#### Mediciones con rugosímetro mecánico

Se han realizado mediciones de la rugosidad en función de  $s$  con un rugosímetro mecánico sólo para las muestras tipo **B**. Se utilizó para ello un equipo de reluctancia variable marca Taylor Hobson modelo Surtronic 3+, con una resolución vertical de **0,01mm** y una punta de diamante de **5mm** de radio. Un registro de este instrumento se muestra en las Figuras 4; en ella pueden verse cuatro pozos producidos por electroerosión.

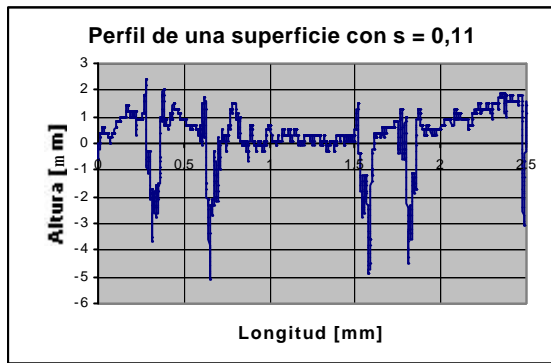


Figura 4. Registro del rugosímetro mecánico.

#### IV. RESULTADOS OBTENIDOS

##### Determinación de la rugosidad

Se graficó el cuadrado de la rugosidad en función de la proporción de área erosionada para comparar los datos obtenidos con el modelo propuesto, Ec. (6). Se debe notar que en el desarrollo del modelo no se ha tenido en cuenta la superposición de pozos que en verdad ocurre. Se consideró, entonces, que tal superposición no es importante hasta un **40%** o un **50%** de área atacada.

Se determinó la rugosidad por dos métodos distintos: por correlación de speckle y con un rugosímetro de reluctancia variable.

A pesar que la superficie no presenta una distribución de alturas gaussianas, el valor de la rugosidad obtenido por el método de correlación de speckle está dentro del valor esperado con un error del 10%. Tomando los datos así obtenidos, se graficó el cuadrado de la rugosidad en función de la proporción de área corroída, hasta  $s = 0,5$  (Figura 5). Se ajustaron los datos con una función cuadrática calculada por cuadrados mínimos.

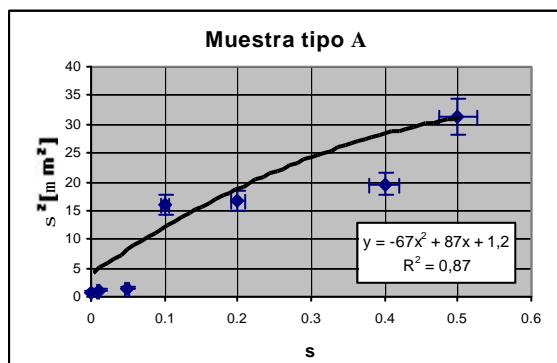


Figura 5. Cuadrado de la rugosidad (medida por correlación de speckle) en función de la proporción de área electroerosionada para la muestra A. " datos experimentales,  $\frac{3}{4}$  curva de ajuste.

De la Figura 5 se ve que el coeficiente de correlación para la curva de ajuste es aceptable.

Realizando un análisis de la curva de ajuste y comparándola con la ecuación (6) se calcularon los valores de los parámetros involucrados en ella:

$$\begin{aligned} p &= (8,2 \pm 0,5) \text{ mm} \\ s_1 &= (1,1 \pm 0,2) \text{ mm} \\ s_2 &= (4,6 \pm 2) \text{ mm} \end{aligned} \quad (17)$$

Debido a la pequeña profundidad del pozo producida por la electroerosión en las muestras tipo **B** y al error que se introduce por ello, se utilizó un método mecánico para analizar la validez del modelo propuesto. Se analizaron los datos obtenidos con el rugosímetro mecánico. De la misma manera que para la muestra **A**, se graficó el cuadrado de la rugosidad en función de la proporción de área erosionada y se ajustaron los datos con una curva cuadrática obtenida mediante el método de cuadrados mínimos (Ver Figura 6).

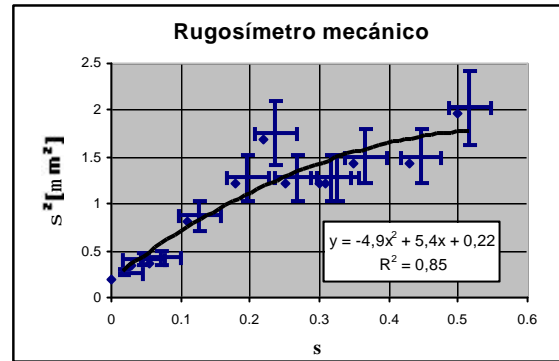


Figura 6. Rugosidad medida con el rugosímetro Taylor Hobson y curva de ajuste para la muestra tipo B.

Utilizando esta curva de ajuste, se calcularon los parámetros de la ecuación (6) obteniéndose los siguientes valores

$$\begin{aligned} p &= (2,2 \pm 0,2) \text{ mm} \\ s_1 &= (0,47 \pm 0,05) \text{ mm} \\ s_2 &= (0,9 \pm 0,4) \text{ mm} \end{aligned} \quad (18)$$

Para poder comparar los parámetros obtenidos con ambos métodos, se analizaron los registros de los perfiles de las dos muestras relevados con el rugosímetro mecánico. De ellos se midió, realizando una estadística, la profundidad del pozo  $p$ , la rugosidad inicial  $s_1$  y la rugosidad del fondo del pozo  $s_2$ . Para la muestra **A** se obtuvo

$$\begin{aligned} p &= (8 \pm 2) \text{ mm} \\ s_1 &= (0,5 \pm 0,2) \text{ mm} \\ s_2 &= (0,9 \pm 0,4) \text{ mm} \end{aligned} \quad (19)$$

y para la muestra **B**

$$\begin{aligned} p &= (3,1 \pm 0,8) \text{ mm} \\ s_1 &= (0,45 \pm 0,05) \text{ mm} \\ s_2 &= (0,8 \pm 0,3) \text{ mm} \end{aligned} \quad (20)$$

Aunque el valor obtenido de  $s_2$  para la muestra **A** (ecuaciones 17 y 19), por ambos métodos, no coincide, se obtuvo una curva de ajuste aceptable. Se debe notar que el error es del orden de un 50% en ambos métodos.

Los valores para la muestra **B** (ecuaciones 18 y 20) demuestran que este sencillo modelo propuesto es una buena herramienta para analizar el estado de erosión de diversas superficies.

##### Análisis de la intensidad media dispersada

En la comunicación "Una Nueva Aplicación Óptica de END para Analizar Superficies Erosionadas" se estudiaron las curvas de intensidad media dispersada por diferentes muestras con distintos grados de electroerosión. Se demostró en todos los casos que las curvas de intensidad media se pueden pensar como formadas por

la suma de tres curvas gaussianas de amplitud y exponente variables, representando tres fenómenos diferentes:

- Una curva denominada de reflexión, a la cual contribuyen principalmente las zonas de la superficie que se comportan como un espejo.
- Una curva intermedia, cuya mayor contribución está dada por la dispersión de la luz en aquellas zonas donde las rugosidades de la superficie son mayores que la longitud de onda de la luz incidente.
- Una curva muy ancha, denominada de fondo, correspondiente a la dispersión de la luz producida por irregularidades o diferencias de fase del metal muy pequeñas.

Cuando el ángulo de observación  $\theta_2$  es igual al ángulo de incidencia  $\theta_1$ , es decir, cuando se observa en la dirección especular, se puede considerar que la intensidad es igual al máximo de la curva de intensidad media dispersada. Así, en la ecuación (15) se pueden reemplazar los valores medios por los máximos correspondientes, obteniéndose

$$I = (1 - s)^2 I_1 + s^2 I_2 \quad (21)$$

donde:  $I$  es la intensidad máxima total,

$I_1$  es la intensidad máxima dispersada por las zonas de la superficie que no presentan pozos de erosión,

$I_2$  es la intensidad máxima dispersada por el fondo del pozo de electroerosión.

Se demostró en la comunicación "Una Nueva Aplicación Óptica de END para Analizar Superficies Erosionadas" que la variación de los máximos de intensidad de las curvas Pico y/o Total (Figura 7) son las que proveen la información más clara sobre el estado de la superficie.

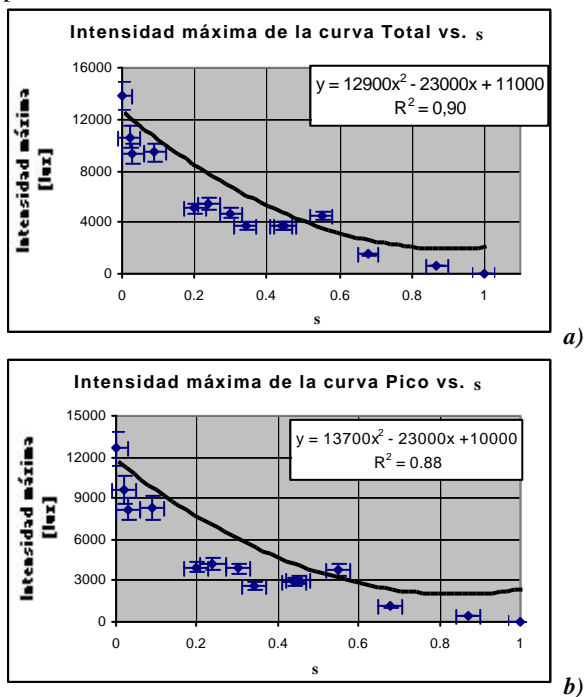


Figura 7. a) Intensidad máxima de la curva Total vs. s. b) Intensidad máxima de la curva Pico vs. s. ♦ datos experimentales,  $\frac{3}{4}$  curva de ajuste.

Comparando la ecuación (21) con la curva de ajuste para la intensidad Total (Figura 7a), se obtiene  $I_1 = (11300 \pm 1500)$  lux. Como  $I_1$  es el valor máximo dispersado por la superficie sin erosionar, se lo puede comparar con el medido directamente con el luxómetro, esto es  $(13800 \pm 1400)$  lux. Ambos valores concuerdan dentro del error de medida.

Para analizar el comportamiento de la curva Pico en función del área erosionada se consideró que esta curva está formada principalmente por la intensidad dispersada por la superficie no electroerosionada. Considerando en la ecuación (21) los términos que solo dependen de  $I_1$ , se obtiene una buena aproximación teórica del comportamiento de dicha curva. O sea,

$$I_p(s) = (1 - s)^2 I_{1p} \quad (22)$$

donde:  $I_p(s)$  es la intensidad máxima de la curva Pico en función de s,

$I_{1p}$  es la intensidad máxima de la curva Pico dispersada una superficie sin atacar.

Comparando esta ecuación con la curva de ajuste para la curva Pico (Figura 7b), promediando sus tres coeficientes, se tiene que  $I_{1p} = (11700 \pm 3000)$  lux. Por otro lado se determinó este valor de la curva de intensidad dispersada para una superficie con  $s=0$  (ver comunicación "Una Nueva Aplicación Óptica de END para Analizar Superficies Erosionadas") y se obtuvo  $I_{1p} = (13800 \pm 1400)$  lux. Ambos valores concuerdan dentro del error de medida.

## V. CONCLUSIONES

El estudio del estado de una superficie mediante el análisis de la rugosidad es una herramienta relevante para caracterizar cuantitativa y cualitativamente un proceso de erosión tipo pitting.

El fenómeno de electroerosión, similar a lo que se conoce como "pitting corrosion", no presenta las características de un proceso aleatorio gaussiano. Estas superficies no siempre cumplen con el modelo propuesto por Beckmann. Esto hizo necesario elaborar un nuevo modelo de superficie para calcular la rugosidad y la intensidad media dispersada como función del grado de erosión.

A través de este modelo es posible determinar el estado de erosión de una superficie (s) conociendo determinados parámetros.

En este trabajo se desarrolló un modelo y se verificó su validez analizando, por un lado la evolución de la rugosidad con el progreso de la electroerosión, y por otro las variaciones de la intensidad con s.

De manera general, se ve que, cuando el pozo de electroerosión es mayor que la rugosidad inicial del material se puede analizar el modelo propuesto utilizando el método óptico, dado que ésta aumenta apreciablemente con el grado de erosión.

Haciendo una comparación con ambos métodos de medición se puede decir que el de correlación de speckles no es el más adecuado cuando la rugosidad y su variación son pequeñas ( $<1\text{mm}$ ). En este caso habría que utilizar el método fotométrico o el de contraste de speckle si se quiere utilizar una técnica no destructiva.

De los resultados obtenidos a partir de la Figura 5, se observa que no todos los parámetros que caracterizan a

la superficie, Ec. (8), coinciden con los determinados con el rugosímetro mecánico, Ec. (10).

Para las muestras tipo **B**, los parámetros calculados de la curva de ajuste para los datos obtenidos con el rugosímetro mecánico, Ec. (9), coinciden con los calculados con otro método, Ec. (11). Nótese que la curva de ajuste de las mediciones realizadas con el rugosímetro mecánico verifica el modelo propuesto para la rugosidad.

Del análisis de la variación del valor máximo de la dispersión total y de la curva de reflexión como función de  $s$ , se concluye que el modelo propuesto explica satisfactoriamente los resultados obtenidos. Además, el valor de la intensidad media máxima inicial que se deduce de la curva experimental concuerda con los valores medidos directamente con el luxómetro.

Una conclusión general del presente trabajo es que el fenómeno de electroerosión puede ser evaluado, en primera instancia, aplicando el modelo elaborado. Sin

embargo, habría que seguir trabajando en él de manera de tener en cuenta las diversas complejidades de la superficie inicial y del fenómeno de erosión en general.

## VI. REFERENCIAS

1. P. Beckmann and A. Spizzichino, "The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces". Pergamon Press. London (1963).
2. D. Léger, E. Mathieu and J.C. Perrin, Optical surface roughness determination using speckle correlation technique, *Appl. Opt.* **14**, 872-877(1975).
3. M.A. Rebollo, Estudio de superficies rugosas mediante el análisis del valor medio de la intensidad dispersada y la correlación de speckles; Tesis de Doctorado UNLP, 1995.J.