

# UN NUEVO MÉTODO ÓPTICO DE END PARA ANALIZAR SUPERFICIES EROSIONADAS.

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

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

En este trabajo se estudia el proceso de electroerosión en diferentes muestras de bronce con distintos grados de electroerosión. Para ello se utilizan dos métodos diferentes: el análisis de la intensidad de la luz reflejada por la superficie, y el estudio de la correlación de speckles.

Se describen los dispositivos experimentales utilizados. Se analizan los resultados obtenidos en término del estado de electroerosión de la superficie.

In this work we study the electroerosion process in samples of bronze, with different stages of electroerosion. For this, we applied two different methods, analysing the scattered mean intensity light and studying the speckle correlation.

We describe the experimental set-up. We analyse the obtained results by means of the surface stage of electroerosion.

## I. INTRODUCCION

La aparición del fenómeno de corrosión en materiales con frecuencia produce fallas imprevistas en diferentes clases de componentes mecánicos. Entre los tipos más comunes de corrosión podemos mencionar: *pitting*, *intergranular*, *stress*, *cracking* y *crevice corrosion*. Para estudiar este problema y prevenir accidentes, se utilizan diversas técnicas de Ensayos No Destructivos (END)<sup>(1)</sup>.

Los métodos propuestos en este trabajo están basados en el estudio de las propiedades estadísticas de primer orden (intensidad media) y de segundo orden (correlación de speckles), de la intensidad dispersada por la superficie en la que se desea detectar y analizar el fenómeno de corrosión.

Para determinar la rugosidad  $s$  de una superficie<sup>(2,3,4,5)</sup> se utiliza el método de correlación de speckles, mientras que de la curva de intensidad media dispersada en la zona de Fraunhofer se pueden obtener otros parámetros que caracterizan dicha superficie rugosa<sup>(6,7,8,9,19)</sup>. Ambas técnicas dan una mayor comprensión del fenómeno que se desea estudiar y, debido a ser de no-contacto y no-destructivas, satisfacen los requerimientos para realizar END in-situ.

En esta comunicación se presentan los resultados experimentales obtenidos en muestras metálicas de bronce, para un modelo de superficie corroída consistente en diferentes estados de electroerosión. Se muestra que el método tiene una buena resolución y sensibilidad. Se describen los dispositivos experimentales utilizados. Se analizan los resultados obtenidos en término del estado de electroerosión de la superficie y se muestra que la implementación de estas técnicas dará una herramienta para estudiar procesos de erosión, ofreciendo a la industria un nuevo método no invasivo ni

destrutivo y de bajo costo para analizar procesos de erosión

## II. ESTUDIO TEÓRICO Y PRINCIPIO DEL MÉTODO.

### Intensidad media

Se ilumina la muestra con un haz laser bajo un ángulo de incidencia  $q_1$ , y se calcula la amplitud compleja dispersada en la dirección  $(q_2, q_3)$ . Siguiendo la teoría de Beckmann<sup>(11)</sup>, se tiene que la intensidad media dispersada en la dirección especular resulta, luego de las aproximaciones usuales,

$$I_2 = \frac{|K_{2R}|^2 2LT \sqrt{p}}{v_z S} \exp \left[ \frac{v_x^2 T^2}{4v_z^2 S^2} \right] v_z \cdot S \gg I \quad (1)$$

donde

$S$ : rugosidad aparente de la superficie corroída,

$v_x = k(\text{sen } q_1 - \text{sen } q_2 \cdot \text{cos } q_3)$ ,

$v_z = -(2p/l) \cdot (\text{cos } q_1 \cdot \text{cos } q_2)$ ,

$T$ : longitud de correlación,

$2L$ : tamaño zona iluminada,

$K_{2R}(q_1, q_2) = A_0 \cdot [(1 + \text{cos}(q_1 + q_2)) / (\text{cos } q_1 + \text{cos } q_2)]$

$A_0$ : constante.

De la expresión (1) se puede ver que la intensidad media dispersada nos permite evaluar el cociente  $T/S$ , que nos dará una primera información sobre la superficie. El mecanismo para detectar cambios en la superficie es similar al que se utiliza para estudiar sus características.

### Correlación de speckles

Cuando se ilumina una superficie rugosa con un haz coherente, la luz dispersada presenta un aspecto

irregular de manchas brillantes y oscuras, distribuidas aleatoriamente, denominado *speckle*. Éste es el resultado de múltiples interferencias de ondas secundarias provenientes de la estructura de la superficie. Manteniendo la iluminación constante, los cambios en la forma del *speckle* se deben a variaciones en la microestructura de la superficie y pueden deberse a procesos tales como: oxidación, corrosión, etc.

El procedimiento para detectar dichas variaciones es similar al que se utiliza para evaluar la rugosidad de una superficie. Para ello, se capturan y se registran con una cámara CCD dos patrones de *speckle*, antes y después de haber cambiado el ángulo de iluminación, en un lapso de tiempo muy pequeño comparado con el tiempo de corrosión. Luego se comparan los dos patrones de *speckle* mediante un algoritmo digital de correlación, obteniéndose un valor de la rugosidad de la superficie. Por lo tanto, al analizar la rugosidad obtenida para muestras con distintos estados de erosión, se puede evaluar el proceso de corrosión. El fundamento teórico lo provee la teoría de Beckmann<sup>(11)</sup>, los cálculos posteriores elaborados por Léger et al<sup>(2)</sup> han mostrado que la correlación de dos patrones de *speckle* registrados antes y después de haber rotado una superficie un pequeño ángulo  $dq$  permite calcular la rugosidad  $s$ . Más recientemente Rebollo et al.<sup>(5,12,13)</sup> han digitalizado y generalizado este método a situaciones muy diversas.

La relación entre la correlación de intensidad de *speckles*  $C_I$  y la rugosidad de una superficie  $s$  es:

$$C_I(dq) = \exp\left\{-s^2 \frac{4p}{l} \sin^2 \frac{q}{2}\right\} \quad (2)$$

siendo:

$C_I$  = correlación de intensidades.

$q$  = ángulo de incidencia inicial = ángulo de dispersión inicial.

$dq$  = incremento angular.

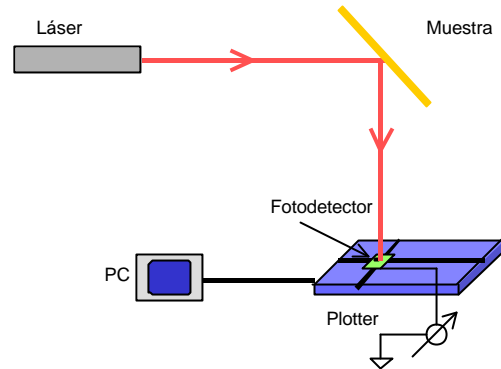
### III. RESULTADOS EXPERIMENTALES.

#### Intensidad media

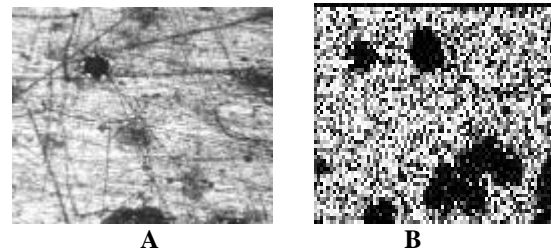
Se registra la intensidad media dispersada en el plano perpendicular a la dirección especular, efectuando un barrido con un fotodetector. Se diafragma el fotodetector con una pequeña abertura rectangular, lo suficientemente grande de modo de poder integrar el *speckle*, pero lo suficientemente chica de modo que el muestreo cumpla con el teorema de Shannon, es decir que se logre una buena reproducción de la curva de intensidad media. En caso de observarse una dirección privilegiada en la difusión, se realizan dos barridos perpendiculares.

En la *Figura 1* se ilustra el dispositivo experimental para registrar la intensidad media. El objetivo del trabajo es simular una *pitting corrosion*, utilizando un modelo conocido. Se construyeron muestras de bron-

ce, maquinadas y sin maquinar. Posteriormente se las sometió a un proceso de electroerosión, obteniéndose distintos porcentajes de superficie corroída, mediante diferentes intervalos y corrientes de electroerosión. En la *Figura 2* se observan microfotografías de algunas de las muestras estudiadas.



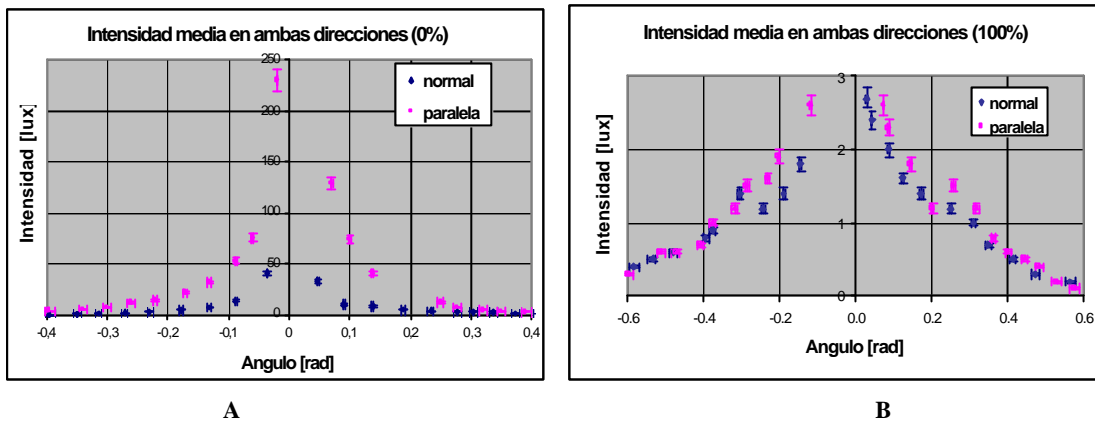
*Figura 1.* Dispositivo experimental esquemático para registrar la intensidad media dispersada.



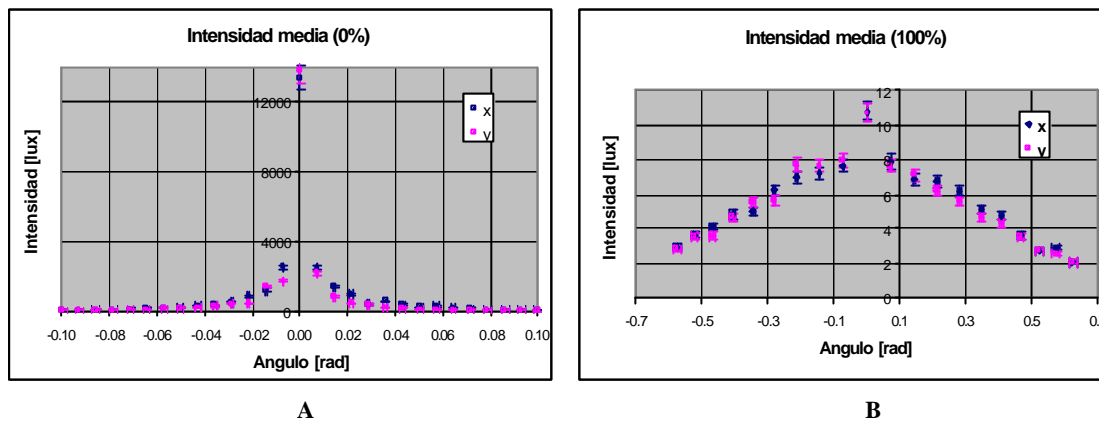
*Figura 2.* Microfotografías de muestras metálicas erosionadas. A) maquinada y B) sin maquinar.

Para las muestras maquinadas (A) se relevaron las curvas en las direcciones paralela y perpendicular al maquinado. Se pudo observar que, cuando las muestras presentan pocos núcleos de erosión, la forma de la curva de difusión es elíptica. Obteniéndose así dos curvas diferentes asociadas con el diagrama de difracción de la microestructura del maquinado (*Figura 3*). Se puede observar que cuando la electroerosión aumenta, el diagrama de difracción circular debido a los núcleos de erosión prevalece sobre la curva de difusión asimétrica inicial, obteniéndose una curva circularmente simétrica a partir del 24% de la superficie erosionada.

Las muestras sin maquinar fueron sometidas previamente a un pulido electrolítico y luego electroerosionadas. Se registraron las curvas de la intensidad media difundida, en el plano perpendicular a la dirección especular, y en dos direcciones perpendiculares entre sí. Se observó que, para cualquier grado de electroerosión, dado que la superficie inicial no tiene ninguna dirección privilegiada, las curvas en ambas direcciones eran similares (*Figura 4*).



**Figura 3.** Intensidad media dispersada por una muestra de bronce maquinada vs ángulo de observación  
 A) Superficie corroída: **0%**. B) Superficie corroída: **100%**.



**Figura 4.** Intensidad media dispersada por una muestra de bronce sin maquinar vs. ángulo de observación.  
 A) **0%** del área total electroerosionada. B) **100%** del área total electroerosionada

Las muestras utilizadas (con o sin electroerosión) no presentan una distribución estadística gaussiana de sus alturas, por lo tanto, la intensidad media dispersada tampoco es gaussiana. Esta puede pensarse como formada por la suma de tres curvas gaussianas de amplitud y exponente variables (ver *Figura 5*) representando tres fenómenos diferentes:

- Una curva muy estrecha, 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.

La *Figura 5* muestra algunos de los resultados obtenidos para la muestra de bronce. En ellas se pueden observar: la curva de reflexión en color fucsia, la curva intermedia en verde, la curva fondo en celeste y la suma de todas en color azul.

Cuando la superficie no está erosionada o el grado de electroerosión es pequeño, el máximo de la curva de reflexión predomina sobre las otras curvas. A medida que aumenta el área erosionada, el valor máximo de esta curva disminuye de manera tal que a partir de un **65%** de erosión éste es del orden del máximo de la curva intermedia. Con el fin de buscar los parámetros que definan mejor el estado de electroerosión de la superficie se analizó la variación de los máximos de estas tres curvas en función del porcentaje de área electroerosionada.

Para poner en evidencia la variación de los máximos de estas curvas al variar  $s$  (proporción de área erosionada), se graficaron éstos vs  $s$ , para cada una de ellas y se calculó la curva de ajuste correspondiente (*Figura 6*).

Del análisis de estas curvas se puede concluir que la variación de los máximos de intensidad de las curvas pico y/o total son los que proveen la información más clara sobre el estado de la superficie, dado que ambas curvas cumplen con el modelo teórico desarrollado en la comunicación: **Modelo Teórico de la variación de la rugosidad de una superficie erosionada.**

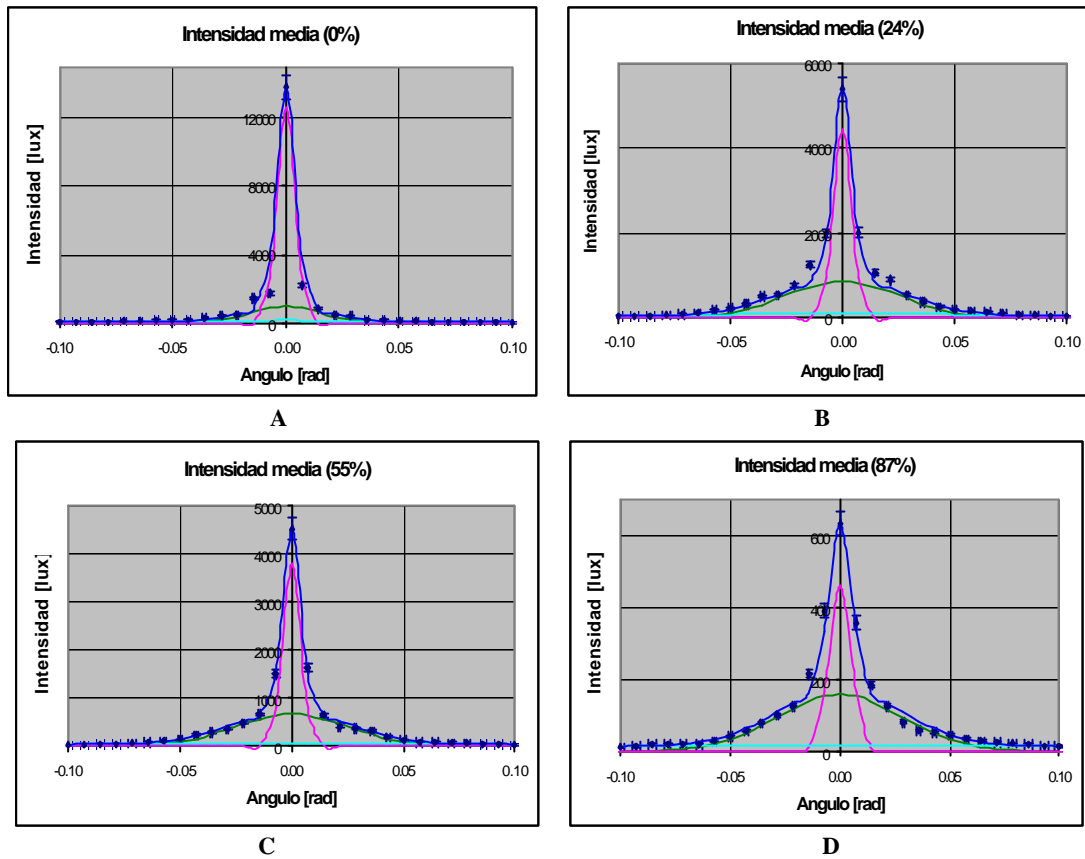


Figura 5. Intensidad dispersada por una superficie de bronce pulida vs. ángulo de observación, donde:  $\blacklozenge$  datos experimentales; — intensidad total; — intensidad reflejada — curva intermedia y — curva fondo. Para: A) 0%, B) 24%, C) 55% y D) 87% de electroerosión

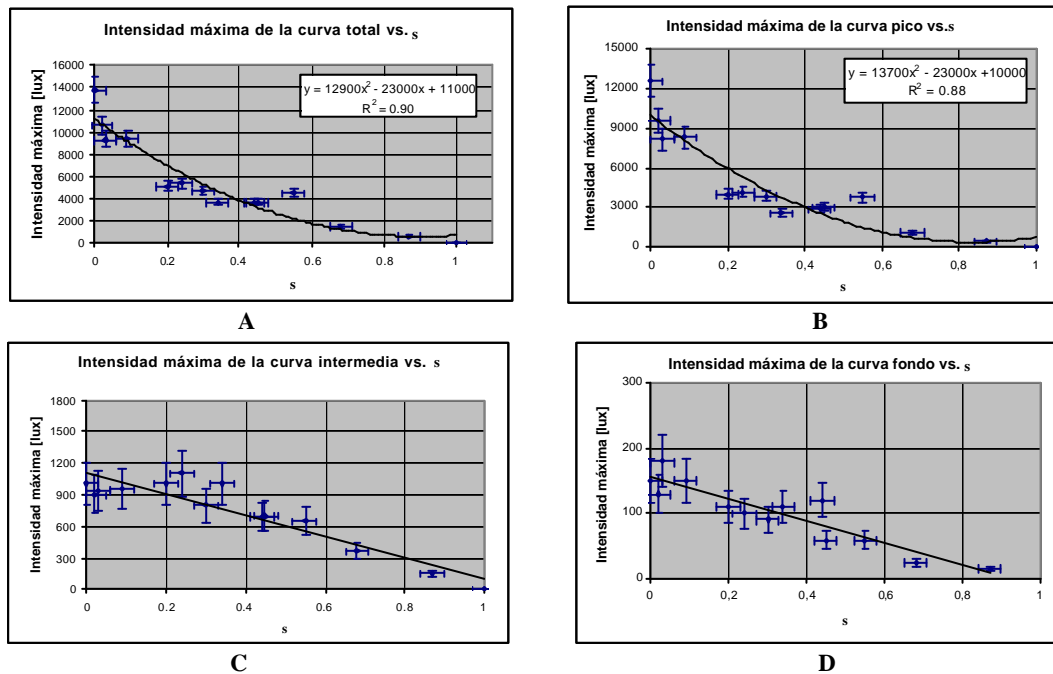


Figura 6. Máxima intensidad de la curva: A) total vs.  $s$ , B) de reflexión en función de  $s$ ; C) intermedias en función de  $s$  y D) curva fondo vs.  $s$ . Donde  $\blacklozenge$  datos experimentales y la curvas de color negro son las curvas de ajuste.

### Método de correlación angular.

Se han medido las rugosidades  $S$ , mediante el método de correlación de speckles, de muestras de bronce con diferentes estados de electroerosión.

La Figura 7 muestra esquemáticamente dispositivo experimental utilizado.

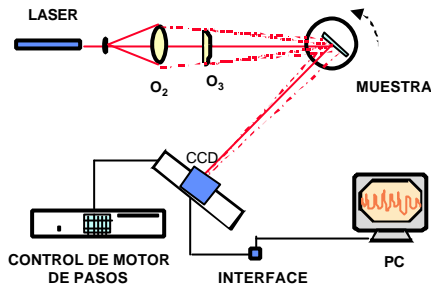


Figura 7. Diagrama esquemático del dispositivo para evaluar la correlación de speckles.

Un haz láser de He-Ne incide sobre la superficie rugosa a través de un sistema óptico. La muestra está montada sobre un goniómetro que le permite girar alrededor de un eje. Una cámara CCD lineal, ubicada en la dirección de reflexión especular, en la zona de Fraunhofer, registra la distribución de intensidades del speckle. La CCD está conectada mediante una interfase a

una computadora que almacena los distintos diagramas de speckles obtenidos al rotar la muestra un pequeño ángulo. Utilizando un algoritmo matemático se calcula la correlación ( $r_I$ ) de cada una de estas intensidades con la primera. De la relación  $r_I$  vs.  $dq$  (Ec. 2) se obtiene el valor de  $S$  (ver Figura 8). En cada gráfico se traza la curva de ajuste y se indica el valor de la rugosidad obtenida junto con el porcentaje de superficie erosionada.

Al analizar los datos obtenidos para ambas muestras se observa que, cuando la superficie presenta unos pocos pozos de electroerosión, el extremo derecho de la curva se aparta de la forma gaussiana esperada. Se puede inferir que dicho apartamiento se debe a que la distribución de las alturas de la superficie inicial no cumple con las hipótesis estadísticas<sup>(11)</sup>. A medida que aumenta el grado de electroerosión, el ajuste entre los datos experimentales y la curva gaussiana esperada mejora. A partir de un 40% y hasta el 100% de área electroerosionada el ajuste es muy bueno.

En el comunicación: **Modelo teórico de la variación de la rugosidad de una superficie erosionada**, se analizan los valores de la rugosidad obtenidos en función del área electroerosionada y se los compara con el modelo teórico desarrollado.

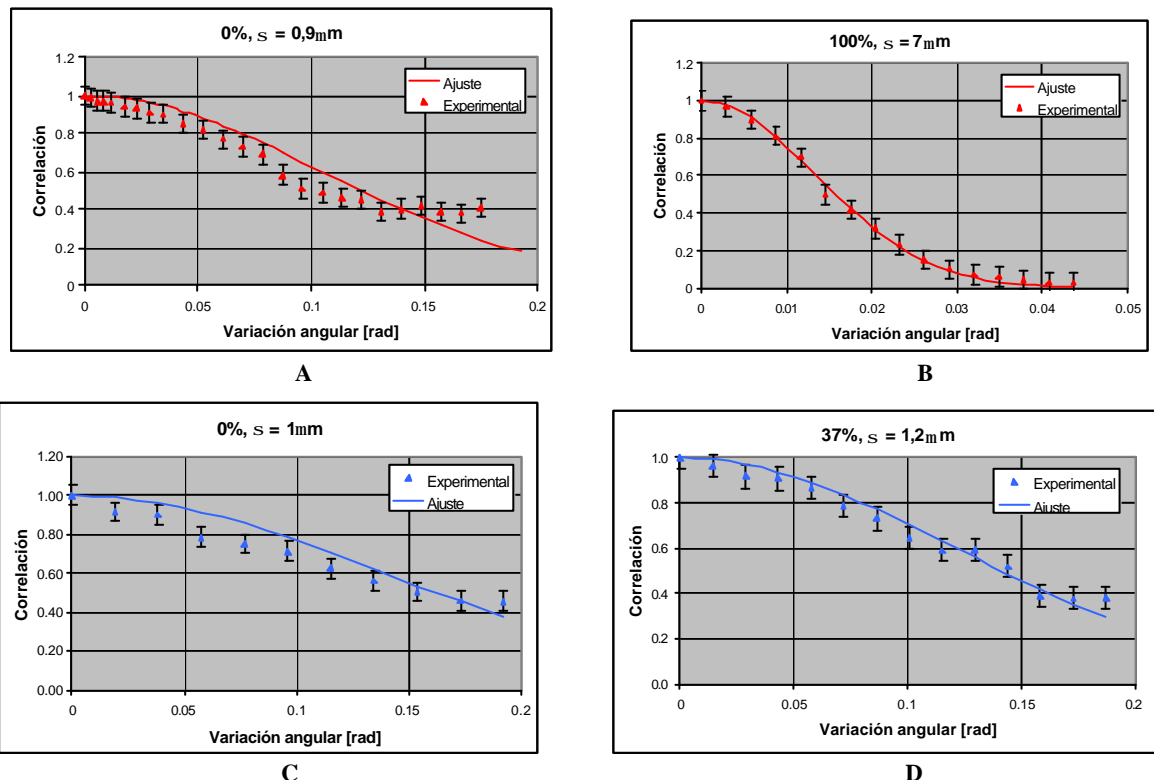


Figura 8. Correlación de speckle vs variación del ángulo de incidencia para: A) y B) muestra de bronce maquinadas previamente; C) y D) muestras de bronce sin maquinar.

## CONCLUSIONES

El estudio del estado de una superficie mediante el análisis de las propiedades estadísticas de primer y segundo orden de la luz dispersada es una herramienta relevante para caracterizar cuantitativa y cualitativamente un proceso de corrosión tipo pitting.

En este trabajo se estudió, bajo un aspecto de evaluación no destructiva, la evolución de la intensidad media dispersada y de la correlación de speckles con el progreso de la electroerosión en muestras metálicas.

De un modo general, una superficie metálica genera una indicatriz de difusión en la que están involucrados diversos fenómenos: la característica del metal, el maquinado y la erosión. Esta compleja superficie dispersa la luz según un patrón apenas parecido al predicho por una superficie gaussiana. Por ello, se descompuso la indicatriz de difusión en tres curvas gaussianas que podrían representar fenómenos diferentes: una curva debida principalmente a la reflexión especular, otra a la que contribuyen las pequeñas irregularidades de la superficie (las diferentes fases del material, las distintas componentes y/o impurezas del mismo, etc.), y una tercera que recibe el aporte de distintos fenómenos de escala intermedia y que no se ha podido caracterizar aún de manera satisfactoria. Estas curvas son las que se han denominado de reflexión o pico, fondo e intermedia, respectivamente.

Del análisis de la variación del valor máximo de la dispersión total y de la curva de reflexión como función del cociente entre las áreas erosionada y total, se obtuvo una curva de ajuste de los resultados experimentales que concuerda fuertemente con el modelo teórico propuesto en la comunicación: **Modelo Teórico...**

En cuanto a las curvas de correlación de intensidad de speckles en función de la variación del ángulo de incidencia, se pudo observar que cuando la superficie presenta unos pocos pozos de electroerosión, el extremo derecho de la curva se aparta de la forma gaussiana esperada. Dicho apartamiento se debe a que la distribución de las alturas de la superficie inicial no cumple con las hipótesis estadísticas. A medida que aumenta el grado de electroerosión, el ajuste entre los datos experimentales y la curva gaussiana esperada mejora. A partir de un **40%** y hasta el **100%** de área electroerosionada el ajuste es muy bueno.

Una conclusión general del presente trabajo es que: los métodos ópticos aplicados parecen ser adecuados para evaluar el estado de erosión de una superficie. Sin embargo, es imprescindible hacer nuevas experiencias. Por lo tanto, se propone elaborar una serie de muestras controladas que amplíen las condiciones experimentales para realizar nuevas y más precisas mediciones.

Con este trabajo se ha puesto en evidencia la posibilidad de estudiar el proceso de electroerosión o cualquier otro proceso de corrosión mediante el estudio de la luz dispersa.

## REFERENCIAS

1. Hagemaijer, D.J. et al, 1985, "Aircraft corrosion and detection method", *Mat. Eval.* **43**, N° 3, (426-).
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.S. Stihel, J.J. Lunazzi, E.N. Hogert and N.G. Gaggioli, *Speckle pattern direct photographic correlation for measuring surface roughness*, *Proc. SPIE* **813**, 561(1987).
4. B. Ruffing and J. Anschutz, *Surface roughness measurement by 2-D digital correlation of speckle images*, *Proc. SPIE* **814**, 105-112(1987).
5. M.A. Rebollo, E.N. Hogert, M.R. Landau and N.G. Gaggioli, *Medición de la rugosidad de superficies por medio de la correlación digital de speckles*, *Anales AFA* **3**, 181-184(1991).
6. D.H. Hensler, *Light scattering from fused polycrystalline aluminum oxide surfaces*; *Appl. Opt.* **11**, 2522-2528 (1972).
7. F. Berny et C. Imbert, *Determination Optique des états de surface*; *Bulletin du Bureau National de Métrologie* **4**, 14(1973).
8. N.G. Gaggioli et M.L. Roblin, *Etude des états de surface par les propriétés de diffusion à l'infini en lumière transmise*; *Opt. Comm.* **32**, 209-213(1980).
9. N.G. Gaggioli et M.L. Roblin, *Determination de la longueur de covariance d'une surface rugueuse par l'étude de la diffusion à l'infini*; *Opt. Comm.* **54**, 201-206(1985).
10. P. J. Chandley and W. T. Welford, *A reformulation of some results of P. Beckmann for scattering from rough surfaces*; *Opt. and Quantum Elect.* **7**, 393(1975).
11. P. Beckmann and A. Spizzichino, "The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces". Pergamon Press. London (1963).
12. F. Pérez Quintián, M.A. Rebollo, N.G. Gaggioli y M.R. Landau, *Medición de rugosidad de materiales dieléctricos transparentes*; *Anais Optica XIX ENFMC96*, 443-446(1996).
13. F. Pérez Quintián, M.A. Rebollo, E.N. Hogert, M.R. Landau and N.G. Gaggioli, *Relationship between speckle correlation and refraction index variation. Application to roughness measurement*; *Opt. Eng.* **35**, 1175-1178(1996).