

METODO OPTICO PARA ESTUDIAR ROCAS POROSAS. PROBLEMAS Y RESULTADOS

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

Laboratorio de Optica y Laser - IAMEND - ENDE- CNEA

Av. del Libertador 8250, Buenos Aires, ARGENTINA.

E-mail: gaggioli@cnea.gov.ar

Tel.: 54 11 4 754-7401

RESUMEN:

En el II Workshop de Aplicaciones de la Ciencia en la Ingeniería del Petróleo se presentaron algunos resultados preliminares sobre la posibilidad de estudiar rocas porosas mediante correlación de speckles.

En este trabajo se presentan nuevas mediciones que confirman los resultados preliminares, es decir, una alta correlación entre la rugosidad medida por correlación de speckles y la porosidad determinada por métodos clásicos.

Por otra parte, también se presentan resultados teóricos y experimentales relativos a una modelización de la roca porosa como un aglomerado de partículas utilizada para explicar la relación entre rugosidad y porosidad.

ABSTRACT:

The possibility to study porous rocks by speckle correlation has been investigated in a paper presented at the II Workshop of the Applications of Science to Petroleum Engineering.

The new measurements presented here, confirm previous results, a high correlation between the roughness as measured by speckle correlation and the porosity as determined by classical methods.

To explain the relationship between roughness and porosity a model was prepared, considering the porous rock as an aggregate of particles. Theoretical and experimental results concerning this model are presented.

INTRODUCCION:

El estudio de la porosidad de rocas mediante el análisis de la luz láser dispersada, tiene su fundamento en varios trabajos realizados en diversos laboratorios del mundo, en particular en aquellos llevados a cabo en la CNEA, referentes a la caracterización de superficies mediante la dispersión de luz coherente.

Cuando la luz de un láser incide en una superficie rugosa, ésta dispersa la luz llevando consigo información sobre sus características. Dicha información puede ser obtenida del valor medio de la intensidad dispersada y de sus propiedades estadísticas de segundo orden.

En los últimos años se han desarrollado dos métodos para estudiar la rugosidad de una superficie. Uno de ellos, se basa en el estudio de la intensidad media dispersada^(1,2,3,4) y el otro utiliza la correlación de speckles^(5,...,13), ambos han mostrado dar buenos resultados, tanto para estudiar superficies metálicas como dieléctricas, ya sea por reflexión o por transmisión. Este último método, el de correlación de speckles, provee un valor de la rugosidad s prácticamente en tiempo real mientras que el primero provee información sobre el cociente entre la longitud de correlación y la rugosidad, T/s . Por otra parte, trabajos realizados recientemente^(14,15,16) han mostrado que aunque la superficie no sea gaussiana, se puede obtener un valor de la rugosidad próximo al real. Colegas de EE.UU. y Japón han logrado relacionar la correlación de speckles con el tamaño de las partículas que conforman un sinterizado⁽¹⁷⁾ así como el tamaño y la concentración de partículas incluidas bajo plástico⁽¹⁸⁾.

Estos trabajos condujeron a intentar relacionar la dispersión de luz con parámetros vinculados al estado de una superficie: oxidación⁽¹⁹⁾, superficies variables⁽¹²⁾, porosidad^(20,21), corrosión^(22,23), etc. Los resultados preliminares obtenidos permiten afirmar que se ha encontrado un nuevo camino para este tipo de fenómenos y es necesario explorarlo llevando a cabo trabajos que permitan comprender cabalmente la física del problema para poder finalmente desarrollar uno o más prototipos industriales.

El estado actual del conocimiento sobre este tema permite imaginar la posibilidad de desarrollar un dispositivo para efectuar mediciones en el campo. El método que se expondrá en este trabajo es completamente original, aunque tiene antecedentes en investigaciones anteriores y en las de otros colegas de diferentes partes del mundo. Es un nuevo método de medición de la poro-

sidad de rocas, no invasivo, confiable y posiblemente más económico que las técnicas tradicionales.

Dado que se ha mostrado la posibilidad de evaluar directamente la porosidad y probablemente la permeabilidad de la corona, la expectativa es lograr una notable disminución de los costos actuales de ese tipo de mediciones. Sin embargo es imprescindible señalar que, dadas las características del método, por el momento sólo se prevén resultados satisfactorios para poros interconectados. No obstante, los resultados que se obtengan, darán una importante información para posteriores investigaciones que podrían conducirnos al conocimiento de la geometría interna, por ejemplo realizando las medidas con ultrasonido de alta frecuencia.

TEORIA:

Intensidad media.

El fundamento teórico del método utilizado en el presente trabajo puede encontrarse en los trabajos de Beckmann⁽²⁴⁾, Lefrançois⁽²⁵⁾ y Gaggioli⁽²⁶⁾. Estudiaremos la dispersión de luz por una superficie rugosa siguiendo el tratamiento de Kirchhoff para la difracción⁽²⁷⁾.

La superficie será descrita por $z(x,y)$, donde z es la altura de la misma desde un plano medio xy . Se considerará que z es una función aleatoria de las coordenadas x,y cuyas características estadísticas son las usuales para representar superficies^(24,25,26).

Sobre esta superficie, incide una onda electromagnética plana. Su dirección de propagación está dada por el vector de onda k_1 , cuyo módulo es $k_1 = 2\pi/\lambda$, con λ la longitud de onda de la luz incidente. k_1 se encuentra en el plano x,z del sistema de coordenadas (Figura 1). El ángulo entre k_1 y el eje z es θ_1 .

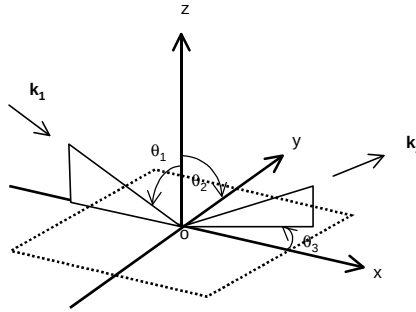


Figura 1

Suponemos la onda incidente linealmente polarizada, armónica y plana, luego podemos expresar su amplitud como:

$$E_1 = E_0 e^{j(k_1 \cdot r - \omega t)}$$

ω es la frecuencia angular, pero de aquí en adelante, como se lo hace usualmente, no se considerará la dependencia temporal; $r = x\bar{x}_0 + y\bar{y}_0 + z\bar{z}_0$ y para un punto sobre la superficie:

$$r = x\bar{x}_0 + y\bar{y}_0 + z(x,y)\bar{z}_0$$

El problema es encontrar el campo en una dirección arbitraria q_2, q_3 , lejos de la superficie dispersora, en la región de Fraunhofer.

Suponemos que la superficie es, punto a punto, perfectamente reflectora y que el coeficiente de reflexión es constante e igual a la unidad sobre toda la superficie. Esto último es independiente del ángulo entre la dirección incidente y la normal a la superficie.

No tendremos en cuenta efectos de sombra ni dispersiones múltiples y supondremos que las irregularidades de la superficie son mucho mayores que la longitud de onda de la radiación incidente.

Estas condiciones nos permiten utilizar el método de Kirchhoff.

Sea k_2 el vector de propagación en la dirección q_2, q_3 con $|k_2| = |k_1| = |k|$. Resolvemos la integral de Helmholtz, que nos da el campo en un punto P lejos del difusor en función del campo y su

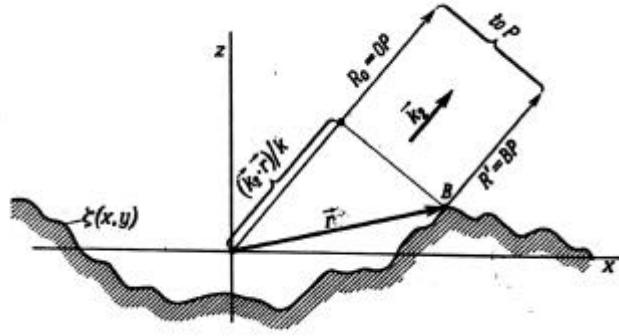


Figura 2

derivada normal en la superficie en la cual: Q , es un punto sobre ésta y r_{pq} es la longitud del vector que une P con Q . Entonces en la Figura 2 se ve que;

$$k_2 r_{pq} = k_2 R_0 - k_2 \cdot r \quad (1)$$

El punto P está muy alejado y consideraremos, que el campo en cada punto de la superficie corresponde al que estaría presente sobre el plano tangente en el mismo. Esto es una buena aproximación si el radio de curvatura de las irregularidades es grande comparado con la longitud de onda de la radiación incidente.

Si R es el coeficiente de reflexión y n es el vector normal a la superficie en el punto (x,y) (Figura 3)

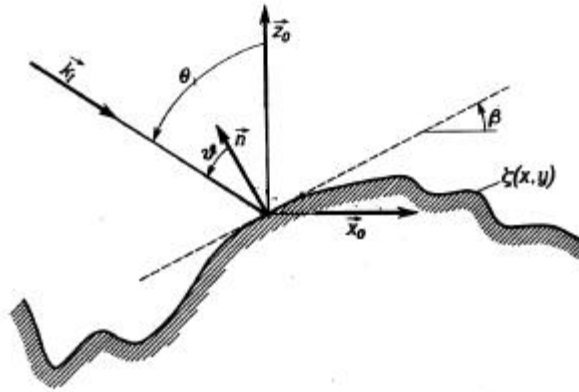


Figura 3

Para simplificar suponemos primero una superficie unidimensional: $z(x,y) = z(x)$. Entonces, la ecuación de Helmholtz, nos da el campo en la dirección q_2 , esto es:

$$E_2 = \frac{j e^{jkR_0}}{4\pi R_0} \oint (R \cdot v - p) \cdot n e^{j \cdot v \cdot r} dS \quad (2)$$

con $v = k_1 - k_2$ y $p = k_1 + k_2$: cuyas componentes son:

$$v = (v_x, v_z) = [k(\sin q_1 - \sin q_2), -k(\cos q_1 + \cos q_2)],$$

$$p = (p_x, p_z) = [k(\sin q_1 + \sin q_2), k(\cos q_2 - \cos q_1)],$$

$$n = (n_x, n_z) = (-\sin b, \cos b),$$

$$r = (x, z(x)); dS = \sec b dx; \tan b = z'(x)$$

Si la extensión de la superficie es finita: $-L < x < L$ (Esto es equivalente a poner una función pupila $P(x)$) entonces:

$$E_2 = \frac{j k e^{j k R_0}}{4 p R_0} \int_{-L}^L (a z' - b) e^{j v_x x + j v_z z} dx \quad (3)$$

donde: $a = (1 - R) \sin q_1 + (1 + R) \sin q_2$ y $b = (1 + R) \cos q_2 - (1 - R) \cos q_1$ y llamamos:

$$A_0 = \frac{j k e^{j k R_0}}{4 p R_0}$$

La integral en (3) puede resolverse fácilmente en el caso en que a y b sean independientes de x , como sucede en un medio perfectamente conductor. Suponiendo además que $L \gg \lambda$ la solución general unidimensional puede escribirse como:

$$E_2(q_1, q_2) = \pm K_{2R}(q_1, q_2) \int_{-L}^L e^{j v \cdot r} dx \quad (4)$$

$$K_{2R}(q_1, q_2) = 2 A_0 \frac{1 + \cos(q_1 + q_2)}{\cos q_1 + \cos q_2}$$

donde $\pm$ corresponde a las direcciones de polarización paralela y perpendicular al plano de incidencia y $v \cdot r = \frac{2 p}{\lambda} [(\sin q_1 - \sin q_2)x - (\cos q_1 + \cos q_2)z(x)]$

Para el caso unidimensional se tiene:

$$\langle E_2 E_2^* \rangle = |K_{2R}|^2 \int_{-L}^L \int_{-L}^L e^{j v_x (x_1 - x_2)} \langle e^{j v_z [z(x_1) - z(x_2)]} \rangle dx_1 dx_2 \quad (5)$$

Y para el caso bidimensional resulta:

$$\langle E_2 E_2^* \rangle = |K_{3R}|^2 \int_{-X}^X \int_{-X}^X \int_{-Y}^Y \int_{-Y}^Y \exp[j v_x (x_1 - x_2) + j v_y (y_1 - y_2)] \cdot \langle \exp[j v_z (z(x_1, y_1) - z(x_2, y_2))] \rangle dx_1 dx_2 dy_1 dy_2 \quad (6)$$

Donde X e Y son los límites de la pupila de área $A = 2X \cdot 2Y$ y $\langle \cdot \rangle$ significa valor medio de "ensemble".

A partir de aquí tendremos en cuenta las características de la superficie que consideraremos estadísticamente rugosa siendo $z(x, y)$ una función aleatoria de la posición (x, y) .

z es una variable aleatoria que toma valores z con una densidad de probabilidad $p(z)$. Para resolver el problema, debemos conocer la densidad de probabilidad adjunta $p_2(z_1, z_2)$ donde z_1 y z_2 son los valores que toma z en los puntos (x_1, y_1) y (x_2, y_2) . Podemos suponer que el proceso aleatorio $z(x, y)$ es estacionario, o sea que su densidad de probabilidad adjunta depende sólo de la distancia entre los puntos (x_1, y_1) y (x_2, y_2)

$$t = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

La función característica bidimensional asociada con la distribución $p_2(z_1, z_2)$ es:

$$c_2(t_1, t_2) = \langle e^{j t_1 z_1 + j t_2 z_2} \rangle = \int_{-Y}^Y \int_{-Y}^Y p_2(z_1, z_2) e^{j t_1 z_1 + j t_2 z_2} dz_1 dz_2 \quad (7)$$

Escribiendo t en coordenadas polares:

$$x_1 - x_2 = t \cos j ; \quad y_1 - y_2 = t \sin j$$

$$\langle E_2 E_2^* \rangle = |K_{3R}|^2 \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{jv_x t \cos j + jv_y t \sin j} c_2(v_z, -v_z) t dt dj$$

suponiendo $X, Y \gg$ que la distancia de correlación de $\mathbf{z}(x, y)$ se obtiene:

$$\langle E_2 E_2^* \rangle = 2p |K_{3R}|^2 \int_0^{2\pi} J_0(v_{xy} t) c_2(v_z, -v_z; t) t dt \quad (8)$$

donde $v_{xy} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$

La función característica, asociada con una distribución normal bidimensional de dos variables aleatorias $\mathbf{z}_1$ y $\mathbf{z}_2$ con valor medio $\mathbf{0}$ y varianzas $\mathbf{s}^2$ es

$$c_2(v_z, -v_z) = \exp\left[-v_z^2 \mathbf{s}^2 (1 - C(t))\right] \quad (9)$$

Suponemos, además, que $C(t)$ es Gaussiana entonces:

$$C(t) = \exp\left\{-\frac{t^2}{T^2}\right\}$$

Donde T es la longitud de correlación. Desarrollando esta expresión en serie alrededor de $t = 0$, (9) queda:

$$c_2(v_z, -v_z) = e^{-v_z^2 \mathbf{s}^2} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{v_z^{2m} \mathbf{s}^{2m}}{m!} \exp\left\{-\frac{t^2}{T^2}\right\} \quad (10)$$

Reemplazando en la integral de (8) se llega a la expresión:

$$\langle E_2 E_2^* \rangle = e^{-\mathbf{g}^2} \mathbf{r}_0^2 + p |K_{3R}|^2 T^2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\mathbf{g}^m}{m! m} \exp\left\{-\frac{v_{xy}^2 T^2}{4m}\right\} \quad (11)$$

con: $v_{xy} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$, $\sqrt{\mathbf{g}} = v_z \mathbf{s} = \frac{2ps}{l} (\cos q_1 + \cos q_2)$, y $\mathbf{r}_0 \gg \text{sinc}(v_x X) \cdot \text{sinc}(v_y Y)$ que es la transformada de Fourier de la función autocorrelación de la pupila para un diafragma rectangular $4XY$.

La serie infinita de la expresión (11) representa la parte difundida de la luz. El primer término es casi nulo en todo el espacio salvo en las vecindades de la dirección especular es la componente difractiva o especular de la dispersión.

En general, el campo dispersado está compuesto por ambas partes. Cuando $\mathbf{g} \rightarrow 0$, la componente especular es dominante, cuando $\mathbf{g} \gg 1$, domina la componente difusiva.

En las aplicaciones que nosotros veremos en este trabajo, la rugosidad de la superficie es grande con lo que $\mathbf{g} \gg 1$ ($\mathbf{g} \gg \frac{2ps}{l}$), entonces la expresión (8), se puede integrar directamente y se obtiene:

$$\langle E_2 E_2^* \rangle = \frac{p |K_{3R}|^2 T^2}{v_z^2 \mathbf{s}^2} \exp\left\{-\frac{v_{xy}^2 T^2}{4v_z^2 \mathbf{s}^2}\right\} \quad \mathbf{g} \gg 1 \quad (12)$$

La distribución angular de la intensidad media dispersada para distintos valores de la relación T/s se pueden ver en la Figura 4 ($T/s = 5, 10, 15$ y 20).

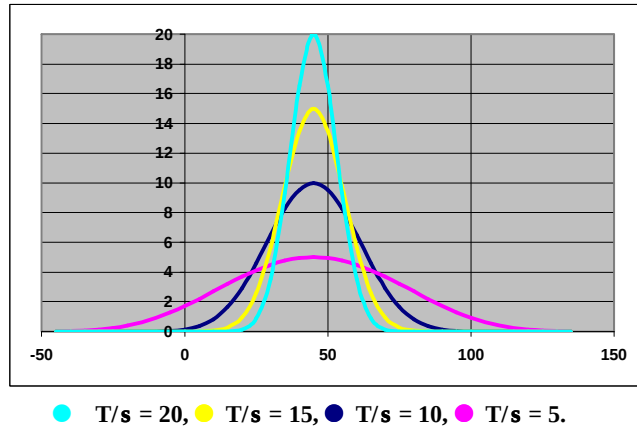


Figura 4

Speckle

La utilización del primer láser en 1960 reveló un fenómeno inesperado: los objetos iluminados con él adquieren una apariencia granular. La estructura de esta granularidad (Figura 5) no parece guardar ninguna relación obvia con las propiedades microscópicas del objeto iluminado.

El origen de esta granularidad fue observado por los primeros investigadores en el tema láser^(28,29,30). La mayoría de las superficies son muy rugosas en la escala de las longitudes de onda ópticas. Bajo una iluminación coherente, la onda reflejada por la superficie, consiste, de acuerdo al principio de Huygens, en la superposición de las ondas que provienen de los diferentes elementos microscópicos de la superficie. Las distancias recorridas por estas ondas pueden diferir en varias longitudes de ondas, manteniéndose sin embargo, la coherencia de la onda original. La interferencia de estas ondas desfasadas da como resultado la figura granular que se conoce como *speckle*.

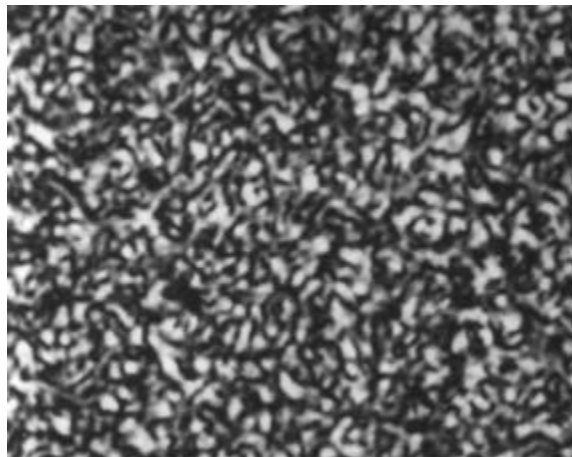


Figura 5

Dado que si se mueve el punto de observación, las distancias recorridas por las distintas componentes dispersadas cambia, se obtiene un nuevo valor de la intensidad, independiente del anterior. Por lo tanto, la figura de *speckle* consiste en una multitud de pequeñas manchas brillantes y oscuras cuya la interferencia ha sido constructiva o destructiva.

El *speckle* tiene una categoría especial entre los fenómenos de ruido, porque en realidad no es un ruido, sino información no deseada. Dicha información, debidamente procesada, permite conocer muchas propiedades de la superficie iluminada, como por ejemplo la rugosidad, longitud de correlación, deformaciones, desplazamientos, rotaciones, tensiones, vibraciones, etc.

Correlación angular de speckles.

Se verá ahora la correlación angular de intensidades en el plano de observación y su relación con la rugosidad de la superficie difusora.

Para el caso de superficies perfectamente reflectoras se parte de la teoría de Beckmann⁽²⁴⁾, de los trabajos de Leger^(5,31), y de la teoría unificada para correlación espectral y angular desarrollada por B. Ruffing^(33,34). No obstante, dado que el dispositivo experimental utilizado tiene una geometría algo diferente, se estudia la correlación en estas nuevas condiciones siguiendo trabajos realizados más recientemente^(8,....,13).

Cuando se ilumina una superficie rugosa con un haz láser, la luz reflejada tiene un aspecto granular denominado speckle. Si la superficie es bastante rugosa, se puede afirmar que está formada por una gran cantidad de dispersores independientes, la amplitud del campo complejo obedece a una estadística circular gaussiana. En este caso, se tendrá una componente especular despreciable y la figura de speckle se dice que está "completamente desarrollada". Cuando el ángulo de iluminación varía ligeramente, esta figura, 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 speckles antes y después de haber variado el ángulo de iluminación mediante una operación de correlación.

Como los detectores no son lineales, se calculará la correlación de intensidades y se determinará su relación con la rugosidad de la superficie.

Como ya se ha visto, es posible obtener la correlación de intensidades, a partir de la correlación de amplitudes del campo dispersado. Se considerará por simplicidad el problema unidimensional. Por lo tanto, partiendo de la expresión para el campo difundido en la dirección $\mathbf{q}_2$, cuando se ilumina la superficie bajo un ángulo de incidencia $\mathbf{q}_1$:

$$E(\mathbf{q}_2, \mathbf{q}_1) = K_{2R} \int_{-L}^L \exp\{j[v_x x + v_z z(x)]\} dx \quad (13)$$

Variando el ángulo de incidencia en $d\mathbf{q}_1$, se obtiene la amplitud difundida $E(\mathbf{q}_2 + d\mathbf{q}_2)$. Reemplazando en (13) los ángulos de incidencia y difusión por $\mathbf{q}_1 + d\mathbf{q}_1$ y $\mathbf{q}_2 + d\mathbf{q}_2$ respectivamente (Figura 6).

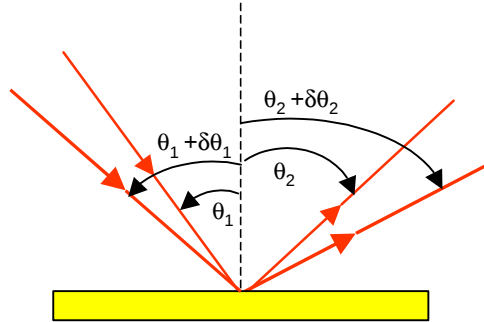


Figura 6

Entonces:

$$E(\mathbf{q}_2)E^*(\mathbf{q}_2 + d\mathbf{q}_2) = |K_{2R}|^2 \int_{-L}^L e^{jv_z z(x_1) + jv_x x_1} dx_1 \int_{-L}^L e^{-jv'_z z(x_2) - jv'_x x_2} dx_2 \quad (14)$$

Donde se ha usado x_1 como variable de integración para $E(\mathbf{q}_2)$ y x_2 como variable de integración para $E(\mathbf{q}_2 + d\mathbf{q}_2)$, se ha considerado $K_{2R}(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2) \gg K_{2R}(\mathbf{q}_1 + d\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2 + d\mathbf{q}_2)$ y

$$\begin{aligned} v_x &= k(\sin \mathbf{q}_1 - \sin \mathbf{q}_2) & v_z &= k(\cos \mathbf{q}_1 + \cos \mathbf{q}_2) \\ v'_x &= k[\sin(\mathbf{q}_1 + d\mathbf{q}_1) - \sin(\mathbf{q}_2 + d\mathbf{q}_2)] & v'_z &= k[\cos(\mathbf{q}_1 + d\mathbf{q}_1) + \cos(\mathbf{q}_2 + d\mathbf{q}_2)] \end{aligned}$$

reagrupando en la ecuación (14)

$$\begin{aligned}
E(\mathbf{q}_2)E^*(\mathbf{q}_2 + d\mathbf{q}_2) &= \\
&= |K_{2R}|^2 \int_{-L}^L \int_{-L}^L e^{j[\mathbf{v}_z \mathbf{z}(x_1) - \mathbf{v}'_z \mathbf{z}(x_2)]} e^{j[\mathbf{v}_x x_1 - \mathbf{v}'_x x_2]} d\mathbf{x}_1 d\mathbf{x}_2
\end{aligned} \quad (15)$$

y considerando que la abertura es suficientemente grande, la hipótesis de ergodicidad permite decir que el valor medio espacial es el mismo que el valor medio de "ensemble", luego:

$$\begin{aligned}
\langle E(\mathbf{q}_2)E^*(\mathbf{q}_2 + d\mathbf{q}_2) \rangle &= \\
&= |K_{2R}|^2 \int_{-L}^L \int_{-L}^L \left\langle e^{j[\mathbf{v}_z \mathbf{z}(x_1) - \mathbf{v}'_z \mathbf{z}(x_2)]} \right\rangle e^{j[\mathbf{v}_x x_1 - \mathbf{v}'_x x_2]} d\mathbf{x}_1 d\mathbf{x}_2
\end{aligned} \quad (16)$$

Teniendo en cuenta (7), haciendo un cambio de variables e integrando, se tiene:

$$\langle E(\mathbf{q}_2)E^*(\mathbf{q}_2 + d\mathbf{q}_2) \rangle = |K_{2R}|^2 2L \text{sinc}(D\mathbf{v}_x L) \int_{-L}^L c(\mathbf{v}_z, -\mathbf{v}'_z) e^{j\mathbf{v}_x \mathbf{t}} d\mathbf{t} \quad (17)$$

La suposición de una distribución de alturas gaussiana, implica:

$$c(\mathbf{v}_z, -\mathbf{v}'_z) = \exp\left\{j\frac{\mathbf{t}^2}{2} - \frac{\mathbf{s}^2}{2} [\mathbf{v}_z^2 + \mathbf{v}'_z{}^2 - sC(\mathbf{t})\mathbf{v}_z \mathbf{v}'_z]\right\} \quad (18)$$

Donde $\mathbf{s}$ y $C(\mathbf{t})$ son la varianza y la función correlación de las alturas respectivamente.

Reemplazando (18) en (17), suponiendo que la superficie en consideración tiene una función de correlación gaussiana que para $\mathbf{t} = 0$ se puede aproximar a $C(\mathbf{t}) \approx 1 - \frac{\mathbf{t}^2}{T^2}$, llevando los límites de integración a $\pm \frac{T}{2}$ y llamando $D\mathbf{v}_z = \mathbf{v}_z - \mathbf{v}'_z$ se tiene:

$$\int_{-L}^L c(\mathbf{v}_z, -\mathbf{v}'_z) e^{j\mathbf{v}_x \mathbf{t}} d\mathbf{t} = \exp\left\{j\frac{\mathbf{t}^2}{2} - \frac{\mathbf{s}^2}{2} (D\mathbf{v}_z)^2\right\} \sqrt{\frac{\mathbf{p}T^2}{\mathbf{s}^2 \mathbf{v}_z \mathbf{v}'_z}} \exp\left\{j\frac{\mathbf{v}_x^2 T^2}{4\mathbf{s}^2 \mathbf{v}_z \mathbf{v}'_z}\right\} \quad (19)$$

Reemplazando (19) en (17), la correlación de amplitudes queda:

$$\langle E(\mathbf{q}_2)E^*(\mathbf{q}_2 + d\mathbf{q}_2) \rangle = |K_{2R}|^2 2L \text{sinc}(D\mathbf{v}_x L) \exp\left\{j\frac{\mathbf{t}^2}{2} - \frac{\mathbf{s}^2}{2} (D\mathbf{v}_z)^2\right\} \sqrt{\frac{\mathbf{p}T^2}{\mathbf{s}^2 \mathbf{v}_z \mathbf{v}'_z}} \exp\left\{j\frac{\mathbf{v}_x^2 T^2}{4\mathbf{s}^2 \mathbf{v}_z \mathbf{v}'_z}\right\}$$

Si se normaliza dividiendo por $\langle I(\mathbf{q}_2) \rangle$ y haciendo $d\mathbf{q}_2 = \frac{\cos \mathbf{q}_1}{\cos \mathbf{q}_2} d\mathbf{q}_1$

La correlación de amplitudes queda:

$$C_E(\mathbf{q}_2, \mathbf{q}_2 + d\mathbf{q}_2) = \exp\left\{j\frac{\mathbf{t}^2}{2} - \frac{\mathbf{s}^2}{2} D\mathbf{v}_z^2\right\} = \exp\left\{j\frac{\mathbf{t}^2}{2} - \frac{\mathbf{s}^2}{2} \frac{\mathbf{t}^2}{\cos \mathbf{q}_2}\right\} d\mathbf{q}_2$$

Recordando que^(39,40)

$$\begin{aligned}
&\langle [I(\mathbf{q}_2) - \langle I(\mathbf{q}_2) \rangle] [I(\mathbf{q}_2 + d\mathbf{q}_2) - \langle I(\mathbf{q}_2 + d\mathbf{q}_2) \rangle] \rangle = \\
&= \langle DI(\mathbf{q}_2)DI(\mathbf{q}_2 + d\mathbf{q}_2) \rangle = \left| \langle E(\mathbf{q}_2)E^*(\mathbf{q}_2 + d\mathbf{q}_2) \rangle \right|^2
\end{aligned}$$

y que se define como *coeficiente de correlación* r_I a

$$r_I = \frac{\langle DI(q_2)DI(q_2 + dq_2) \rangle}{s_{I(q_2)} s_{I(q_2 + dq_2)}}$$

Para dos speckles completamente desarrollados, $s_I = \langle I \rangle$, entonces:

$$r_I = \exp \left[-s^2 k^2 \frac{\sin(q_1 + q_2)}{\cos q_2} dq_2 \right] \quad (20)$$

Suponiendo ahora que inicialmente se ilumina la superficie según una dirección q_1 , y luego para variar el ángulo de incidencia, en lugar de rotar el haz del láser, se rota la superficie un ángulo dq_1 . La figura de speckle, se habrá desplazado un ángulo dq_2 como indica la *Figura 6* y un ángulo adicional dq_1 debido a la rotación de la superficie como indica la *Figura 7*.

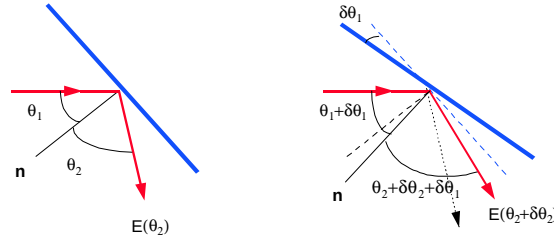


Figura 7

Entonces, para el caso $q_2 = q_1$ y como

$$dq_2 = 2dq_1. \quad (21)$$

El coeficiente de correlación en función de la variación del ángulo de incidencia $dq_1 = dq$, resulta ser

$$r_I = \exp \left[-s^2 k^2 (4 \times dq \times \sin q)^2 \right] \quad (22)$$

Correlacion digital de figuras de speckle.

Como se ha visto en los dos capítulos anteriores, la correlación de speckle en intensidad en el plano de observación está relacionada con la rugosidad de la superficie.

Diferentes métodos fueron utilizados para extraer esta información^(5,41,42), por ejemplo mediante el estudio del contraste de las franjas que aparecen cuando se hacen interferir las amplitudes de las ondas difundidas para las dos direcciones de incidencia.

En el presente trabajo se optó por calcular la correlación de intensidades directamente en el plano de observación (Fraunhofer). Para ello, se recurrió al procesamiento digital de las figuras de speckle registradas mediante una cámara CCD unidimensional.

Se realiza un muestreo de la distribución de intensidad de las figuras de speckle, sobre la base de que estas constituyen procesos aleatorios ergódicos y espacialmente estacionarios. La primera condición (ergodicidad) se satisface tomando un número suficientemente grande de granos de speckle teniendo en cuenta que, por lo menos, se debe hacer un muestreo de cada grano de speckle con un número de muestras dado por el teorema de Nyquist. La segunda condición (estacionariedad), se logra tomando una muestra rugosa de dimensiones tales que, dentro de ella, la intensidad media sea constante.

El valor medio de la intensidad muestreada será simplemente:

$$\langle I_j \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} I_{ji} \quad (23)$$

La varianza será:

$$s_{I_j}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (I_{ji} - \langle I_j \rangle)^2 \quad (24)$$

La función autocorrelación muestreada será (Figura 10):

$$G_I(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-|k|-1} I_{ji} I_{i+|k|} \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm N - 1 \quad (25)$$

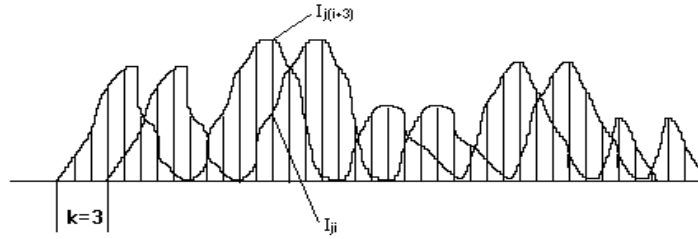


Figura 8

y la correlación cruzada:

$$G_{I_j I_s}(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-|k|-1} I_{ji} I_{s(i+k)} \quad k = 0, 1, \dots, N - 1$$

$$G_{I_j I_s}(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=|k|}^{N-1} I_{ji} I_{s(i+k)} \quad k = -1, -2, \dots, -N + 1$$

$$G_{I_j I_s}(k) = 0 \quad |k| \geq N$$

Se puede demostrar que cuando $N \gg k$, el valor de $G(k)$ es muy parecido al verdadero valor de la correlación⁽⁴³⁾.

Se calcula el valor del coeficiente de correlación definido en función de las fluctuaciones de intensidad $\Delta I = I_i - \langle I \rangle$

$$G_{\Delta I_j \Delta I_s}(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-|k|-1} (\Delta I_{ji} - \langle \Delta I_j \rangle)(\Delta I_{s(i+k)} - \langle \Delta I_s \rangle) \quad k = 0, 1, \dots, N - 1$$

$$G_{\Delta I_j \Delta I_s}(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=|k|}^{N-1} (\Delta I_{ji} - \langle \Delta I_j \rangle)(\Delta I_{s(i+k)} - \langle \Delta I_s \rangle) \quad k = -1, -2, \dots, -N + 1$$

$$G_{\Delta I_j \Delta I_s}(k) = 0 \quad |k| \geq N$$

entonces,

$$r_I(k) = \frac{G_{\Delta I_j \Delta I_s}}{s_{I_j} s_{I_s}} \quad (28)$$

En nuestro caso, la medida de la decorrelación que estamos buscando, corresponde a la deformación de la misma figura de speckle luego $k = 0$. (Superposición de la misma figura de spe-

ckle). Sin embargo el cálculo del coeficiente de correlación para valores de $k \neq 0$ nos permite el correcto reposicionamiento del detector, como describiremos en la parte experimental.

MEDICIONES EXPERIMENTALES DE RUGOSIDAD.

Se presentan las mediciones experimentales de rugosidad realizadas aplicando el método de correlación digital de figuras de speckles. Se han efectuado determinaciones mediante reflexión de luz por una superficie rugosa.

Se muestra una aplicación de este método al estudio de la porosidad de rocas de testigos provenientes de pozos petroleros y a la caracterización de una aglomeración de partículas.

Descripción del método

Se ilumina con un haz coherente, una superficie rugosa como se ve en la *Figura 9*. Un arreglo lineal de detectores del tipo CCD ubicado en la dirección de reflexión especular, registra la distribución de intensidades del speckle. Luego se rota la superficie un pequeño ángulo $d\theta$. Para observar la deformación de los mismos granos de speckle, se desplaza el detector un ángulo $2d\theta$. En esta posición, el detector registra el nuevo patrón de intensidad. Se repiten estos registros para otros valores de $d\theta$. Se calcula la correlación de cada una de estas intensidades con la primera y de la relación r_1 vs. $d\theta$ se obtiene el valor de la rugosidad, ajustando los valores experimentales por regresión numérica a la curva teórica.

Dispositivo experimental

Un láser de He-Ne ($\lambda = .633 \mu\text{m}$) incide sobre la superficie rugosa a través de un sistema compuesto por tres lentes (*Figura 10*): O_1 es un objetivo de microscopio que ensancha el haz; O_2 es una lente esférica que determina el plano de Fourier sobre el detector; O_3 es una lente cilíndrica que en combinación con la lente 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 de manera de hacer casi insensible la medición a posibles desplazamientos transversales que podrían introducir una decorrelación adicional.

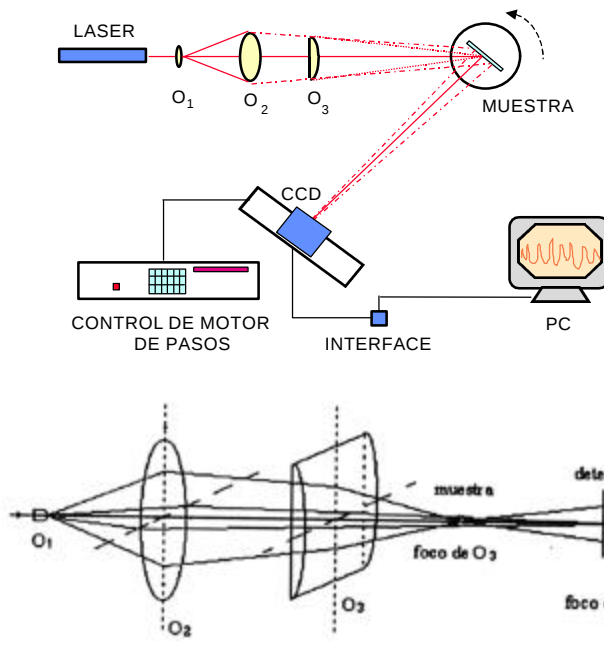


Figura 9

Figura 10

La muestra rugosa 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 conjunto de movimientos micrométricos permite ajustar esta posición.

El detector es del tipo CCD ("charge coupled device") y consiste en un arreglo de 512 sensores alineados de $7\mu\text{m}$ de ancho y $13\mu\text{m}$ de alto separados entre sí por una distancia de $13\mu\text{m}$.

Cada rotación es acompañada por una traslación del detector. Esta, se realiza mediante un motor de pasos manejado por un controlador digital con un desplazamiento mínimo igual a $2.5\mu\text{m}$.

La cámara CCD, está conectada mediante una interfase a una computadora. El monitor de dicha computadora, muestra la distribución de intensidad de los sucesivos registros de speckles (*Figura 11a* superpuestos y *Figura 11b* desplazados).

En la *Figura 11b* se aprecia claramente, la variación de cada grano de speckle cuando se varía el ángulo de incidencia.

La comparación visual de las figuras de speckle sobre la pantalla, permite un primer ajuste de la superposición de las mismas, que se efectúa con el goniómetro.

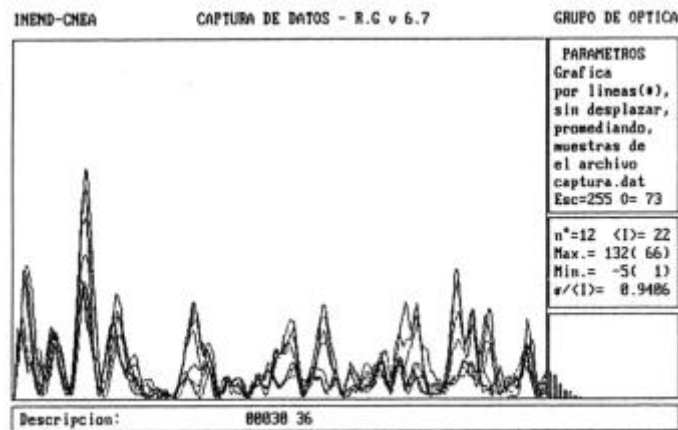


Figura 11a

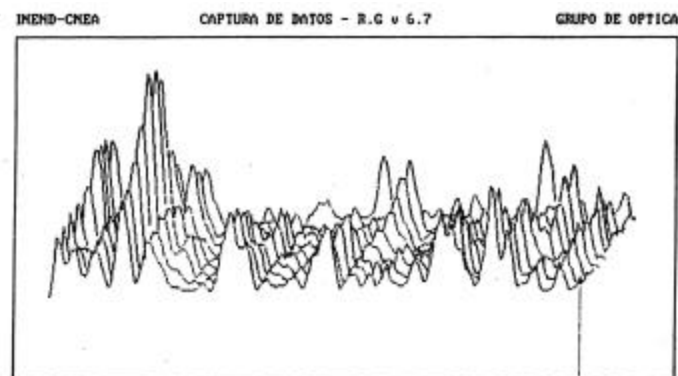


Figura 11b

Los registros de intensidad, son almacenados para cada posición de la muestra.

Posteriormente se procesan las muestras almacenadas: mediante el algoritmo correspondiente (27), se efectúa la correlación de las sucesivas figuras de speckle con la primera. El programa devuelve los valores máximos de las distintas correlaciones y el correspondiente corrimiento Dk con el cual, por software se realiza un ajuste fino de la posición. El mismo programa ajusta los datos experimentales de correlación con la curva teórica dando el valor de la rugosidad s correspondiente.

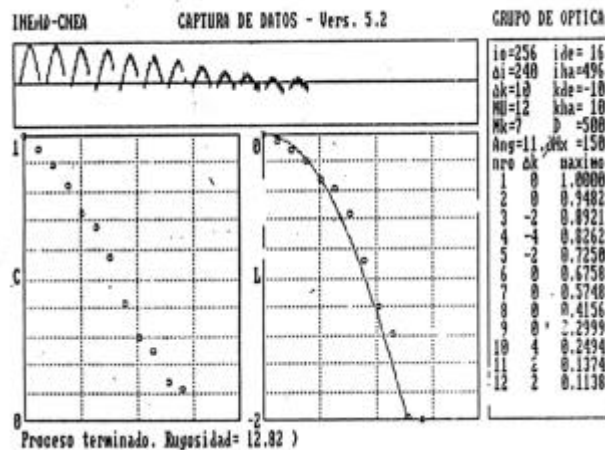


Figura 12

La Figura 12, muestra estos resultados. En la parte superior, se muestran las sucesivas correlaciones, en el centro, los valores de la correlación y del logaritmo de la correlación en función de dq y en la parte inferior, el valor de la rugosidad calculada.

Los errores en el cálculo de s provienen principalmente de la medición del ángulo dq , pero son mucho menores que los errores estadísticos, salvo los provenientes de lo acertado o no del modelo usado.

Los valores del cuadro de la derecha corresponden a la elección del tamaño y posición de la ventana que selecciona un subconjunto de muestras dentro de las 512 detectadas en cada serie.

En el mismo cuadro se ingresan para el cálculo, la cantidad de series, el ángulo de incidencia inicial y la distancia del detector a la superficie rugosa. A continuación, aparecen para cada serie el valor máximo de su correlación con la primera.

Resultados

La Figura 13 muestra los datos experimentales y las curvas teóricas con el valor de rugosidad calculado a partir de ellos, para tres de las distintas muestras patrones medidas.

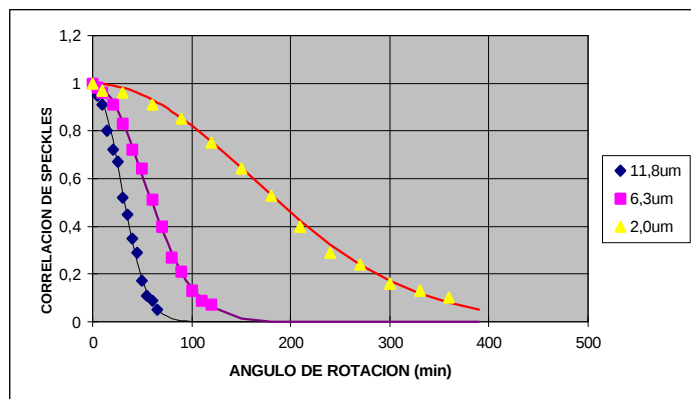


Figura 13

En la Tabla 1 se ven los resultados de las mediciones realizadas con el presente método y las obtenidas con un rugosímetro electromecánico Hommel-Werke.

muestra	1	2	3
s (correlación)	$(11,8 \pm 1,5) \mu\text{m}$	$(6,3 \pm 0,7) \mu\text{m}$	$(2,0 \pm 0,2) \mu\text{m}$
s (rugosímetro)	$(11,0 \pm 2) \mu\text{m}$	$(5,8 \pm 1) \mu\text{m}$	$(1,9 \pm 0,5) \mu\text{m}$

Tabla 1

Se han considerado, como en todos los casos de medición de rugosidades, los errores estadísticos sobre un conjunto de mediciones sobre la misma muestra (no menor que cinco), esto da un error de medida para cada muestra del 10%.

DETERMINACION DE LA RUGOSIDAD DE ROCAS MEDIANTE CORRELACION DE SPECKLES.

La utilización del método de correlación de speckles para el estudio de superficies rugosas y los resultados obtenidos para superficies no gaussianas, nos condujeron a pensar en extender su aplicación a otros medios con características aleatorias aún cuando se desconociera la relación teórica entre el medio y la rugosidad medida. Como la porosidad superficial presenta características aleatorias, semejantes a la rugosidad de una superficie, se utilizó el método de correlación de speckles para caracterizar testigos de corona obtenidos de pozos petrolíferos. Se decidió entonces, realizar experiencias para caracterizar rocas porosas y para medir tamaño de partículas de polvos.

Medición de rugosidad de rocas.

Ha sido demostrado⁽³⁴⁾, que la porosidad superficial es proporcional a la porosidad volumétrica. La porosidad superficial puede ser considerada como la sección transversal de todos los poros intersectados por un plano, y luego expresados como una fracción de la sección transversal total de la roca.

Como la porosidad superficial de las rocas presenta características aleatorias análogas a la rugosidad de una superficie, se decidió utilizar el método de correlación de speckles para muestras obtenidas de pozos petrolíferos.

La superficie de una roca porosa no posee una distribución de las alturas gaussiana, no obstante se aplica el método de correlación digital de speckles usado para medición de rugosidades y se comparan los valores de s obtenidos, con los valores de porosidad medidos por métodos convencionales^(36,37,38).

Las muestras fueron cortadas de testigos de corona provistos por la empresa ASTRA S.A. y corresponden a una sola formación geológica de Argentina denominada POZO ET-16.

Se construyó un dispositivo, en el que se colocan las muestras, que permitió su montaje de manera de posicionar las muestras rápidamente para hacer las mediciones en la configuración geométrica óptima determinada en los trabajos de calibración con superficies rugosas patrones, es decir, con todo el sistema alineado de modo que el eje de giro este contenido en el plano de la superficie de la roca.

Debido a la escasa reflectividad de las superficies rocosas, se requirió mayor potencia de láser y mayor sensibilidad de la cámara CCD para optimizar la relación señal/ruido del conjunto detector-conversor.

La muestra y el correspondiente dispositivo para soportarla están montados sobre un goniómetro, de modo que se puede cambiar el ángulo de iluminación rotando el conjunto. Cada desplazamiento del speckle generado por la muestra produce un desplazamiento y una ligera deformación del speckle. Este movimiento es acompañado mediante un desplazamiento del detector que ha sido montado en un motor de pasos, de este modo siempre se observa el mismo conjunto de speckles, sólo algo deformados con respecto al anterior.

El monitor de una PC muestra la intensidad de las sucesivas figuras de speckles (*Figura 11*). Estos registros son almacenados para cada posición de la roca porosa.

La correlación r_i de las sucesivas distribuciones de intensidad de speckle se calculan mediante un algoritmo desarrollado en el LOL, basado en el modelo teórico de Legér modificado para esta configuración experimental.

La *Figura 14*, muestra la variación de la correlación del speckle en función del ángulo de rotación de algunas muestras con distintos valores de porosidad.

Para calcular la rugosidad asociada a estas curvas se utilizó la expresión (2-22). Las características que presentan estas curvas, no son iguales a las obtenidas por superficies rugosas gaussianas (*Figura 13*), entonces, para disminuir el error de utilizar una ecuación deducida para una superficie gaussiana para determinar la rugosidad de otra superficie que no lo es (*Figura 15*), se toma en cada una de ellas, aquellos puntos para los cuales a una pequeña variación en dq le corresponde la mayor decorrelación, es decir se mide el dq para una caída de la decorrelación entre 0.7 y 0.3⁽⁴²⁾.

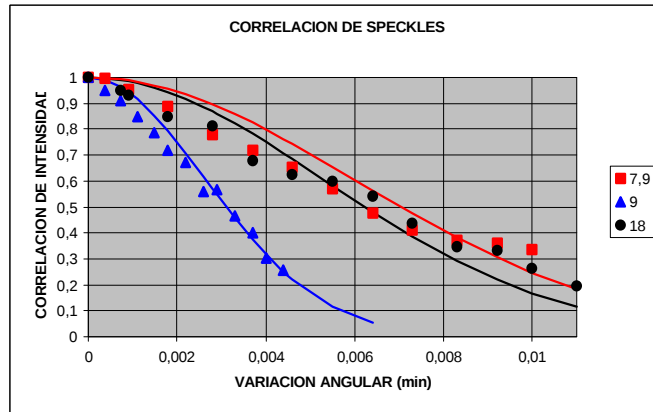


Figura 14

Se construyó un dispositivo para posicionar las muestras de modo de poder montar y alinear las rocas rápidamente, esta necesidad tiene dos motivos: por un lado el trabajo realizado debía tender a satisfacer requerimientos de la industria petrolera y uno de ellos es la celeridad de las mediciones, por el otro, dadas las características no gaussianas de las rocas porosas, se consideró necesario realizar unas diez mediciones de la rugosidad para cada roca girando la muestra entre 20° y 30° entre una medición y otra y luego hacer el promedio de todos los valores obtenidos. El valor que se presenta en este trabajo es el promedio de los valores hallados.

Se consideró que el promedio atenuaba el error debido al modelo utilizado. La Figura 15 muestra una imagen de un modelo de la superficie más cercano a la realidad y que se está estudiando como una proyección de los resultados obtenidos en el presente trabajo.



Figura 15

Otro punto que se estudió y se resolvió en este trabajo, ha sido el de la frecuencia de muestreo. Se optimizó esta para lograr la mejor relación señal/ruido. Para ello se estudió el problema en cada etapa del sistema experimental. Se iluminó la muestra con una mancha luminosa que abarcara un número importante de irregularidades, de modo de cumplir con el teorema ergódico. Esta condición implica que la zona iluminada sea grande, pero esto significa que el grano de speckle a nivel de los detectores de la cámara CCD sean muy pequeños. Por consiguiente hubo que encontrar un tamaño óptimo que permitiera cumplir con la condición de ergodicidad y al mismo tiempo produjera un grano de speckle que cumpliera con la condición de Nyquist a nivel de la cámara CCD. Se logró esta condición para un grano de speckle promedio que abarcaba entre diez y quince detectores de la cámara CCD.

Se han realizado mediciones de rugosidad de veinte (20) muestras de testigos de corona de la misma formación geológica y del mismo pozo, denominado POZO ET-16, con ellas se ha operado como se lo señaló más arriba. El resultado de dichas mediciones se muestra en la Tabla 2.

TESTIGO (Nº)	POROSIDAD (%)	RUGOSIDAD (mm)
0	0	0
60	6,5	7,0
62	12	10,8
66	15	13,2
68	18,5	16,0
70	30	26,8
74	17,5	13,8
76	16,0	15,2
78	19,5	16,8
80	18,1	17,0
82	17,3	19,9
246	16,8	18,2
248	16,0	25,7
250	16,6	15,5
256	18,4	20,5
258	18,0	17,8
264	6,6	6,8
266	7,6	8,5
274	2,2	7,9
276	1,4	9,8
278	13,4	14,6

Tabla 2

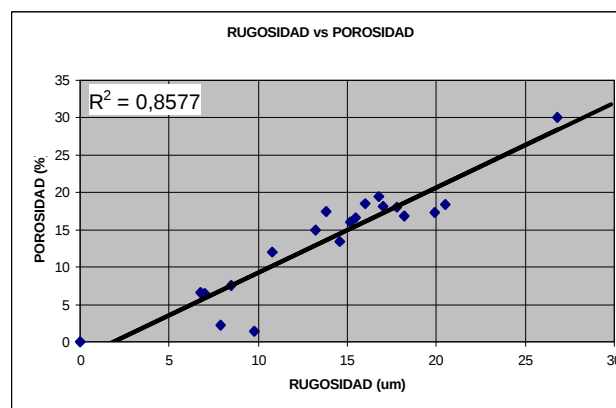


Figura 16

De las curvas de correlación de intensidades de speckle vs. **dq**, se deduce que la superficie de la roca no se ajusta a un modelo gaussiano. Sin embargo, existe un alto grado de correlación entre la correlación y el parámetro de rugosidad medido.

Podemos pensar entonces que este método se puede extender al análisis de otros parámetros superficiales aleatorios.

Los resultados obtenidos nos permiten imaginar este método como apto para medir la porosidad de rocas, sin embargo, es necesario encontrar una teoría que relacione la porosidad con la correlación del speckle. Esto escapa al alcance del presente trabajo, pero deja abierta la posibilidad de continuar los estudios en esta dirección.

Un coeficiente de correlación de **0,86** para las **20** muestras del POZO ET-16 (Figura 16) nos alienta a seguir trabajando en este sentido, es decir, estudiar no menos de **200** muestras de un mismo pozo para verificar si el coeficiente de correlación entre porosidad y rugosidad se mantiene superior a **0,8**. Indudablemente para realizar estas mediciones es imprescindible tener un láser de mayor potencia y una cámara CCD más sensible que las utilizadas para este trabajo.

Medición del tamaño de partículas

Dado que puede pensarse a una roca porosa como una aglomeración de partículas, el estudio de este tipo de aglomeraciones podría ser de valor para el presente trabajo.

Por lo tanto nos hemos propuesto medir el diámetro medio de un aglomerado de partículas mediante el método de correlación de speckles. En general, la estructura de la superficie de un aglomerado de partículas, consiste en un gran número de ellas estrechamente relacionada a su

tamaño y forma. En particular, para cierto tipo de superficies, la irregularidad microscópica depende fuertemente del tamaño de las partículas que forman el material.

Por lo tanto, se podría obtener alguna información sobre el tamaño de las partículas que forman el material y de allí obtener información sobre la porosidad que sería algo así como el negativo de las partículas.

El experimento se llevó a cabo con varias clases de polvos en el rango de **1mm a 30mm**. Como en el caso de la porosidad, de los datos experimentales se observa una correlación relevante entre la rugosidad de la superficie y el diámetro medio de las partículas.

Las propiedades de la superficie formada por una aglomeración de polvo determinada por el método de correlación de speckles puede pensarse como una combinación de la irregularidad conformada por la partícula y los intersticios dejados por las partículas de su entorno y de la rugosidad misma de la partícula. Sin embargo, dado que la rugosidad de una partícula es pequeña comparada con su tamaño, el efecto de los intersticios entre partículas, que dependen básicamente del tamaño de ellas debería aparecer como un indicador relacionado con las mediciones de correlación de speckles.

En el desarrollo experimental, se utiliza el diámetro medio pesado como el diámetro característico de las partículas en el polvo aglomerado. Se define como diámetro medio pesado $D_{sm}^{(35)}$

$$D_{sm} = (\sum n_i d_i^3) / (\sum n_i d_i^2)$$

donde d es el diámetro de la partícula, n es el número de partículas y el subíndice i designa partículas de un dado diámetro. Si los tamaños de las partículas siguen una distribución log-normal, el diámetro medio esta dado por

$$D_{sm} = D_{mm} \exp(-0.5 \ln^2 s_g)$$

donde D_{mm} el diámetro medio y s_g es la desviación estándar de los diámetros de las partículas.

Puesto que el diámetro medio pesado lo es para un área específica, podría ser razonable evaluar el tamaño medio de las partículas que han sido examinadas en la experiencia. Este diámetro medio se adapta mejor a los resultados experimentales que otros valores medios.

Sobre la base del mismo experimento, se dispusieron muestras constituidas por partículas de carborundum (carburo de silicio), alúmina (óxido de aluminio), carbonato de calcio y arena de distribución de tamaño conocido.

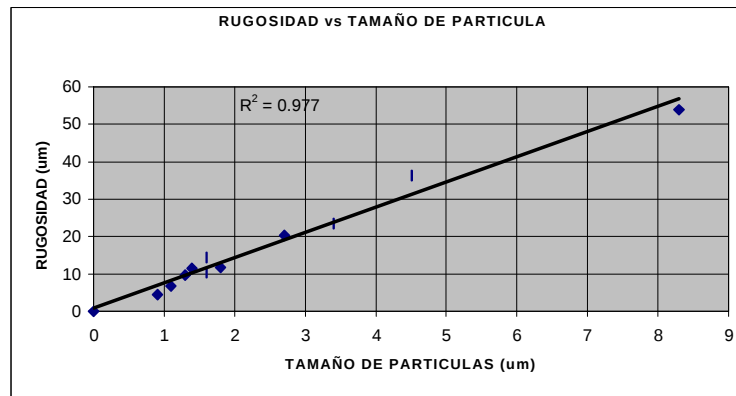


Figura 17

Los resultados obtenidos, así como los calculados por Asakura, nos permiten suponer que ésta sería una interesante manera de profundizar el estudio de la porosidad ópticamente. Sin duda, estos estudios deben ser profundizados. En primer lugar, habría que mejorar el diseño de las muestras y tener más certeza sobre el tamaño de partículas, para ello sería necesario optimizar la determinación previa de la distribución de diámetros presentes en el conjunto de las partículas y la cantidad relativa de cada uno de dichos diámetros. Una manera de hacer este trabajo es determinar estos parámetros mediante un buen granulómetro por difracción.

De todas maneras hemos mostrado que existe una relación entre la rugosidad y la porosidad y el tamaño de las partículas que conforman la roca porosa.

CONCLUSIONES.

En este trabajo se ha utilizado un método nuevo, el de correlación de speckles, para caracterizar rocas porosas.

El método se basa en la medición del grado de correlación entre dos figuras de speckles producidas mediante dos iluminaciones diferentes de la misma región de la roca.

Para ello se han realizado determinaciones de la rugosidad de rocas provenientes de testigos de corona de un solo pozo de petróleo. Dado que existe una dispersión importante en las determinaciones de dicha rugosidad para cada muestra, en cada caso se realizaron cinco o más mediciones para diferentes zonas de la misma roca y se tomó su promedio como valor de la rugosidad de dicha roca. De este modo, no sólo se determinó el promedio estadístico en el área iluminada, sino que, mediante el artificio señalado podemos decir que se obtuvo el promedio estadístico sobre una zona iluminada mucho mayor que la tomada para cada medida.

La *Figura 14* muestra un resultado típico obtenido para tres de las muestras estudiadas. Se puede ver claramente que la decorrelación del speckle permite diferenciar la distinta rugosidad de las rocas con diferente porosidad. Este resultado muestra la capacidad del método de correlación de speckles para diferenciar los distintos niveles de porosidad.

Luego se compararon las determinaciones de la rugosidad mediante el método de correlación de speckles con las mediciones de la porosidad mediante los métodos clásicos^(36,37,38).

En la *Figura 16* se grafican los valores de la rugosidad medida, como fue señalado más arriba, versus la porosidad de las mismas muestras determinada mediante el método de Boyle. De la misma se deduce que el coeficiente de correlación de dichos puntos es de **0,86**, por lo que podemos deducir que existe una relación entre la rugosidad y la porosidad superficial. Sin embargo, todavía no hemos encontrado la relación teórica que relaciona ambos parámetros, aunque se han realizado algunos trabajos al respecto.

En el contexto del presente trabajo se ha considerado importante medir el diámetro medio de un aglomerado de partículas mediante el método de correlación de speckles. En general, la estructura de la superficie de un aglomerado de partículas, consiste en un gran número de ellas estrechamente relacionada a su tamaño y forma. En particular, para cierto tipo de superficies, la irregularidad microscópica depende fuertemente del tamaño de las partículas que forman el material. Por lo tanto, se podría obtener alguna información sobre el tamaño de las partículas que forman el material y de allí obtener información sobre la porosidad que sería algo así como el negativo de las partículas.

El experimento se llevó a cabo con varias clases de polvos en el rango de **1mm a 30mm**. Las muestras fueron preparadas colocando un pegamento en un disco de metal y luego se volcó polvo con una cierta distribución de diámetros medios y se dejó que se adhirieran al soporte metálico. Finalmente dichas muestras fueron colocadas en el mismo dispositivo que se había preparado para determinar la rugosidad de rocas y se evaluó su rugosidad por correlación de speckles.

Las propiedades de la superficie formada por una aglomeración de polvo determinada por el método de correlación de speckles puede pensarse como una combinación de la irregularidad conformada por la partícula y los intersticios dejados por las partículas de su entorno y de la rugosidad misma de la partícula. Sin embargo, dado que la rugosidad de una partícula es pequeña comparada con su tamaño, el efecto de los intersticios entre partículas, que dependen básicamente del tamaño de ellas debería aparecer como un indicador relacionado con las mediciones de correlación de speckles.

Se utilizaron muestras constituidas por partículas de carborundum (carburo de silicio), alúmina (óxido de aluminio), carbonato de calcio y arena de distribución de tamaño conocido y se evaluó su diámetro medio pesado. Los resultados obtenidos, aún cuando la determinación del diámetro medio es relativamente imprecisa debido a que, por falta de tiempo, no se pudo hallar una distribución de diámetros confiable en todos los casos, son indudablemente interesantes. El coeficiente de correlación de **0,98** indica que estamos en el camino correcto. Sin embargo es imprescindible continuar con las investigaciones en curso y profundizar la teoría de manera de encontrar expresiones que relacionen la rugosidad con la porosidad y con el tamaño de partículas.

Los resultados obtenidos permiten afirmar que el método de correlación de speckles es adecuado para estudiar la porosidad y el tamaño de partículas. Sin embargo, es imprescindible continuar este trabajo en tres direcciones: por un lado realizar mediciones de rugosidad de un mayor número de rocas, en lo posible provenientes de una misma configuración geológica, en

segundo lugar, construir más muestras de aglomerados de polvo al que previamente se ha determinado su distribución de diámetros y por último avanzar en el desarrollo teórico de modelos que relaciones dichos parámetros.

AGRADECIMIENTOS:

Los autores desean expresar su agradecimiento al Lic. Raúl García por el desarrollo de parte del software utilizado en este trabajo, al Sr. Carlos Jordana por su inestimable ayuda en lo concerniente a la solución de problemas en soft y hardware, al Dr. Jorge Albano y al Lic. Norberto Galacho por habernos provisto las muestras estudiadas y por su asesoramiento en problemas relativos a las mismas.

BIBLIOGRAFIA

1. D.H. Hensler, *Light scattering from fused polycrystalline aluminum oxide surfaces*; Appl. Opt. **11**, 2522-2528 (1972).
2. F. Berny et C. Imbert, *Determination Optique des états de surface*; Bulletin du Bureau National de Métrologie **4**, 14(1973).
3. 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).
4. 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).
5. D. Léger, E. Mathieu and J.C. Perrin, *Optical surface roughness determination using speckle correlation technique*, Appl. Opt. **14**, 872-877(1975).
6. M.S. Sthel, J.J. Lunazzi, E.N. Hogert and N.G. Gaggioli, *Speckle pattern direct photographic correlation for measuring surface roughness*, Proc. SPIE **813**, 561(1987).
7. B. Ruffing and J. Anschutz, *Surface roughness measurement by 2-D digital correlation of speckle images*, Proc. SPIE **814**, 105-112(1987).
8. 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).
9. M.A. Rebollo, E.N. Hogert, M.R. Landau y N.G. Gaggioli, *Determinaciones no destructivas por el método de correlación de speckles*, I Reunión Iberoamericana de Optica, **Com.1C25**, Barcelona, España(1992).
10. F. Pérez Quintián, M.A. Rebollo, E.N. Hogert, M.R. Landau y N.G. Gaggioli, *Determinación de la rugosidad de una transparencia mediante técnicas de correlación de speckles*; Anales AFA **7**, 40-42(1995).
11. F. Perez 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).
12. 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).
13. M.A. Rebollo, E.N. Hogert, M.R. Landau, F. Pérez Quintián y N.G. Gaggioli, *Caracterización de transparencias de rugosidad variable por métodos ópticos*; **Proceedings OPTILAS 95**, 206-209(1996).
14. M.F. Ruiz Gale, J.A. Marengo, M.R. Landau, E.N. Hogert and N.G. Gaggioli *Digital speckle correlation for non-destructive testing of corrosion*; **Proceedings 7th ECNDT**, 717-723(1998).
15. E. Hogert, M. Landau, M. Ruiz Gale, J. Marengo, D. Soga, R. Dias Paiva, M. Muramatsu y N.G. Gaggioli, *END de corrosión mediante el estudio de la luz dispersa*; **Actas de las Jornadas SAM'98 e IBEROMET V** (en prensa).
16. M.A. Rebollo, M.R. Landau, E.N. Hogert, N.G. Gaggioli and M. Muramatsu; *Roughness determination bu direct visual observation of the speckle pattern*, Opt. and Laser Tech. **27**, 355-356(1995).
17. H. Nitta and T. Asakura, *Method for measuring mean particle size of the bulk powder using speckle patterns*; Appl. Opt. **30**, 4854-4858(1991).
18. O.F. Genceli, J.B. Schemm and C.M. Vest, *Measurement of size and concentration of scattering particles by speckle photography*; JOSA **70**, 1212-1218(1980).
19. M. Muramatsu, G.H. Guedes and N.G. Gaggioli, *Speckle correlation used to study the oxidation process in real time*; Opt. and Laser Tech. **26**, 167-172(1994).

20. M.A. Rebollo, E.N. Hogert, M.R. Landau, J. Albano y N.G. Gaggioli, *Resultados preliminares sobre el estudio de la relación entre la rugosidad y la porosidad en rocas*; **II Workshop sobre Aplicaciones de la Ciencia en Ingeniería del Petróleo y II Simposio de Producción de Hidrocarburos**, 13-15/06/1995, Mendoza, Argentina.
21. M.A. Rebollo, E.N. Hogert, J. Albano, C.A. Raffo and N.G. Gaggioli, *Correlation between speckle decorrelation and surface porosity of rocks*; Opt. and Laser Tech. **28**, 21(1996).
22. R. Dias Paiva, D. Soga, M. Muramatsu, E.Hogert, M. Landau, M. Ruiz Gale y N. Gaggioli, *Digital speckle correlation for non destructive testing of corrosion*; Proceedings SPIE (en prensa).
23. E. Hogert, M. Landau, M. Ruiz Gale, J. Marengo, D. Soga, R. Dias Paiva, M. Muramatsu y N.G. Gaggioli, *Non destructive study of corrosion by the analysis of the diffused light*; Proceedings SPIE (en prensa).
24. P. Beckmann and A. Spizzichino, "The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces". Pergamon Press. London (1963).
25. M. G. Lefrançois, *Propriétés statistiques de la lumière diffusée en optique cohérente*; Note Tech. Int. N° EST/DEF/1533, CNET(1968).
26. N. G. Gaggioli, *Reformulación de algunos resultados de P. Beckmann referentes a la dispersión de ondas electromagnéticas por una transparencia rugosa*; Inf. Téc. IIBM **03/1980**, FIUBA (1980).
27. J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*; Mc Graw-Hill, New York (1968).
28. L.I. Goldfisher, *Autocorrelation function and power spectral density of laser-produced speckle pattern*; JOSA **55**, 247(1965).
29. L.H. Enloe, Noise-like structure in the image of diffusely reflecting objects in coherent illumination; Bell Syst. Tech. J. **46**, 1479(1967).
30. N.G. Gaggioli, *Fenómeno de granularidad producido con luz coherente y parcialmente coherente*; Tesis de Doctorado, FCEN-UBA (1976).
31. D. Leger and J. C. Perrin, *Real-Time measurements of surface roughness by correlation of speckle patterns*; JOSA **66**, 1210-1217(1976).
32. B. Ruffing and J. Fleischer, *Spectral Correlation of partially or fully developed speckle patterns generated by rough surfaces*; JOSA **A 2**, 1637-1643(1985).
33. B. Ruffing, *Application of speckle-correlation methods to surface-roughness measurements: a theoretical study*; JOSA **A 3**, 1297-1304(1986).
34. J.W. Amyx, D.M. Bass and R.L. Whiting, *Petroleum Reservoir Engineering, physical properties*; McGraw-Hill, New York, Toronto, London(1960).
35. W.C. Hinds, *Aerosol Technology*; John Wiley & Sons, New York, 1982.
36. S.J. Pirson, *Oil Reservoir Engineering*; Ed. McGraw Hill, N.Y., Toronto, London(1958).
S.J. Pirson, *Ingeniería de Yacimientos Petrolíferos*; Ed. Omega, Barcelona(1965).
37. G. Anderson, *Coring and Core Analysis Handbook*; Petroleum Publishing Company(1975).
38. R.E. Collins, *Flow of Fluids Through Porous Materials*; Ed. Reinhold, London, Berlin(1964).
39. J. C. Dainty Ed., *Laser Speckle and Related Phenomena*; Springer-Verlag, Berlin Heideberg New York (1975).
40. A. Papoulis, *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*; International Student Edition, McGraw Hill Kogakucha, (1965).
41. E.N. Hogert, *Caracterización de superficies rugosas mediante interferometría de speckles*; Tesis de Licenciatura, FCEN-UBA(1983).
42. E.N. Hogert, O.J. Nejamis y N.G. Gaggioli, *Determinación de la rugosidad de una superficie mediante la evaluación de la correlación de speckles*; Carta Metrológica 6/1984.
43. M.Schwartz and L.Shaw, *Signal Processing*; Ed. McGraw-Hill(1975).