

Análisis microestructural de granitos, por técnicas de proceso digital de imágenes, para su utilización como áridos en hormigones

M^a CARMEN ÁNGEL MARTÍNEZ (*)
NICANOR PRENDES RUBIERA (*)

RESUMEN Se presenta una metodología para la determinación, por técnicas de proceso digital de imágenes, de los parámetros más significativos, microestructuralmente hablando, que definen las propiedades de durabilidad de los áridos utilizados como material de préstamo en hormigones; estableciendo, a partir de ellos, un coeficiente (α) que asocia a cada familia de elementos una función lineal que podemos asimilar a un tipo de modelo, bien fisural (pendientes predominantemente bajas) o cilíndrico, circular o equidimensional (pendientes altas). Asimismo, se ha constatado el error cometido en la determinación del diámetro menor, especialmente en el modelo fisural, con el algoritmo de la ventana de Feret, que el programa de tratamiento digital de imágenes calcula; proponiéndose uno nuevo, partiendo de los puntos medios del objeto (poros o fisuras) y teniendo en cuenta su orientación, extrayendo el segmento menor que intercepta a la superficie del mismo.

MICROSTRUCTURAL ANALYSIS OF GRANITES, BY DIGITAL IMAGE-PROCESSING TECHNIQUES, FOR THEIR USE AS AGGREGATES IN CONCRETES

ABSTRACT A methodology is presented for determining, by digital image-processing techniques, the most significant parameters, microstructurally speaking, which define the durability properties of the aggregates used as borrowed fill in concretes; a coefficient (α) is established from these, which associates each family of elements to a linear function which can be assimilated to a kind of model, either fissural (predominantly low gradients) or cylindrical, circular or equidimensional (high gradients). In addition, an error was found to be committed in the calculation of the lesser diameter, particularly for the fissural model, using the algorithm of Feret's window, which is calculated by the digital image-processing program, and so a new calculation is proposed, starting from the central points of the object (pores, fissures) and taking into consideration their orientation, thus extracting the lesser segment which intersects at the surface of same.

Palabras clave: Áridos; Proceso digital de imágenes; Poros, Fisuras, M.E.B.; Microscopía óptica.

1. INTRODUCCIÓN

La caracterización microestructural de los áridos graníticos, utilizados como material de préstamo para la fabricación de hormigones, se centra en el estudio de parámetros petrográficos como la microfisuración existente, la porosidad y la naturaleza mineralógica (bordes y tipos de granos), proporcionando, éstos, información "a priori" de su potencial reactividad y, por consiguiente, su grado de susceptibilidad a la alteración, sobre todo en medios básicos, como es el caso del hormigón.

De todos ellos, la porosidad es la que mayor influencia ejerce en el aspecto anteriormente citada, así como su distribución, morfología, etc., y que podemos asimilar a un modelo

fisural, en el que aquéllas son de carácter planar (fisuras, bordes de granos abiertos, etc.), asociados, generalmente, a porosidades muy bajas (<0,5%), que se corresponden con materiales ígneos (granitos, basaltos, etc.), pero con una notable influencia en su comportamiento mecánico; o bien a un modelo poroso, en el que los espacios vacíos son conductos, intercomunicados entre sí por pasos angostos o "cuellos de botella" y asociados a porosidades de valores muy dispares, desde <5% (porosidad baja), 10% (porosidades medias) y >20% (porosidades elevadas), de mayor dispersión y variabilidad morfológica, y que se corresponden a materiales sedimentarios (calizas, areniscas, etc.).

La diferenciación entre los tipos de fisuración y porosidad, además de su distribución y génesis, inducida por deformaciones mecánicas del material (fisuras, diaclasaciones, grietas de tensión, etc.) permite explicar algunos fenómenos de interacción árido-álcali que van a condicionar la durabili-

(*) Licenciados en Ciencias Geológicas. CEDEX (MOPTMA).

dad del hormigón ya que nos dan información sobre la estabilidad cristaloquímica de sus componentes frente a medios agresivos (caso del hormigón, con un pH básico —13— lo que provoca que algunos minerales reaccionen con la pasta formando productos de hidratación que pueden llegar a colapsar la obra).

2. MATERIALES

Los materiales estudiados, en este caso, corresponden a un granito de dos micas, utilizado como árido para la construcción de presas, con un tamaño de grano medio de 0,9 mm, heterogranular, utilizado como material de préstamo en la fabricación de hormigones. Composicionalmente está constituido por cuarzo (Q, 33%); feldespatos potásicos (Fto K, 37%); plagioclasas (Plg, 17%); micas (biotitas y moscovitas, 11%); opacos y accesorios (2%). Es de baja porosidad, con un marcado carácter fisural, de borde de grano y, en mayor proporción, transgranular. Asociado a estas zonas de porosidad y microfisuración aparecen ligeras alteraciones, sobre todo en las plagioclasas y máficos (micas), dando lugar a minerales secundarios como son sericitas y cloritas. El análisis microscópico evidencia deformaciones internas (extinción ondulante) en los cuarzos y red de microfisuras, en las secciones estudiadas.

3. ANÁLISIS DIGITAL DE IMÁGENES

El tratamiento digital de imágenes es una técnica auxiliar a la microscopía, tanto óptica como electrónica, para la extracción de datos y parámetros morfológicos, de forma rápida, objetiva y fiable.

3.1. CAPTURA Y MEJORA DE LA IMAGEN

La muestra se ha estudiado por microscopía óptica de transmisión, utilizando bajos aumentos (15x), para tomar un campo lo suficientemente representativo para la medida de los poros y tamaños de granos; con esta resolución, la equivalencia entre unidades máquina (pixels) y reales (mm^2) es la siguiente, 1 pixel es equivalente a $9,4 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2$; es decir, una longitud de lado (ya que el pixel es un cuadrado) de $3,07 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$. Consecuentemente, las fotografías obtenidas tienen 1,5 mm de lado, o lo que es lo mismo, estamos trabajando sobre áreas de $2,5 \text{ mm}^2$. Para el caso de la microscopía electrónica de barrido (M.E.B.), la relación es, asimismo muy parecida (fotografía 1).

Estas imágenes se transfieren a la pantalla del ordenador, donde se discretizan en forma matricial de $512 \cdot 512$ pixels y con un rango de valores de gris de 255. Asimismo, la utilización de esta técnica aumenta las posibilidades de extracción de información, ya que podemos tomar del mismo área diversas imágenes con diferentes propiedades (ópticas, morfológicas, texturales, etc.) como es el caso, e integrarlas en un único recinto de memoria.

Previamente a este proceso y tratando cada imagen independientemente, obtenemos información del histograma de frecuencias de niveles de gris; muy útil, por otra parte, para posteriores tratamientos. El histograma resultante como puede verse (fotografía 1), queda limitado a unos valores específicos, menores, dentro del rango total del mismo. Si aplicamos, sobre la imagen, un algoritmo de expansión lineal de niveles de gris hasta sus valores máximos (normalización), el resultado será una mejora del contraste en la imagen, reordenando la información contenida en la misma y, por consiguiente, discriminando las fases con mayor nitidez y facilidad (fotografía 2).

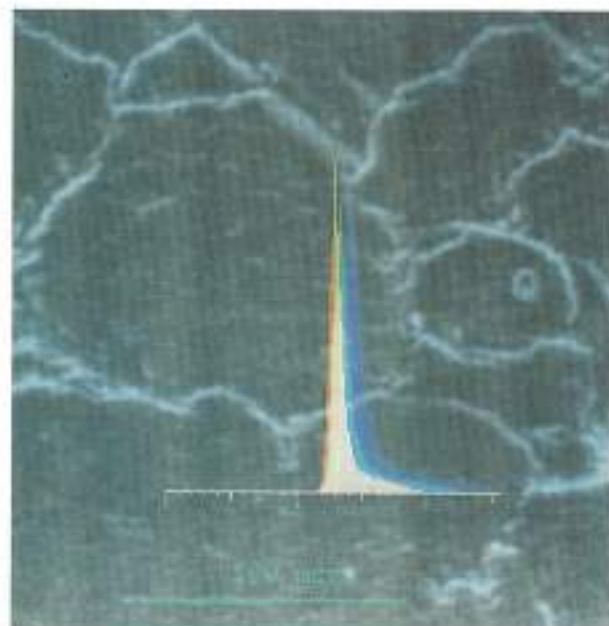


FOTO 1. Imagen de S.E.M. original.

Posteriormente, y sobre cada imagen, aplicamos procesos de filtrados matriciales, orientados a reducir los ruidos de captación de la señal, y remarcar algunos aspectos de la imagen original que luego nos condicionarán los resultados finales (bordes de grano); en este sentido, como nos interesan las estructuras de borde (límites de poros y fisuras) hemos aplicado un realce de contornos (filtro lineal de paso alto que opera en las altas frecuencias, reforzándolas) y cuyo resultado es una señalización de las estructuras lineales, mejorando substancialmente la imagen.

Realizada cada una de las anteriores secuencias sobre las imágenes independientes, combinamos aquellas por opera-

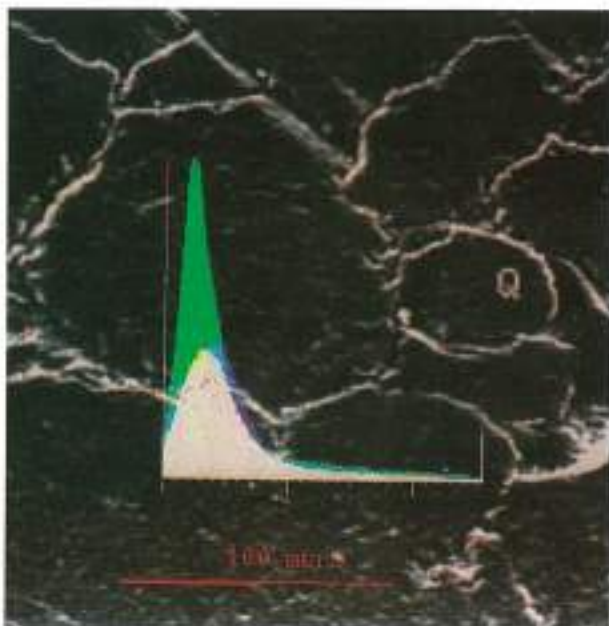


FOTO 2. Imagen de S.E.M. restaurada.

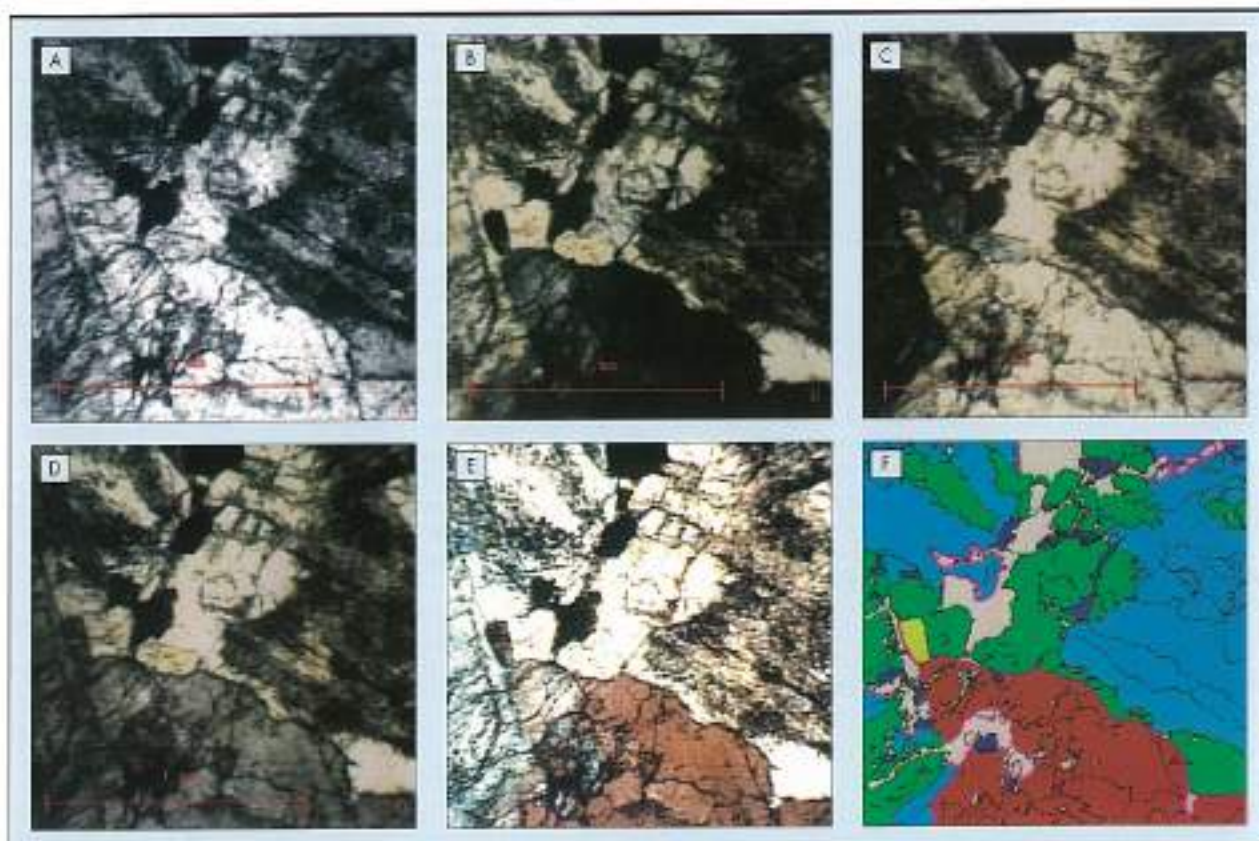


LÁMINA I. MICROSCOPIA ÓPTICA DE TRANSMISIÓN. A. Microscopía óptica de luz transmitida; Imagen tomada con luz natural (póles paralelos). B. Misma imagen que la anterior, pero tomada con luz polarizada; posición analizador/polarizador 90°. C. Igual registro que la anterior, con luz polarizada. Posición analizador/polarizador 45°. D. Igual que en los tres registros anteriores, pero con la posición analizador/polarizador a 22.5°. E. Combinación de las cuatro imágenes anteriores, por procesos de multiimágenes. Como se puede apreciar se diferencian, perfectamente, las fases minerales y la red de microfisuras. F. Imagen clasificada, obtenida por procesos de segmentación de la imagen. El color rojo se corresponde con el cuarzo; el verde a los feldespatos potásicos sin alterar; el azul, a los feldespatos alterados; el amarillo a las micas. Se ha representado, asimismo, la red de microfisuración y la porosidad. Sobre esta imagen se pueden cuantificar todas las fases presentes.

ciones algebraicas y que, previamente, se habían tomado variando las posiciones del analizador y polarizador y, por lo tanto, consiguiendo ver los minerales con diferentes propiedades ópticas, dando, consecuentemente, diferentes niveles de gris que permiten diferenciar a éstos de las fases porosas, (Lámina II). Este proceso, que es el resultado de las operaciones entre los valores de los píxeles de las imágenes, da como consecuencia una fase oscura (en negro) que es la porosidad, diferenciada de una fase menos oscura que se corresponde a algunos minerales próximos a su extinción óptica total, y que por combinación de imágenes, siempre dará diferencias en el nivel de gris, del valor mínimo (0).

3.2. SEGMENTACIÓN DE LA IMAGEN

Una vez capturada y restaurada (mejorada) la imagen hemos de subdividirla en regiones que nos diferencien los objetos (poros y fisuras) que nos interesa estudiar del resto. Para ello hemos de buscar un valor de corte o umbral (T) a partir del cual todos los niveles de gris de la imagen que estén por encima se reasignen a valor 0 (negro, o valores no considerados) y los que estén por debajo del mismo a 1 (blanco, o valores a considerar), es decir $P_0(x, y) = 0$ si $P(x, y) \leq T$, y $P_1(x, y) = 1$ si $P(x, y) > T$. El resultado, consecuentemente, será una imagen binaria (fotografía 3). Existen diferentes algoritmos para este proceso, nosotros

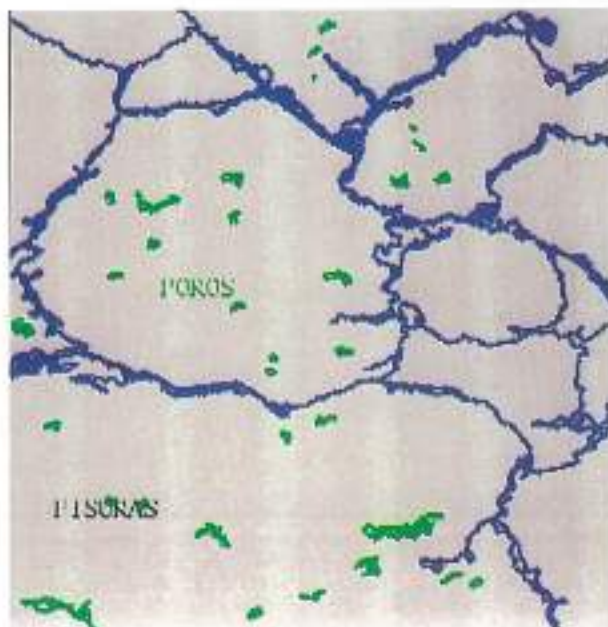


FOTO 3. Imagen de S.E.M. clasificada.

hemos calculado este valor considerando un perfil que corte todos los niveles de gris de una sección de la pantalla y en la que atravesemos, también, los poros y fisuras, determinando el punto crítico de la caída de los valores de niveles de gris en sus bordes; éste se ha estimado en 20. En algunas ocasiones, este perfil, al atravesar la fase a estimar, no es neto sino que presenta cierta degradación, obligando a desarrollar procesos interactivos para recalcular y ajustar los umbrales, dependiendo, asimismo, de la definición que deseamos.

Este valor (T) es importante ya que de él dependerá el proceso de cuantificación de la imagen binaria, por lo que se ha propuesto que se contraste el resultado con la imagen original, superponiéndola en fase gráfica "overlay" y evaluando su eficacia; en el caso de que ésta fuera baja (es decir el borde de detección no coincidiera con el objeto de la imagen real), el proceso se repetiría, modificando aquél. El resultado final de este algoritmo es una imagen binaria.

Debido a la composición original de la imagen se ha optado por una segmentación color, tomando los niveles de gris de las tres bandas (R, G, B) simultáneamente, para definir mejor los límites de los objetos, y consecuentemente, determinar los umbrales de corte (T) en los tres canales, ganando precisión.

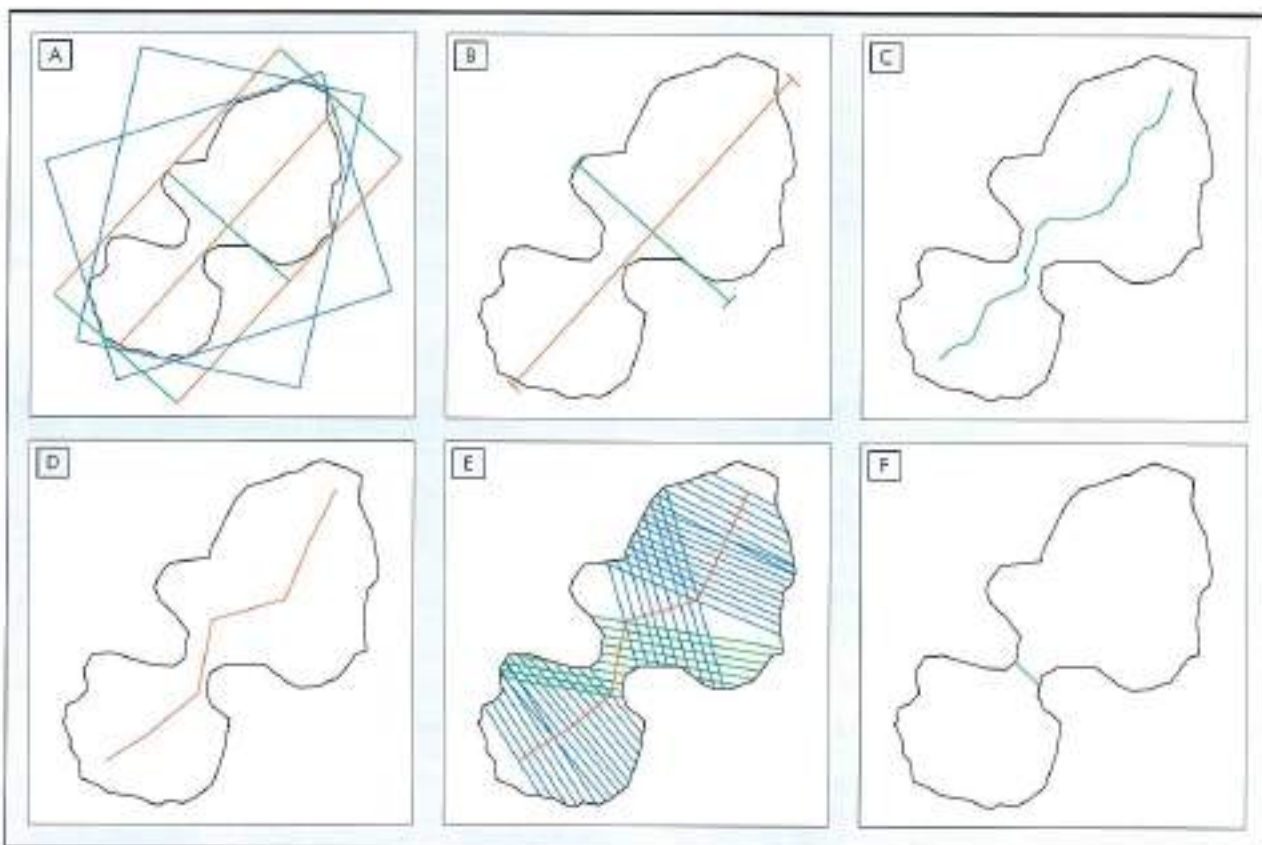
A partir de la imagen binaria resultante, previa preparación y restauración de la misma, por procesos de morfología

matemática, ya estamos en condiciones de extraer datos, relaciones, etc., que después tendrán un tratamiento estadístico posterior. Ello supone que la obtención de esta imagen binaria es importante y condiciona los resultados, puesto que sobre ésta vamos a contar los pixels ya identificados.

3.3. TRATAMIENTO BINARIO DE LA IMAGEN

En la imagen binarizada y previo al proceso de cuantificación, hemos aplicado algunos algoritmos de corrección y limpieza de la misma. En primer lugar se ha aplicado un clasificador experto, basado en la selección, por morfología matemática, de una ventana de trabajo (20 pixels) para este caso concreto y condiciones de trabajo, eliminando aquellos objetos cuya área esté por debajo de la misma (que en unidades reales se corresponde a $1,8 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2$, para la microscopía óptica de transmisión). A su vez, este valor, nos dará el límite inferior de la resolución para este tipo de microscopía. Estos "pequeños campos" pueden generar errores de medida importantes, sobre todo en los aspectos morfológicos; además, ha de tenerse en cuenta que estos objetos pueden estar producidos por ruidos de fondo, artefactos (introducidos en el sistema de preparación de las muestras), poros, etc., que son ajenos al material.

Sobre la imagen limpia se ejecuta un proceso de relleno de estructuras, algoritmo consistente en reconocer la ima-



ESQUEMA 1. A. Cálculo del diámetro mayor y el diámetro menor, por el desarrollo de la ventana de Feret. B. Ejes del diámetro mayor y menor, obtenidos por el anterior proceso. A partir de aquí, deducimos la dirección del segmento director para la determinación del nuevo diámetro menor. C. Línea media del objeto, obtenida por el cálculo de las distancias medias de los extremos, perpendiculares al eje director (Feret X). D. Aproximación poligonal de la anterior línea, para la determinación de la red de segmentos secundarios. E. Generación de las retículas, normales a cada segmento menor, y que nos dan el espesor del objeto, según sus secciones correspondientes. F. Señalización del menor segmento obtenido por este método; como se puede apreciar, este valor es más real que el obtenido por el diámetro menor de Feret (Feret Y).

gen y reasignar los píxeles con valor (0), en las estructuras binarias, a un nuevo valor (1), si cumplen la propiedad de estar acotados, dentro de un espacio, por píxeles de valor unidad; el resultado es un relleno de las áreas discriminadas.

Con la aplicación de estos algoritmos la imagen ya está preparada para ser identificada y cuantificada.

En la identificación se ha incluido un algoritmo de eliminación de objetos de borde, que consiste en borrar (reasignar) todo objeto que toque el borde del campo, obteniendo medidas totales y evitando, de esta forma, falsear los datos al tomar segmentos de fases no completas.

3.4. PARÁMETROS

La determinación de los parámetros se ha hecho siguiendo, bien criterios **morfológicos y espaciales**: *área* [S] (número de píxeles conectados entre sí), *perímetro* [P] (número de píxeles de borde) y *centros de gravedad* [Cx y Cy] y **geométricos**; por otra parte, para la extracción de características estructurales: *factor de forma circular* [F_c] (relación entre la forma de cada objeto y su circunferencia equivalente) y *diámetro equivalente* [D_{eq}] (diámetro del círculo de igual área), *diámetro mayor* (Fx) y *diámetro menor* (Fy). Hemos constatado, además, que este último parámetro no siempre da el diámetro menor real, sobre todo en objetos muy irregulares (Martínez Nistal, 1993), con "golfos de corrosión" o entrantes de cierta consideración. Ello se debe a que al trabajar con el desarrollo de la ventana de Feret, lo que en realidad estamos midiendo es el diámetro menor del rectángulo circunscrito.

Para solventar este problema hemos diseñado un pequeño programa que utiliza el eje del diámetro mayor (**feret x**) que será el *segmento base o director* y que nos define la orientación general del objeto. Por procesos de erosión y adelgazamiento calculamos los puntos medios del mismo a lo largo de esa orientación (que es una línea curva, generalmente), que se corresponde con su eje. Esta línea se aproxima a una poligonal que estará constituida por varios segmentos, menores, subparalelos al segmento director y que se denominan *segmentos base*. Sobre ellos se genera una retícula perpendicular a cada uno de estos *segmentos base* y que tendrá tres puntos conocidos (los extremos del objeto y el del segmento). El resultado será una serie de líneas menores, paralelas entre sí y perpendiculares a cada segmento base (o de poligonal) y que, en función del ángulo de cada uno de ellos, pueden llegar a solaparse. Cada línea representa una sección menor del objeto discriminado, y el procesador señalará el menor de todos, que se corresponde con el del diámetro menor real.

La eficacia de este algoritmo viene condicionada por dos factores que hemos de definir "a priori" y son: la aproximación del eje del objeto a la poligonal (obviamente, a mayor número de segmentos, mayor precisión, aunque mayor tiempo tardará en calcularlo); y el espaciado de las retículas normales a los segmentos base (asimismo, a mayor densidad de retícula, mayor definición y mayor precisión, aunque el procesador invertirá mayor tiempo en su cálculo). Estos dos factores, lógicamente, están relacionados entre sí.

Hemos visto, por otra parte, que teníamos problemas en la determinación del diámetro menor sobre todo en los extremos de los objetos (principalmente alargados). Para solventarlo se ha tomado la longitud del segmento director como espacio de trabajo para el cálculo de los segmentos base o poligonales, y que tiene la ventaja (por el propio algoritmo de generación) de ser menor que el objeto en sí y, por lo tanto, no registra el área de los extremos. Hemos de señalar

que este segmento es el resultado de los procesos de erosión (para objetos de alta circularidad) y de erosión más adelgazamiento (para objetos de baja circularidad) sucesivos.

Previamente a desarrollar este algoritmo y con objeto de optimizar los datos debemos hacer un tratamiento de los mismos, correlacionando el *área del poro con su perímetro* o su *factor de forma circular* con su *diámetro equivalente*. Señalar, únicamente, que este valor nos va a variar dependiendo de la orientación real del objeto, ya que en ocasiones éste no va a ser perpendicular el feret x con el cuello de botella menor, obteniendo, siempre, un valor ligeramente mayor que los reales, pero siempre mucho menor que el determinado hasta ahora por el diámetro menor de la ventana de Feret. Con todo, los datos obtenidos se ajustan bastante a los reales del objeto. En la actualidad estamos desarrollando cálculos y comparando poros con cuellos de botella, girándolos para estimar el error estadístico que se puede generar (Esquema I).

Este algoritmo es de mucha utilidad para el cálculo del espesor de las fisuras, tanto del diámetro menor mayor (o anchura de la fisuración) como del diámetro mínimo (anchura menor).

4. RESULTADOS

El cálculo de la porosidad y red de microfisuración, obtenidos por integración de todas las áreas de las imágenes binarias, es de 4,9%, correspondiendo tan sólo un 0,77% a la primera. El histograma (gráfico 1) señala que aquella tiene un factor de forma relativamente bajo (F_c medio = 0,5), lo que indica su carácter planar (84,2%). Este histograma, dividido en 9 clases, con intervalos en el eje de las x de 0,1, nos separa la circularidad de los objetos. Como puede verse, éstas

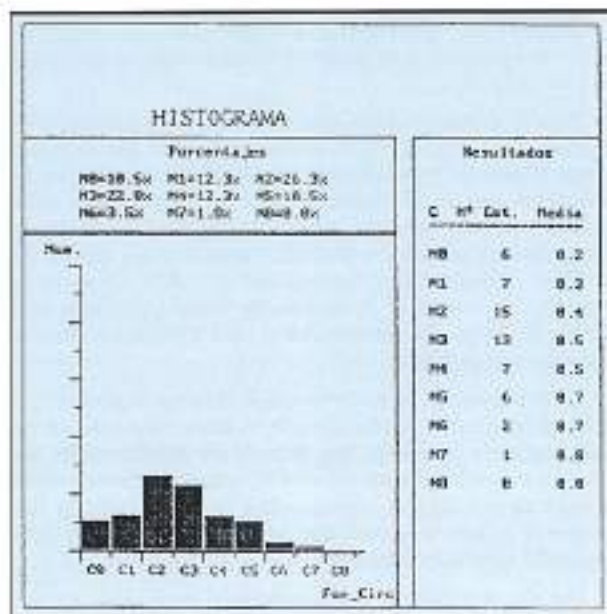


GRÁFICO 1. Histograma de la distribución de poros [F_c].

tienden a formas planas (desplazándose al valor 0), mientras que las formas más circulares (tendiendo hacia 1), tan sólo representan el 15,8% del total de los objetos medidos (gráfico 1).

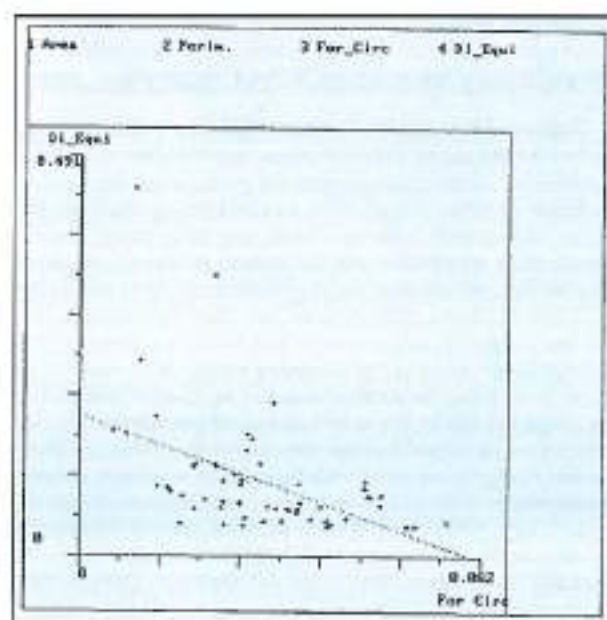


GRÁFICO 2. Relación de tamaños con respecto a su factor de forma circular.

La relación entre el D_{eq} (en función del área total de los objetos) y su circularidad supone una clasificación en cuanto a la importancia de los objetos con respecto a su superficie (gráfico 2). Hemos de indicar, a este respecto, que son los tamaños mayores los que presentan este hábito irregular, mientras que los poros equidimensionales se concentran en los rangos menores (25% del tamaño de los poros < 0,050 mm), lo que indica el carácter transgranular de la red de fisuración (puesto que su longitud es mayor que la media del tamaño de grano).

Para la caracterización general del sistema poroso se ha relacionado el D_{eq} con el P , ambos calculados por el procesador digital de imágenes, estableciéndose una función lineal entre sí, con un coeficiente (α) que discrimina si estamos ante un modelo fisural (coeficientes bajos, generalmente en torno a $\alpha < 0,2$) o bien ante un modelo cilíndrico, circular o equidimensional ($\alpha > 0,2$). De acuerdo con ello, la pendiente de la función lineal calculada está dentro del rango del modelo fisural ($\alpha = 0,15$), tal y como se aprecia en el gráfico 3.

Evidentemente, si estuviéramos ante un modelo cilíndrico el coeficiente tendería hacia valores mayores, con un aumento de la pendiente, que debería ser máxima si los poros fueran perfectamente circulares, tomando, en este caso, el valor de $\alpha = 0,3$ que corresponde a una pendiente de 15° , ya que el diámetro equivalente está relacionado con el perímetro del círculo en base a π .

Por ello, y a medida que disminuye el coeficiente (α), nos encontramos, estadísticamente, que los poros tienden hacia formas planares (aumentando su perímetro y disminuyendo el área).

Para calcular la distribución espacial de la porosidad en la muestra, se ha determinado el centro de gravedad de cada objeto (sus coordenadas espaciales x e y), obteniendo, de esta forma, una cartografía de la distribución de la porosidad en función de su densidad (gráfico 4).

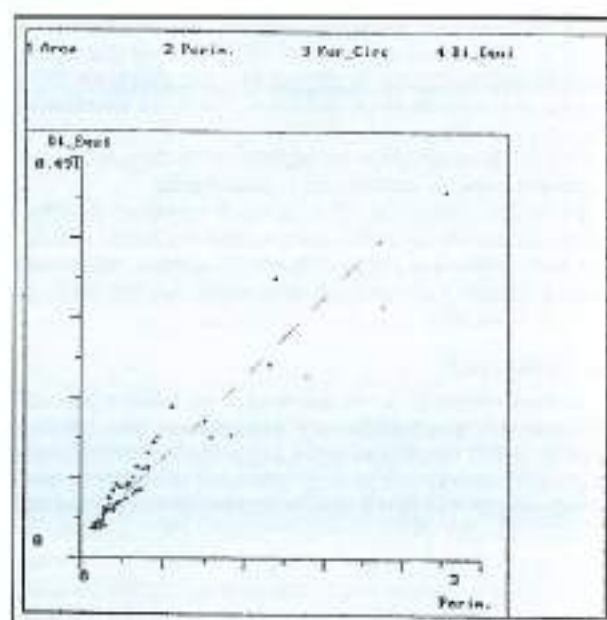


GRÁFICO 3. Relación D_{eq} / P . Determinación de su función lineal.

5. CONCLUSIONES

El estudio petrográfico del material, por microscopía óptica de luz transmitida, hace posible la caracterización textural y óptica de los áridos, pudiendo integrar, en un único recinto de memoria de imágenes, toda la información obtenida con diferentes tipos de luz, desde natural (con nicóles paralelos), a luz polarizada con diferentes ángulos entre el analizador y el polarizador (girando la posición entre los nicóles), extrayendo, al final, una única fase, con un nivel de gris 0, que es

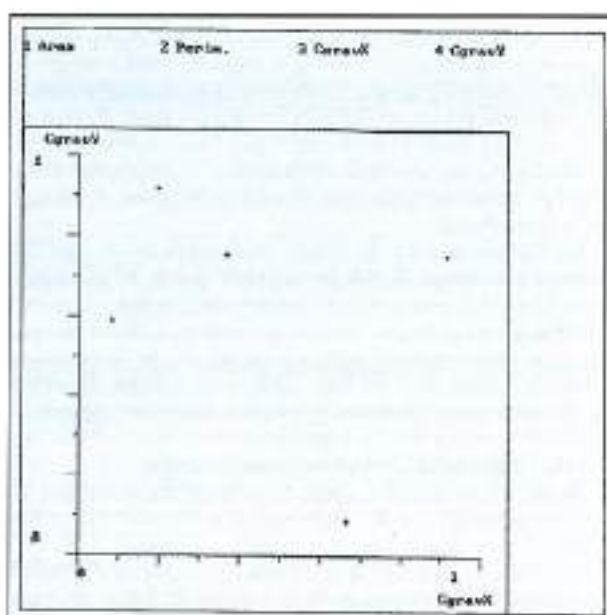


GRÁFICO 4. Distribución de la porosidad por sus coordenadas x e y , sobre la muestra.

ÁREA	PERÍMETRO	D _{may}	D menor			F _h	D _{eq}	C _h	C _v	TIPOLOGÍA
			Feret y (D _{eq})	D _{eq} (A)	Relación (A/F _h)					
13,8545	16,6557	6,025	3,444	3,1211	0,90	0,62	4,20	1,9	1,77	F. mín.
54,8695	52,8031	19,9867	8,4887	7,06	0,83	0,24	8,35	2,3	3,91	F. mín.
8,2304	12,2113	4,2668	2,56	0,321	0,12	0,69	3,23			Fisura
0,6858	3,2697	1,1574	0,4166	0,332	0,79	0,80	0,93	2,51	1,63	Poros
49,7941	45,9194	14,2377	7,9629	3,28	0,41	0,29	7,96	3,02	1,17	F. mín.
80,5211	47,4009	14,9300	8,4887	5,38	0,63	0,45	10,12	0,45	2,01	F. mín.
3,5665	11,1637	4,5135	0,869	0,12	0,14	0,35	2,13			Fisura
4,8010	9,0686	3,4493	1,8059	1,75	0,97	0,73	2,47	1,79	2,90	Poros
15,0891	19,6187	6,6667	3,7713	0,25	0,06	0,49	4,38			Fisura
31,001	34,5760	9,5925	6,3992	2,59	0,46	0,32	6,28	1,13	3,22	F. Mín.
0,2825	2,0818	0,6708	0,485	0,40	0,87	0,81	0,59	0,60	1,82	Poros
3,7031	10,8969	4,0077	2,0125	0,9	0,4	0,39	2,17			Fisura
0,9071	4,5381	1,6033	0,756	0,29	0,38	0,55	1,07			Fisura
6,8560	15,6285	5,6723	1,8445	0,27	0,15	0,35	2,95			Fisura
0,1933	1,6654	0,559	0,3408	0,30	0,9	0,87	0,49	1,37	1,12	Poros
0,1338	1,3919	0,4514	0,2514	0,21	0,85	0,86	0,41	3,92	2,09	Poros
22,9080	20,4865	6,6667	4,4907	0,16	0,72	0,68	5,40	1,40	2,01	F. mín.
1,2345	4,0105	1,3740	0,7870	0,54	0,69	0,96	1,25	0,92	1,12	Poros
25,24	28,1263	11,2281	4,0168	1,48	0,37	0,40	5,66	3,12	1,9	F. mín.
1,3717	4,5343	1,3740	0,8184	0,70	0,86	0,83	1,32	1,02	0,41	Poros
52,537	26,7456	10,6296	7,45	1,21	0,16	0,92	8,17	2,49	3,50	F. Mín.
30,864	30,9095	11,45	4,26	0,63	0,14	0,40	6,26			Fisura
0,6858	3,2697	1,1574	0,4166	0,40	0,96	0,80	0,93	1,80	0,96	Poros

TABLA I. Resultados obtenidos por el procesador de imágenes, a partir del granito estudiado. Obsérvese la diferencia que exista entre el diámetro menor (Feret y) y el propuesto en este trabajo, más próximo a la realidad. Hemos de indicar, asimismo, que la relación diámetro menor propuesto (D_{eq}) y el diámetro menor calculado por la ventana de Feret (D_h), guarda cierta relación con el F_h y el diámetro equivalente (a mayor factor de forma circular, la relación (D_{eq}/D_h) se aproxima a 1). Los fisuras, según se puede apreciar, tienden a relaciones bajas (hacia 0), mientras que los poros tienden hacia relaciones próximas a 1.

la que nos interesa (porosidad y microfisuras, en este caso) para proceder a su cuantificación.

Los parámetros utilizados en la caracterización microestructural de los áridos han sido el tamaño de grano, su forma, la red de microfisuración y de poros, la densidad por unidad de superficie de los mismos, etc., facilitando su modelización (porosidad asociada a fisuras, de carácter transgranular).

Asimismo, y debido a algunos errores en la determinación del radio menor (por exceso) se ha diseñado un algoritmo específico, basado en la determinación del eje o línea media del objeto y el cálculo, a partir de ésta (que no necesariamente debe ser una línea recta) del menor de los segmentos que intercepta al contorno del objeto, y perpendicular a aquél.

La utilización de la microscopía óptica posibilita la determinación microestructural en el rango de valores comprendido entre 5 y 500 µm de resolución, mientras que la microscopía electrónica de barrido (M.E.B.) de mayor resolución,

permite afinar en el rango comprendido entre las 100 µm y las 0,1 µm. Como podemos ver, además, la posibilidad de combinar ambas técnicas en el campo de superposición resulta de gran utilidad, si combinamos, consecuentemente todas las señales derivadas en un único recinto de memoria (Lámina II).

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a D. Javier Burgos Oñate, laboral adscrito al departamento de Petrología, mineralogía y tratamiento digital de imágenes, por la realización de la parte gráfica del presente artículo, así como por las medidas realizadas sobre las láminas y muestras de M.E.B. en la comprobación del nuevo algoritmo diseñado en este centro. Asimismo, queremos dejar constancia de la colaboración que nos ha proporcionado D. Mariano Garzo Fernández y Ángel Mateos Moreno, ambos ingenieros de caminos, del Laboratorio Central de Es-

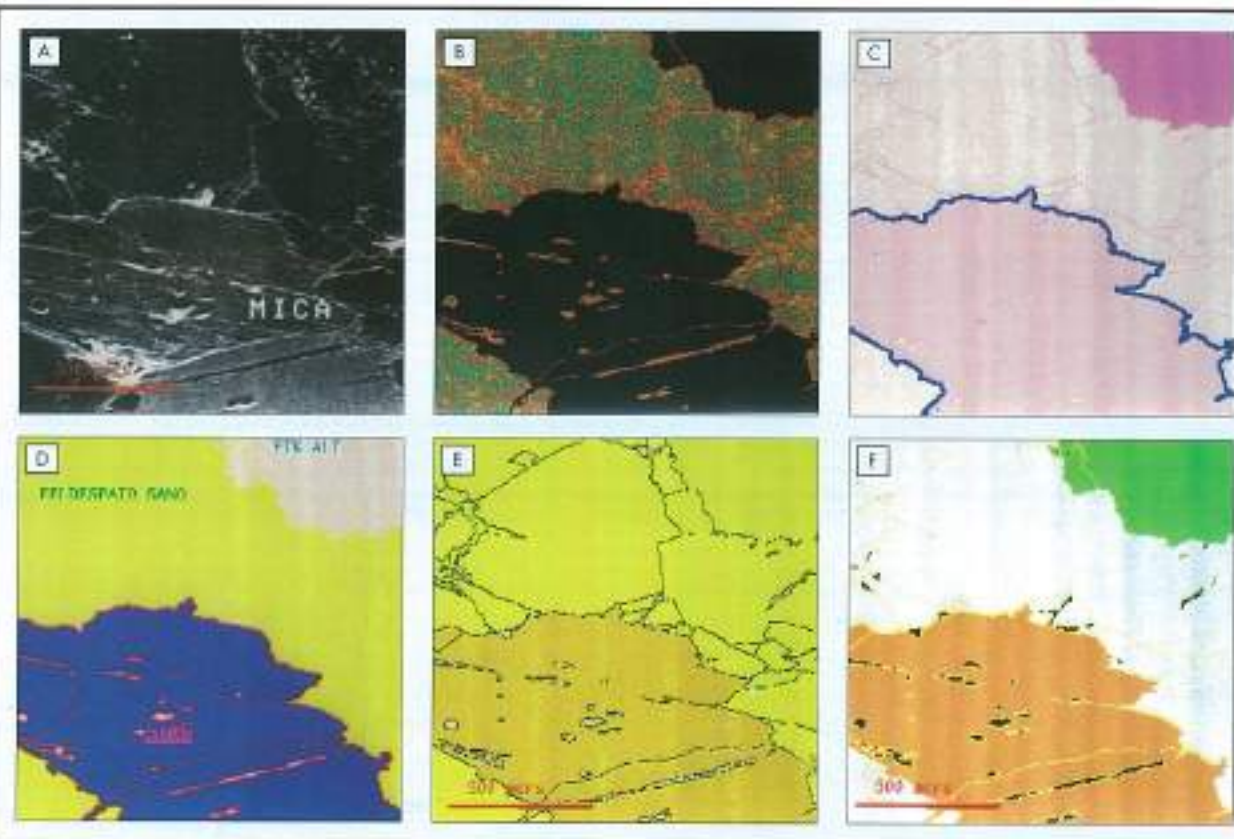


LÁMINA II. MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA DE BARRIDO. A. Imagen derivada, directamente del S.E.M. Podemos diferenciar su textura y microestructura. B. Técnicas de proceso digital de imágenes (filtro Sobel) para determinar la textura de la fase correspondiente al Fto K; observese cómo las fibras quedan señalizadas perfectamente, así como las zonas de alteración. C. Imagen clasificada, basándose en la detección de bordes de grano. El procesador marca el límite entre los distintos feses minerales [en azul oscuro se ha cartografiado al borde de grano mica-feldespatho]. D. Clasificación de las fases minerales por multisegmentación, reasignando los umbrales de corte a los minerales que nos aparecen. E. Aplicación de algoritmos específicos para extraer información de cambios de frecuencia (bordes y fibras). Se pueden clasificar, a partir de esta imagen en fibras transgranulares, intergranulares e intragranulares. F. Combinación de las fases minerales y la red de microfisuras y poros. El programa, posteriormente, posibilita el estudio y relación de las diferentes fases minerales con sus aspectos morfológicos-texturales.

estructuras y Materiales, por la revisión de algunos aspectos, principalmente matemáticos, del desarrollo y puesta a punto del algoritmo de cálculo del diámetro menor.

7. BIBLIOGRAFÍA

BEL-LAN BALLESTER, A. (1984): Análisis de parámetros petrográficos mediante proceso digital de imágenes. Tesis doctoral. U.A.M. Centro de investigación UAM-IBM, pp.35-8; 74-5; 94; 86-9.

CALLEJA, L.; RUIZ DE ARGANDOÑA, V. G.; DE LLANOS, C.; SUÁREZ DEL RÍO, L. M. y RODRÍGUEZ-REY, A. (1995): Estudio de la deformación producida por cortes de precisión en rocas graníticas. XVII Reunión Bienal de la S.E.M.E. Libro de Comun., pp. 284-85.

CARMONA, G.; MANRIQUE, E.; IBÁÑEZ, J. y ABALLE, M. (1988): Métodos automáticos para la obtención de datos morfométricos, por ordenador, a partir de imágenes digitalizadas. V Simposio Nacional de Reconocimiento de Formas y Análisis de Imágenes. Comun., pp. 137-44.

COSTER, M.; CHERMANT, J. L. (1985): Précis d'analyse d'images. Ed. du Centre Nat. de la Rech. Scient. Ch. V, pp. 119-59.

DOBEREINER, L.; DURVILLE, J. L.; RESTITUITO, J. (1993): Weathering of the massiac gneiss (Massif central, France). Bull. Int. As. Ing. Geol., n° 47, pp.79-86.

DOMINGO AJENJO, D. (1993): Tratamiento digital de imágenes. Guía monográfica. Ed. Anaya Multimedia, pp.89-96.

GÓMEZ DE SALAZAR, J. M. y MARTÍNEZ, M. A. (1988): Imágenes 3-D obtenidas por S.E.M. y cálculo de parámetros a partir de ellas. IIIº Simposio Nacional de Reconocimiento de Formas y Análisis de Imágenes. Comun., 131-37.

JAIN ANIL, K. (1989): Fundamentals of digital image processing. Prentice-Hall International Editions, pp.241-46.

LACUBE, J.; BISSAINT, M.; HERNÁNDEZ, J. (1993): Traitement d'image appliqué aux matériaux: exemple d'une analyse quantitative des feldspaths dans les roches. Bull. Int. As. Ing. Geol., n° 47, pp.109-117.

MARTÍNEZ NISTAL, A. (1985): Diseño y operatividad de un sistema interactivo para el proceso digital de microfotografías petrográficas. Dto. de Petrología. T. de licenciatura. Univ. de Oviedo. Asturias, pp. 39; 52-4 y 61-4; 25; 42-4; 42-4.

MARTÍNEZ-NISTAL, A.; MONTOTO, M. y MENÉNDEZ, B. (1990): Discontinuidades en la "Intact Rock". Su cuantificación por proceso digital de imágenes. IV Simposio Nacional

de Reconocimiento de Formas y Análisis de Imágenes. Comun., pp. 97-8.

MARTÍNEZ NISTAL, A. y MENÉNDEZ VILLAR, B. (1992): Cuantificación del radio de poro mediante análisis de imágenes. V Simposio Nacional de Reconocimiento de Formas y Análisis de Imágenes., pp. 149-54.

MARTÍNEZ NISTAL, A. (1993): Discriminación, cuantificación y cartografiado de componentes petrográficos mediante proceso digital de multi-imágenes microscópicas. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias. Departamento de Geología; Área de Petrología y Geoquímica., pp. 253.

MENG, B. (1994): Resolution-dependent characterization of interconnected pore systems: development and suitability of a new method. Materials and Structures, 27, pp. 63-70.

MONTOTO, M.; MONTOTO, L.; BEL-LAN, A. (1981): Proceso digital de micrografías en petrología. Departamento de Petrología. Universidad de Oviedo y Centro de investigación UAM-IBM Madrid pp. 15-7; 69-72; 29-31.

NÚÑEZ, A.; NÚÑEZ, M.; NÚÑEZ, J.; MONJE, S. DE MON-

SERRAT, J. J. y SOLER, C. (1992): Obtención de datos morfométricos, por ordenador, a partir de imágenes digitizadas. V Simposio Nacional de Reconocimiento de Formas y Análisis de Imágenes. Comun., 102-07.

PÉREZ-ORTIZ, A.; ORDAZ, J.; ESBERT, R. M. y MARTÍNEZ NISTAL, A. (1995): Utilización de electrones retrodispersados y del proceso digital de imágenes para la cuantificación de microfisuras en rocas. XVII Reunión Bienal de la S.E.M.E. L. de Comun., 286-87.

RINGOT, E.; SAADA, R.; BARRIOULET, P. (1992): Caractérisation microstructurale d'une pâte fraîche de ciment. Essais et mesures, 238, n° 501 février.

ROCA, X.; SÁNCHEZ, X.; SERRAT, J.; VANRELL, M.; VILLANUEVA, J. y VITRIA, J. (1991): Curso de tratamiento y análisis de imágenes. Fac. de Ciencias. Dto d'inform. UAB., pp. 161-2.

RUSS, C. J. (1991): Computer-assisted microscopy. The measurement and analysis of images. PP. N. Y. and London, pp. 103-5; 153-61.



HUMO DE SILICE



EE238/2/94

Pº DE LA CASTELLANA, 86, 7º
28046 MADRID
TEL. 562 85 07 - FAX 562 82 27

Fábrica de Sabón
Polígono Industrial de Sabón
15142 Arteixo
La Coruña
Tlf. (981) 60 06 75
Fax (981) 60 13 06

✓ **BOMBEABLE**

✓ **PROYECTABLE**

✓ **RESISTENCIA**

MECÁNICAS
ABRASION

✓ **DURABILIDAD**

REACCION
ARIDO/ALCALIS
PROTECCION
ARMADURAS

✓ **DURABILIDAD**

ATAQUE
QUIMICOS
CICLOS
HIELO/DESHIELO

A veces, los mayores problemas
necesitan soluciones muy pequeñas



Galga extensométrica para embeber en hormigón (serie EGP)

Compacta y robusta

Insensible al paso del tiempo
y de los efectos térmicos

Protección integral

1/4 de puente 120 y 350 Ω

 grupo de medidas ibérica, s.l.

Ramón Gómez de la Serna, 87, L2 - 28035 MADRID
Tel. 91/373 70 51 - 91/373 71 35 - FAX 91/373 71 36

