INFLUENCIA DE LOS COMPUESTOS FILMOGENOS EN EL CURADO DEL HORMIGON [1]

F. J. SAINZ DE CUETO TORRES (*)
N. PRENDES RUBIERA (**)

RESUMEN. El curado del hormigón tiene gran importancia en obra. La ausencia de un curado adecuado origina patologías como fisuraciones por retracción.

La razón puede buscarse en el desarrollo defectuoso de la madurez del hormigón reciente e hidratación del cemento en el endurecimiento. La relación agua-cemento efectiva disminuye, mientras que la proporción de huecos y cemento anhidro aumenta en la matriz de cemento.

La aplicación de productos filmógenos impermeabiliza la superficie y asegura la disponibilidad de agua para el proceso de hidratación.

Las observaciones por Microscopía Electrónica permiten verificar la idoneidad de los productos. Mediante las técnicas de Análisis Digital de Imagen se pudo cuantificar el grado de eficacia de los productos.

ABSTRACT. *Curing of concrete reaches a great importance in work performances.*

So the lack of a proper curing cause many pathologies, like its own cracking due to a strong shrinkage.

The reason of these damages may be searched in the abnormal development of concrete maturity at early ages, due to cement hydratation during its hardening. Effective water-cement ratio progressively decreases, while voids and fraction of anhydrous cement increases inside the microstructural hydrated matrix.

Application of curing membrane-forming compounds (liquids like-paint with resins or paraffin vehicles) allows to render the surface impermeable, insuring the availability of water in order to finish the hydration process normally.

Observation provided by Scanning Microscopy allows verification of suitability of each product. On the other hand, by means of Digital Images Techniques, it was possible to quantify the efficacy degree in the used products.

1. INTRODUCCION

El curado del hormigón en obra es una de las tareas habituales a las que no se viene prestando la atención que merece. En un informe presentado, el Comité 308 del American Concrete Institute (A.C.I.), en 1982 se indicaba que el 75 % del hormigón puesto en obra no se curaba, o se cursaba sin conformidad a especificaciones técnicas. La situación era aún peor en el caso de los hormigones para la edificación.

La ausencia de un curado adecuado origina numerosas patologías en la obra y en fechas inmediatamente posteriores a su ejecución. La más habitual es la fisuración provocada por una fuerte retracción.

Los daños son más frecuentes y espectaculares en elementos superficiales de hormigón, sometidos a una climatología desfavorable como es la elevada temperatura, la baja humedad ambiental y el fuerte viento.

La causa de estos daños puede buscarse en un desarrollo anormal de la maduración del hormigón a temprana edad, debida fundamentalmente a la alteración de la hidratación del cemento en su proceso de fraguado.

Cuando el entorno ambiental es hostil, desde el punto de vista higrométrico (sol de verano directo, velocidad de viento elevada, etc.) se produce un fuerte gradiente de humedad entre la red porosa del hormigón y el exterior, que provoca un flujo de vapor de agua a través de la superficie.

La merma de humedad disponible dificulta la consecución de una correcta hidratación del cemento. La relación «agua-cemento» efectiva se reduce progresivamen-

(1) Este artículo ha sido presentado como ponencia en el Tercer Seminario de Microscopía Aplicada a los Materiales de Construcción. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona. Septiembre 1991.

(*) Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Sector de Ciencia de Materiales. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX (MOPT).

(**) Licenciado en Ciencias Geológicas. Sector de Ciencia de Materiales. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX (MOPT).

te, a la vez que aumenta la proporción de cemento anhidro en el interior de la microestructura de la matriz hidratada. También aumenta la proporción de huecos potenciales y el resultado es un hormigón con menor compacidad y resistencia mecánica.

La misión esencial del curado es, por tanto, la de asegurar una disponibilidad de agua suficiente para que el proceso de la hidratación pueda desarrollarse con normalidad en las primeras etapas del hormigón joven.

Las técnicas de M.E.B. y Análisis de Imagen permiten cuantificar la proporción de huecos existentes; así, el resultado de aplicar, sobre el hormigón, este tipo de productos filmógenos nos da la posibilidad de utilizar esta técnica ya que permite valorar su compacidad y grado de resistencia mecánica, así como la eficacia del producto filmógeno, suponiendo un método de control de calidad muy interesante para este tipo de productos.

2. CURADO CON PRODUCTOS FILMOGENOS

De entre los posibles métodos de curado aplicables resultaba de enorme interés el curado por impermeabiliza-

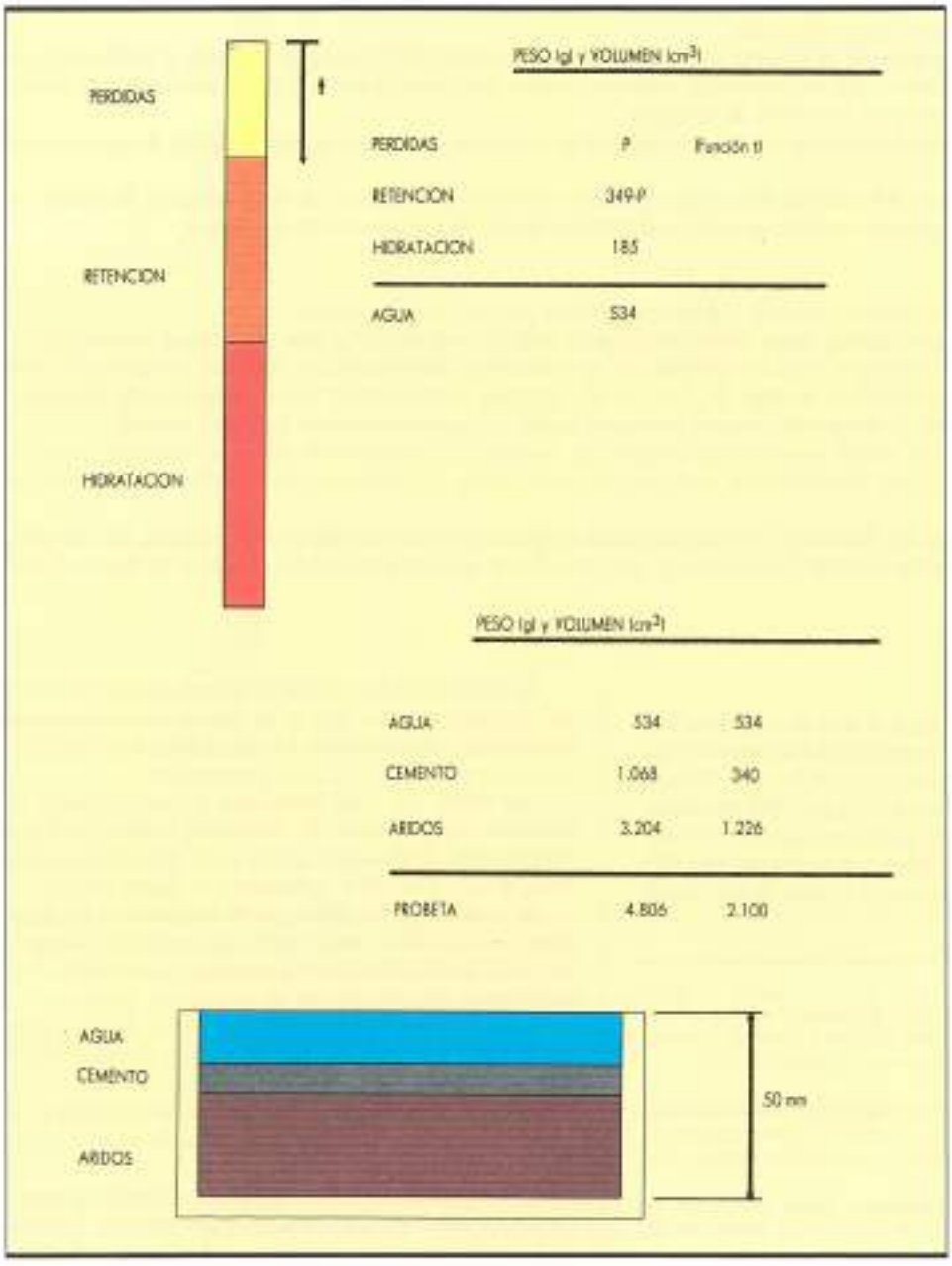

FIGURA 1. Características de la Probeta de ensayo, según norma ASTM.

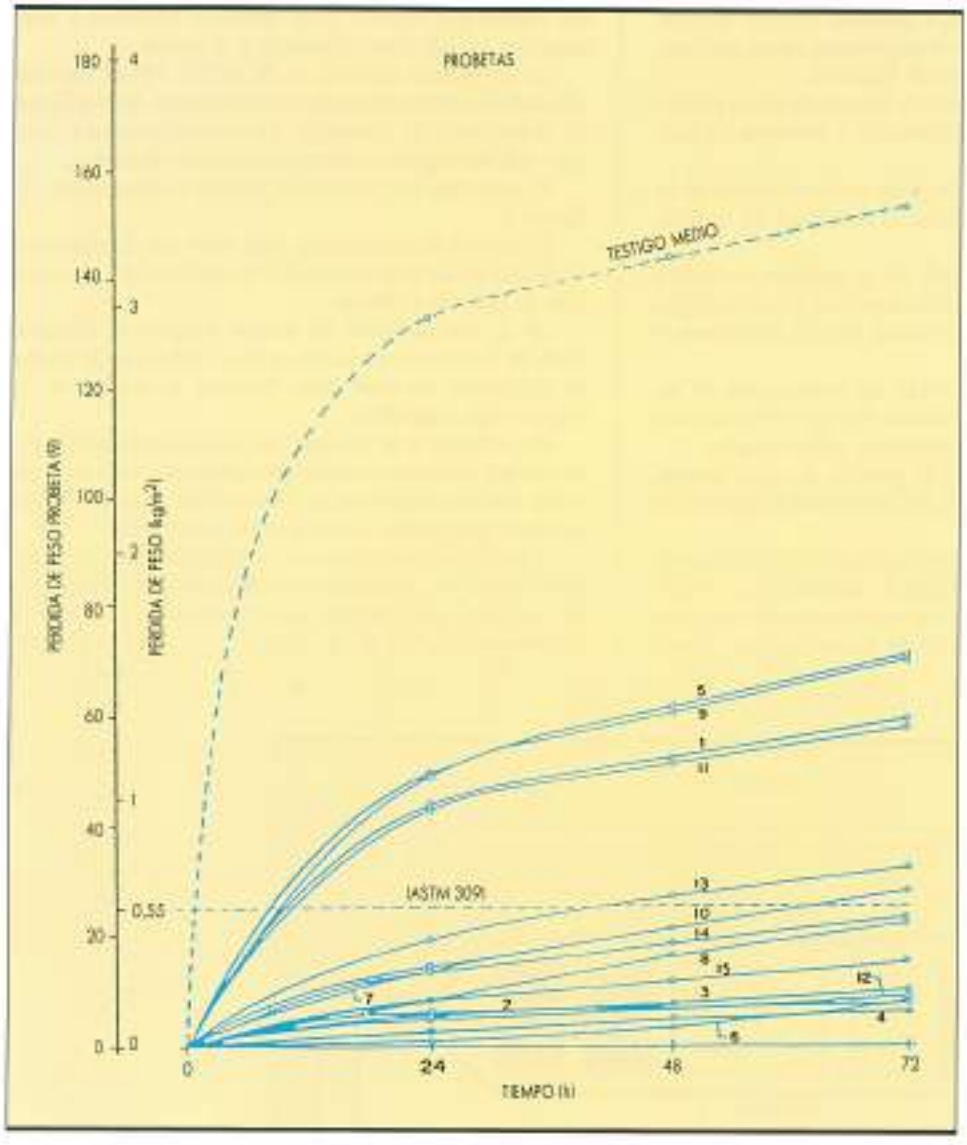

FIGURA 2. Diagrama representativo de las evoluciones de pérdida de peso en diferentes probetas.

ción de superficie, que retiene la propia humedad de amasado al impedir la evaporación.

De todas las modalidades de curado por impermeabilización, la más utilizada es la de pulverización externa con productos filmógenos.

Los productos filmógenos son líquidos tipo pintura, de color claro, con un vehículo a base de resinas o parafinas sintéticas.

Para el estudio se realizó un sondeo exhaustivo del mercado nacional de dichos productos, seleccionándose, finalmente, quince tratamientos distintos de varios fabricantes.

El empleo de los productos filmógenos de curado ha sido muy fecundo para las miras del estudio por la amplia gama de hipótesis de curado que pueden generarse.

Dado el abierto abanico de retenciones de humedad que proporcionaron no fue necesaria la variación de concentraciones ni de dotaciones a emplear, aplicándose éstos siguiendo las recomendaciones del propio fabricante.

3. ANALISIS DE LA RETENCION DE HUMEDAD

Para el análisis de la retención de humedad por los tratamientos superficiales se ha recurrido a una adaptación de la Norma ASTM C156. Tal adaptación se ha decantado en la Norma MELC 12135 «Método de Ensayo para la determinación de la eficacia en la retención de humedad, por los productos para curado del hormigón, mediante cámara climática».

Los ensayos en **Cámara Climática** revelan el comportamiento de los distintos tratamientos en un ambiente de 40°C y 40 % de Humedad Relativa.

Se comparan las pérdidas de humedad entre probetas tratadas con producto filmógeno y probetas sin tratar (Probetas Testigo).

El ensayo dura 72 horas y las características de la probeta de mortero empleadas se muestran en la figura 1.

Se destaca la importancia de la fracción no-volátil del producto aplicado, advirtiéndose una gran variación en las calidades de los productos: buenos, regulares y malos.

En la figura 2 se presentan las evoluciones de las pérdidas de peso experimentadas por las probetas para cada uno de los quince tratamientos seleccionados.

El límite de 0,55 kg/m^2 de pérdida de agua separa, según la Norma ASTM 309, los productos de calidad de los deficientes.

Paralelamente a los ensayos indicados se ha desarrollado en el Laboratorio Central de Estructuras y Materiales un prototipo que permite una simulación más perfecta del clima real. Se trata de los ensayos en **Tunel de Viento** que añaden a las variables humedad y temperatura la radiación infrarroja y el viento.

La normativa seguida es la MELC 12134 titulada «Método de ensayo para la determinación de la eficacia en la retención de humedad, por los productos para curado del hormigón mediante radiación infrarroja».

El esquema del circuito de ensayo se muestra en la figura 3.

El ensayo es ligeramente más duro que el anterior y se realiza en un período de sólo 24 horas sobre el mismo tipo de probeta indicada.

De la comparación de ambos grupos de ensayos, dada su perfecta correlación, puede deducirse la calidad de cualquiera de ellos para discernir la calidad de un tratamiento superficial.

En la figura 4 se recogen las dispersiones contrastadas en los distintos tratamientos probados. Se puede advertir que los productos de peor calidad también suelen producir una mayor disparidad de resultados.

A partir de estos datos se escogieron diferentes probetas para ser analizadas por Microscopía Electrónica de Barrido, aplicándoles, posteriormente, procesos de tratamiento digital de la imagen para obtener resulta-

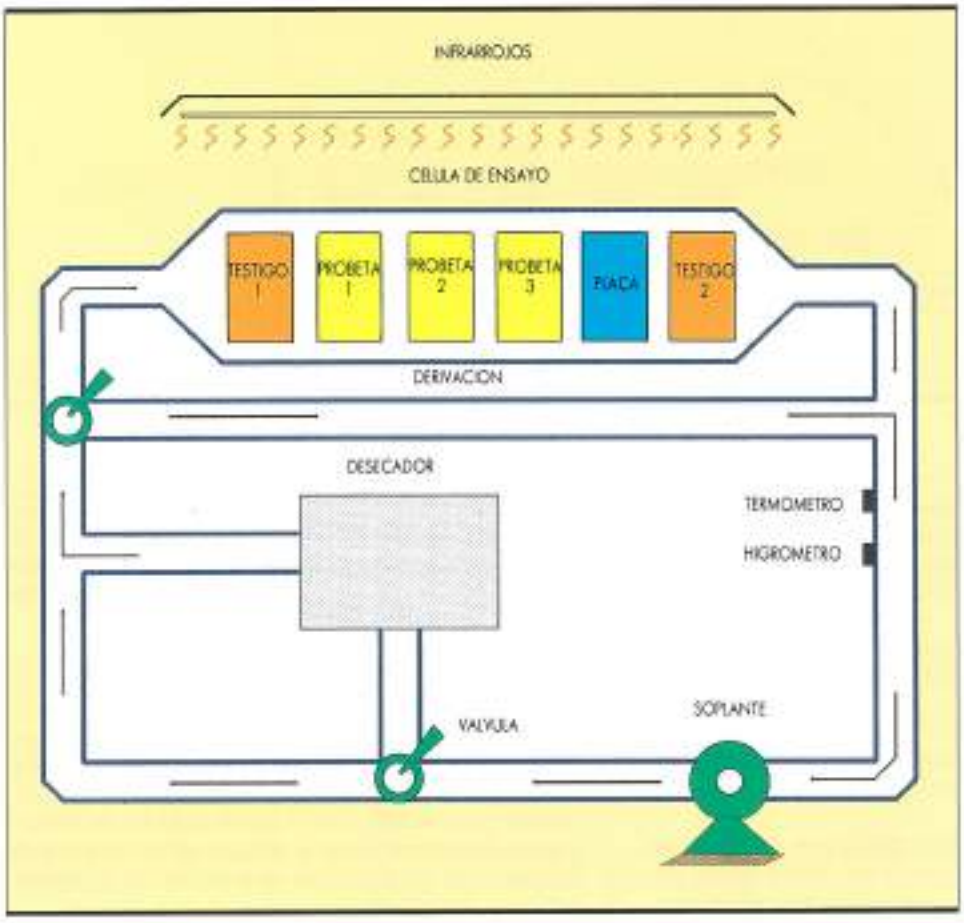

FIGURA 3. Representación esquemática del circuito de ensayo de los filmógenos.

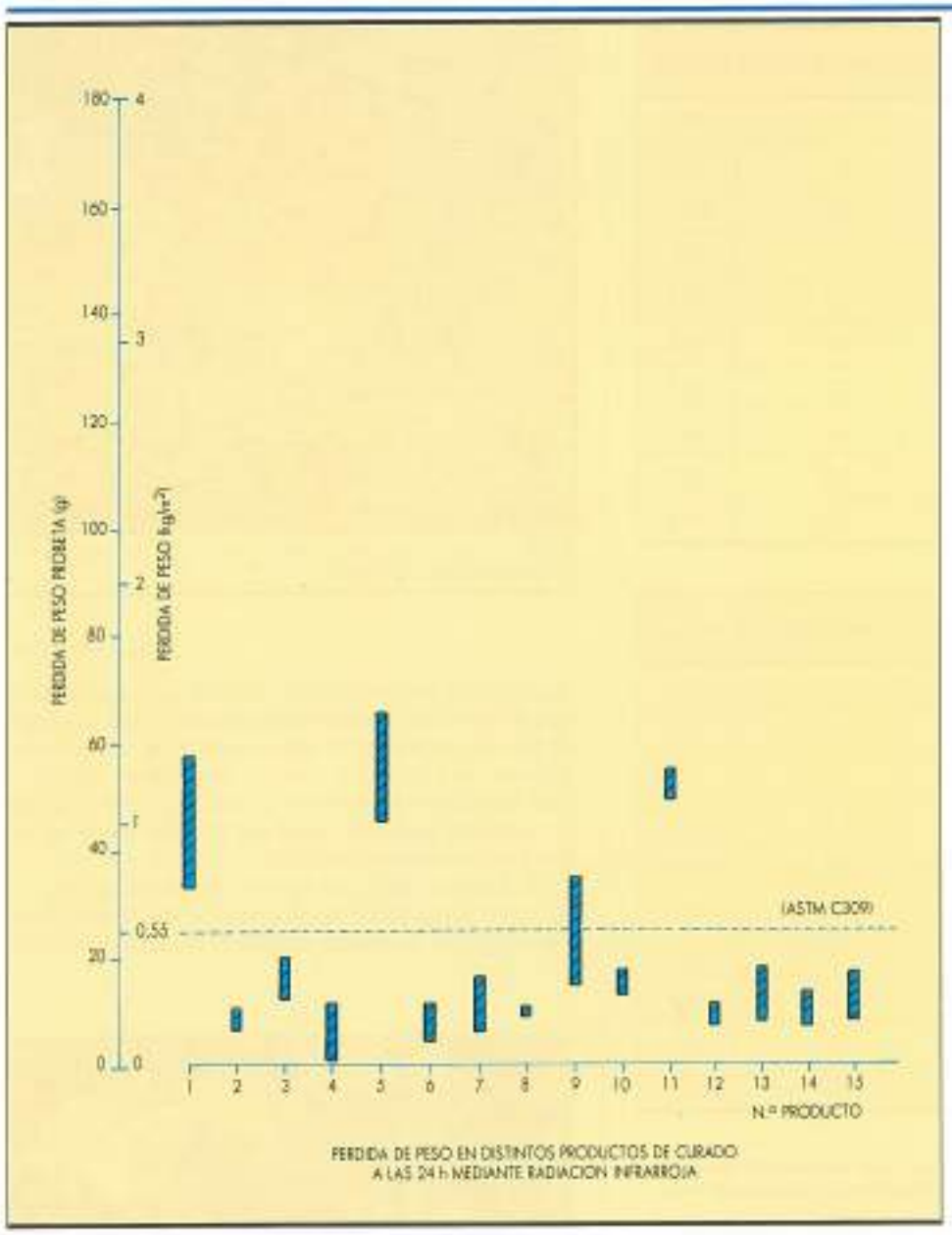

FIGURA 4. Representación gráfica de los distintos productos de curado y su relación con la pérdida de peso.

dos cuantitativos sobre diferentes zonas de la muestra, comparando aquellas en las que se había utilizado el producto filmógeno y qué grado de eficacia había tenido.

Para el estudio por M.E.B., se ha elegido un filmógeno considerado como bueno, es decir, dentro de la figura 4, por debajo del límite establecido en la norma ASTM 309.

4. TECNICA DE TRATAMIENTO DE IMAGENES POR MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO.

Las técnicas de tratamiento digital de la señal recibida por Microscopía Eléctronica de Barrido nos permiten la cuantificación y el seguimiento del producto filmógeno aplicado sobre un determinado hormigón.

En el presente estudio hemos aplicado, en un hormigón, un producto de este tipo, sobre el que, teóricamente, se han calculado la retención de humedad y, por tanto, el porcentaje entre la pérdida de humedad de las probetas tratadas y las probetas sin tratar, obteniéndose unos resultados bastantes concordantes con los encontrados por técnicas de tratamiento de imágenes (véanse los gráficos de la figura 5).

El registro, por M.E.B., de la señal recibida, tanto de

N.º DE MUESTRA	POROSIDAD	MICROFISURACION	MATRIZ
1	25,4	5	69,6
2	25,7	6	68,3
3	21,9	5,7	83,8
4	22,4	3	74,6
5	24,4	8,3	67,3
6	25,6	4,6	69,8
7	28,1	5,2	66,7
8	24,5	6,2	69,3
9	21,0	4,3	74,7
10	21,4	7,2	71,4

FIGURA 5a. Probeta testigo.

N.º DE MUESTRA	POROSIDAD	MICROFISURACION	MATRIZ
1	11,4	2	86,6
2	10,0	1,9	88,1
3	8,9	1,7	89,4
4	11,8	2,5	85,7
5	10,7	1,5	98,8
6	12,8	1,8	85,4
7	10,1	1,3	88,6
8	11,1	1,6	87,3
9	12,0	1,4	86,6
10	11,6	1,9	86,5

FIGURA 5b. Probeta tratada.

FIGURA 5. Valores obtenidos a partir de la cuantificación de fases, FIGURA 5a, y experimentalmente FIGURA 5b, y su comparación entre ambos.

la probeta testigo (Fot. 1) como de la probeta tratada (Fot. 2) se ha evidenciado, en el primer caso, una importante porosidad, así como su red de microfisuración; mientras que, en el segundo, tanto la porosidad como la fisuración eran significativamente menores. Hecho que corroboraba la importancia de la aplicación de este tipo de productos.

Sobre estas dos imágenes hemos aplicado un filtrado matricial, con un realce de contornos para definir, en base a sus niveles de gris, unos umbrales de corte que nos permitan, por proceso selectivo de segmentación dinámica, obtener una imagen binaria (con dos fases),

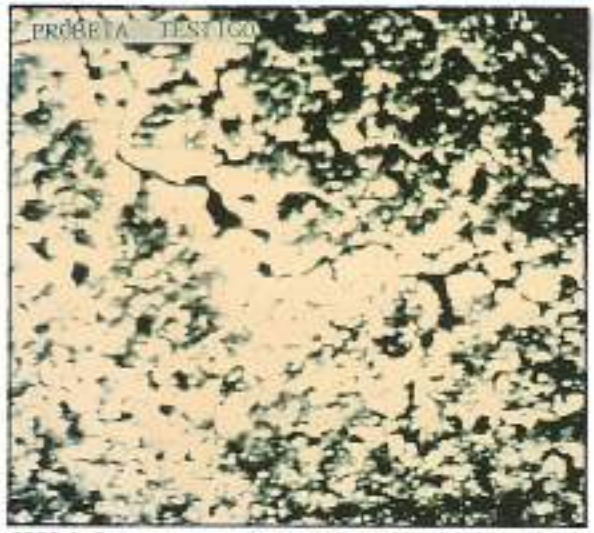

FOTO 1. Probeta testigo en la que se observa la red de fisuración y la porosidad existente (en negro).

donde existe una primera (en blanco) que representa la red de fisuración y porosidad existente y otra, la segunda fase (en negro), en la que se engloba el resto. Es importante, por lo tanto, obtener una imagen binaria lo más exactamente parecida a la fase a cuantificar; de ahí la necesidad de aplicar estos dos filtrados sobre las señales derivadas anteriormente.

El resultado se puede apreciar en las fotografías 3 y 4, donde la porosidad (azul) presenta una mayor distribución que en la probeta tratada (Fot. 4); lo mismo su-

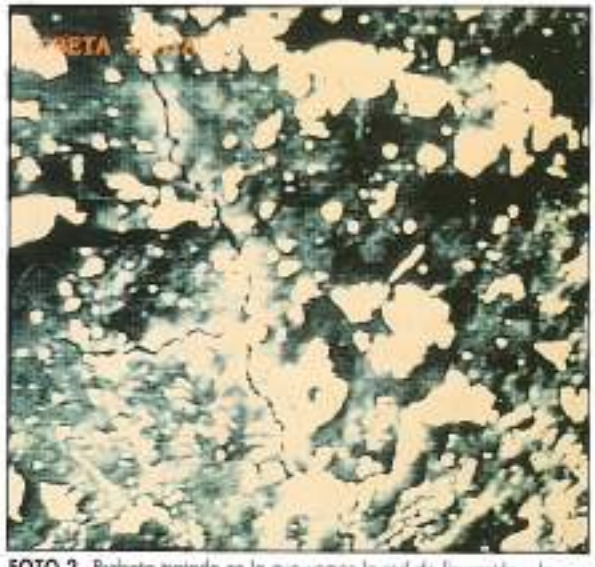

FOTO 2. Probeta tratada en la que vemos la red de fisuración y la porosidad menor que en el caso anterior.

FOTO 3. Obtención de la imagen binaria, en la que la fase azul representa la porosidad y fisuración de la muestra. La fase verde es la «zona sana». Esta imagen ha sido obtenida con una paleta de falso color, registrando una imagen más agradable.

cede con la red de microfisuración. Se ha de señalar, asimismo, lo importante de esta fisuración, ya que, por una parte, conecta la porosidad y, por otra, se distribuye y asocia a aquélla.

Sobre la imagen binaria, el procesador de imágenes identifica, discrimina y cuantifica, por procesos selecti-

FOTO 4. Obtención de la imagen binaria de la fotografía 2 (testigo tratado), donde los colores representan lo mismo que lo anterior (la paleta de color es la misma). Obsérvese cómo la zona azul ocupa menor área que la micrografía anterior.

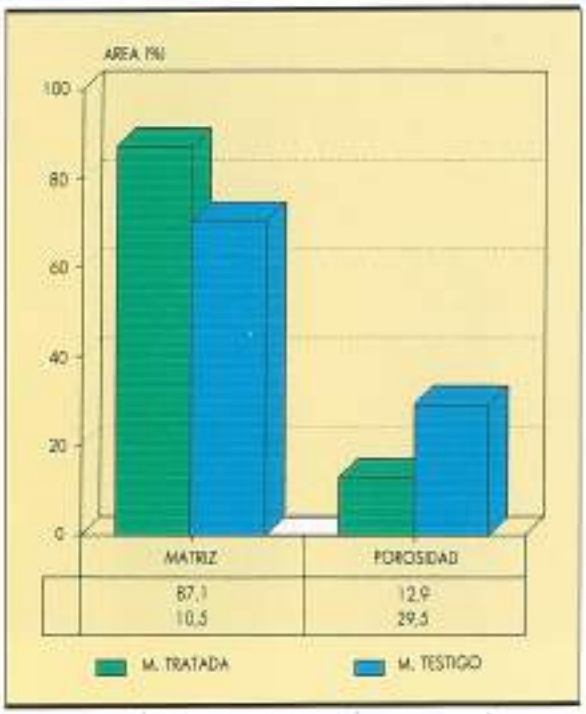

FIGURA 6. Gráfico de comparación entre la muestra tratada, con productos filmógenos y sin tratar.

vos de clasificación de áreas, los píxels existentes (fase blanca) en relación al total del área cubierta (512 × 512); y a partir de aquí, extrae el porcentaje del área ocupada por cada fase.

Por ello, el proceso de segmentación va a ser determinante de la validez de los datos.

Estos, obtenidos promediadamente, al medir diversas áreas de las muestras, se han representado en la figura 5.

Hemos de señalar la importancia de la red de fisuración, asociada a la porosidad; por otra parte, la fisuración influye en la resistencia mecánica del mismo, además de facilitar la movilidad del agua y la posible neoformación de productos nocivos para la durabilidad del hormigón.

Mediante esta técnica de análisis de imagen, hemos representado las redes de fisuración, tanto de la probeta testigo como de la probeta tratada. Para ello hemos aplicado, sobre la imagen binaria, un algoritmo de apertura y dilatación de estructuras, así como un posterior proceso de «Thinning» o esqueletización, para obtener los ejes de la red fisurada, tal y como se puede apreciar en las fotografías 5 y 6.

La densidad de fisuración es un índice del estado de la muestra ya que una densidad muy alta indica un mal curado, con la posibilidad de procesos migratorios, dentro del hormigón, así como una evidencia de un curado deficiente.

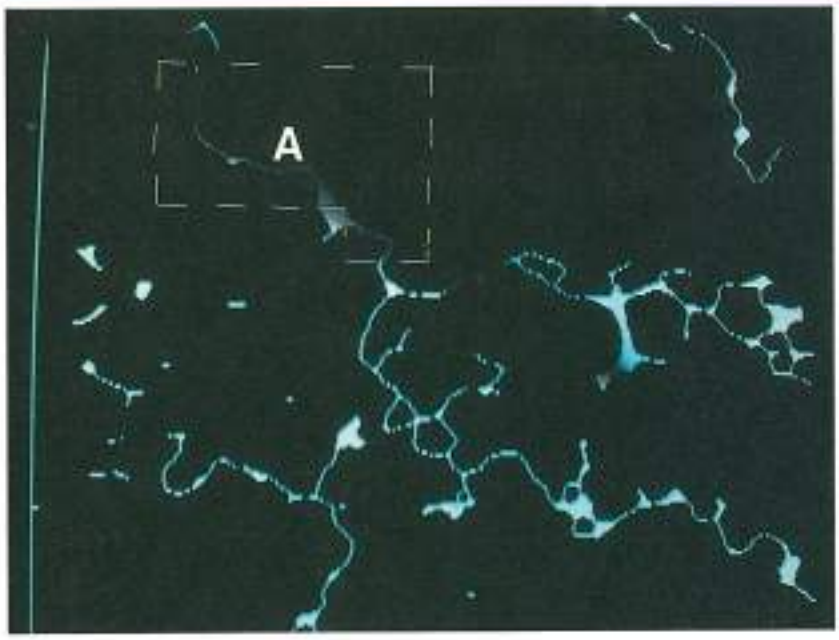

FOTO 5. Resultado del proceso de Esqueletización o «Thinning» donde sólo se ha representado la microfisuración principal. Como se puede ver, esta red es mucho más densa que en el segundo caso.

5. CONCLUSION

Del presente estudio, realizado mediante técnicas de tratamiento digital de imágenes, a partir de fotografías obtenidas por M.E.B., se confirman los valores de porosidad que se determinaron por métodos clásicos gravimétricos, utilizados hasta el presente en el Laboratorio Central.

Se ha costatado la caída de la porosidad en la matriz de cemento tratado con productos filmógenos de curado superficial, frente a aquellos hormigones que carecían de dicho tratamiento. La cuantificación de esta disminución oscila en valores medios en torno al 17 %.

La repercusión en la resistencia del hormigón debida a las mejoras de la compacidad de la pasta de cemento es del orden de un 60 % superior.

FOTO 6. Resultado del mismo proceso que en el caso anterior, solamente que de la imagen 4, perteneciente a la probeta tratado. Como se puede ver, la aplicación del filmógeno produce una importante disminución de la red estudiada.

Podemos decir, por lo tanto, que el tratamiento de imágenes, aplicado sobre este tipo de muestras, es una herramienta de gran poder de discriminación y cuyos resultados son extrapolables a los obtenidos por otros medios clásicos, como pueden ser los gravimétricos.

REFERENCIAS

GOLDSTEIN, J. I., y YAKOWITZ, H. (1975). Practical Scanning Electron Microscopy. Plenun Press, N.Y.

PRENDES RUBIERA, N. (1991). Estudio de los parámetros petrográficos en cementos y hormigones, mediante tratamiento digital de imágenes. Proyecto de Investigación y Desarrollo del Laboratorio Central de Estructuras y Materiales.

RABINER, L. R., y GOLD, B. (1975). Applications of digital signal processing. Englewood Cliff: Prentice-Hall Inc.

SERRA, J. (1972). «Morphologie Mathematique». Trite d'informatique geológique. Direction P. Laffitte, pp. 194-238. París Masson et Cia. Editeurs

SAINZ DE CUETO, F. J., y LOPEZ, A. R. (1989). Experimentación en cámara climática de los productos filmógenos para el curado del hormigón. Rev. Rutas. Asociación Técnica de Carreteras, n.º 15.

SAINZ DE CUETO, F. J., y LOPEZ, A. R. (1990). Estudio en túnel de viento de los productos de curado. Normativa MELC. Rev. Rutas. Asociación Técnica de Carreteras, n.º 18.

SAINZ DE CUETO, F. J. (1990). Pliego de condiciones para el estudio de los productos de curado en pavimentos de hormigón. Informe para la Dirección General de Carreteras. MOPU. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales. CEDEX.

SAINZ DE CUETO (1990). Porosidad, humedad y curado del hormigón, curso sobre aplicaciones de técnicas físicas de análisis al estudio y control de materiales.

SAINZ DE CUETO, F. J. (1991). Método para la caracterización del curado en elementos superficiales de hormigón. Tesis Doctoral. ETSICC y P. Universidad Politécnica de Madrid.

CUANDO PONEMOS UNA BASE PONEMOS UN FUTURO

25 AÑOS DE HISTORIA

Pilotes Posada, S.A. en sus 25 años
ha creado una buena base en la "cimentación" del país.
Lo logramos con tecnología y la seriedad que siempre
hemos puesto en cada obra.

Ahora, queremos ayudar a cimentar Europa.

PILOTES POSADA, S.A.

CIMENTACIONES ESPECIALES

Carretera de Bayona, 44 interior. Teléfono (986) 29 35 00/04/08. Fax (986) 20 21 52. 36213 VIGO (Spain)

LA GARANTIA DE SU CALIDAD

CIMENTACIONES/LABORATORIO

LABORATORIO / Dpto. de Carreteras

Aeropuerto de Palma de Mallorca. Plataforma de estacionamiento de aeronaves. Auscultación del firme de deflectómetros de impacto DYNATEST AWD-8081 evaluando la capacidad portante y vida residual.

CIMENTACIONES

Avda. de la Ilustración (Madrid).
Consolidación del Puente de Arroyofresno mediante JET-GROUTING.

GEOCISA
GEOTECNIA Y CIMIENTOS, S.A.

MADRID
Los Llanos de Jerez, 10 y 12
28820 Coslada (Madrid)
Tel.: 671 53 00 - Fax: 671 64 60

SEVILLA
Carretera del Copero, s/n.°
Apdo. 1.140 - 41080 Sevilla
Tel.: (95) 461 46 22 - Fax: (95) 462 88 65

VALENCIA
Dolores Márquez, 18
46020 Valencia
Tel.: (96) 360 07 50 - Fax: (96) 369 74 84

ZARAGOZA
Polígono Industrial Europa II. Nave 15
Autovía Zaragoza-Logroño P.K. 7,800
50011 Zaragoza
Tel.: (976) 33 13 33 - Fax: (976) 53 32 04

VALLADOLID
Ctra. Adanero-Gijón km. 195
47610 Zaratán (Valladolid)