

Influencia de la eficacia del curado en la hidratación y porosidad de los hormigones

por Fco. Javier Sainz de Cuetos Torres
y Antonio Román López García
Laboratorio Central de Estructuras
y Materiales, CEDEX (M.O.P.T.)



Foto 1. Consistencia del hormigón

Introducción

LA repercusión del curado de los hormigones en su calidad final es bien conocida, aunque es un cuidado que no se le viene prestando la atención que merece.

En los estudios llevados a cabo en el Laboratorio Central de Estructuras y Materiales financiados por la Dirección General de Carreteras, ha podido cuantificarse la influencia de la eficacia de curado en los parámetros básicos de calidad del hormigón, como son la compactación y la resistencia mecánica.

Con referencia al primer aspecto sucede que una alteración en la humedad disponible durante el fraguado y madurez inicial, modifica las condiciones de evolución de la hidratación del cemento, modificando la distribución de fracciones volumétricas.

La influencia de las pérdidas tempranas de agua se manifiesta por tanto en dos aspectos básicos como son:

- Alteración de la hidratación de la pasta de cemento.
- Alteración del endurecimiento de la pasta de cemento.

La cuestión es especialmente importante en los firmes de hormigón

La cuestión es especialmente importante en los firmes de hormigón

La cuestión es especialmente importante en los firmes de hormigón



igón para pavimentos (Cono de Abrams 2 cm aproximadamente).

de carreteras, donde se ponen en obra básicamente hormigones de consistencia seco-plástica (foto 1).

Alteración de la estructura porosa

Para la verificación de la alteración experimentada por la estructura porosa, al cambiar las condiciones de curado, se realizaron ensayos que pueden agruparse en dos conjuntos

perfectamente diferenciados:

- Ensayos para determinación de la alteración en la hidratación y porosidad.
- Ensayos para determinación de la alteración en la resistencia.

El primer grupo de ensayos se efectuó al término del Ensayo de Retención Diferida (véase Bibliografía). Las probetas se fabricaron con mortero de cemento normalizado en la Norma UNE 80.101. Los moldes usados fueron bandejas metálicas de 32 x 25 x 5 cm (foto 2).

Las proporciones dosificadas por probeta fueron: 864 g de agua, 1 728 g de cemento y 5 182 g de áridos (total 7 774 g).

Es decir una amasada con una relación agua/cemento $W/C = 0,50$ y una disponibilidad de agua inicial por metro cuadrado de 10,8 kg.

Antes de la aplicación del tratamiento superficial se constataron unas pérdidas medias por probeta, debidas a la exudación, de 18,7 g ($0,234 \text{ kg/m}^2$). Esto significa una ligera corrección de la relación agua/cemento inicial $W/C = 0,489$ y de la disponibilidad inicial de agua 10,566 kg/m^2 .

Se aplicaron 15 tratamientos superficiales con distintos productos filmógenos. De cada producto se fabricaron tres probetas, dos de ellas con la dotación normal de producto 250 g/m^2 y la tercera con una dotación superior, 400 g/m^2 . Cinco probetas se dejaron sin tratamiento.

Las probetas se mantuvieron durante 72 h en unas condiciones medias de sala de laboratorio de 24°C de temperatura y 50% de humedad relativa. Posteriormente se expusieron durante 100 días a un clima ex-

“**A**ntes de la aplicación del tratamiento superficial se constataron unas pérdidas medias por probeta, debidas a la exudación, de 18,7 g ($0,234 \text{ kg/m}^2$). Esto significa una ligera corrección de la relación agua/cemento inicial $W/C = 0,489$ y de la disponibilidad inicial de agua 10,566 kg/m^2 .”

terior de verano caluroso, con exposición solar diurna permanente. Esta fase constituyó el Ensayo de Retención Diferida a la Intemperie.

El estado final de las probetas representa el punto de partida para la realización del Ensayo de Agotamiento de Humedad.

EL ENSAYO DE AGOTAMIENTO DE HUMEDAD nos va a revelar la influencia que ha tenido la eficacia del curado en la hidratación.

En el origen del ensayo las probetas tenían una madurez ligeramente superior a las 4 000 h y su estado era muy seco. A partir de ese momento inicial fueron introducidas en estufa a una temperatura de 110°C durante 60 días. (foto 3) (Ver página siguiente)

Periódicamente las probetas eran extraídas de la estufa, para la comprobación de su peso en una balanza



Foto 2. Molde con probeta y producto de curado.

Pérdidas de agua (kg/m²) por estufado a 110°C de probetas, en fechas

	Marca inicial	4 d	7 d	11 d	15 d	20 d	25 d	32 d	Máxima
Sin tratamiento sobre testigos									
13	5,37	7,13	7,16	7,21	—	—	—	—	—
25	5,40	7,13	7,10	7,25	7,25	7,41	7,45	7,53	7,70
37	5,40	7,12	7,11	7,11	7,13	7,13	7,13	7,56	7,68
50	5,23	7,50	7,58	7,58	7,58	7,58	7,58	7,61	7,73
Media	5,35	7,22	7,24	7,29	7,32	7,37	7,39	7,57	7,70
Merma	0	1,87	1,89	1,94	1,97	2,02	2,04	2,22	2,35
Con tratamiento de producto 1									
11	4,28	6,72	6,79	6,84	6,93	6,95	6,95	6,95	6,95
12	4,26	6,60	6,66	6,69	6,69	6,71	6,73	6,76	6,78
14	3,06	7,07	7,12	7,19	7,19	7,37	7,37	7,40	7,43
Media	4,53	6,80	6,86	6,91	6,94	7,01	7,02	7,04	7,05
Merma	0	2,27	2,33	2,38	2,41	2,48	2,49	2,51	2,52
Con tratamiento de producto 2									
15	4,29	7,05	7,11	7,16	7,16	7,16	7,16	7,16	7,16
16	4,33	7,30	7,35	7,35	7,35	7,35	7,35	7,36	7,38
17	2,84	7,03	7,09	7,13	7,13	7,34	7,37	7,37	7,39
Media	3,82	7,13	7,18	7,21	7,21	7,28	7,29	7,30	7,31
Merma	0	3,31	3,36	3,39	3,39	3,46	3,47	3,48	3,49
Con tratamiento de producto 3									
18	3,43	7,07	7,14	7,33	7,33	7,42	7,45	7,52	7,57
19	3,22	5,95	6,49	6,71	6,83	7,09	7,09	7,09	7,09
20	3,27	5,63	6,33	6,64	7,13	7,17	7,17	7,17	7,17
Media	3,31	6,22	6,65	6,89	7,10	7,23	7,24	7,26	7,28
Merma	0	2,91	3,34	3,58	3,79	3,92	3,93	3,95	3,97
Con tratamiento de producto 4									
21	1,53	3,36	4,04	4,74	6,95	6,99	7,12	7,17	7,26
22	1,12	3,06	3,83	4,69	6,89	6,98	7,16	7,22	7,39
23	1,11	2,12	2,77	3,87	7,13	7,19	7,26	7,31	7,39
Media	1,25	2,85	3,55	4,43	6,99	7,05	7,18	7,23	7,35
Merma	0	1,60	2,30	3,18	5,74	5,80	5,93	5,98	6,10
Con tratamiento de producto 5									
24	4,49	6,58	6,73	6,82	6,92	7,04	7,23	7,49	7,54
26	4,34	7,05	7,15	7,16	7,32	7,32	7,32	7,33	7,51
27	4,55	6,89	6,94	7,15	7,18	7,18	7,34	7,34	7,34
Media	4,53	6,84	6,94	7,04	7,14	7,18	7,30	7,39	7,46
Merma	0	2,31	2,41	2,51	2,61	2,65	2,77	2,86	2,93
Con tratamiento de producto 6									
28	3,02	7,13	7,15	7,19	7,19	7,19	7,19	7,19	7,19
29	2,97	7,14	7,18	7,30	7,30	7,31	7,32	7,35	7,38
30	2,04	6,93	6,97	7,10	7,13	7,20	7,23	7,26	7,29
Media	2,68	7,07	7,10	7,20	7,21	7,23	7,25	7,27	7,29
Merma	0	4,39	4,42	4,52	4,53	4,55	4,57	4,59	4,61
Con tratamiento de producto 7									
2	2,63	5,68	6,26	6,42	6,57	6,69	6,74	6,78	7,11
3	3,96	5,81	6,22	6,42	6,51	6,58	6,62	6,63	7,16
4	2,79	6,42	6,58	6,66	6,67	6,68	6,87	6,88	6,97
Media	3,13	5,97	6,35	6,50	6,58	6,65	6,74	6,76	7,08
Merma	0	2,84	3,22	3,37	3,45	3,52	3,61	3,63	3,95
Con tratamiento de producto 8									
5	3,92	6,46	6,59	6,66	6,85	6,86	6,89	6,90	7,20
6	3,90	6,41	6,53	6,60	6,70	6,78	6,84	6,85	7,05
7	3,89	6,79	6,83	6,90	6,90	6,90	6,90	6,90	6,90
Media	3,90	6,55	6,65	6,72	6,82	6,85	6,88	6,88	7,05
Merma	0	2,65	2,75	2,82	2,92	2,95	2,98	2,98	3,15
Con tratamiento de producto 9									
31	4,63	7,29	7,31	7,31	7,31	7,31	7,31	7,34	7,40
32	5,02	7,30	7,35	7,36	7,36	7,36	7,36	7,80	7,80
33	4,38	7,24	7,28	7,28	7,28	7,32	7,32	7,62	7,62
Media	4,68	7,28	7,31	7,32	7,32	7,33	7,33	7,59	7,61
Merma	0	2,60	2,63	2,64	2,64	2,65	2,65	2,91	2,93
Con tratamiento de producto 10									
8	4,08	6,80	6,89	6,95	7,13	7,17	7,25	7,26	7,30
9	4,08	6,63	6,71	6,78	6,86	6,89	6,91	6,91	6,92
10	3,84	6,97	7,09	7,11	7,11	7,11	7,11	7,11	7,11
Media	4,00	6,80	6,90	6,95	7,03	7,06	7,09	7,09	7,11
Merma	0	2,80	2,90	2,95	3,03	3,06	3,09	3,09	3,11
Con tratamiento de producto 11									
38	4,50	6,61	6,80	7,62	7,62	7,62	7,62	7,68	7,82
39	4,44	6,38	6,44	6,57	6,93	7,53	7,69	7,69	7,69
40	4,38	7,31	7,31	7,31	7,31	7,31	7,31	7,31	7,31
Media	4,44	6,77	6,85	7,17	7,29	7,49	7,54	7,56	7,61
Merma	0	2,33	2,41	2,73	2,85	3,05	3,10	3,12	3,17



de precisión, siendo reintegradas a la estufa sin demoras.

En las TABLAS adjuntas se muestran las pérdidas de agua sufridas por las probetas en distintas fechas. Las pérdidas se refieren a la masa original una vez exudada. Las mermas pueden obtenerse por diferencia y representan las pérdidas efectivas en la estufa.

El desarrollo del Ensayo de Agotamiento de Humedad probó que a pesar del estado excesivamente seco del mortero aún quedaba un notable volumen de agua capilar en la red de poros.

Las probetas que estabilizaban su peso eran cambiadas de postura en la estufa para facilitar la salida del vapor de agua de la trama porosa. También fueron liberadas de los moldes, para que la evaporación tuviera efecto por todas las caras.

El ensayo se mantuvo a 110°C sin interrupción durante 60 días, aunque ya a los 40 días todas las probetas evidenciaban un peso constante.

De los resultados obtenidos puede establecerse una comparación entre el efecto que ha tenido en la evolu-

En testigos
sin curado

Agua capilar	7,70 kg/m ²
Agua hidratación	2,87 kg/m ²
Relación (W/C) estricta	0,13



Foto 3. Estufado de las probetas.

ción de la hidratación un curado de alta eficacia y uno de baja eficacia. Con tal fin se han promediado los resultados para productos de calidad alta (2, 3, 4, 6, 7, 8 y 10), con un Coeficiente de Eficacia medio del 91%, con los obtenidos para productos de calidad baja (1, 5, 9, 11 y 13), con un Coeficiente de Eficacia medio del 65%.

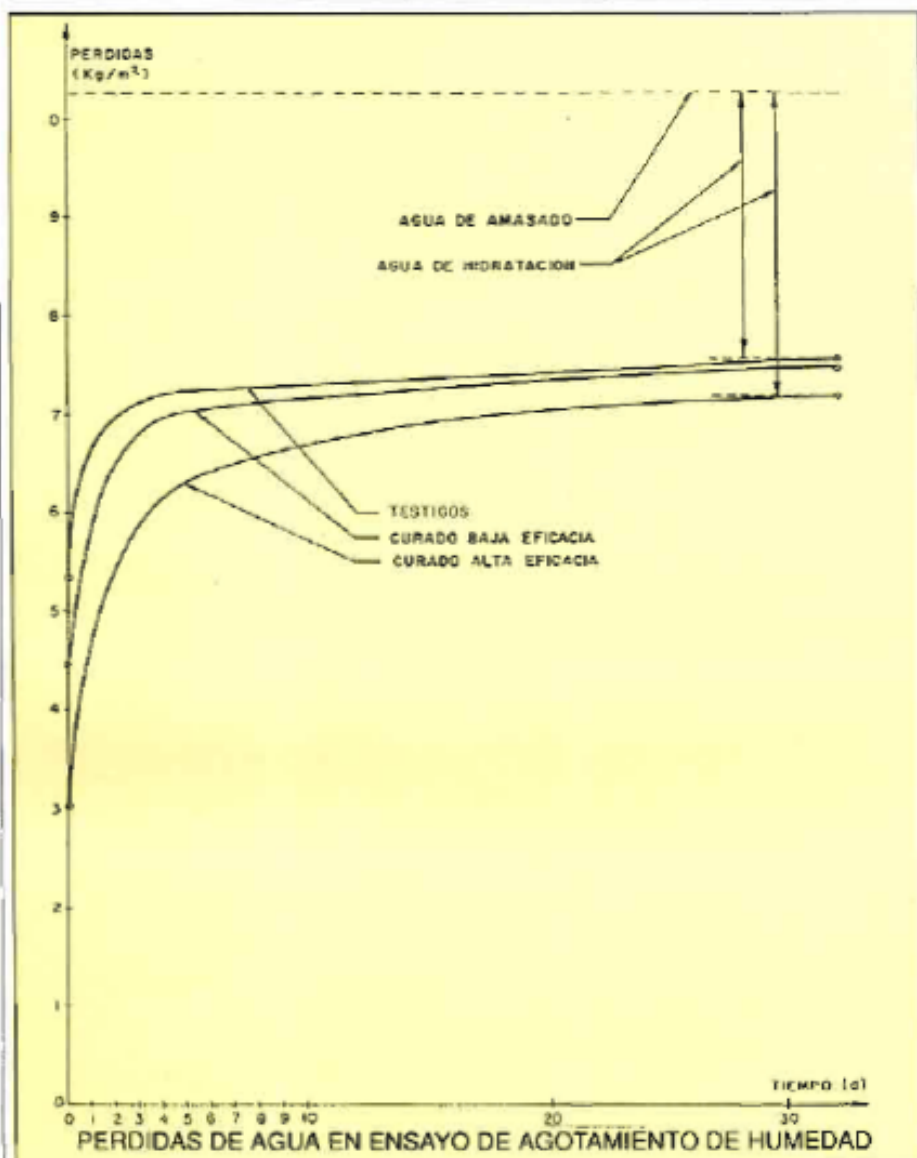
Los valores estadísticos se muestran en la TABLA adjunta, representándose en la FIGURA correspondiente. Finalmente podemos destacar las interesantes cifras siguientes: (ver cuadro inferior)

Es decir una pasta de cemento bien curada asimila 0,48 kg/m² más de agua estructural de hidratación, lo que representa en porcentaje un 17%.

Se realizaron observaciones microscópicas entre las pastas bien curadas y deficientemente curadas, pudiendo advertirse en las primeras, de forma cualitativa, una mejor trabazón y compacidad de gel microcristalino con una menor proporción de cemento anhidro.

Pérdidas de agua (kg/m²) por estufado a 110°C de probetas, en fechas

	Marca inicial	4 d	7 d	11 d	15 d	20 d	25 d	32 d	Máxima
Con tratamiento de producto 12									
34	2,48	7,26	7,29	7,29	7,29	7,37	7,37	7,41	7,44
35	2,39	7,18	7,22	7,27	7,27	7,27	7,27	7,27	7,27
36	1,68	7,03	7,08	7,18	7,18	7,18	7,18	7,18	7,18
Media	2,18	7,16	7,20	7,25	7,25	7,27	7,27	7,29	7,30
Merma	0	4,98	5,02	5,07	5,07	5,09	5,09	5,11	5,12
Con tratamiento de producto 13									
41	4,00	6,72	6,72	6,99	6,99	7,70	7,88	7,88	7,88
42	3,80	6,94	6,94	6,99	7,31	7,52	7,68	7,68	7,68
43	3,00	7,60	7,62	7,63	7,63	7,63	7,65	7,65	7,65
Media	3,60	7,09	7,09	7,20	7,31	7,62	7,74	7,74	7,74
Merma	0	3,49	3,49	3,60	3,71	4,02	4,14	4,14	4,14
Con tratamiento de producto 14									
44	2,77	7,27	7,27	7,34	7,57	7,57	7,57	7,57	7,60
45	3,15	7,34	7,34	7,36	7,42	7,45	7,53	7,53	7,53
46	2,51	7,04	7,04	7,04	7,20	7,34	7,44	7,44	7,44
Media	2,81	7,22	7,22	7,25	7,40	7,45	7,51	7,51	7,52
Merma	0	4,41	4,41	4,44	4,59	4,64	4,70	4,70	4,71
Con tratamiento de producto 15									
47	3,08	7,06	7,11	7,11	7,11	7,11	7,11	7,11	7,11
48	3,07	7,53	7,63	7,63	7,63	7,63	7,63	7,63	7,63
49	2,48	7,44	7,47	7,51	7,51	7,51	7,51	7,51	7,51
Media	2,88	7,34	7,40	7,42	7,42	7,42	7,42	7,42	7,42
Merma	0	4,46	4,52	4,54	4,54	4,54	4,54	4,54	4,54



En probetas
curadas
con alta
eficacia

7,22 kg/m²
3,35 kg/m²
0,16

En probetas
curadas
con baja
eficacia

7,57 kg/m²
3,00 kg/m²
0,14

Pérdidas de agua (kg/m³). Ensayo de agotamiento de humedad

Fecha (d)	Pérdidas totales Media desviación		Pérdidas en estufa Media desviación	
- Con tratamiento de PRODUCTOS DE ALTA EFICACIA				
Inicial	3,03	0,96	0	0
4	6,22	1,43	3,19	1,06
7	6,45	1,21	3,41	0,89
11	6,64	0,93	3,61	0,78
15	7,02	0,23	3,99	1,02
20	7,08	0,23	4,04	1,02
25	7,12	0,20	4,08	1,03
32	7,14	0,21	4,10	1,05
Máx.	7,22	0,12	4,19	1,04
- Con tratamiento de PRODUCTOS DE BAJA EFICACIA				
Inicial	4,46	0,54	0	0
4	7,01	0,21	2,60	0,51
7	7,06	0,18	2,65	0,48
11	7,18	0,10	2,77	0,48
15	7,25	0,08	2,84	0,51
20	7,40	0,17	2,97	0,62
25	7,46	0,18	3,03	0,66
32	7,54	0,15	3,11	0,62
Máx.	7,57	0,13	3,14	0,61

Estudio microestructural

De las probetas ensayadas se prepararon muestras para su análisis

microestructural. Se trataba de comparar la microestructura, de las matrices hidratadas de cemento, en las probetas tratadas con un producto

adecuado frente a las probetas testigo o mal curadas. Los campos elegidos fueron las superficies internas de las pequeñas inclusiones de aire. (Véase fotos 4 y 5).

La razón de esta elección era asegurar una zona de concentración de pasta de cemento con una superficie razonablemente plana.

Como era de esperar en las probetas testigo se pudo apreciar una microfisuración de retracción mucho más acusada. (Véase fotos 6 y 7).

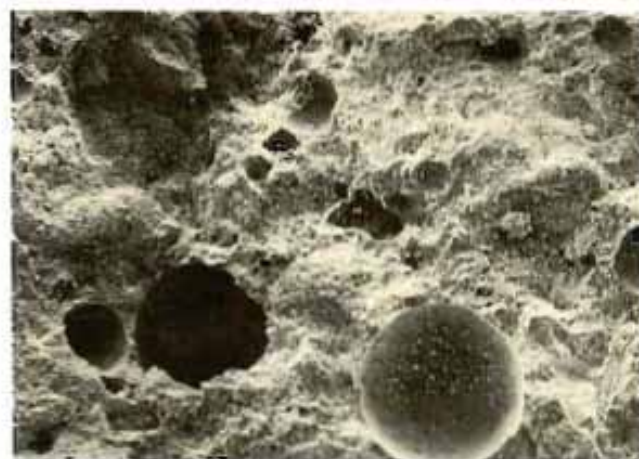
También la porosidad era mucho mayor en las probetas testigo, intuyéndose ya una menor capacidad resistente.

Las estructuras obtenidas fueron evaluadas mediante las técnicas de Análisis Digital de Imagen (fotos 8, 9 y 10).

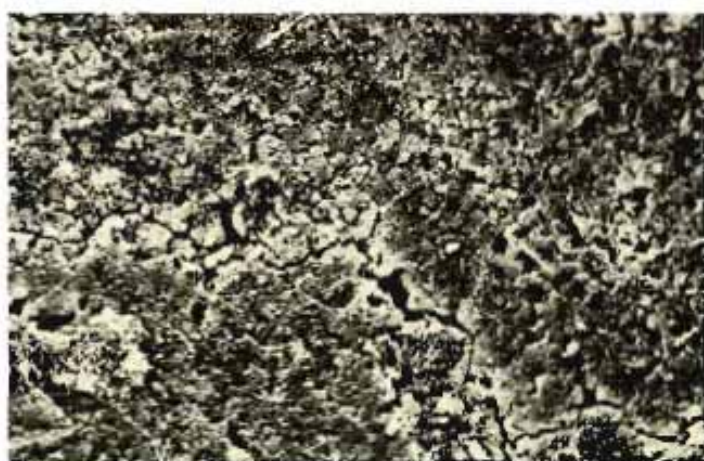
La cuantificación de porosidades obtenida mediante análisis digital confirma el orden de las cifras ya citadas del Ensayo de Agotamiento de Humedad (foto 11).

Bibliografía

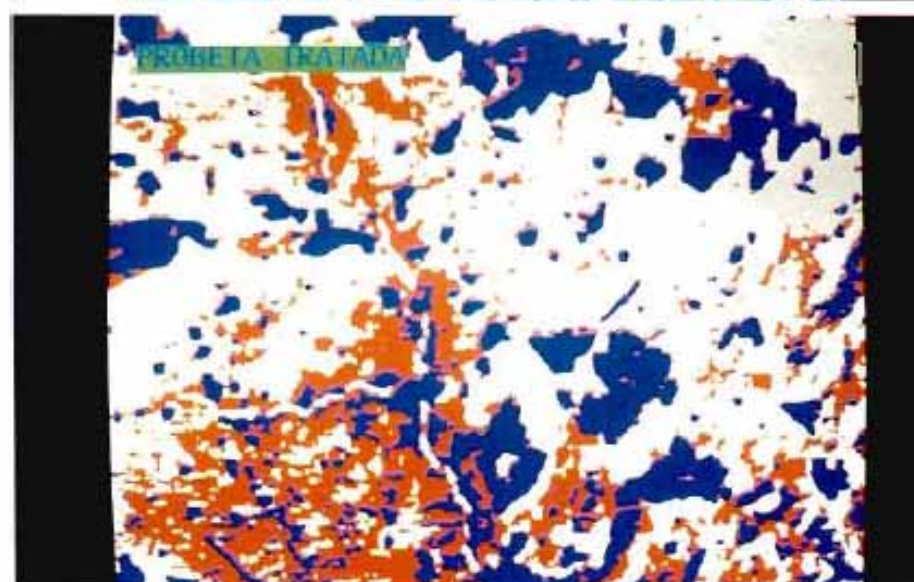
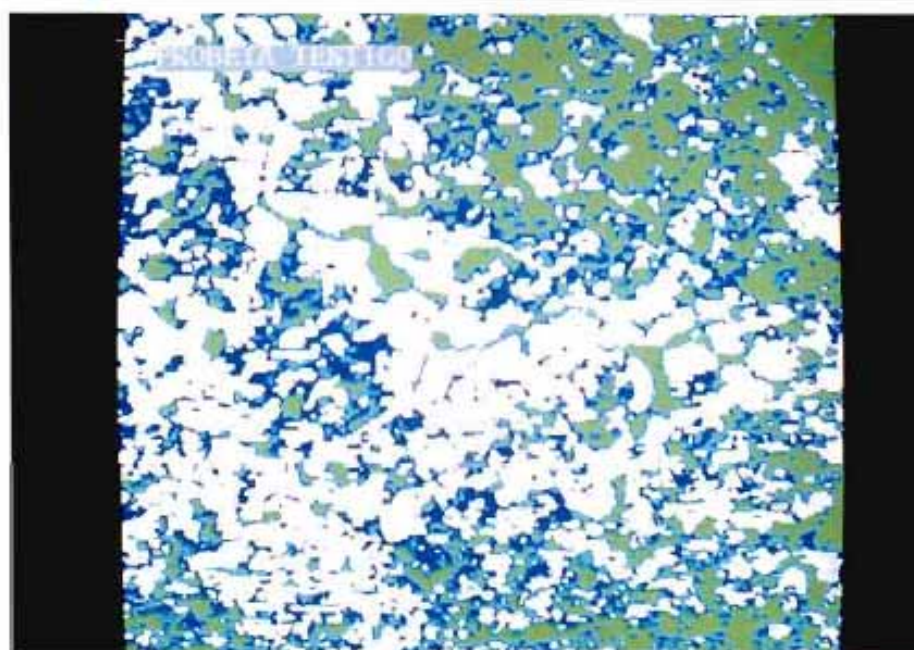
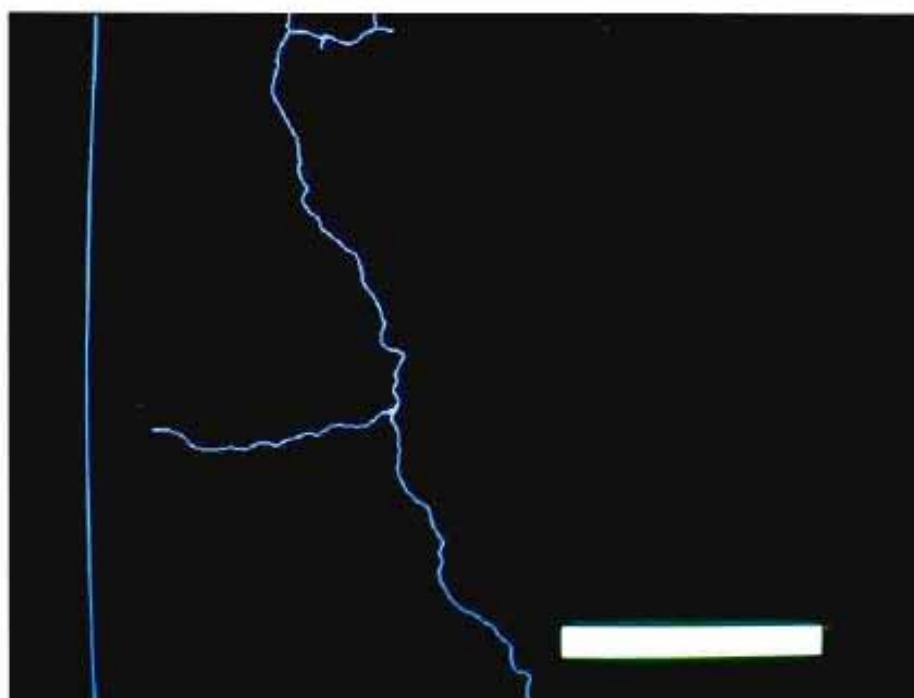
- Productos Filmógenos de Curado del Hormigón
F. J. Sáinz de Cuetio y A. R. López
Revista RUTAS. Asociación Técni-



Fotos 4 y 5. Campos de observación microscópica en el interior de pequeñas burbujas de aire ocluido.



Fotos 6 y 7. Textura porosa de la pasta de cemento analizado. Obsérvese la diferencia de porosidades entre la probeta testigo y la tratada.



ca de Carreteras. Nº 14.
Madrid, Julio 1.989.

- Experimentación en Cámara Clí-
mática de los productos Filmóge-
nos para el Curado de Hormigón.
F. J. Sáinz de Cuetto y A. R. López
Revista Rutas. Asociación Técni-
ca de Carreteras. Nº 15.
Madrid, Octubre 1.989.

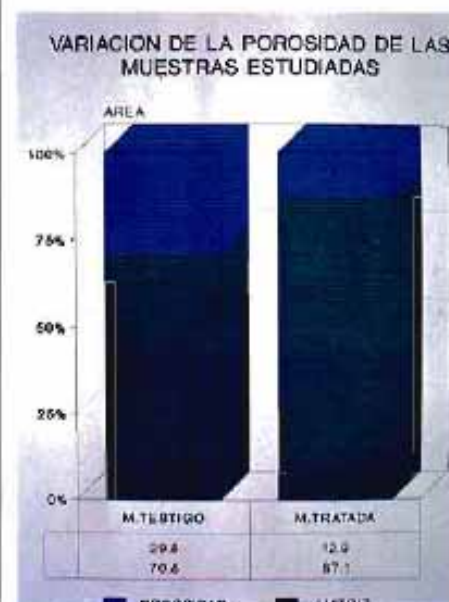


Foto 11. Cuantificación de la porosidad obtenida mediante análisis digital de imagen.

- Comportamiento en Ambiente Real de los Productos Filmógenos para Curado del Hormigón. Ensayo de Retención Diferida. F. J. Sáinz de Cuetto y A. R. López. Revista Rutas. Asociación Técnica de Carreteras. Nº 17. Madrid, Marzo 1.990.
- Estudio en Túnel de Viento de los Productos de Curado. Normativa MELC. F. J. Sáinz de Cuetto y A. R. López. Revista Rutas. Asociación Técnica de Carreteras. Nº 18. Madrid, Mayo 1.990.
- Pliego de Condiciones para el Estudio de los Productos de Curado en Pavimentos de Hormigón. F. J. Sáinz de Cuetto. Informe para la Dirección Gral. de Carreteras. MOPU. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales. CEDEX. Madrid. Marzo 1.990.
- Porosidad, Humedad y Curado del Hormigón. F. J. Sáinz de Cuetto. Curso sobre Aplicación de Técnicas Físicas de Análisis al Estudio y Control de Materiales. CEDEX. Madrid. Febrero 1.990.

De arriba a abajo. Foto 8: Red de fisuración fina y espaciada en las probetas tratadas con productos filmógenos. Fotos 9 y 10: Análisis de imagen de campos microscópicos en las probetas testigo y tratadas.