

Influencia de la eficacia del curado en la resistencia mecánica de los hormigones

por Francisco Javier Sáinz de Cuetos Torres y
Antonio Román López García
Laboratorio Central de Estructuras y Materiales, CEDEX
Ministerio de Obras Públicas y Transportes



Foto 1. Firme de Hormigón. Extensión

Introducción

LAS pérdidas tempranas de humedad en el hormigón tienen una repercusión inmediata en la calidad final de las ejecuciones de dicho material en obra. Particularmente en los hormigones con curado por impermeabilidad superficial, sin aporte de agua, como es el caso de los firmes y pavimentos blancos de carretera (foto 1), debe contarse con un producto filmógeno de eficiencia retentiva comprobada.

Los trabajos desarrollados por el Laboratorio Central de Estructuras y Materiales, financiados por la Di-

rección General de Carreteras, han mostrado la influencia del curado en los principales parámetros básicos de caracterización del hormigón. Los dos aspectos fundamentales en que se manifiesta la repercusión del curado son:

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

Ambos aspectos están íntimamente ligados. En los estudios realizados ha podido verificarse la variabilidad en la estructura porosa alcanzada, dependiendo del tipo de curado aplicado. Una estructura fi-

nal de la pasta de cemento más porosa y con peor hidratación de su matriz conduce a una merma de su resistencia.

Alteración de la capacidad resistente

En un intento de cuantificar la modificación de las propiedades del hormigón, por la alteración sufrida en la red porosa de la pasta de cemento, se han realizado ensayos agrupables en dos conjuntos perfectamente diferenciados:

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



hormigón previa a la aplicación de producto filmógeno.

- Ensayos para determinación de la alteración en la resistencia.

Centrémonos en esta última faceta, tratando de mostrar los cambios resistentes.

- El segundo grupo de ensayos se ha realizado a la finalización del Ensayo en Cámara Climática con normativa ASTM y del Ensayo en Túnel de Viento con normativa MELC (Véase Experimentación Básica). Las probetas se fabricaron con mortero de cemento normalizado en la Norma UNE 80.101. Los moldes utilizados fueron los prescritos en la Norma ASTM C.156 de dimensiones 30 x 15 x 5 cm, interiormente.

Las proporciones dosificadas por probeta fueron las siguientes.

Agua	534 g
Cemento	1 068 g
Aridos	3 204 g
Total	4 806 g

A las probetas se les efectuó, después de la exudación inicial, un tratamiento con alguno de los 15 productos filmógenos estudiados, dejando un tercio de las mismas como probetas testigos. Foto 2.

Un conjunto de probetas fueron sometidas al Ensayo en Cámara Climática durante 72 h llevando un control de humedad según la Norma ASTM C.156. Al final de este ensayo las probetas tenían una madurez de 174 h.

Otro conjunto de probetas fueron sometidas al Ensayo de Túnel de Viento durante 24 h llevando un control de humedad según Norma MELC 12.134. Al final de este ensayo las probetas tenían una madurez de 58 h.

Al término de los ensayos referidos, las probetas eran almacenadas en una sala de conservación a una temperatura de 24° C y humedad relativa del 50%.

Dado que los ensayos anteriores se realizaban sobre grupos limitados de probetas, el Ensayo de Flexotracción MELC 12.136 tuvo que ser llevado a efecto sobre probetas con distintas edades y madureces. No obstante se conocía de cada probeta su madurez y estado de humedad.

El ENSAYO DE FLEXOTRACCIÓN MELC 12.136 ha sido registrado en esta Norma MELC 12.136 como "Ensayo de Resistencia a Flexotracción de probetas de mortero

“En los hormigones con curado por impermeabilidad superficial, sin aporte de agua, como es el caso de los firmes y pavimentos blancos de carretera, debe contarse con un producto filmógeno de eficiencia retentiva comprobada.”

de cemento curadas mediante tratamiento superficial”.

En dicho ensayo las probetas corresponden a las contempladas en las Normas MELC 12.134, MELC 12.135 y ASTM C 156, ensayándose como viga biapoyada según la dimensión mayor con carga centrada. La cara sometida a tracción será la tratada con el producto filmógeno de curado. Foto 3. (Ver página siguiente).

Las probetas fueron ensayadas en una prensa universal y en las TABLAS adjuntas se recopilan las resistencias a flexotracción en MPa. Puede observarse el producto de tratamiento, la edad de ensayo, las dimensiones y las cargas total y unitaria de rotura.

En función de las madureces registradas por cada probeta en el momento de ensayo, se ha realizado una corrección para referir todas las probetas a la resistencia a 28 días a 20° C.



Foto 2. Vista de la probeta de hormigón ensayador. Molda de metacrilato y superficie con producto de curado.

Resistencia a flexotracción de probetas de mortero ensayadas

Producto (Nº)	Marca (Nº)	Edad (d)	Ancho (mm)	Canto (mm)	Carga (KN)	Carga Unitaria (MPa)	Resistencia (MPa)
------------------	---------------	-------------	---------------	---------------	---------------	----------------------------	----------------------

Control de humedad ASTM sobre Testigos

-	7-8	287	150,0	48,3	3,90	4,30	3,92
-	5-11-12	207	151,0	48,7	3,81	4,10	3,78
-	5-13-14	196	151,0	48,4	3,51	3,83	3,54
-	1-2-15	193	150,5	48,2	4,39	4,84	4,47
-	2-3-4	186	151,5	48,2	4,00	4,38	4,05
-	8-9-15	178	151,0	47,6	3,75	4,23	3,92
-	1-7-9	164	151,0	47,4	4,10	4,66	4,33
-	7-14-15	154	151,0	47,3	3,65	4,17	3,88
-	2-11-12	151	151,0	47,8	3,54	3,96	3,69
-	11-13-15	137	151,0	48,2	3,86	4,24	3,96
-	3-6-9	79	150,5	47,5	3,41	3,87	3,69
-	1	73	150,5	47,5	3,48	3,95	3,79

Control de humedad MELC sobre Testigos

-	1-6	183	150,5	48,4	3,93	4,30	3,98
-	4-10	182	151,0	47,6	3,77	4,25	3,93
-	P1	182	150,5	48,1	3,22	3,56	3,30
-	4-10	182	151,0	48,0	3,92	4,34	4,02
-	11-15	181	151,0	47,8	3,81	4,26	3,94
-	P1	179	151,0	47,4	3,77	4,28	3,96

Curado de humedad ASTM. Tratamiento Producto 1

1	4	192	151,5	48,5	5,03	5,44	5,03
1	5	192	151,5	48,5	4,91	5,31	4,91
1	3	163	151,5	46,9	4,34	5,02	4,66

Control de humedad MELC. Tratamiento Producto 1

1	2	183	151,0	48,1	4,39	4,84	4,48
1	2S	181	152,0	48,4	5,27	5,71	5,29

Control de humedad ASTM. Tratamiento Producto 2

2	6	192	151,5	48,2	5,55	6,08	5,62
2	2	185	151,0	48,5	6,03	6,54	6,05
2	2B	150	151,0	48,3	5,59	6,12	5,70
2	3	150	152,0	48,3	5,76	6,26	5,83

Control de humedad MELC. Tratamiento Producto 2

2	3	183	152,0	47,9	5,16	5,70	5,28
2	3S	181	152,0	48,5	5,12	5,52	5,11

Control de humedad ASTM. Tratamiento Producto 3

3	4	239	151,5	49,0	5,45	5,78	5,30
3	2	147	151,0	48,4	5,39	5,87	5,47

Control de humedad MELC. Tratamiento Producto 3

3	4	183	151,0	48,0	5,30	5,87	5,43
3	4B	182	151,0	48,3	5,31	5,81	5,38
3	4S	181	151,5	48,4	5,10	5,54	5,13

Control de humedad ASTM. Tratamiento Producto 4

4	5	185	151,0	48,4	5,47	5,96	5,51
4	6	185	151,0	48,8	5,82	6,24	5,77

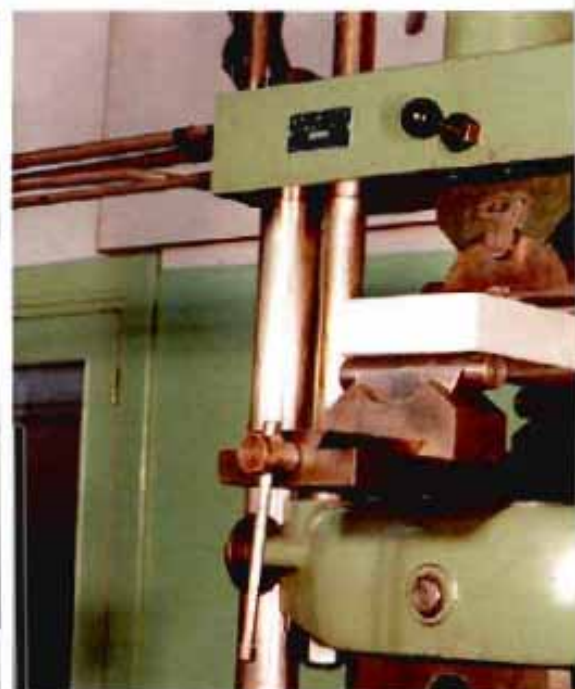


Foto 3. Ensayo d

Efectuado un tratamiento estadístico de los resultados, se ha podido constatar la buena correspondencia, que era de esperar, entre los valores obtenidos para probetas procedentes del ensayo en cámara climática con normativa ASTM y las procedentes del ensayo en túnel de viento con normativa MELC. Esta doble vía de llegada significa una confirmación de la veracidad de las pruebas.

Finalmente se ha establecido una correlación entre las resistencias a flexotracción del mortero y la eficacia de los tratamientos de curado que se adoptaron. Como parámetro

Control de humedad MELC. Tratamiento Pro

4	2	182	151,5
4	2B	182	151,5
4	2S	180	152,0

Control de humedad ASTM. Tratamiento Pro

5	2	207	151,0
5	6	200	151,5

Control de humedad MELC. Tratamiento Pro

5	5	183	151,0
5	5B	182	151,5
5	5S	181	151,5

Control de humedad ASTM. Tratamiento Pro

6	4	90	151,0
6	4B	90	151,5

Control de humedad MELC. Tratamiento Pro

6	6	183	151,5
6	6S	181	151,5



Fig. 1. Rig a flexotracción (Superficie Curada en tracción).

representativo de dicha eficacia de retención de humedad se ha tomado el Coeficiente de Eficacia.

Puede advertirse la tendencia lineal de la regresión. Los diferentes puntos corresponden a los tratamientos con productos filmógenos comerciales, con las dotaciones recomendadas por los fabricantes. En la TABLA y FIGURA adjuntas (ver páginas siguientes) pueden analizarse los resultados obtenidos.

Los dos grupos de ensayos de contraste confirman las hipótesis y modificaciones introducidas por el Método de Caracterización del Curado.

to 4			
48,0	5,02	5,54	5,13
48,3	5,34	5,82	5,39
48,3	5,12	5,57	5,16

to 5			
49,1	4,97	5,26	4,85
48,8	4,81	5,14	4,74

to 5			
48,2	4,42	4,86	4,50
48,4	5,16	5,60	5,18
47,5	4,83	5,45	5,05

to 6			
48,4	5,34	5,82	5,49
48,4	5,27	5,72	5,40

to 6			
48,4	5,16	5,60	5,18
48,4	5,37	5,83	5,40

Control de humedad ASTM. Tratamiento Producto 7

7	3	281	151,0	48,7	5,49	5,91	5,39
7	4	281	151,0	48,3	5,17	5,66	5,16
7	6	217	151,5	48,7	5,26	5,64	5,19
7	2	211	151,0	47,8	5,18	5,79	5,34

Control de humedad MELC. Tratamiento Producto 7

7	3	182	152,0	48,3	5,95	6,47	5,99
7	3B	182	152,0	48,2	5,18	5,65	5,23
7	3S	180	152,0	48,3	4,63	5,03	4,66

Control de humedad ASTM. Tratamiento Producto 8

8	6	281	151,0	48,9	5,58	5,96	5,43
8	4	231	151,5	48,2	5,57	6,10	5,60
8	5B	231	151,0	47,8	4,78	5,34	4,91

Control de humedad MELC. Tratamiento Producto 8

8	4	182	151,5	48,0	5,82	6,43	5,95
8	4B	182	152,0	47,8	5,05	5,61	5,19
8	4S	180	152,0	47,9	4,80	5,31	4,92

Control de humedad ASTM. Tratamiento Producto 9

9	3	220	151,0	48,1	5,23	5,77	5,31
9	4	220	151,0	47,6	4,64	5,23	4,81
9	3B	163	151,0	47,4	4,39	4,99	4,64
9	4B	164	151,0	48,1	5,33	5,88	5,46
9	5	164	151,5	48,3	5,09	5,55	5,16
9	5B	79	150,5	47,9	4,05	4,52	4,31
9	6	79	150,5	48,3	3,75	4,12	3,93

Control de humedad MELC. Tratamiento Producto 9

9	5	182	151,5	47,5	5,01	5,65	5,23
9	5B	182	151,5	48,0	4,58	5,06	4,68

Control de humedad ASTM. Tratamiento Producto 10

10	5	273	151,5	47,5	5,29	5,97	5,45
10	2	198	151,5	48,6	5,89	6,35	5,86
10	3	198	152,0	48,9	5,22	5,54	5,12

Control de humedad MELC. Tratamiento Producto 10

10	6	182	151,5	47,7	5,86	6,55	6,06
10	6B	182	151,5	48,4	5,42	5,89	5,45
10	6S	180	151,5	47,6	5,28	5,93	5,49

Control de humedad ASTM. Tratamiento Producto 11

11	3	207	151,5	48,8	5,03	5,37	4,95
11	4	207	151,0	48,3	4,91	5,37	4,95
11	6	151	151,0	48,2	4,12	4,53	4,22
11	4B	144	151,0	48,4	5,22	5,69	5,31
11	3B	137	152,0	48,1	4,53	4,97	4,64
11	4S	88	151,0	47,5	4,42	5,00	4,73
11	3S	88	151,5	47,9	4,65	5,16	4,88

Control de humedad MELC. Tratamiento Producto 11

11	3	181	152,0	48,2	4,64	5,07	4,69
11	3B	179	152,0	48,5	5,53	5,96	5,52
11	2	179	151,5	47,3	4,37	4,97	4,60

Control de humedad ASTM. Tratamiento Producto 12

12	5	207	151,0	48,6	5,72	6,18	5,70
12	6	207	151,0	49,1	6,19	6,56	6,05
12	4	151	151,5	48,0	6,06	6,69	6,23
12	5B	151	151,5	48,5	5,16	5,58	5,20
12	2	137	151,5	47,9	4,79	5,31	4,96

Control de humedad MELC. Tratamiento Producto 12

12	3B	179	152,0	48,5	5,53	5,96	5,52
12	3S	179	152,0	47,8	5,58	6,19	5,73

Control de humedad ASTM. Tratamiento Producto 13

13	5	203	152,0	48,6	6,09	6,54	6,03
13	6	203	151,5	48,3	4,98	5,43	5,01
13	4	196	151,0	47,8	6,42	7,17	6,62
13	5B	196	151,5	48,1	6,55	7,20	6,65
13	5S	147	151,5	48,3	5,07	5,53	5,16
13	6B	147	151,0	48,7	5,89	6,34	5,91

Control de humedad MELC. Tratamiento Producto 13

13	4B	179	151,5	48,3	5,54	6,04	5,59
13	4S	179	151,0	47,8	5,08	5,68	5,26

Control de humedad ASTM. Tratamiento Producto 14

14	4	196	151,5	49,0	5,32	5,64	5,21
14	5	196	151,0	48,3	5,41	5,92	5,47
14	3	154	151,5	48,3	4,78	5,21	4,85
14	4B	154	151,0	47,5	4,87	5,51	5,13

Control de humedad MELC. Tratamiento Producto 14

14	5	181	152,0	48,3	4,83	5,25	4,86
14	5B	179	152,0	48,1	5,41	5,93	5,49

Control de humedad ASTM. Tratamiento Producto 15

15	2	193	152,0	48,3	5,77	6,27	5,79
15	3	193	152,0	48,1	5,98	6,56	6,06
15	6	178	151,5	48,0	5,45	6,02	5,58
15	5	158	151,5	47,3	4,99	5,68	5,28
15	6B	158	151,0	47,6	5,49	6,19	5,76
15	6S	137	151,0	47,8	6,10	6,82	6,37

Control de humedad MELC. Tratamiento Producto 15

15	6	181	152,0	48,2	4,59	5,01	4,64
15	6B	180	151,5	47,9	5,52	6,12	5,67
15	6S	179	151,5	48,2	6,02	6,59	6,10

Estadísticas de las resistencias a flexotracción obtenidas para las distintas hipótesis de curado superficial

Hipótesis de Curado	Control ASTM		Control MELC	
	Media (MPa)	Desviación (MPa)	Media (MPa)	Desviación (MPa)
Testigos	3,92	0,27	3,86	0,27
P1	4,87	0,19	4,89	0,57
P2	5,80	0,19	5,20	0,12
P3	5,39	0,12	5,31	0,16
P4	5,64	0,18	5,23	0,14
P5	4,80	0,08	4,91	0,36
P6	5,45	0,06	5,29	0,16
P7	5,27	0,11	5,29	0,67
P8	5,31	0,36	5,35	0,53
P9	4,80	0,55	4,96	0,39
P10	5,48	0,37	5,67	0,34
P11	4,81	0,34	4,94	0,51
P12	5,63	0,54	5,63	0,15
P13	5,90	0,70	5,43	0,23
P14	5,17	0,26	5,18	0,45
P15	5,81	0,38	5,47	0,75

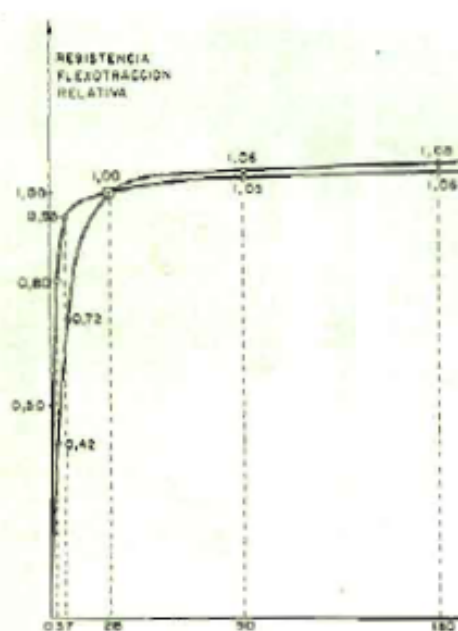
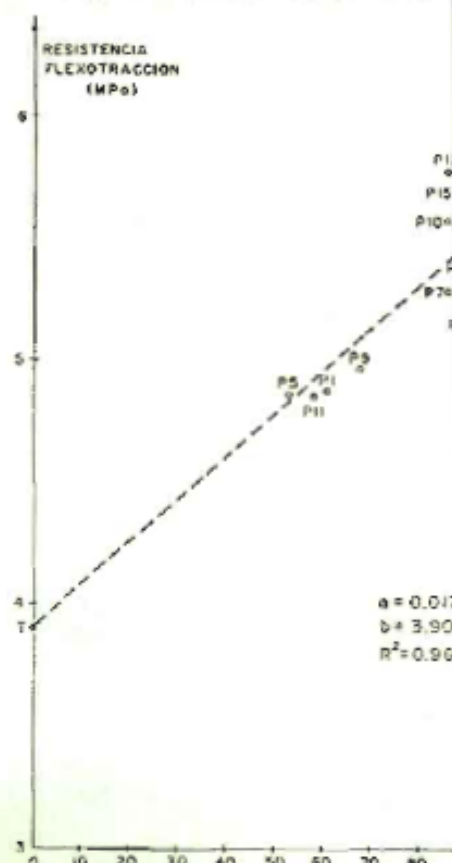


FIG. 1.-VARIACION DE LA RESIST.



Ajuste lineal de la influencia de la eficacia de curado para la consideración de las posibles pérdidas de humedad durante la etapa de maduración del hormigón joven.

Se demuestra que las distintas eficacias de retención de humedad del tratamiento superficial dan lugar a diferentes hidrataciones finales de la pasta de cemento y a diferentes grados de endurecimiento y resistencia.

Puede afirmarse que en un hormigón curado con un tratamiento de



A DEL MORTERO NORMALIZADO

retención eficaz, a igualdad de historia termodinámica, se puede llegar a una matriz de cemento hidratado más uniforme y de mejor calidad. La masa de gel microcristalino es superior, como lo prueba la asimilación de una mayor proporción de agua estructural, y por tanto el área resistente eficaz ante un esfuerzo aumenta.

A efectos de modelización matemática es válida la variación lineal de la resistencia a flexotracción en función de la eficacia del tratamiento de curado. Dicha

linealidad sugiere que la distribución interna de la humedad en espesores pequeños parece ser bastante uniforme a lo largo del canto, si bien parece lógico pensar que al aumentar esta dimensión se produzca una ley de humedades decrecientes hacia la superficie.

Se vuelve a evidenciar, en los ensayos de contraste, la importancia del mantenimiento de las condicio-

nes de curado por encima de las 100 h de madurez.

Las conclusiones de este estudio abren una vía al control "in situ" del curado del hormigón, mediante la instrumentación en obra de métodos parcialmente destructivos, basados en la resistencia a flexotracción del hormigón, como el "Break Off" u asimilables.

En cualquier caso una sistematización operativa completa para la previsión o seguimiento del curado deberá incluir una corrección por alteraciones higrométricas del hormigón.

Conclusiones

Se confirma la influencia de un curado bien ejecutado en la resistencia a flexotracción de la pasta de mortero del hormigón.

La ley de comportamiento tiene una marcada tendencia lineal en función de la eficacia del curado superficial suministrado. Los valores extremos mínimo y máximo serán respectivamente los correspondientes al mortero testigo sin curar y al mortero curado en condiciones óptimas de cuarto de curado normalizado.

Las mejoras de resistencia a flexotracción por un curado de calidad pueden subir por encima incluso del 60%.

Dichas mejoras resistentes se pueden correlacionar con una estructura de la pasta de cemento mejor hidratada y más compacta.

Correspondencia entre eficacia de curado y resistencia a flexotracción para las distintas hipótesis de curado superficial

Hipótesis de Curado	Eficacia de curado		Resistencia flexotracción	
	Índice (kg/m ²)	Coefficiente (%)	Media (MPa)	Desviación (MPa)
Testigos	-	-	3,90	0,26
P1	1,53	61	4,87	0,32
P2	2,33	91	5,60	0,35
P3	2,23	88	5,34	0,13
P4	2,44	97	5,39	0,26
P5	1,42	53	4,86	0,27
P6	2,42	95	5,37	0,13
P7	2,13	86	5,28	0,39
P8	2,30	91	5,33	0,41
P9	1,98	68	4,96	0,39
P10	2,24	86	5,57	0,34
P11	1,60	58	4,85	0,37
P12	2,60	95	5,63	0,45
P13	2,36	86	5,78	0,64
P14	2,66	89	5,17	0,28
P15	2,37	88	5,69	0,51

Bibliografía

- *Productos Filmógenos de Curado del Hormigón*. F. J. Sáinz de Cuetto y A. R. López. Revista Rutas. Asociación Técnica de Carreteras. Nº 14. Madrid, julio 1989.
- *Experimentación en Cámara Climática de los Productos Filmógenos para el Curado de Hormigón*. F. J. Sáinz de Cuetto y A. R. López. Revista Rutas. Asociación Técnica de Carreteras. Nº 15. Madrid, octubre 1989.
- *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 1990.
- *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 1990.
- *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 1990.
- *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 1990.