

Permeabilidad al aire del hormigón

RAFAEL MUÑOZ MARTIALAY, Lcdo. en Ciencias Físicas

El objeto, en principio, era conocer las posibilidades del hormigón como material de cerramiento en edificios nucleares estancos. El estudio se realizó midiendo los caudales de aire que pasaban a través de la masa de hormigón, en función de la dosificación, espesor de la probeta y diferencia de presión establecida entre las superficies opuestas.

Los ensayos dieron unos resultados relativamente sorprendentes, ya que, al no haber encontrado bibliografía que incluyera unos ensayos sistemáticos ni valores concretos, no se tenía conocimiento del orden de magnitud de los caudales de aire que habrían de medirse. Como ejemplo se señalan los siguientes resultados:

- para una presión de 1 kp/cm² y un espesor de la probeta de hormigón de 20 cm, se midió un caudal de 1,2 litros/m² y hora;
- para una presión de 2 kp/cm², el caudal pasó a ser de 2,9 litros.

Por otra parte, los resultados que se van obteniendo con las mismas probetas, según pasa el tiempo y se van secando, demuestran la fuerte influencia de dicho secado. A los cinco años el caudal ha aumentado más de seis veces.

Estas y otras conclusiones, no menos importantes, son la razón de que la Dirección del Instituto Eduardo Torroja haya incluido entre sus temas de investigación el de la "permeabilidad al aire del hormigón".

INTRODUCCION

La permeabilidad es una propiedad de los cuerpos por la que permiten que un fluido pueda atravesarlos, al penetrar por sus poros, cuando se produce una diferencia de presión entre dos de sus superficies opuestas.

La permeabilidad depende, de una parte, del grado de porosidad del cuerpo y, de otra parte, de las características del fluido. Un medio poroso será más permeable, generalmente, cuanto mayor sea su porosidad y menor sea su densidad.

Cuando el fluido que atraviesa el medio poroso es agresivo, produce un efecto destructor que afecta a la durabilidad de éste.

El hormigón es un material muy poroso —en un hormigón bien compactado la porosidad total es del orden del 12 % de su volumen— y el aire atmosférico es un agente agresivo para él, ya que facilita la carbonatación de la cal; la corrosión de las armaduras, en el caso de hormigones armados; la acción de las heladas; etc.

Teniendo en cuenta que, salvo en elementos que están situados dentro del agua, el hormigón permanece constantemente en contacto con el aire atmosférico, resulta obvio el interés por el conocimiento de la permeabilidad al aire que ofrece el hormigón.

Independientemente de su relación con la durabilidad, dicho conocimiento resulta imprescindible cuando se pretende construir con este material depósitos para gas, cámaras de vacío, edificios nucleares, conductos para gases, etc.

En el Instituto Eduardo Torroja se inició el estudio de la permeabilidad al aire del hormigón en los últimos meses del año 1964.

Dadas las dificultades que presentaba el planteamiento teórico del problema y la poca bibliografía existente, relativa a la permeabilidad a los gases que ofrecen los medios porosos, y siendo la mayor parte de los trabajos encontrados posteriores al año 1940 y, de éstos, muy pocos los que hacían referencia al hormigón como medio poroso, se consideró conveniente realizar, en principio, un trabajo experimental sobre elementos de hormigón que representaran lo más fielmente posible a los que se emplean en la realidad.

Este trabajo experimental comprende las siguientes partes:

- estructura y dosificación del hormigón;
- fabricación de las probetas;
- dispositivo de ensayo;
- ejecución de los ensayos;
- resultados obtenidos, y
- conclusiones.

Estructura y dosificación del hormigón

En el estudio de la dosificación del hormigón había de tenerse en cuenta que las cualidades de éste que más directamente condicionan la permeabilidad son: la compacidad, la constancia de volumen y la cohesión.

Un conglomerante cuya composición, fabricación y almacenamiento hayan sido correctos será de mejor calidad cuanto más superficie de contacto ofrezcan los granos, que constituyen el conglomerante, al agua de amasado, pues así se consigue una hidratación más completa en menos tiempo.

Si bien la mayor finura de los granos de cemento origina una mayor superficie de contacto, resulta necesaria mayor cantidad de agua para conseguir una docilidad adecuada y esto se traduce en una disminución de la compacidad.

La finura influye en las propiedades mecánicas del hormigón; los granos cuyo tamaño está comprendido entre 10 y 25 micras dan una buena resistencia mecánica; los de tamaño inferior a 10 micras confieren al hormigón, además de resistencia, cualidades de impermeabilidad (1), pero una finura excesiva conduce a hormigones de corta durabilidad. Como límite inferior para que la durabilidad del hormigón sea aceptable, la superficie específica "Blaine" conviene que esté comprendida entre 3.200 y 3.400 cm²/gramo (2).

El aire cuando se incorpora al hormigón intencionadamente constituye los poros de aire ocluido. Su acción más inmediata es la de un incremento de la docilidad y, como consecuencia, resulta de mayor compacidad, al facilitar el relleno con pasta de los huecos que quedan entre los áridos. El diámetro de estas burbujas está comprendido, según Walz (3), entre 0,05 y 0,30 mm.

El volumen de estas burbujas incorporadas al hormigón deben representar del 4 al 5 % del volumen aparente del mismo, siendo conveniente no superar el 6 % para evitar que influya desfavorablemente en la retracción, expansión térmica y permeabilidad, de acuerdo con las conclusiones a que llegó Klieger (4) en un trabajo muy completo sobre la estructura del hormigón, publicado en 1949.

En los áridos la porosidad es muy variable, ya que depende de la naturaleza de los mismos y del proceso de fabricación del hormigón. Desde hace más de 30 años han ido apareciendo artículos en los que se señala la importancia que en el comportamiento del hormigón tiene el grado de porosidad y el tamaño de los poros. Los áridos que se emplean en hormigones corrientes presentan poros cuyos diámetros quedan dentro del campo limitado por los valores comprendidos entre 3 y 6 micras; siendo el de 4 micras el valor más idóneo por su posibilidad de drenaje y de que sea ocupado por la pasta de cemento (5).

El agua en los poros capilares de los áridos, cuyos diámetros quedan dentro de los límites citados, se evapora casi completamente en ambientes con una humedad relativa inferior al 40 %.

Aparte de los poros originados por el aire ocluido y los que presentan los áridos, en un hormigón recién elaborado y fraguado se distinguen, además, los poros de asentamiento, los poros capilares y los poros del gel. Los primeros se crean en la superficie de contacto de la pasta con los áridos y los poros capilares, y los del gel se forman durante la hidratación del conglomerante. También hay otro tipo de poros que van apareciendo como consecuencia de la evaporación de aquella agua que se ha empleado en la fabricación del hormigón, pero que no toma parte en la hidratación del conglomerante —el cemento toma la cantidad de agua que precisa para su hidratación y que representa únicamente del 18 al 22 % de su peso para hidratarse completamente— y que supone, generalmente, un 50 %, aproximadamente del total de agua empleada en la fabricación de hormigones corrientes, más bien secos.

La evaporación del agua del hormigón es un proceso continuo que puede durar varios años, dependiendo de la humedad y temperatura del ambiente que le rodea, de sus dimensiones y del tipo de dosificación. Esto es importante tenerlo en cuenta, pues la apertura de poros que deja el agua al evaporarse influye sensiblemente en el aumento de la permeabilidad al aire del hormigón. Por otra parte significa que al hormigón no se le puede considerar como un material consolidado aunque tenga, aparentemente, su estructura permanente.

El espacio que en la pasta de cemento recién amasada llena el agua es el que ocupan los productos que se crean por la hidratación del cemento; a medida que ésta avanza el espacio, que inicialmente quedaba determinado por la relación agua/cemento, se reduce al ser ocupado por el gel.

En resumen, la porosidad total del hormigón está constituida por: los poros que presentan sus componentes, los huecos que quedan entre éstos al mezclarlos, los que se forman como consecuencia de la hidratación del cemento y los que va dejando el agua al evaporarse.

Dada la limitación en la extensión impuesta a estas comunicaciones no es posible hacer una exposición detallada de cada uno de estos tipos de poros, cuyo conjunto constituye la porosidad total del hormigón; así como, el de la distribución y volumen de poros abiertos, que son los que permiten el paso del aire a través de su masa y que se puede definir como "porosidad eficaz".

No obstante al estudiar la dosificación del hormigón, con el que habrían de fabricarse las probetas para los ensayos, se procuró tener en cuenta lo anteriormente señalado eligiéndose, en principio, una relación muy baja de agua/cemento del orden de 0,35, y un árido silíceo de poca porosidad.

Para establecer la proporción de los distintos tamaños de áridos se empleó la fórmula de Fuller, que dio las siguientes proporciones:

- gravilla 20 %
- garbancillo 45 %
- arena 35 %

Se observó que con la relación agua/cemento 0,35 no se conseguía la trabajabilidad adecuada de la masa de hormigón, decidiéndose establecer dos dosificaciones, con las siguientes relaciones agua/cemento: 0,37 y 0,42.

A continuación se detallan las cantidades de cada tipo de árido que se emplearon en la fabricación del hormigón; del cemento y litros de agua, por metro cúbico de hormigón.

Componentes del hormigón por m ³	Dosificación	
	I	II
Relación agua/cemento	0,37	0,42
Gravilla	387 kg	392 kg
Garbancillo	871 kg	888 kg
Arena	651 kg	662 kg
Cemento P-350	405 kg	357 kg
Agua	150 litros	150 litros

Fabricación de las probetas

Con las dosificaciones obtenidas se fabricaron cuarenta y ocho placas rectangulares de sección 1 m × 1 m en tres espesores, de 20, 30 y 40 cm cuyo detalle se especifica a continuación:

Espesor de las placas (cm)	Dosificación			
	I		II	
	En masa	Armado	En masa	Armado
20	6	6	6	6
30	6	—	6	—
40	6	—	6	—

La compactación se realizó por vibrado con aguja a 9.000 r.p.m.

La armadura de las placas de hormigón armado estaba constituida por una parrilla de 7 Ø de 12 mm en cada sentido y colocada a unos 3 cm de la superficie de una de las caras mayores.

La resistencia media del hormigón a rotura, a los 28 días, fue de:

- para la dosificación I 438 kp/cm²
- para la dosificación II 407 kp/cm²

El hormigonado se efectuó colocando los moldes metálicos en posición vertical (figs. 1 y 2).

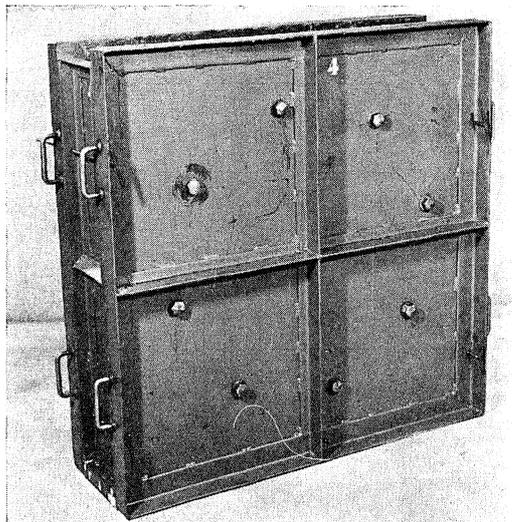


Fig. 1.—Molde metálico: frente.

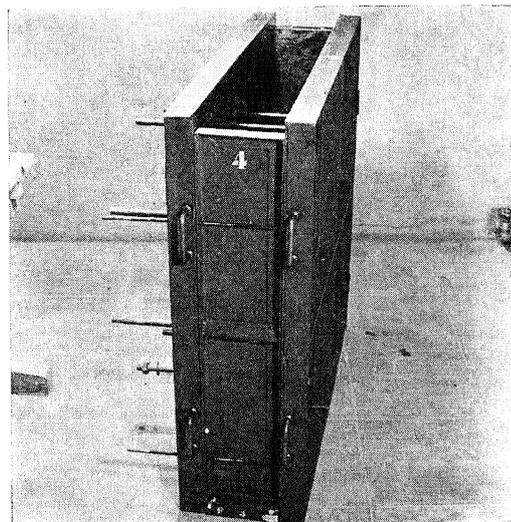


Fig. 2.—Molde metálico: vista lateral.

Con objeto de evitar pérdidas de lechada se colocaron juntas de goma-espuma entre los elementos metálicos del molde. Las caras interiores del mismo fueron impregnadas con una solución de gas-oil y estearina para facilitar el desencofrado.

La figura 3 muestra el conjunto de las placas construidas para el ensayo, después de haberlas aplicado una capa de pintura bituminosa, en las superficies laterales y en parte de las frontales, con el fin de disminuir la influencia del efecto de borde.

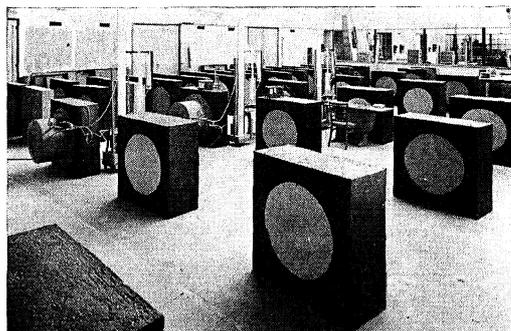


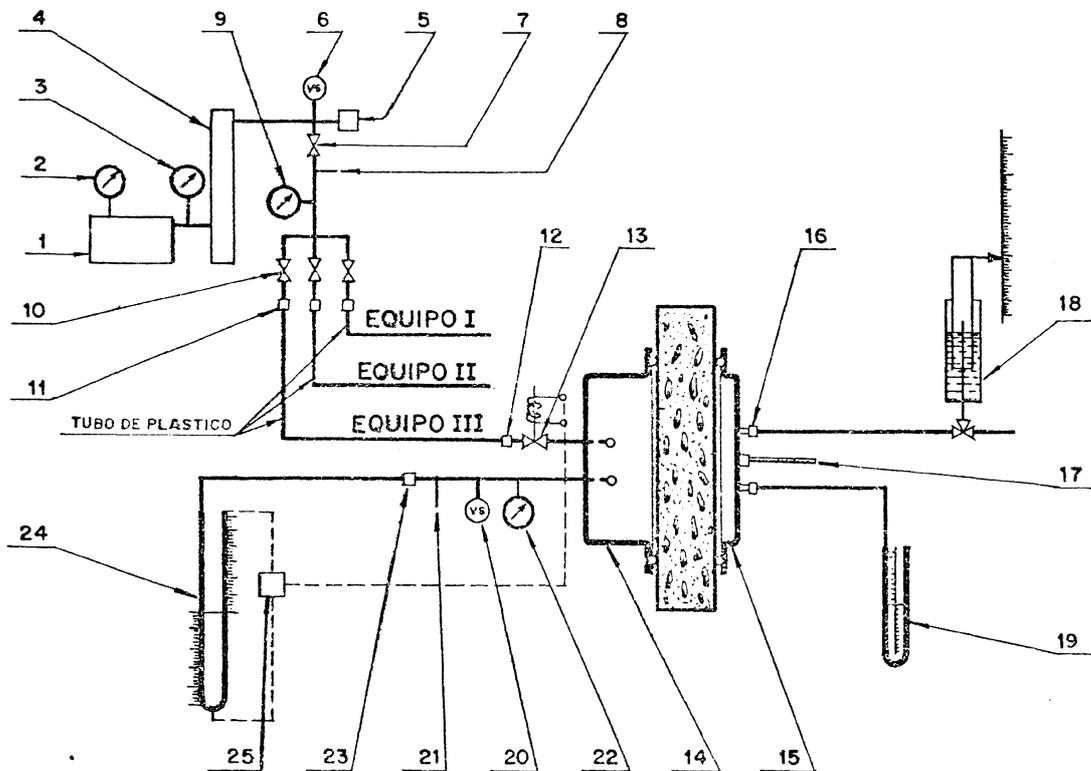
Fig. 3.—Vista del conjunto de placas fabricadas para el ensayo.

Dispositivo de ensayo

El dispositivo de ensayo, cuyo esquema se presenta con detalle en la figura 4, se diseñó de manera que permitiera mantener en una de las superficies frontales de la placa una presión de aire determinada.

PERMEABILIDAD AL AIRE DE PLACAS DE HORMIGON

Esquema de montaje del ensayo



1. Compresor de 10 kp/cm².
2. Manómetro metálico de 8 kp/cm².
3. Manómetro metálico de 8 kp/cm².
4. Depósito de aire comprimido.
5. Presostato «Billman» Tipo PD3B (Δp de 3 a 8 kp/cm²).
6. Válvula de seguridad regulada a 4 kp/cm².
7. Válvula de compuerta 1/2".
8. Purgador tipo radiador de calefacción.
9. Manómetro metálico de 5 kp/cm².
10. Válvulas de compuerta de 1/2" de distribución del aire comprimido a los depósitos de presión.
11. Racores rosca SAE de 3/8".
12. Racores rosca SAE de 1/2".
13. Válvula solenoide «Danfos» tipo EVJ 10-220 V.
14. Depósito de presión (ver fig. 3).
15. Depósito receptor (ver fig. 3).
16. Racor rosca SAE 3/8".
17. Termómetro de mercurio.
18. Casómetro que consta de un recipiente cilíndrico de 50 cm de altura y 12 cm de diámetro, una campana de 4,5 de diámetro y 47 cm de altura, una escala de 53 cm de longitud graduada en mm.
19. Manómetro en «U» de agua que consta de un tubo de vidrio de 6 mm diámetro interior y una escala de 40 cm de longitud graduada en mm, correspondiendo 1 mm de la escala a 2 mm de c. a.
20. Válvula de seguridad graduada a 2,5 kp/cm².
21. Purgador radiador de calefacción.
22. Manómetro metálico de 3 kp/cm².
23. Racor rosca SAE 3/8".
24. Manómetro en «U» de Hg que consta de: un tubo capilar de 2 mm de diámetro y 2 m de longitud, una escala de 2 m de longitud, graduada en mm, correspondiendo 1 mm de la escala a 2 mm de Hg.
25. Sistema eléctrico de regulación automática de presión del depósito (n.º 14).

Fig. 4.—Esquema del dispositivo de ensayo.

Al producirse, entonces, una diferencia de presiones entre dos superficies opuestas de las mismas, se crea un flujo de aire cuyo caudal es función de la dosificación del hormigón y del espesor de la placa.

La mecánica de las medidas consistía, esencialmente, en elevar la presión del aire en el interior del depósito mayor y medir el aire que se recogía en el depósito menor.

Para la medida de los caudales de aire se empleó un gasómetro, especialmente diseñado, de unos 750 cm³ de capacidad, en forma de campana, de 5 cm de diámetro, conectado al depósito receptor del aire filtrado.

Montado el dispositivo de ensayo en la placa, se comprobaba la estanquidad del depósito receptor y las juntas correspondientes. Esta comprobación se efectuaba sometiendo dichos elementos a una presión neumática de 150 mm.c.a., que era más de 10 veces superior a la que tendría el aire durante las pruebas.

Antes de iniciar los ensayos se dejaron secar las placas durante dos meses al ambiente de la nave del laboratorio en el que se realizaron las experiencias. Las temperaturas oscilaron entre 15° y 25°C y la humedad relativa entre 30 y 60 %.

Las medidas de los caudales de aire se efectuaron para cuatro presiones, de menor a mayor, 0,400; 0,900; 1.400 y 1.900 kp/cm², aproximadamente.

Se comprobó que cada escalón de presión no influía, apreciablemente, en los resultados para otras presiones. Esta comprobación se efectuó repitiendo en algunas placas los ensayos, someténdolas alternativamente a presiones crecientes y decrecientes; y también iniciando los ensayos a una de las presiones intermedias.

Resultados obtenidos

Alcanzada la presión de ensayo y logrado el régimen de paso de aire se hicieron las medidas suficientes para conseguir una media representativa. A continuación se expone un cuadro resumen de los resultados obtenidos. Estos resultados están incluidos en su totalidad en la publicación EN-3 (6).

En el cuadro, las placas se designan del siguiente modo:

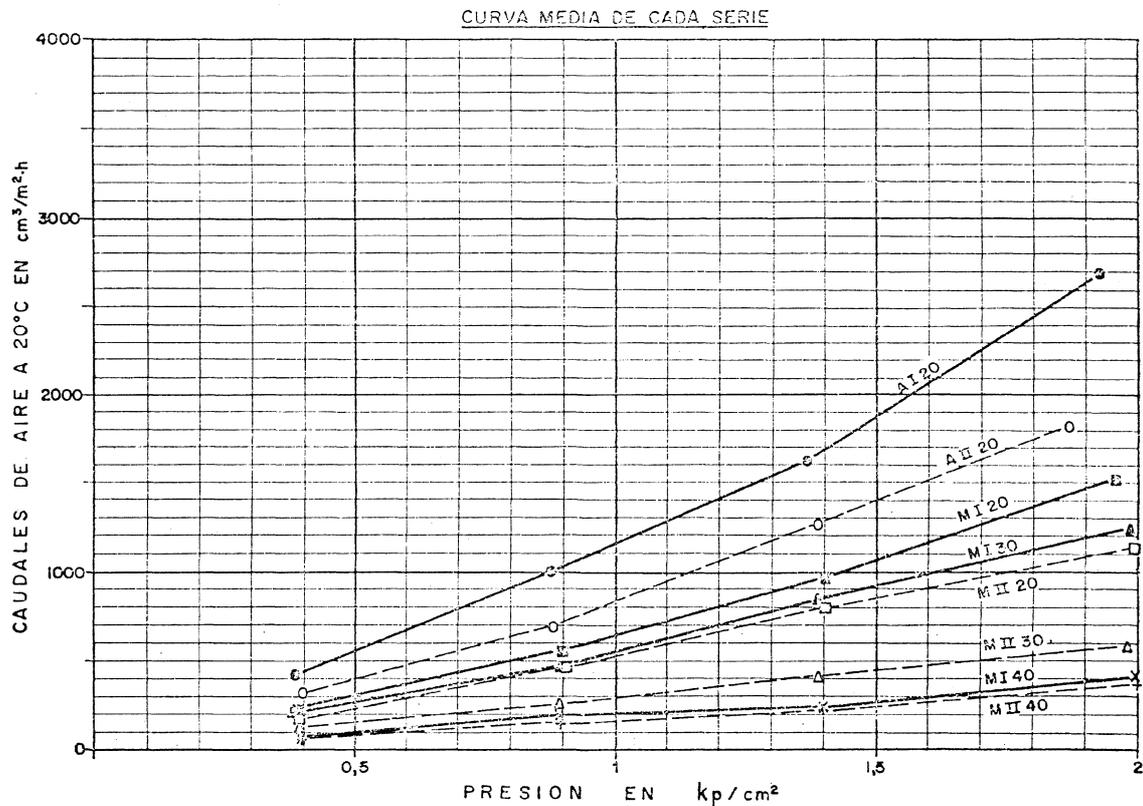
- Las letras A ó M se refieren al tipo de hormigón: armado o en masa, respectivamente.
- Los números I y II, indican los tipos de dosificación.
- Los números 20, 30 y 40 expresan el espesor en centímetros de las placas.

Es decir, las placas de hormigón en masa, con la dosificación II y de 30 cm de espesor se designan por M II 30.

Los valores del cuadro se representan en coordenadas rectangulares, en el gráfico que se incluye a continuación, observándose que todos los puntos quedan sensiblemente en línea recta. Es decir que los caudales son función lineal de la diferencia de presiones.

PERMEABILIDAD AL AIRE DE PLACAS DE HORMIGON

Curvas de caudales en función de la presión



Conclusiones

Del estudio del tema y del análisis de los resultados obtenidos se deducen las siguientes conclusiones:

- La composición con mayor cantidad de agua resultó menos permeable, a igualdad de presión y espesor.
- La influencia de la composición disminuye al aumentar el espesor.
- La permeabilidad es inversamente proporcional a la primera y segunda potencia del espesor*.
- La permeabilidad aumenta con el tiempo.

Además de estas conclusiones se dedujo que el efecto de borde podía ser tan importante que los resultados tuvieran un valor más bien cualitativo que cuantitativo.

* Deducida teniendo en cuenta las condiciones de contorno. Para un espesor cero el caudal es infinito y para un espesor infinito el caudal ha de ser cero.

PERMEABILIDAD AL AIRE DE PLACAS DE HORMIGON
Caudal de aire en función de la presión
 Valores medios de cada serie

Placa	Presión media de ensayo (kp/cm ²)	N.º de placas ensayadas por serie	Valor medio a 20°C (cm ³ /m ² . hr)
A I 20	0,396	4	425
	0,881	4	1.007
	1,371	5	1.649
	1,931	5	2.697
A II 20	0,390	5	303
	0,886	5	721
	1,389	4	1.291
	1,870	5	1.820
M I 20	0,384	6	230
	0,897	6	566
	1,401	6	971
	1,960	6	1.544
M II 20	0,391	5	180
	0,893	5	482
	1,401	4	805
	1,993	5	1.142
M I 30	0,387	4	226
	0,899	4	495
	1,391	4	859
	1,992	4	1.254
M II 30	0,395	5	130
	0,890	5	246
	1,387	4	446
	1,981	5	601
M I 40	0,397	5	74
	0,891	5	189
	1,399	5	266
	1,998	5	442
M II 40	0,400	5	86
	0,896	5	174
	1,402	5	234
	1,999	5	414

Con el fin de conocer el aumento de la permeabilidad con el tiempo se destinaron las seis placas de hormigón en masa, con la dosificación a/c = 0,37 y de 20 cm de espesor —designadas por M I 20— para ensayos de envejecimiento. Estos ensayos que se están realizando cada año demuestran la fuerte influencia que tiene el secado, como se aprecia al observar los valores que se deducen de los resultados y que resumidamente se incluyen a continuación.

Meses transcurridos desde el primer ensayo	Aumento del coeficiente de permeabilidad
12	1,3
24	1,6
36	2,3
48	4,6
60	6,1

Las conclusiones a que se ha llegado ofrecen un gran interés para el conocimiento del hormigón por lo que la Dirección del Instituto Eduardo Torroja ha incluido dentro de sus programas de investigación un estudio sistemático que se está actualmente realizando con ocho tipos distintos de dosificación, en probetas cilíndricas de 13 cm de diámetro y 8 cm de altura.

Este estudio quizá pueda incluir un examen sobre la posibilidad de aprovechar los valores medidos, de la permeabilidad de un hormigón, como control del deterioro sufrido por las probetas en los ensayos de durabilidad, con la ventaja de constituir un método de ensayo no destructivo.

BIBLIOGRAFIA

- (1) LAFUMA, H.: "Liants Hydrauliques". Dunod, ed. 1952.
- (2) BUREAU OF RECLAMATION USA.: "Manual del Hormigón", (trad. española, año 1954).
- (3) WALZ, K.: Zement-Kalk-Gips, núm. 5, año 1952.
- (4) KIEGER, P.: "Journal of the American Concrete Institute", núm. 45, año 1949.
- (5) BLANKS, R. F.: A.S.C.E., 75, año 1949.
- (6) EN-3.: "Publicación del Gabinete de Aplicaciones Nucleares a las Obras Publicas". Secretaría General Técnica.