

# PROPUESTA DE INDICADORES DE LA EFICACIA DEL CURADO EN OBRA

Luis Fernández Luco<sup>a</sup>

## RESUMEN

La condición de clima cálido con alto porcentaje de asoleamiento y baja humedad relativa ambiente es propicia para inducir un secado prematuro al concreto, a partir del momento en que queda expuesto. Sin duda, un curado eficaz es esencial para reducir o evitar el secado prematuro y permitir la evolución adecuada de la hidratación del cemento o materiales cementantes, y alcanzar las propiedades especificadas en el concreto endurecido. Por su parte, un curado defectuoso puede comprometer la calidad del concreto de recubrimiento, reduciendo su resistencia al desgaste y su durabilidad. Sin embargo, su efecto sobre las propiedades mecánicas resulta menos significativo, aunque tradicionalmente se ha empleado este criterio como indicador de la eficacia del curado. En este trabajo se presentan diferentes alternativas para evaluar la eficacia del curado. Éstas se encuentran basadas en la caracterización del concreto de recubrimiento, tanto en condiciones de laboratorio como *in situ*. Finalmente, se presenta un nuevo método para la identificación del secado efectivo del concreto estructural, basado en la medida de la resistividad eléctrica. El procedimiento propuesto constituye una herramienta no destructiva, rápida y económica que permite la adopción de medidas correctivas ante la detección de un secado prematuro, capaces de restablecer las condiciones idóneas para la continuidad de las reacciones de hidratación, de manera de alcanzar las propiedades de diseño, cuando se ha detectado secado prematuro. Con base en los resultados obtenidos, se concluye que los métodos que miden la capacidad de transporte de fluidos ofrecen mejor sensibilidad que aquellos que miden la resistencia a los efectos de un secado prematuro, aunque su utilidad para la adopción de medidas correctivas es limitada. Por el contrario, la medida de la resistividad relativa ofrece la ventaja de permitir la aplicación de medidas correctivas y puede integrarse en los procedimientos habituales de control.

**Palabras clave:** Hormigón, curado, métodos no destructivos, resistividad eléctrica, permeabilidad al aire, indicadores.

## ABSTRACT

A warm weather condition with a high sunlight percentage and low environmental moisture encourage a premature drying of concrete, from the moment in which it remains exposed. An appropriate curing of the concrete is essential to reduce or to avoid a premature drying and to allow the adequate development of hydration of cement or cementitious materials, to achieve the specified properties of the hardened concrete. A bad curing of the concrete may endanger the concrete quality of the cover to reinforcement, reducing its wearing resistance and its durability. However its influence on mechanical properties is less important, although this judgment has been used as an indicator of the efficiency of the curing. This paper presents different proposals to assess the efficiency of the curing. They are based on the characterization of the concrete cover to reinforcement, both in laboratory and in field. Finally, a new method to identify the effective drying of structural concrete is presented, based on the measurement of electrical resistivity. The proposed procedure is a non destructive, fast and not expensive tool that allows the application of corrective actions when a premature drying is detected, capable of restoring the ideal conditions to continue with the hydration reactions, so as to achieve the design properties, when a premature drying has been detected. According to results, it may be established that methods that measure the fluid transport capacity provide better sensitivity to the effects of premature drying than those that measure the compressive strength, although their use for the application of corrective actions is limited. On the contrary, the measurement of the relative resistivity offers the advantage of allowing the implementation of corrective actions and it can be included into usual control procedures.

**Keywords:** Concrete, curing, non destructive methods, electrical resistivity, air permeability, indicators.

<sup>a</sup> Doctor Ingeniero Civil. INTECIN, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires.

## RESUMO

A condição de clima cálido, com uma elevada percentagem de luz solar e baixa umidade ambiente relativa é propícia para induzir uma secagem prematura do concreto, a partir do momento que fica exposto. Uma cura eficaz é essencial para reduzir ou evitar a secagem prematura e permitir o desenvolvimento adequado da hidratação do cimento ou de materiais que cimentam, para atingir, no concreto endurecido, as propriedades especificadas. Uma cura defeituosa pode comprometer a qualidade do concreto de revestimento, reduzindo sua resistência ao desgaste e a sua durabilidade. No entanto, o seu efeito nas propriedades mecânicas é menos significativo, embora tradicionalmente, este critério tem sido utilizado como indicador da eficácia da cura. Neste trabalho, apresentam-se várias propostas alternativas para avaliar a eficácia da cura. Elas baseiam-se na caracterização do concreto de revestimento, tanto em condições de laboratório como in situ. Finalmente, se apresenta um novo método para identificar a secagem efetiva do concreto estrutural, com base na medição da resistividade elétrica. O procedimento proposto é uma ferramenta não destrutiva, rápida e barata que permite adotar medidas corretivas no caso de detecção de secagem antecipada, [medidas] capazes de restaurar as condições adequadas para a continuação das reações de hidratação, de modo a alcançar as propriedades do desenho, quando se tem detectada secagem antecipada. Com base nos resultados obtidos, concluímos que os métodos para medir a capacidade de transporte de fluidos fornecem melhor sensibilidade do que aqueles que medem a resistência aos efeitos da secagem antecipada, embora a sua utilidade para adotar ações corretivas seja limitada. Pelo contrário, a medição da resistividade relativa apresenta a vantagem de permitir a aplicação de medidas corretivas e pode ser integrada nos procedimentos de controle usuais.

**Palavras-chave:** concreto armado, cura, métodos não-destrutivos, resistividade elétrica, permeabilidade ao ar, os indicadores.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los avances científico-tecnológicos asociados con las construcciones de concreto armado muestran un avance significativo en los últimos años. Dichos avances incluyen el desarrollo de nuevos tipos de concreto y nuevos procedimientos de caracterización y control, tanto en condiciones de laboratorio como in situ. Desde el punto de vista de los reglamentos y la redacción de especificaciones técnicas particulares, se observa una tendencia hacia la adopción de criterios prestacionales o mixtos (prescriptivos–prestacionales) apoyados en la medición de distintos parámetros de las mezclas, que se constituyen en “indicadores de desempeño”.

Uno de los factores clave de la ejecución de estructuras de concreto es el curado, que tiene por objeto brindar al concreto las condiciones adecuadas de humedad y temperatura para el desarrollo de sus propiedades de diseño, acordes con su composición y características. En general, los reglamentos incluyen recomendaciones acerca de “tiempos mínimos de curado”, de manera prescriptiva, y no se verifica la eficiencia de curado adoptado. Así, cuando la condición de exposición inicial del concreto favorece el secado prematuro, la importancia de un curado eficiente adquirirá mayor relevancia. Por lo tanto, es esencial contar con procedimientos capaces de valorar su eficacia. Estos procedimientos permiten la transición hacia modelos prestacionales, que integran la especificación y el control de la calidad en situaciones reales de obra.

## 2. CURADO: DEFINICIÓN Y CONCEPTO

Para su aplicación en la construcción de estructuras, el curado puede definirse como el conjunto de acciones cuyo objetivo es proveer las condiciones adecuadas para la hidratación del cemento en concretos y morteros. En términos prácticos, se debe controlar la temperatura y evitar o reducir las pérdidas de agua del concreto en el período comprendido entre su colocación y los 14 días. Aun cuando las propiedades del hormigón se refieren usualmente a la edad de 28 días, para la mayoría de las estructuras de concreto de resistencia normal, resulta poco práctico prolongar el curado más allá de los 14 días.

Respecto a la importancia del curado, el Comité 308 del American Concrete Institute<sup>[1]</sup> y la Portland Cement Association expresan que “el curado tiene una influencia significativa sobre las propiedades del concreto endurecido, tanto en el interior del concreto como en su superficie, tales como la resistencia, permeabilidad, resistencia a la abrasión, estabilidad de volumen y resistencia al hielo-deshielo y sustancias anticongelantes. El desarrollo de resistencia superficial puede reducirse significativamente cuando el curado es defectuoso”. A partir de estos conceptos, resulta razonable suponer que la caracterización de la zona expuesta del concreto debería ofrecer mayor sensibilidad frente a un curado deficiente que las medidas que involucren el volumen completo de la muestra, como la resistencia a compresión.

Cuando las condiciones no son las adecuadas para la evolución de la hidratación, ésta primero se ralentiza y después se interrumpe. Las consecuencias pueden extrapolarse del modelo de Powers<sup>[2]</sup> de la hidratación. Las características de la microestructura del concreto se corresponden con el avance obtenido en la hidratación y, por lo tanto, la porosidad capilar y la conectividad de poros son mayores que si las reacciones de hidratación se hubieran completado. Lo anterior justifica la reducción de la resistencia y un aumento de la penetrabilidad del concreto de recubrimiento.

### 3. IDENTIFICACIÓN DE LA ZONA AFECTADA POR SECADO PREMATURO

Un análisis de la cinética de secado confirma que la zona expuesta es la más afectada por un secado prematuro. Hendenblad<sup>[3]</sup> supone que el flujo de humedad en un material poroso es la combinación de tres tipos de flujo diferentes conjugados de manera compleja. Estos tres flujos son: la difusión de vapor que tiene lugar en los poros; el flujo de agua absorbida en las paredes de los poros, y el flujo capilar que ocurre en los poros pequeños (capilares). Estos mecanismos se asimilan a un proceso puramente difusivo donde la causa del movimiento es un gradiente en el contenido de humedad. Puede expresarse de la siguiente forma:

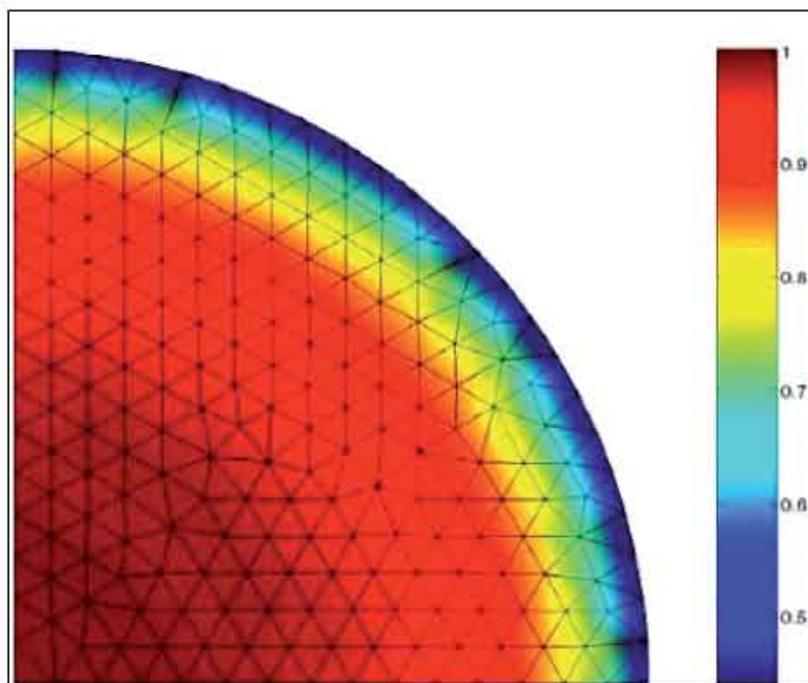
$$g_v = -D_w \frac{\partial w}{\partial x} \quad (1)$$

donde  $D_w$  = coeficiente de difusión del vapor de agua con respecto al contenido de humedad,  $w$  expresado como masa por volumen de material seco.

$w$  = humedad ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

$x$  = coordenada de posición, medida desde la superficie expuesta.

El coeficiente de difusión  $D_w$  no es constante, lo que dificulta la solución numérica de la Eq. (1). En la Fig. 1 se muestra la distribución de humedad relativa en sentido radial para una probeta cilíndrica de concreto, con secado unidimensional, calculado para un concreto con relación agua/cemento=0,55, y a la edad de 2 semanas, según Guillerón, et. al.<sup>[4]</sup>. En la misma, se observa claramente que el núcleo permanece con humedades relativas superiores al 90% y el secado se limita a las zonas expuestas.

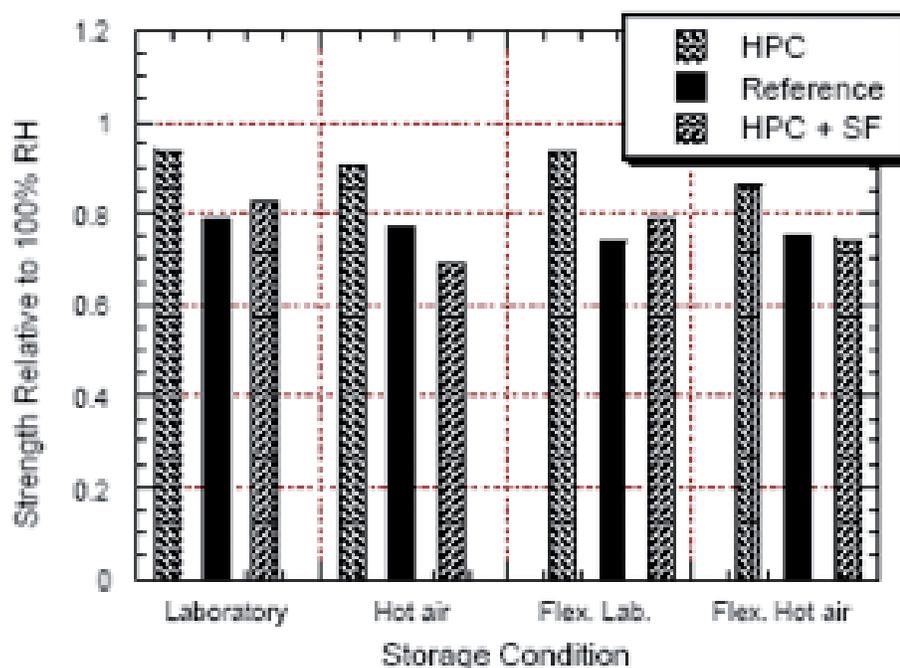


**Fig. 1.** Mapa de humedades relativas (Saturación=1) para una muestra cilíndrica con secado unidimensional (sentido radial) a la edad de 2 semanas<sup>[4]</sup>.

#### 4. INFLUENCIA DEL SECADO PREMATURO SOBRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Es frecuente encontrar recomendaciones acerca del empleo de la resistencia a la compresión como indicador de la eficiencia de curado, ya sea a través del ensayo de probetas o de testigos calados de la estructura. En 1928, Gonneman y Schuman<sup>[5]</sup> presentaron curvas típicas de evolución de resistencia para distintos tipos de curado, pero sus conclusiones no serían aplicables a los cementos actuales.

En estudios más recientes, como los informados por Hasni *et. al.*<sup>[6]</sup> sobre los resultados de resistencia a la compresión y flexión de muestras estándar de laboratorio sometidas a la acción de aire caliente (secado severo), y a un secado moderado en condiciones de laboratorio, relativas a las obtenidas en condiciones de curado estándar, se ilustran en la Fig. 2. Se observa que, en ningún caso, la pérdida relativa supera el 30%



**Fig. 2.** Resistencia a compresión y flexión, relativas al curado estándar, para distintas condiciones de secado, de Hasni, *et.al.*<sup>[6]</sup>

#### 5. INFLUENCIA DEL SECADO PREMATURO SOBRE LAS PROPIEDADES DEL TRANSPORTE DE FLUIDOS

En principio, la interrupción prematura de las reacciones de hidratación conduce a una mayor porosidad, poros de mayor tamaño y la posibilidad que no llegue a alcanzarse la segmentación de la red capilar. Estos factores son determinantes de la penetrabilidad del concreto; por lo tanto, es razonable esperar que el secado prematuro afecte significativamente las propiedades de transporte de fluidos en el concreto de recubrimiento.

Una revisión de resultados efectuada por Meeks<sup>[7]</sup> destaca que el curado inicial es crítico para reducir la permeabilidad de la zona de exterior del concreto. Para el caso de concretos de cemento Portland, el incremento de curado de 1 a 3 días, reduce la permeabilidad al oxígeno por un factor de 5. Sin embargo, prolongar el curado hasta la edad de 28 días sólo aporta una leve reducción adicional, del orden del 10%.

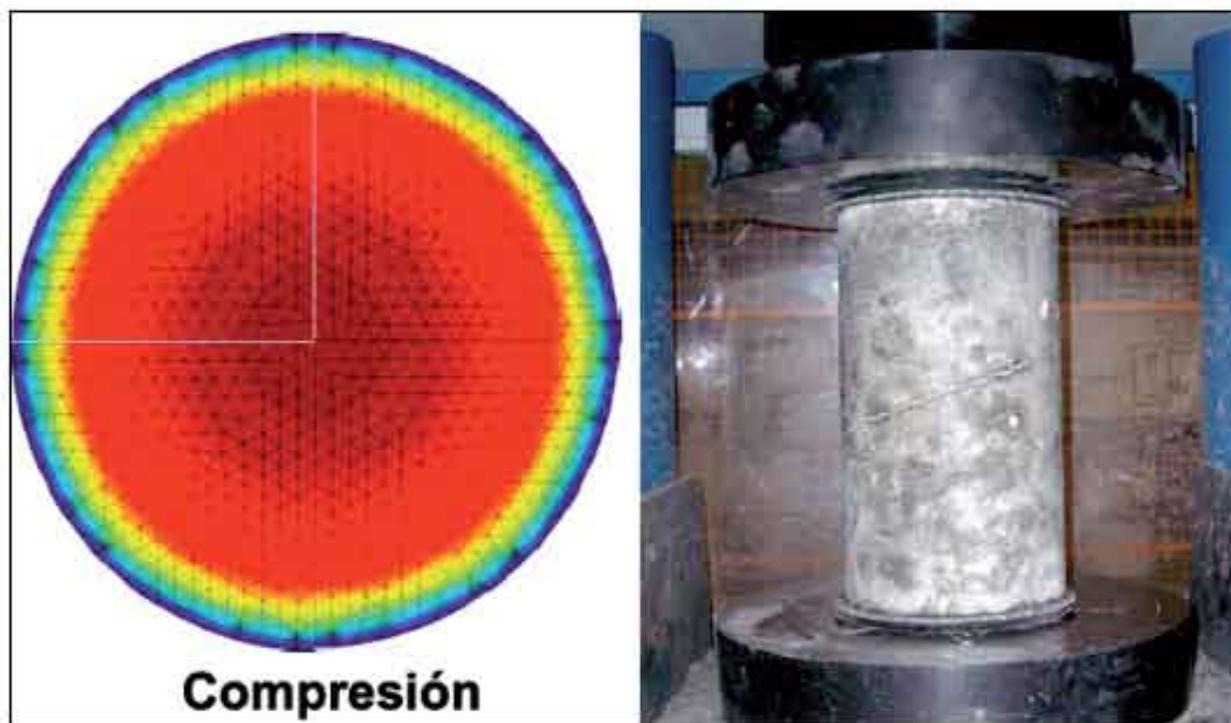
Güneyisi *et. al.*<sup>[8]</sup> destacan que un curado inicial pobre se traduce en una resistencia a la penetración de cloruros marcadamente inferior, tanto para cementos especiales como cementos con adiciones, aunque estos últimos se muestran todavía más susceptibles. Por su parte, Bai *et. al.*<sup>[9]</sup> analizan el efecto del curado sobre la absorción capilar y la carbonatación de concretos preparados con adición de metakaolin y cenizas volantes, adoptando como referencia un

concreto preparado sólo con cemento normal. Concluyen que aunque el curado al aire afecta a todas las propiedades medidas (resistencia a compresión, velocidad de succión capilar y carbonatación) el efecto es diferente en cada caso y depende del tipo y cantidad de adición.

Balayssac *et. al.*<sup>[10]</sup> estudiaron el efecto del curado húmedo sobre la resistencia a la carbonatación. Tal como era de esperar, encontraron que la profundidad de carbonatación, a cualquier edad, se reduce cuando se emplea una relación agua/cemento (a/c) menor o cuando se prolonga el curado. Sin embargo, destacan que cuando el período de curado se lleva de 3 días a 28 días, los beneficios incrementales que se alcanzan son menores, tanto menores cuanto menor es la relación a/c empleada. Todos estos ejemplos confirman que el secado prematuro conduce a incrementos de la penetrabilidad del concreto, modificando el efecto físico de barrera del recubrimiento ya que el secado prematuro afecta predominantemente a las capas exteriores.

## 6. ANÁLISIS DE DIFERENTES INDICADORES DE LA EFICACIA DEL CURADO

La resistencia a compresión del concreto es la propiedad más conocida de dicho material; en general, se emplea como un indicador de su calidad. Su limitación como indicador de curado deficiente radica en que no es capaz de enfocar la medición en la zona expuesta al secado sino que, por el contrario, el ensayo involucra a todo el volumen de la muestra. Si se considera la situación de una sección transversal de una muestra cilíndrica, de acuerdo con el modelo de Guilleron *et. al.*<sup>[4]</sup>, que muestra que una gran proporción del área se mantiene próxima a la saturación incluso después de 14 días de exposición al aire y sólo un espesor relativamente reducido está afectado por el secado, como se muestra en la Fig. 3, se comprende fácilmente que la influencia relativa de la zona afectada por curado deficiente es baja.



**Fig. 3.** Esquema de sección transversal afectada por el secado prematuro y su influencia relativa sobre la resistencia a la compresión.

En principio, cualquier método experimental capaz de valorar la calidad del concreto de recubrimiento podría emplearse como indicador de un curado deficiente. De estos métodos, algunos deben aplicarse sobre muestras en condiciones de laboratorio y otros se realizan directamente sobre la estructura. Además, pueden ser destructivos, levemente destructivos o no destructivos. Cabe decir que existen diferentes métodos capaces de valorar la capacidad de transporte de fluidos del concreto de recubrimiento. En este artículo, se presentan dos: la medida de la permeabilidad al aire y la medida de espesores de carbonatación.

### 6.1 La medida de la permeabilidad al aire.

Para la determinación de la permeabilidad al aire se empleó un equipo comercial, apto para mediciones tanto en condiciones de laboratorio como *in situ*, de manera no destructiva. El equipo, que se ilustra en la Fig. 4, dispone de una celda de doble cámara cilíndrica, de aproximadamente 10 cm de diámetro, unida a una bomba de alto vacío, con sus correspondientes sensores y válvulas comandadas por un ordenador. La celda se adhiere a la superficie del concreto por el vacío que proporciona la bomba y los sensores miden la pérdida de ese vacío por efecto de la porosidad interna del concreto. La doble cámara evita las corrientes de aire espurias y permite el cálculo del coeficiente de permeabilidad  $K$  del concreto de recubrimiento, que se muestra en el visor de la unidad de proceso.

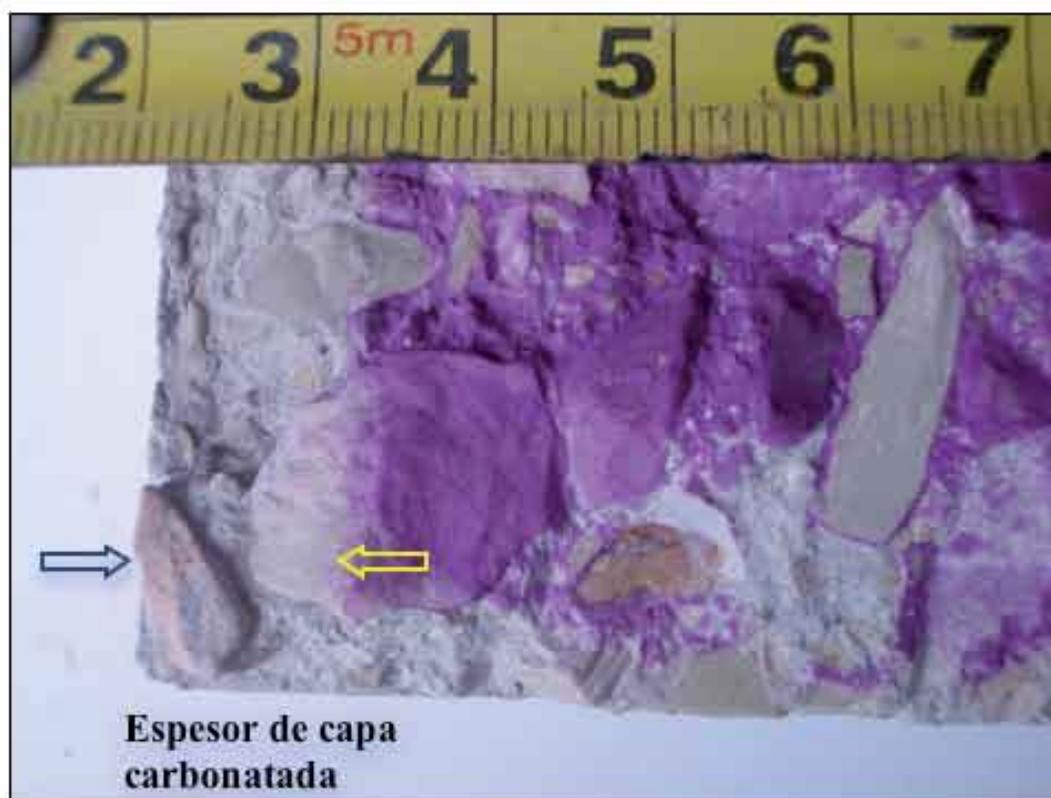
El equipo opera de manera automática y en un tiempo menor o igual que 12 minutos se obtiene un valor de la permeabilidad al aire. Diversos estudios informan de la idoneidad de esta técnica y de su muy buena correlación con otros métodos para medir la permeabilidad a los gases (Método de permeabilidad al oxígeno. Cembureau<sup>[11]</sup>).



**Fig. 4.** Equipo de Torrent para la determinación de la permeabilidad al aire del concreto de recubrimiento.

### 6.2. Carbonatación en exposición natural (no acelerada).

La detección del avance del frente de carbonatación provee una medida directa de la susceptibilidad del concreto de recubrimiento al ingreso de  $\text{CO}_2$  atmosférico. Este avance es sencillo de medir, empleando una solución alcohólica de fenolftaleína, ya que la zona carbonatada queda incolora, mientras que la zona no carbonatada se tiñe de color fucsia, como se ilustra en la Fig. 5.



**Fig. 5.** Determinación del avance del frente de carbonatación mediante la aspersion de solución alcohólica de fenolftaleína.

Si un secado prematuro afecta la calidad del concreto de recubrimiento, éste mostrará mayores espesores carbonatados que las zonas bien curadas, es decir, una mayor velocidad de avance del frente carbonatado.

Es evidente que la técnica de medida de la velocidad de carbonatación en condiciones no aceleradas no constituye en sí misma un método práctico, porque se necesita de una exposición prolongada (años), pero tiene la ventaja conceptual de que se trata de un método directo y que pone de manifiesto la importancia de un curado eficiente para la durabilidad de las estructuras de concreto armado. De manera alternativa, se desarrolló una metodología novedosa apoyada en la dependencia de la resistividad eléctrica del concreto con el contenido de humedad del mismo y, más específicamente, con su grado de saturación, como muestran Climent *et. al.*<sup>[12]</sup>.

La presencia de agua de manera continua dentro de la estructura de poros provee el medio conductor y, por lo tanto, cuando esta fase líquida se reduce y pierde la continuidad, la resistividad aumenta de manera significativa.

La dificultad asociada con las medidas a corta edad es que el concreto está en plena evolución por efecto de la hidratación del cemento, evolución que también induce cambios en la resistividad eléctrica y en la disponibilidad de agua, y que deben considerarse si se pretende emplear a la primera como indicador del secado superficial. Por este motivo, fue necesario diseñar una metodología apropiada para desacoplar todos los factores diferentes del secado.

Para medir la resistividad se empleó un resistivímetro comercial, de 4 electrodos (o puntas) equidistantes, según la configuración de Wenner, con separación entre las mismas de 50 mm y 20 mm, como se ilustra en la Fig. 6.



**Fig. 6.** Medición de la resistividad eléctrica del concreto empleando el método de los electrodos puntuales equidistantes a 20 mm.

## 7. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

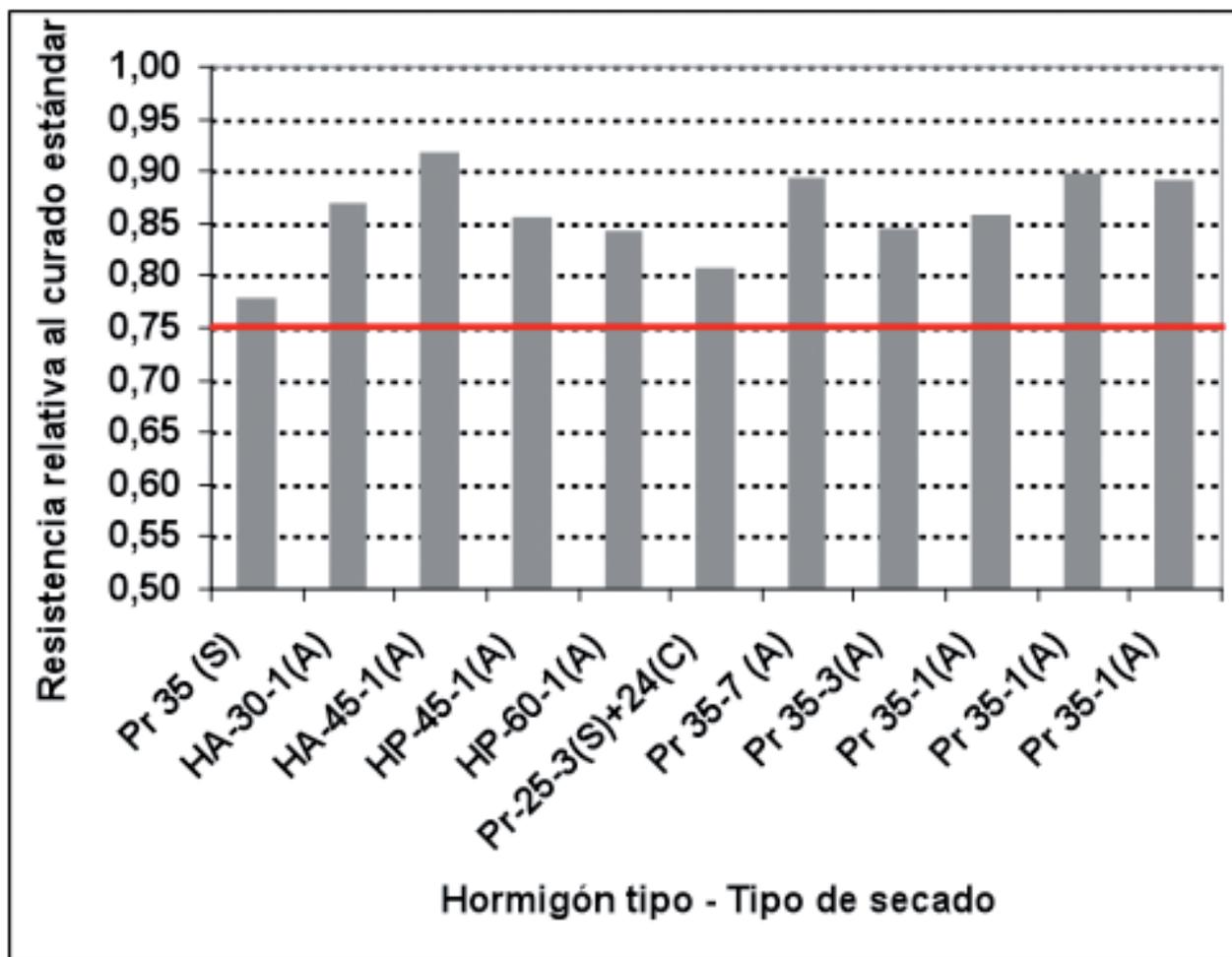
Se elaboraron distintos tipos de concretos (con y sin fibras de acero, convencional y autocompactante), en un amplio rango de resistencias, entre 20 y 60 N/mm<sup>2</sup>, empleando distintos tipos de cemento (cementos normales, cementos puzolánicos, cementos con cenizas volantes) y de agregados (silíceos y calcáreos). En todos los casos fue empleada una hormigonera de mezclado forzado, con eje vertical y se llenaron y compactaron de manera normalizada moldes cilíndricos de diámetros diferentes. Para un tipo particular de concreto, de 50 N/mm<sup>2</sup>, también se moldearon placas de 300 x 400 mm por 120 mm de espesor, que se curaron al aire y cubiertas por agua. Las muestras obtenidas se sometieron a condiciones ambientales diversas. Algunas muestras se mantuvieron en curado normalizado, a modo de referencia, mientras que otras se dejaron secar al aire, a partir de edades de 1, 2, 3 y 7 días. Asimismo, se registró la pérdida de masa por el secado y ese parámetro se adoptó como referencia, aun cuando es evidente que el secado no es homogéneo en toda la masa de la muestra.

En coincidencia con las medidas de la masa durante el secado, se midió la resistividad eléctrica, por método de las 4 puntas, con una frecuencia acorde con el ritmo de secado, es decir, más frecuente durante los primeros días y menos, para edades mayores; la resistencia a compresión se midió a la edad de 28 días, para todas las muestras. La medición del coeficiente de permeabilidad al aire se realizó para edades comprendidas entre 28 y 90 días, con excepción del avance del frente carbonatado, que se realizó entre los 500 y los 720 días.

## 8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

A continuación se presentan los resultados obtenidos, siguiendo un ordenamiento idéntico al empleado en su correspondiente descripción. Los valores de resistencia a la compresión obtenidos a la edad de 28 días para distintas muestras

sometidas a un secado prematuro se compararon con los respectivos valores de los mismos concretos sometidos a curado estándar; el cociente entre ambos representa la influencia del secado prematuro sobre la resistencia a la compresión y se esquematizan en la Fig. 7. En la misma, se observa que en ningún caso, esta diferencia es superior al 25% y se reduce aún más para los concretos de mayor resistencia.



**Fig. 7.** Sensibilidad de la resistencia a compresión a los efectos del secado prematuro, expresada como valor relativo al obtenido luego de un curado estándar.

Por el contrario, la medida de la permeabilidad al aire, empleando el Método de Torrent, muestra que el efecto de un secado prematuro se traduce en el incremento de un orden de magnitud en el valor de la permeabilidad intrínseca  $K_T$ . Esto se puede observar en la Tabla 1, que ilustra los valores medios obtenidos de dos determinaciones sobre las placas de concreto.

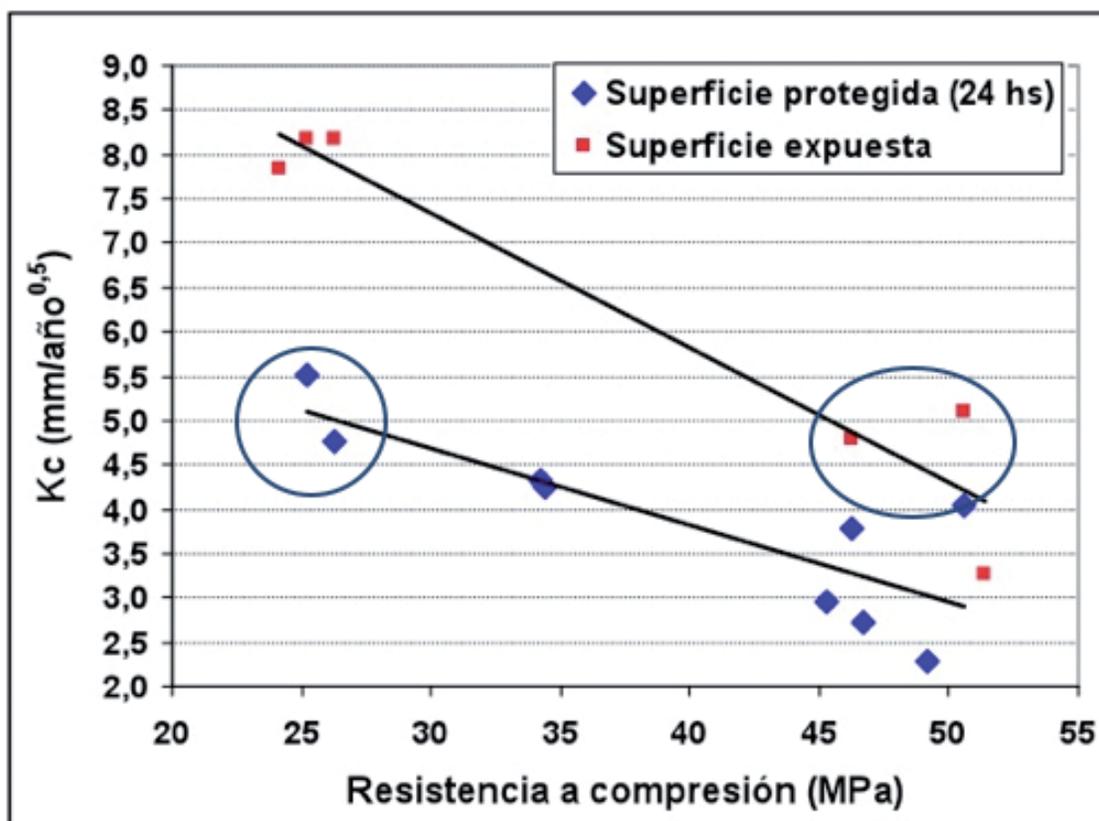
En la parte superior de la Tabla 1, se muestran los valores obtenidos para una loseta que se dejó secar en su molde, a partir de las 24 horas de ejecución; la cara inferior, en contacto con el molde, se emplea como referencia pues éste impidió el secado del concreto. Por su parte, en la parte inferior de la Tabla 1 se pueden ver los valores obtenidos para una loseta que se mantuvo cubierta de agua hasta la edad de 7 días. La permeabilidad intrínseca  $K_T$  de la zona inferior (referencia) y superior (expuesta al secado luego de 7 días) son semejantes, considerando que el rango de  $K_T$  es de 4 órdenes de magnitud.

**Tabla 1. Valores obtenidos de la permeabilidad intrínseca  $K_T$  (al aire, Método de Torrent) para placas curadas el aire y bajo agua.**

	Medida 1	Medida 2	Valor medio
Placa 1 (curada al aire)	$K_{T1}$ ( $\times 10^{-16}$ m <sup>2</sup> )	$K_{T2}$ ( $\times 10^{-16}$ m <sup>2</sup> )	$K_{Tm}$ ( $\times 10^{-16}$ m <sup>2</sup> )
Cara superior	0,284	0,411	0,3475
Cara inferior	0,028	0,021	0,0245
Placa 2 (curada en agua)	$K_{T1}$ ( $\times 10^{-16}$ m <sup>2</sup> )	$K_{T2}$ ( $\times 10^{-16}$ m <sup>2</sup> )	$K_{Tm}$ ( $\times 10^{-16}$ m <sup>2</sup> )
Cara superior	0,032	0,037	0,0345
Cara inferior	0,022	0,019	0,0205

Estos resultados confirman la aptitud de este método de aplicación tanto en condiciones de laboratorio como *in situ*, para la detección de un secado prematuro. En cualquier caso, debe disponerse de una superficie sometida a un curado eficiente, a modo de referencia.

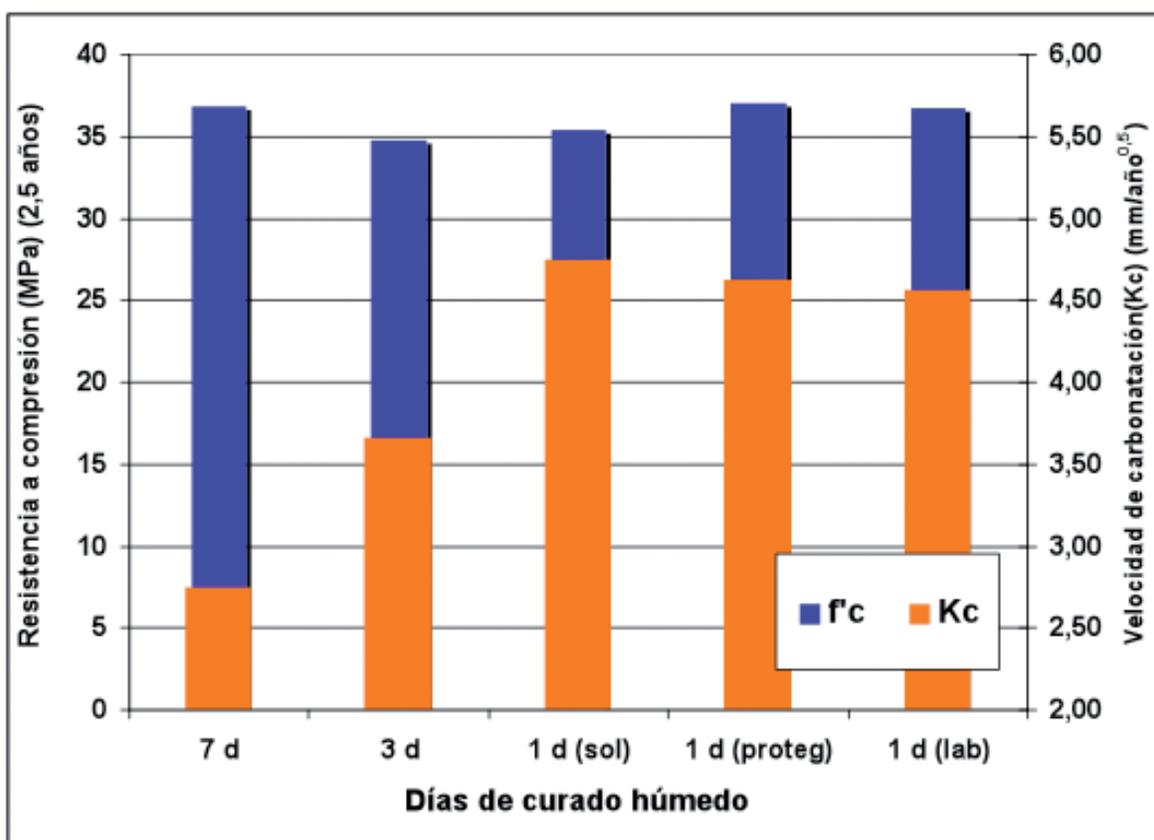
El secado prematuro del concreto expuesto induce un incremento en la velocidad de carbonatación, incremento que es tanto más alto cuanto más severo es el secado, como se ilustra en la Fig. 8. El coeficiente de carbonatación  $K_C$  se calculó como la relación entre el espesor de la capa carbonatada y la raíz cuadrada del tiempo transcurrido hasta la medición (en años), según se indicó en el punto 7.



**Fig. 8** Velocidad de carbonatación en función de la clase resistente del concreto.

En la Fig. 8 se observa que el incremento de la resistencia a compresión del concreto provoca una reducción de la velocidad de carbonatación, mientras que el secado prematuro de la superficie expuesta induce un incremento significativo de la velocidad de carbonatación.

La medida de espesores de carbonatación no es práctica desde el punto de vista operativo, pero ilustra de manera elocuente la influencia del secado prematuro sobre la durabilidad del concreto. A partir de los resultados que se ilustran en la Fig. 8, podría decirse que los concretos de 45 MPa de resistencia a compresión, que no se curaron de manera eficaz, serían prácticamente tan durables como el concreto de 25 MPa de resistencia a la compresión, curado de manera eficiente. Por su parte, en la Fig. 9 se compara la resistencia a la compresión y el coeficiente de carbonatación en relación a las condiciones de curado. En la misma, se ve cómo se reduce el coeficiente de carbonatación cuando se mejora y prolonga el curado (de 1 hasta 7 días), mientras que los valores de resistencia a compresión son similares y no permiten distinguir la duración del curado húmedo de las muestras.



**Fig. 9** Sensibilidad comparada de la resistencia a la compresión y de la velocidad de carbonatación frente al secado prematuro.

La influencia del secado sobre la resistividad se desacopló de los demás factores (grado de hidratación, tipo de cemento, proporciones de la mezcla) mediante la definición de la resistividad relativa, que representa el cociente entre la resistividad medida durante el secado y la resistividad de una muestra equivalente, en estado saturado, a la misma edad. Por su parte, en la Fig. 10 se ilustran los resultados obtenidos mediante medidas de la resistividad eléctrica de distintos concretos, sometidos a distintos regímenes de secado temprano. La resistencia a la compresión se identifica en la leyenda del gráfico, expresada en MPa, mientras que las siglas HP, HPA y HM indican que se trata de concreto (hormigón, en el original) apto para prefabricación, autocompactante para prefabricación y en masa, respectivamente.

El valor que se representa en ordenadas corresponde a la resistividad relativa, cuyo valor es función de la pérdida de masa por secado. El empleo de escala logarítmica para el eje de ordenadas mejora la sensibilidad del gráfico. Es

evidente distinguir cómo un concreto de alta resistencia y cuya porosidad es muy baja, prácticamente no se seca en el período considerado (28 días), mientras que el concreto de clase resistente más baja experimenta la máxima variación de su resistividad relativa. Los casos restantes, se ordenan según su clase resistente y el tamaño de muestra empleada. La descripción y análisis de esta nueva metodología –de carácter completamente no destructivo– excede el alcance de este trabajo, pero está desarrollada con detalle en Fernández Luco<sup>[13]</sup>.

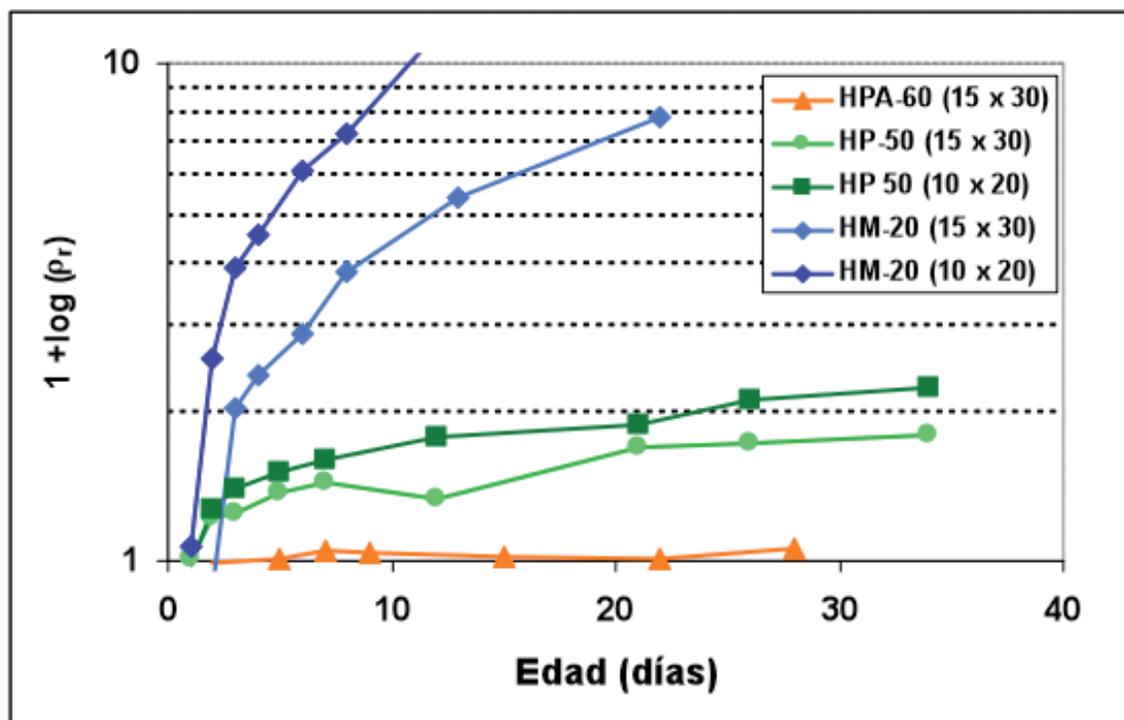


Fig. 10 Variación de la resistividad relativa en función del tiempo.

## CONCLUSIONES

El análisis de los resultados expuestos avala las siguientes conclusiones:

La resistencia a la compresión valorada sobre probetas expuestas y/o testigos calados de la estructura no es un buen indicador de secado prematuro.

Los parámetros que valoran la capacidad de transporte de fluidos dentro del concreto de recubrimiento presentan mayor sensibilidad que la resistencia a la compresión frente al efecto del secado prematuro del concreto. En particular, debe destacarse la notable influencia del secado prematuro sobre el coeficiente de carbonatación.

La medida de la permeabilidad al aire a través del Método de Torrent se mostró capaz de valorar la influencia del secado prematuro; el valor obtenido debe referirse a la permeabilidad obtenida sobre una muestra con un curado eficiente, ya sea que se trate de una muestra sometida a curado estándar o bien se mida la permeabilidad del hormigón interno de la estructura, no expuesto.

La resistividad eléctrica del concreto por método de Wenner es una técnica no destructiva que puede aplicarse con éxito para detectar el secado prematuro del concreto y que permite la adopción de medidas correctivas en tiempo real.

## AGRADECIMIENTOS

A los co-directores de mi tesis doctoral, Dra. Carmen Andrade y Dr. Miguel Angel Climent.

## REFERENCIAS

- [1] Comité 308. Curado del concreto “Standard Specification for Curing Concrete (ACI 308.1)”; “Guide to Curing Concrete” (ACI 308R), ACI, en *Manual of concrete practice*, 2007.
- [2] Power, TC, “A discussion of cement hydration in relation to the curing of concrete”, en *Proceedings, Highway Research Board*, V.27, 1948.
- [3] Hedenblad, G (PhD Tesis), “Moisture permeability of mature concrete, cement mortar and cement paste”, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, 1993.
- [4] Guillerón, M; Regue, C; Guillerón, M; Sánchez, P; Sonzogni, V, “Análisis numérico de las tensiones producidas por el secado del concreto”, en *Mecánica computacional*, Vol. XXIII, Ed. Buscaglia, G; Dari, E; Zamonsky, O, Bariloche, Argentina, Noviembre, 2004.
- [5] Gonnerman, HF; Schumann, EC, “Compression, flexure and tension tests of plain concrete”, en *Proceedings*, Vol 28, Part II, ASTM International West Conshohocken, PA, pp. 527-564, 1928.
- [6] Hasni, L; Gallias, JL; Salomón, M, “Influence of the curing method on the durability of high performance concretes”, *Proceedings of the Third Internacional ACI Conference on Durability of Concrete*, Nice, France, SP-145, Ed. VM Malhotra, ACI, pp. 131-155, 1994.
- [7] Meeks, KW; Carino, NJ, “Curing of high-performance concrete: report of the state of the art”, NISTIR 6295, National Institute of Standards and Technology, 1999.
- [8] Güneyisi, E; Özturan, T; Gesoglu, M, “Effect of initial curing on chloride ingress and corrosion resistance characteristics of concretes made with plain and blended cements”, en *Building and Environment*, Vol. 42, pp 2676–2685, 2007.
- [9] Bai, J.; Wild, S; Sabir, BB, “Sorptivity and strength of air-cured and water-cured PC–PFA–MK concrete and the influence of binder composition on carbonation depth”, en *Cement and Concrete Research* 32, pp. 1813–1821, 2002.
- [10] Balaýssac, JP; Détriché, Ch; Grandet, J, “Effects of curing upon carbonation of concrete,” en *Construction and Building Materials*, Vol. 9, No. 2, april, pp. 91-95, 1995.
- [11] Torrent, R, “The gas-permeability of high-performance concretes: site and laboratory tests”, en *High Performance Concr. & Quality of Concr. Struct.*, ACI-SP186, pp. 291-308, 1999.
- [12] Climent, MA; Vera, G; López, J; Viqueira, E; Andrade, C, “A test method for measuring chloride diffusion coefficients through non-saturated concrete. Part I. The instantaneous plane source diffusion case”, en *Cement and Concrete Research*, Vol. 32 pp. 1113–1123, 2002.
- [13] Fernandez Luco, L, “Valoración de técnicas no destructivas para el control de la eficiencia de curado del concreto”, Tesis doctoral, Universidad de Alicante, España, 2008.