

CALIDAD DEL HORMIGÓN DE RECUBRIMIENTO

Luis Fernandez Luco

Universidad de Buenos Aires, Av. Las Heras 2214 (1127) C.A.B.A., Argentina – lfernandez@fi.uba.ar

RESUMEN

La calidad del hormigón de recubrimiento es vital para obtener una adecuada durabilidad del hormigón y las armaduras, ya que constituye la barrera que retarda el ingreso de sustancias agresivas para el hormigón o el acero. Para la valoración de la calidad se recurre a la medida de la capacidad de transporte de fluidos, preferentemente por métodos no destructivos aplicados in situ.

En este trabajo se presentan los diferentes mecanismos de transporte de fluidos en el hormigón y se muestran algunos de los equipos y técnicas desarrollados hasta el presente. De manera particular, se indica también la influencia de las condiciones de medida sobre los resultados obtenidos, de manera de contribuir a identificar las condiciones óptimas para cada uno de los ensayos descriptos.

ABSTRACT

The quality of the concrete cover (or covercrete) is vital to the durability of concrete and reinforcement, as it acts as a barrier to control the ingress of damaging fluids to concrete or steel. The assessment of its durability related quality is linked to its fluids transport capacity, preferably by means of non-destructive techniques applied on site.

This paper summarises the different transport mechanisms in a porous material, such as concrete and shows some of the available equipments and techniques developed for the assessment of cover quality. Special attention is paid to the effect of environmental conditions on the obtained results, as a way of determining the best technique suitable for each environment.

1. OBJETO Y ALCANCE

Referirse a la calidad del hormigón de recubrimiento y de los métodos para evaluar esta calidad implica un esfuerzo que excede lo que es posible brindar en un texto que, por diversas razones, debe estar acotado.

Asimismo, el continuo avance de las técnicas y los desarrollos experimentales hace casi imposible alcanzar un grado eficiente de actualidad. Por ese motivo, se aportan los conceptos esenciales que rigen los mecanismos de transporte de fluidos en un medio poroso como el hormigón y se han seleccionado sólo algunos de los métodos experimentales capaces de medir la calidad del hormigón de recubrimiento.

Entre las referencias, se podrán encontrar otros textos para complementar esta información y, en breve, se dispondrá de los nuevos informes elaborados por los Comités Técnicos de RILEM que continúan trabajando en este sentido.

2. CONCEPTO Y DEFINICIÓN DEL HORMIGÓN DE RECUBRIMIENTO

El hormigón de recubrimiento es el volumen de hormigón ubicado entre las armaduras más externas y la superficie expuesta al ambiente (aire, suelo, agua).

Esta delgada capa de hormigón, de apenas centímetros de espesor, tiene una importancia clave en la durabilidad del hormigón ya que constituye la barrera que detiene o retarda el ingreso de sustancias agresivas desde el exterior.

En el caso de la corrosión de la armadura de refuerzo, este efecto barrera está integrado por dos componentes básicas: el espesor del recubrimiento, en mm, que determina cuán alejada está la armadura del exterior y la calidad del hormigón de recubrimiento, que ciertamente es diferente de la del hormigón interior.

Las causas por las que la calidad del hormigón de recubrimiento es diferente son varias, entre las que pueden citarse el secado prematuro, la exudación, las tareas de terminación superficial, la exposición permanente al ambiente (sol, lluvia, cambios térmico-higrométricos) que puede provocar microfisuración, la segregación asociada con el procedimiento de llenado, entre otras.

Por estos motivos, no es razonable estimar la calidad del hormigón de recubrimiento a partir de medidas realizadas en el núcleo de elementos estructurales, así como tampoco está representada por el hormigón presente en probetas moldeadas y curadas con procedimientos estándar.

3. IMPORTANCIA DE LA CALIDAD DEL HORMIGÓN DE RECUBRIMIENTO

En un gran número de situaciones que afectan la durabilidad del hormigón estructural, es determinante el ingreso de sustancias agresivas desde el exterior; valgan como ejemplos el ingreso de CO_2 del aire que induce la carbonatación del hormigón, el ingreso de iones cloruro o el ingreso de iones sulfato.

La pérdida de la condición pasiva de las armaduras como consecuencia de la reducción en el pH para el caso del CO_2 y la rotura de la capa pasiva por acción de iones cloruro en concentraciones superiores a la crítica, colocan a las armaduras en condición de corroerse, si hay adecuada humedad y disponibilidad de oxígeno.

Otros procesos que provocan fallos de durabilidad, como los ciclos de congelamiento y deshielo, también dependen del ingreso de agua ya que se necesita que el hormigón supere un cierto umbral de saturación crítica para que las temperaturas bajas sean capaces de inducir deterioro. Esta saturación no se obtiene sino a través del ingreso de agua desde el exterior.

El hormigón de recubrimiento se encuentra además en la zona “convectiva” del hormigón, que es la que soporta los cambios cíclicos de temperatura y humedad por acción del clima. Las continuas dilataciones y retracciones asociadas a los ciclos higrotérmicos van deteriorando el hormigón de recubrimiento por acumulación progresiva de daño. El deterioro asociado con efectos mecánicos como la abrasión también afecta preferentemente al hormigón de recubrimiento.

4. ESTIMACION DE LA CALIDAD DEL HORMIGÓN DE RECUBRIMIENTO

Considerando que la importancia en la calidad del hormigón de recubrimiento está asociada con la durabilidad de la estructura, es razonable pensar que los procedimientos para evaluar esa calidad se apoyen en parámetros vinculados con la durabilidad, como la caracterización de la estructura de poros a través de la medida de la capacidad de transporte de fluidos

El CEB-FIP Model Code Sección d.5.4. expresa que aunque no hay ningún método con aceptación general para la caracterización de la estructura de poros y su vinculación con la durabilidad, las investigaciones indican que la permeabilidad del hormigón, tanto al agua como al aire (gases) resultan en una medida excelente de la

resistencia del hormigón al ingreso de agentes agresivos, tanto en estado líquido como en estado sólido.

Otra indicación importante que aparece en el Model Code es que indica expresamente que la resistencia a compresión no es una medida completa de la durabilidad del hormigón, porque ésta depende de las propiedades de las capas superficiales del hormigón, las que tienen un efecto limitado en la resistencia mecánica.

Lo anterior indica que para determinar la calidad del hormigón en lo que respecta a la durabilidad potencial, es preferible recurrir a medidas de la capacidad de transporte de fluidos del hormigón. Además, estas medidas deberán enfocarse en el volumen de hormigón que corresponde al recubrimiento, ya que su calidad puede ser diferente del hormigón interno o de masa.

En lo que respecta a los métodos que determinan la capacidad de transporte de fluidos por parte del hormigón, los desarrollos recientes y que han demostrado mayor efectividad, involucran la permeabilidad a los gases, la permeabilidad al agua (que incluye la succión capilar), la difusión iónica y la migración. La medida de la conductividad eléctrica (o su recíproca, la resistividad eléctrica del hormigón) está incluida en esta última ya que la conductividad del hormigón es iónica.

Es preciso también indicar que hay procesos que afectan a la durabilidad del hormigón estructural (hormigón + acero) que están vinculados directamente con estos mecanismos de transporte, como por ejemplo la corrosión inducida por carbonatación o por efecto de los iones cloruro y el ataque químico de sustancias que ingresan desde el exterior (sulfatos, por ejemplo). Otros fenómenos, vinculados con reacciones internas o que prácticamente no dependen del ingreso de sustancias desde el exterior (ettringita diferida, reacción álcali-agregado, por ejemplo), tienen una relación menos directa con estas metodologías de ensayo.

4.1. Análisis de otras alternativas posibles para evaluar la calidad del hormigón de recubrimiento

A continuación, se presenta una breve discusión sobre la eficacia eventual de otras técnicas de medida que podrían aplicarse a la valoración de la calidad del hormigón de recubrimiento.

a) Medidas de la resistencia mecánica sobre probetas

La medida de la resistencia mecánica del hormigón moldeado no puede representar a la calidad del hormigón de recubrimiento porque directamente no es representativo, ya que la muestra se llena y compacta con procedimientos normalizados, ciertamente diferentes de los aplicados en obra.

Aún en el caso que la muestra se deje a pie de obra para simular el curado que se le aplica a la estructura, las condiciones geométricas, la terminación y otras circunstancias, básicamente la ausencia de armadura, impiden considerar que una probeta moldeada es representativa del hormigón de recubrimiento.

A estas consideraciones, se suman la que se expone en el caso b), donde se analiza el ensayo de testigos calados de la estructura.

b) Medidas de la resistencia mecánica sobre testigos

Siguiendo un razonamiento análogo, si se emplea el resultado del ensayo a la compresión de un testigo calado como elemento representativo hormigón de recubrimiento de la estructura, ocurre lo que se esquematiza en la Fig. 1, donde se muestra que sólo una de las bases contiene el hormigón correspondiente al recubrimiento (indicado en color rojo). Esta base, por añadidura, debe

acondicionarse para el ensayo, ya sea procediendo a su aserrado y pulido o con mortero de azufre.

El efecto de la fricción entre las cabezas del testigo (o probeta) y los platos de la prensa es capaz de “proteger” un volumen aproximadamente cónico, próximo a la superficie de contacto. En consecuencia, la rotura de la muestra no involucra al hormigón de recubrimiento.

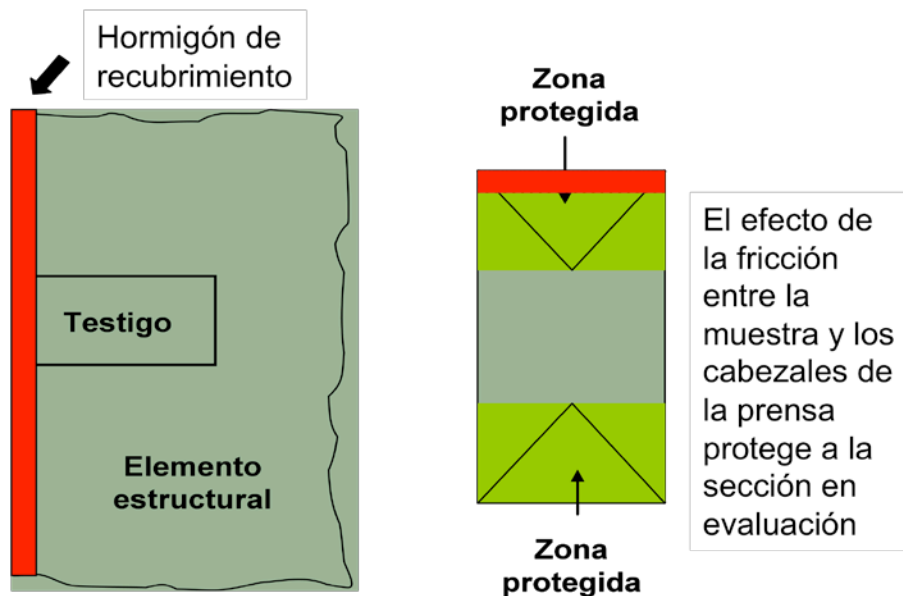


Fig. 1: Esquema de ensayo de testigos donde se muestra el hormigón de recubrimiento

4.2. Consideraciones acerca de las condiciones de la medida: laboratorio / in situ. Ventajas y desventajas

La valoración de la calidad del hormigón de recubrimiento puede hacerse in situ, mediante el empleo de métodos no destructivos o con grados muy leves de destructividad, que no alteran la condición de servicio de la estructura en estudio, o mediante la evaluación en el laboratorio de testigos calados de la estructura. En este último caso, el daño sí es significativo y debería recurrirse a esta estrategia de valoración sólo cuando sea estrictamente necesario.

Operar en condiciones de laboratorio supone que es posible precondicionar las muestras para obtener las condiciones de humedad en la muestra que mejor se adecuan a la técnica de medida. En general, las medidas de permeabilidad a los gases se desempeñan mejor sobre muestras secas, mientras que la medida de difusión y migración de iones requieren alcanzar condiciones de saturación.

Cuando se mide in situ, no es posible acondicionar el hormigón de manera efectiva y entonces los resultados están afectados por la influencia de la humedad y temperatura. La influencia de la humedad y temperatura sobre los distintos métodos de valoración de la calidad del hormigón de recubrimiento pueden consultarse en detalle en el Report 40 – RILEM TC-189 NEC, aunque aquí también se presentan las consideraciones esenciales.

5. METODOS QUE SE BASAN EN EL TRANSPORTE DE GASES

La medida de la permeabilidad a los gases aporta información significativa acerca de la estructura de poros del material (hormigón), ya que la permeabilidad intrínseca es

sensible al radio medio de los poros y también a la conectividad de los mismos. La tortuosidad de los recorridos también impone incrementos de la permeabilidad. Existen diferentes métodos, tanto para aplicación en condiciones de laboratorio como in situ, pero el más reconocido internacionalmente es el adoptado por el CEMBUREAU, que utiliza oxígeno a presión para la medida de la permeabilidad intrínseca, en condiciones de laboratorio.

5.1. Métodos de laboratorio para la medida de la permeabilidad al aire

En realidad, corresponden a este apartado aquellos métodos que sólo pueden aplicarse en condiciones de laboratorio, por la complejidad y tipo de medida, ya que todos los métodos de aplicación in situ también podrían emplearse en laboratorio para caracterizar muestras preacondicionadas convenientemente.

El método de referencia para la permeabilidad a los gases es, como se indicó, el método del CEMBUREAU, que emplea oxígeno a presión para obtener el flujo de gas a través del hormigón.

La muestra, una rodaja de hormigón de aproximadamente 50 mm de ancho, previamente acondicionada mediante un secado y estacionamiento a temperatura de laboratorio, se coloca en la celda del equipo. El flujo de oxígeno por fuera de la muestra se evita con un toroide de goma inflado (típicamente, un neumático de motocicleta).

Se inicia el flujo de oxígeno y, una vez alcanzadas las condiciones de flujo estacionario, se mide el mismo por el movimiento de burbujas de jabón interpuestas en el flujo de aire y que ascienden por los diferentes capilares. Se elige el capilar en función del caudal de oxígeno que atraviesa la muestra. La Fig. 2 ilustra una imagen general del equipo de ensayo.

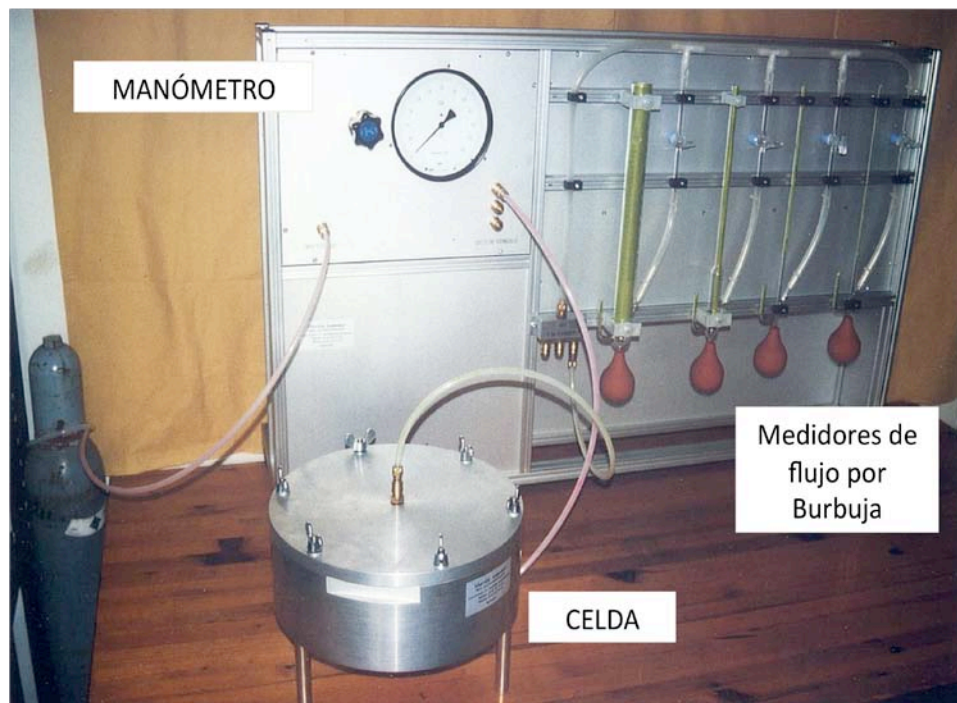


Fig. 2: Equipo del Cembureau para la medida de la permeabilidad al oxígeno

Las recomendaciones generales para este método, así como el pre-acondicionamiento de las muestras antes del ensayo fueron desarrolladas por el Comité Técnico de RILEM TC 116-PCD Permeability of concrete as a criterion of its

durability”, liderado sucesivamente por el Prof. H.K. Hilsdorf y por el Prof. J. Kropp, quien publicó la “Recommendation for testing concrete in the laboratory for gas-permeability and for capillary water absorption, as well as for the preconditioning of the specimens prior to those tests.”

$$K = \frac{2Qp_0L\eta}{A(p^2 - p_o^2)} \quad (1)$$

con Q: velocidad de flujo (m³/s)

A: sección transversal de la muestra (m²)

L: espesor de la muestra en la dirección del flujo (m)

N: viscosidad dinámica del fluido a la temperatura de ensayo (N.s/m²)

p: presión del gas al ingreso a la celda (absoluta) (N/m²)

p₀: presión a la que se determina el caudal (atmosférica) (N/m²)

Cuando la temperatura es de 20°C, la viscosidad dinámica del oxígeno puede adoptarse como 2,02 x 10⁻⁵ N.s/m². Entonces, para la muestra estándar de 150 mm de diámetro y 50 mm de espesor

$$K_{oxygen} = \frac{1,14 \cdot 10^{-4} Q \cdot p_a}{(p^2 - p_a^2)} (m^2) \quad (2)$$

5.2. Métodos de aplicación in situ para la medida de la permeabilidad al aire

Hay diversos métodos de ensayo para la medida de la permeabilidad a los gases en condiciones reales (in situ). Algunos de estos métodos funcionan con bombas de vacío y otros con gases a presión, pero los primeros son más seguros, en lo que a la seguridad en la manipulación de equipamiento se refiere.

Algunos métodos son levemente intrusivos, ya que necesitan de un pequeño orificio sobre el hormigón, mientras que otros son totalmente no destructivos porque apoyan una suerte de “campana” sobre el hormigón que se mantiene adherida por efecto de la presión atmosférica.

Con el principio de la campana o celda, hay equipos de simple o doble celda. Estos últimos son algo más evolucionados porque el anillo exterior de la celda funciona como anillo de guarda, evitando las corrientes espurias y posibilitando que el flujo en la celda interna sea unidimensional, lo que permite una estimación razonable del coeficiente intrínseco de permeabilidad.

Todos los equipos se apoyan en la ecuación de Hagen – Poiseuille desarrollada para fluidos compresibles, aunque las versiones finales de cálculo pueden diferir porque cambian las condiciones de borde.

5.2.1. Equipo Permea-TORR ®

A continuación, se describe el equipo Permea-TORR ®, de producción nacional, y que es el más avanzado en su tipo a la fecha, aunque comparte el principio de diseño y operación básico del TPT (Torrent Permeability Tester).

La disposición del instrumental del aparato se esquematiza en la Fig. 1. Sus dos características distintivas son:

- a) una celda con doble cámara, basada en el principio del anillo de guarda.
- b) un regulador de presión a membrana, cuya función es mantener a ambas cámaras siempre a la misma presión (P_i = P_e).

La operación del aparato es automática, comandada por un procesador, que abre y cierra las válvulas en el inicio del ensayo. Cuando la presión P_i baja a ~ 30 mbar se cierra la válvula 2, momento a partir del cual la bomba solo puede actuar (cuando se lo permite el regulador) sobre la cámara externa, de manera de equilibrar en todo momento la presión en ambas cámaras. De este modo, todo exceso de aire que ingrese lateralmente en la cámara externa será evacuado por la cámara exterior. Así se logra que el flujo de aire hacia la cámara central sea básicamente unidireccional (ver líneas de flujo en la Fig. 3) y no afectado por el ingreso espurio de aire, sea por un deficiente sellado de la cámara externa o a través de la más permeable 'piel' superficial.

La evolución de la presión P_i se mide a partir de los 60 s con un sensor de presión comandado por un microprocesador que tiene integrado un cronómetro. El microprocesador almacena la información y efectúa los cálculos para mostrar automáticamente, al fin del ensayo, el valor del coeficiente de permeabilidad al aire kT (m^2). El fin del ensayo acontece cuando la elevación de la presión en la cámara interna P_i alcanza 20 mbar o, en el caso de hormigones muy impermeables cuando han transcurrido 720 s desde el comienzo del ensayo. Así, dependiendo de la permeabilidad del hormigón, el ensayo puede durar de 2 a 12 minutos, incluso puede limitarse a 6 minutos cuando la evolución es lineal. El microprocesador es capaz de almacenar los datos de los ensayos y la información puede ser transferida a una PC para su posterior análisis y registro.

La función de la válvula 1 es restablecer el sistema para un nuevo ensayo ventilándolo con aire a la presión atmosférica.

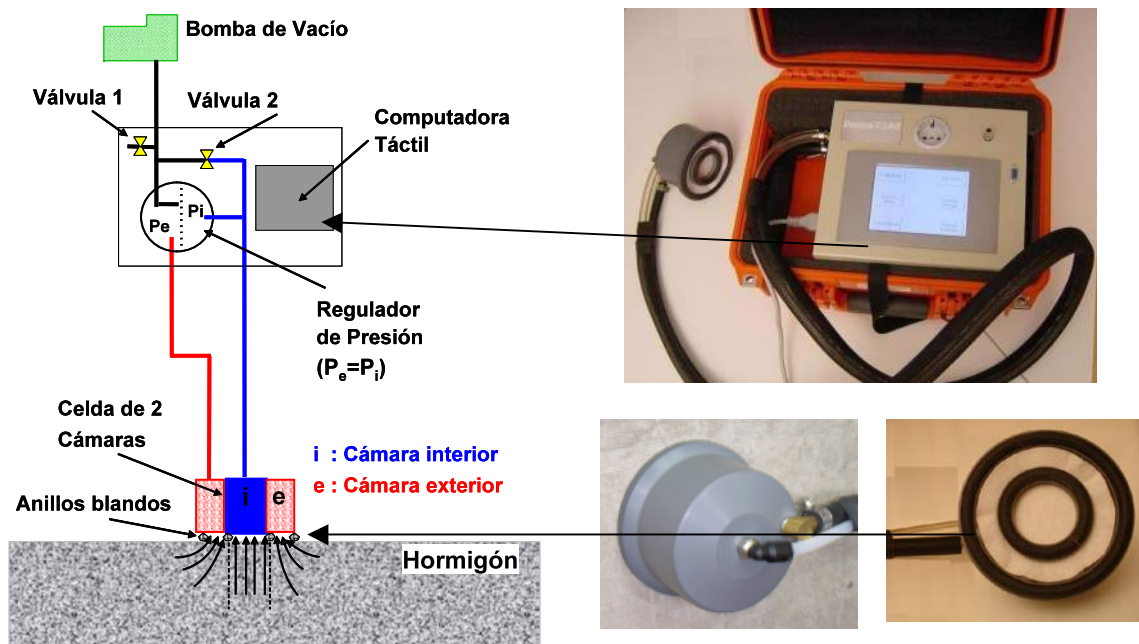


Fig. 3 - Esquema y detalles del Método Torrent

Dado que en este método la geometría del problema está bien definida, mediante un modelo teórico es posible calcular el coeficiente de permeabilidad:

$$k_T = \left(\frac{V_c}{A} \right)^2 \frac{\mu}{2\varepsilon p_a} \left(\frac{\ln \left(\frac{p_a + p}{p_a - p} \frac{p_a - p_o}{p_a + p_o} \right)}{\sqrt{t} - \sqrt{t_o}} \right)^2 \quad (3)$$

donde:

- kT: coeficiente de permeabilidad al aire del recubrimiento [m²]
- Vc: volumen de la cámara interior [m³]
- A: área de la cámara interior [m²]
- μ: viscosidad dinámica del aire [Ns/m²]
- ε: porosidad del hormigón [-]
- pa: presión atmosférica [N/m²]
- po: presión en la cámara interior al inicio del ensayo t_o = 60 s [N/m²]
- p: presión en la cámara interior al final del ensayo t (t ≤ 720 s) [N/m²]

El contenido de humedad del hormigón en el momento de la medida tiene una influencia significativa en el valor “informado” de la permeabilidad por el instrumento, ya que condiciones muy próximas a la saturación se interpretan como una menor permeabilidad (los capilares están obturados por agua líquida), como se muestra en la Fig. 4, que ilustra la influencia de la humedad relativa sobre la medida de la permeabilidad a un gas, según Parrot.

Para el autor del equipo, es suficiente que la lectura de contenido de humedad del hormigón, evaluada con sensores no destructivos basados en la medida de la impedancia y desarrollados específicamente para hormigón y materiales análogos, sea inferior a 5,5 %.

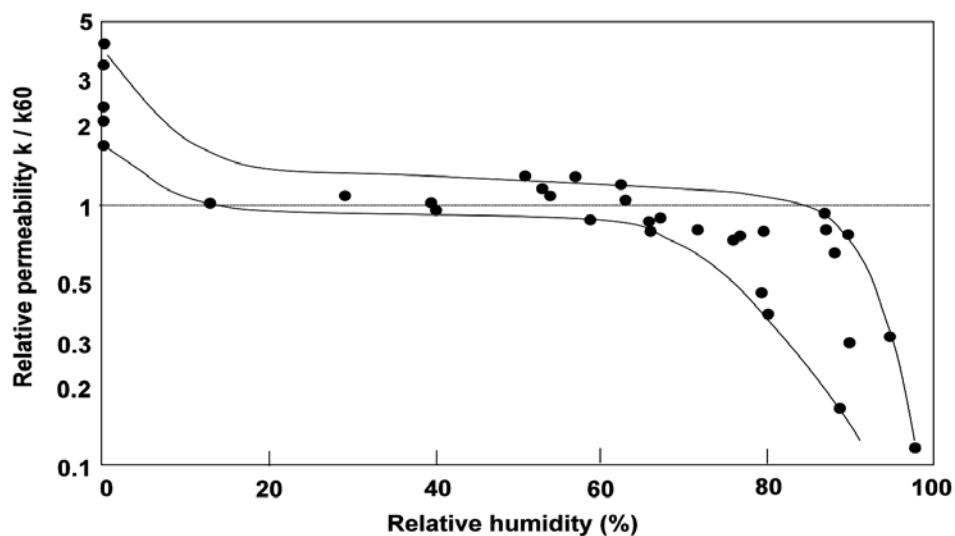


Fig. 4: Permeabilidad a los gases relativa a la obtenida para una humedad relativa del 60 % (Parrot).

El método de medida de la permeabilidad al aire por método de la doble cámara (Permea-TORR ® y Torrent Permeability Tester ®) está recogido por la normativa suiza e integran las estrategias de valoración de la durabilidad por criterios prestacionales.

Existen otros métodos para la medida de la permeabilidad al aire, con disponibilidad comercial, como el Autoclam ®, TPT ®, así como procedimientos experimentales desarrollados en distintas universidades y organismos públicos de investigación. Para obtener mayor información sobre los desarrollos actuales se puede consultar el Informe del Comité Técnico TC 189 NEC de RILEM (Report 40) y el Informe del Comité Técnico TC 230 de RILEM, que próximamente se editará.

5.3. Difusión natural (ensayo de carbonatación natural)

La difusión natural de CO₂ por exposición al aire no puede considerarse un método de ensayo ya que los tiempos necesarios para obtener espesores medibles representativos pueden superar los 5 años, pero es importante recordar que es un caso de difusión natural que se usa como referencia.

Una vez rota la sección completa, se tiñe con una solución al 1 % de fenolftaleína en agua / alcohol (30 % / 70 %), evitando el escurrimiento superficial de esta solución porque tiene capacidad de tinción. El espesor promedio de aproximadamente 10 – 12 lecturas es indicativo del avance del frente de carbonatación, como se observa en la Fig. 5



Fig. 5: medida del espesor de carbonatación por exposición natural.

Es importante recordar el avance del frente carbonatado es un proceso difusivo cuya velocidad está condicionada por la humedad relativa, siendo máxima para HR en el entorno de 65 %. Las muestras protegidas de la lluvia presentan mayor avance del frente carbonatado que las muestras expuestas a la lluvia. Estas diferencias, así como la HR media del entorno donde se ubicarán las estructuras pueden tener relevancia a la hora de efectuar predicciones de vida útil.

6. MÉTODOS QUE SE APOYAN EN EL TRANSPORTE DE AGUA

El transporte de agua en un medio poroso es más lento que el transporte de un gas, situación que condiciona la practicidad de los métodos que se apoyan en el transporte de agua. Por lo general, la fuerza impulsora del movimiento es la succión capilar, que induce una diferencia de presiones y, en consecuencia, también se trata de medidas de permeabilidad relativa.

El procedimiento de referencia es el ensayo de succión capilar, medido en condiciones de laboratorio, que se conoce como método de Fagerlung y que con mínimas variantes está normalizado en distintos países.

Hay nuevas variantes en desarrollo, pero quizás el método más conocido y que tiene difusión comercial es el denominado ISAT, y que se describe de manera sumaria a continuación:

6.1. Succión capilar – ISAT

El método fue originalmente desarrollado por Glanville en 1931 en el BRE (British Research Establishment), Reino Unido y fue modificado luego por Levitt a comienzos de la década del 70. Es quizás el único método estandarizado para la medida in situ de la velocidad de succión capilar (sorptivity) (BS 1881 part 5) cuyo principio de funcionamiento se esquematiza en la Fig. 6 y la Fig. 7



Fig. 6: Dispositivo comercial para ensayo ISAT.

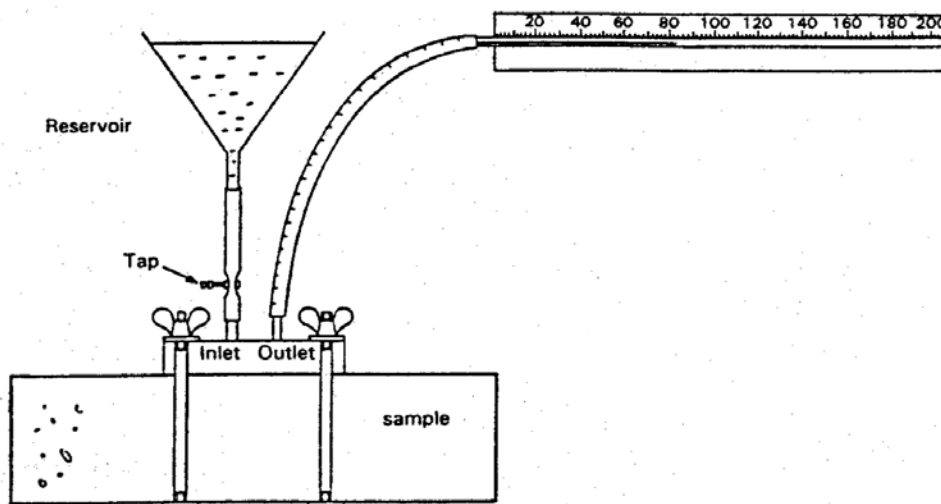


Fig. 7: esquema del ensayo ISAT

Consiste en colocar un cabezal de acrílico sobre la superficie del hormigón y lograr su estanqueidad por medio de una junta tórica (o-ring) y del ajuste adecuado. El reservorio de agua mantiene una presión de aproximadamente 0,02 bares, equivalente a 200 mm de columna de agua.

El agua fluye hasta llenar la cavidad bajo el cabezal de acrílico y alcanza también el tubo capilar adosado al sistema. Luego de 10 minutos en estas condiciones, se cierra la válvula ubicada debajo del reservorio de agua y la velocidad de succión de agua se mide a través de la lectura progresiva del menisco en el capilar. El dato obtenido corresponde a la absorción inicial a los 10 minutos.

La medida se repite a los 30, 60 y 120 minutos contados desde el inicio del ensayo. Entre medida y medida, la válvula del reservorio debe permanecer abierta y se debe reponer el agua para mantener la carga hidráulica en 200 mm.

El cálculo de la velocidad de absorción se realiza empleando la siguiente expresión, ya que está representada por el número de divisiones del capilar que el menisco retrocede en un minuto:

$$ISA = 0,6D / t \quad (4)$$

con D: lectura de meniscos y t: tiempo transcurrido

El valor de succión a los 10 min guarda una correlación razonable con la “sorptivity” medida en el ensayo de Fagerlund, como se ilustra en la Fig. 8, aunque otros autores (ver Montgomery) indican que los valores tempranos, de 10 y 30 min carecen de representatividad para estimar la calidad del hormigón de recubrimiento.

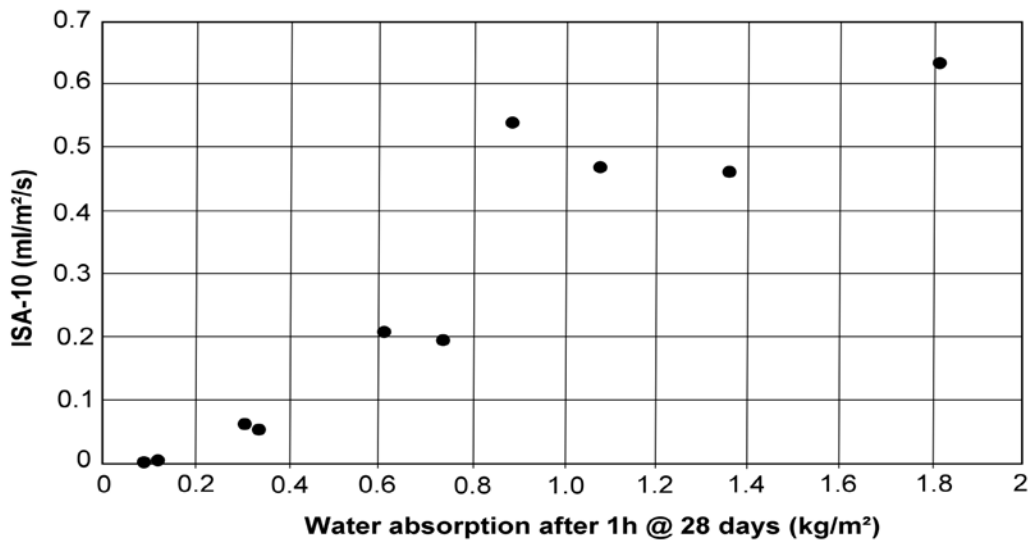


Fig. 8: Correlación entre ISA-10 min y la “sorptivity” a 1 hora (Fagerlund)

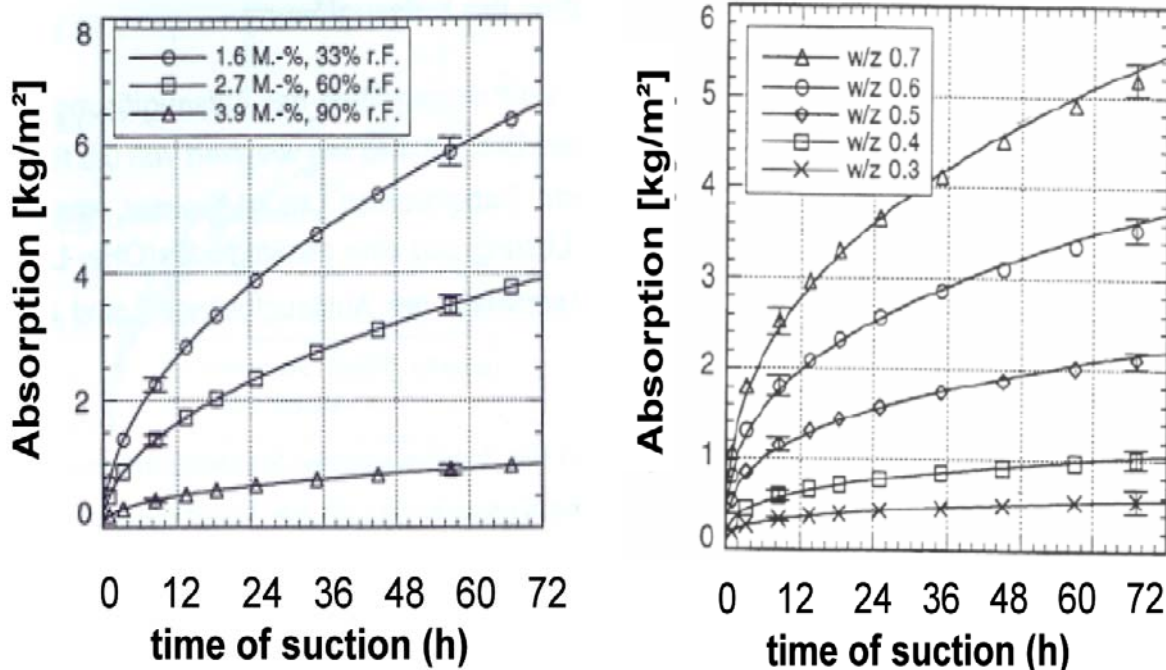
A partir de los resultados de ISA obtenidos a 10 min, 30 min, 60 min y 120 min, es posible calificar la absorción del hormigón (y por consiguiente, la calidad del hormigón de recubrimiento) según se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Clasificación de la absorción capilar según valor de ISAT (ml /m²·s)

Absorción (succión) del Hormigón	Tiempo desde el inicio del ensayo			
	10 min	30 min	60 min	120 min
Alta	> 0.50	>0.35	>0.20	>0.15
Media	0.25-0.50	0.17-0.35	0.10-0.20	0.07-0.15
Baja	<0.25	<0.17	<0.10	<0.07

La succión capilar es fuertemente dependiente del contenido de humedad del hormigón sometido a ensayo, condición que no es sencillo modificar en mediciones in situ.

A medida que el contenido de humedad se aproxima a la saturación, la velocidad de succión va disminuyendo para hacerse “cero”, cuando el hormigón está saturado. La Fig. 9a ilustra la influencia del contenido de humedad sobre la succión capilar mientras que la Fig. 9b ilustra la influencia de la relación a/c sobre la velocidad de succión. De la comparación de ambas figuras se comprende que es necesario conocer el contenido de humedad del hormigón para poder emitir un juicio razonable sobre la calidad del hormigón evaluado.



a) influencia de la humedad relativa

b) influencia de la relación agua/cemento

Figura 9: Influencias sobre la velocidad de absorción capilar

7. MÉTODOS BASADOS EN LA MIGRACIÓN DE IONES

En realidad, el transporte de iones en el hormigón es un proceso bastante complejo, que involucra fenómenos difusivos, succión capilar, flujo convectivo, la presencia eventual de campos eléctricos y que está influenciado por la capacidad de fijación de iones por fenómenos químicos o físicos.

La capacidad de transporte de iones en el hormigón también es una valoración de la durabilidad potencial y tiene la ventaja que la movilidad de los iones puede acelerarse mediante cambios en la concentración (procesos difusivos) o mediante campos eléctricos (electromigración). La medida de la conductividad eléctrica (o su recíproca, la resistividad), también son indicadores de la capacidad de transporte de iones, ya que la conductividad del hormigón es básicamente iónica.

La limitación de cualquiera de estos métodos es que requieren un alto porcentaje de saturación en el hormigón, porque tratándose del movimiento de iones, éste es posible cuando los capilares se encuentran saturados. De hecho, las medidas en laboratorio imponen un precondicionamiento por saturación en vacío.

7.1. Métodos que emplean celdas electrolíticas

En un caso general, el flujo J esta representado por la Eq. 5 que contiene términos asociados con la difusión, la migración y el flujo capilar.

$$J_i = -D_i \left(\frac{\partial C_i}{\partial x} + \frac{z_i F}{RT} c_i \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + cv \quad (5)$$

Donde J = flujo de masa ($\text{g/m}^2\text{s}$)
 D = coeficiente de difusión (m^2/s)
 C = concentración (g/m^3)
 x = distancia (m)
 z = carga eléctrica
 F = Constante de Faraday (J/V mol)
 R = Constante universal de los gases (J/mol K)
 T = temperatura absoluta (K)
 Φ = potencial eléctrico (V)
 v = velocidad del flujo capilar (m/s)

La ventaja de imponer una diferencia de potencial para acelerar el transporte es la fuerte reducción en los tiempos de ensayo. Estas diferencias de potencial se ubican entre 60 V y 12 V para los ensayos más habituales. El esquema de una celda electrolítica se muestra en la Fig. 10.

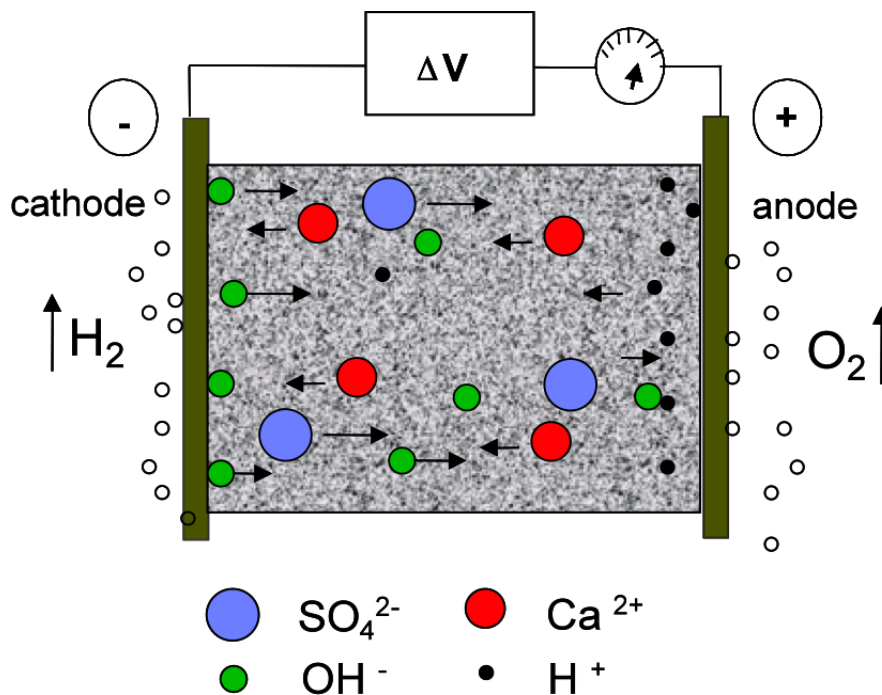


Fig. 10: esquema de celda electrolítica

En el ánodo, la corriente aplicada se consume en la oxidación del ánodo o del electrolito, mientras que en el cátodo, ocurren reacciones de reducción. En ambos electrodos se generan gases (O_2 e H_2) respectivamente.

En el electrolito, los iones se mueven a través de la solución de poros en dirección del electrodo de carga contraria.

La proporción de corriente que transporta un determinado ión respecto del total transportada por todos los iones se conoce como "número de transferencia" de ese

ión en ese electrolito en particular. En lo que respecta al ión Cloruro, su “número de transferencia se expresa como sigue:

$$t_{Cl} = \frac{z F J}{i} \quad (6)$$

Siendo t_{Cl} = Número de transferencia del Cloruro
 z = Carga eléctrica del ión cloruro
 F = Constante de Faraday (C/eq)
 J = Flujo de cloruros ($\text{mol}/\text{cm}^2 \text{ s}$)
 i = Densidad total de corriente (A/cm^2).

Para la aplicación de la ecuación de Nernst-Planck al caso de migración, en hormigones, Andrade sugiere la siguiente simplificación

$$D_a = \frac{JRTI}{zFC\gamma \cdot \Delta E} \quad (7)$$

donde γ es el coeficiente de actividad de la solución y se introduce para corregir las soluciones iónicas concentradas en las que la acción efectiva del ión es sólo una pequeña proporción.

J puede calcularse de un experimento en el que se monitorizan los cloruros con el tiempo. J se calcula de la porción lineal de la gráfica de Concentración de cloruros vs. tiempo.

7.2. Método de ASTM C 1202

Este método también se conoce como “Permeabilidad Rápida al Ion Cloruro”, y se basa en el conteo de coulombs o carga eléctrica que pasa por la celda electrolítica cuando se establece una diferencia de potencial de 60 V durante 6 (seis) horas. La Fig. 11 ilustra un equipo de disponibilidad comercial para el ensayo.



Fig. 11: Equipo disponible comercialmente para el ensayo según ASTM C 1202

En función de la cantidad de carga eléctrica al cabo de las 6 horas, se establece una clasificación, que se muestra en la Tabla 2.

Este ensayo está muy difundido en EEUU y America del norte, como requisito general de durabilidad, pero tiene algunas limitaciones intrínsecas, entre las que puede citarse su excesiva dispersión de resultados, con una reproducibilidad típica de más de 50 % y una repetibilidad del 42 %.

Tabla 2: clasificación de la permeabilidad a los cloruros según ASTM C 1202

Carga que pasa (6 h) (Coulombs)	Permeabilidad a los cloruros	Situación típica para
> 4000	Alta	H° de cemento portland, alta relación a/c (> 0,60)
2000 – 4000	Moderada	H° de cemento portland de moderada a/c (0,40 – 0,50)
1000 – 2000	Baja	H° de cemento portland de baja relación a/c (< 0,40)
100 – 1000	Muy baja	Hormigón modificado con latex o con impermeabilización interna
< 100	Despreciable	Hormigón polímero u Hormigón impregnado con polímero

Otra aspecto que es criticado por algunos investigadores es el excesivo voltaje que se aplica en la celda y a la falta de discriminación sobre los iones movilizados por el campo eléctrico, es decir, capaces de transportar la carga de coulombios que se miden en el ensayo. Adicionalmente, el resultado del ensayo no aporta información sobre los parámetros fundamentales del transporte, en este caso, coeficiente de difusión.

7.3. Método multirégimen

En el método denominado como “multirégimen” también se establece una celda electrolítica pero la diferencia esencial es que se mide la concentración de cloruros en la solución anódica, de manera de cuantificar de manera específica su transporte a través del material. La Fig. 12 ilustra la celda electrolítica de este ensayo

La cuantificación de cloruros puede hacerse por distintos procedimientos, químicos o electroquímicos, lo que permite instrumentar el ensayo e independizarlo del operador.

Como resultado del ensayo, se obtiene un gráfico que representa los milimoles de ión cloruro en el anolito vs. el tiempo, como se ilustra en la Fig. 13. En la misma, se puede distinguir tres períodos: uno inicial, de pendiente creciente, luego un período caracterizado por una pendiente constante y finalmente, un período decreciente, que aporta poca información.

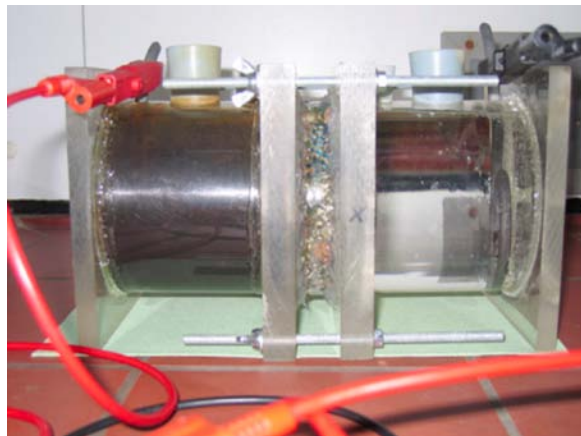


Fig. 12: Celda electrolítica para el ensayo “multirégimen”

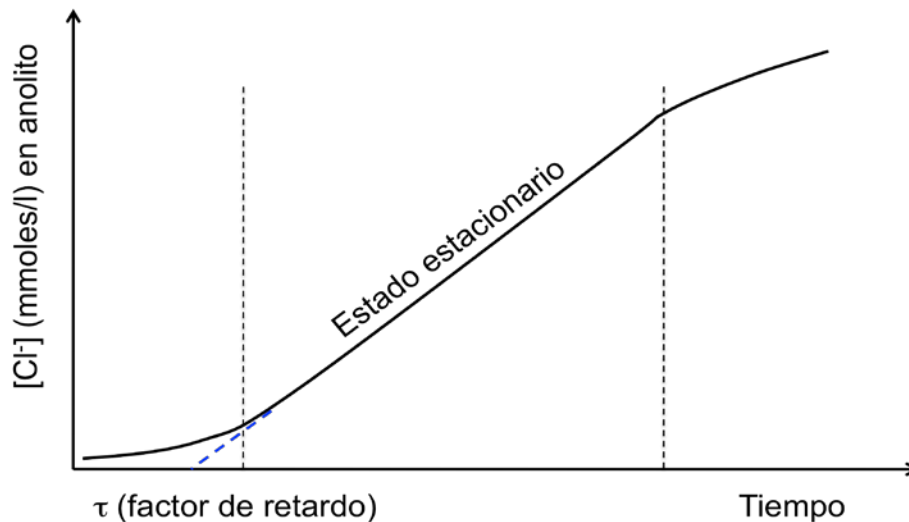


Fig. 13: esquema de datos en el ensayo "Multirégimen"

El período pendiente constante corresponde al "estado estacionario" y de esa información puede conocerse el Coeficiente de Difusión aparente, que caracteriza las propiedades de transporte del medio.

La respuesta inicial, de pendiente creciente, se asocia con la capacidad del material para "fijar" o "retener" iones cloruros, ya sea por procesos químicos o físicos. El efecto, en términos prácticos, corresponde a un "retardo" en alcanzar el régimen estacionario y, en consecuencia, el tiempo que se obtiene por intersección de la prolongación del período estacionario con el eje del tiempo se conoce como "factor de retardo" y es otra característica distintiva del método.

El ensayo finaliza cuando hay evidencias claras que se ha alcanzado el último período y el tiempo necesario depende del tipo de muestra. En general, 2 semanas es un tiempo suficiente para la mayoría de los casos.

El coeficiente de difusión en estado estacionario, D_s , se calcula a partir de la ecuación de Nernst-Planck modificada, indicada como Ec. 8.

$$D_s = \frac{J_{Cl} RTl}{z F C_1 \gamma \Delta \Phi} \quad (8)$$

$$J = \frac{(mmol_{ssf} - mmol_{ssi}) 1E - 3}{St_{ss(f-t)}} \quad (9)$$

donde:

J: es el flujo de cloruros a través de la muestra en el período estacionario ($mol/cm^2 \cdot s$)

S : es la superficie transversal de la muestra expuesta a los iones cloruros (cm^2)

t: tiempo (s) de duración del período estacionario.

También es posible calcular el coeficiente de difusión en estado transitorio (o no estacionario), como puede consultarse en (Referencia de multirégimen).

8. MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

En un hormigón saturado, el agua líquida presente en los poros se encuentra saturada en iones y entonces los parámetros de porosidad del hormigón (porosidad,

distribución del tamaño de poros y su conectividad) son factores determinantes de su resistividad.

Por ello, la medida de la resistividad del hormigón saturado puede aportar información acerca de su calidad [Wilkins, N. J. (1982)], en particular, relativa a parámetros vinculados con la durabilidad, y que la porosidad, distribución de tamaño de poros y su conectividad son determinantes de todos los fenómenos de transporte. Existe una vinculación directa entre la resistividad y el coeficiente de difusión, conocida como Relación de Einstein, que se muestra en la Ec. 10.

$$D_{eff} = \frac{k_{cl}}{\rho_{sat}} = k_{cl} \cdot \sigma \quad (10)$$

D_{eff} = Coeficiente de difusión efectivo para los iones cloruro en solución

k_{cl} = parámetro experimental que depende de la concentración

ρ_{sat} = resistividad del hormigón saturado

σ = conductividad del hormigón saturado

8.1. Factores que inciden sobre la resistividad eléctrica

Como ya se indicó, la capacidad de un hormigón de conducir electricidad se manifiesta a través del movimiento de los iones presentes en la solución de poros. Por este motivo, el grado de saturación es el factor más importante a tener en cuenta. En condiciones de laboratorio siempre se mide sobre muestras saturadas.

La medida también es sensible al grado de hidratación y a la relación agua/cemento empleada en la elaboración del hormigón. En realidad, estos factores determinan la estructura de poros del hormigón y condicionan la resistividad eléctrica.

La composición química, tipo de cemento y la presencia de adiciones también aportan una importancia significativa sobre la resistividad eléctrica, que es evidente cuando se analizan los valores típicos que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: Resistividad típica (Ohm.m) para distintas condiciones de exposición y tipo de cemento (o cemento más adición)

Condición de exposición	Hormigón de cemento portland (CPN)	Hormigón de cemento con Escoria de AH (>65 %) o Ceniza volante (>25 %) o Humo de Sílice (>5 %)
Muy húmedo, sumergido, zona de salpicaduras o cámara húmeda	50 - 200	300 - 1000
Al exterior, expuesto	100 - 400	500 - 2000
Al exterior, protegido de la lluvia, recubierto, hidrofobado, no carbonatado (20°C / HR 80 %)	200 - 500	1000 - 4000
Idem + carbonatado Ambiente interior (carbonatado) (20°C / HR 50 %)	1000 y superior 3000 y superior	2000 - 6000 y superior 4000 - 10000 y superior

A los efectos de medir la resistividad en espesores compatibles con los recubrimientos usuales, deben emplearse métodos con dos o cuatro electrodos, según la configuración de Wenner (método de las 4 puntas), como se ilustra en la Fig. 14.

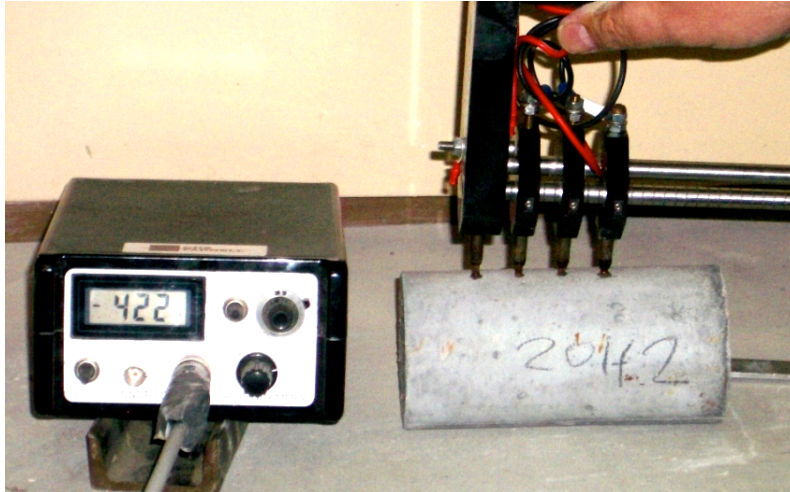


Fig. 14: medida de la resistividad eléctrica con método de las 4 puntas

Para el cálculo de la resistividad debe tenerse en cuenta la configuración de los electrodos y la geometría de la muestra. Para 4 electrodos separados regularmente una distancia “a”, la resistividad aparente se expresa como:

$$\rho_{app} = 2\pi a \frac{\Delta V}{i} \quad (11)$$

siendo ΔV la diferencia de potencial entre los electrodos internos e i la intensidad de corriente.

La Ec. (o) es válida para sustratos semiinfinitos. Para medios finitos, como las muestras cilíndricas medidas sobre su generatriz, se define al coeficiente de forma y tamaño como se muestra en la Ec. ρ

$$K = \rho_{app} / \rho \quad (12)$$

El valor de este coeficiente, para muestras cilíndricas medidas con los electrodos alineados con una generatriz, puede obtenerse del ábaco provisto por Morris et al. que se muestra en la Fig. 15.

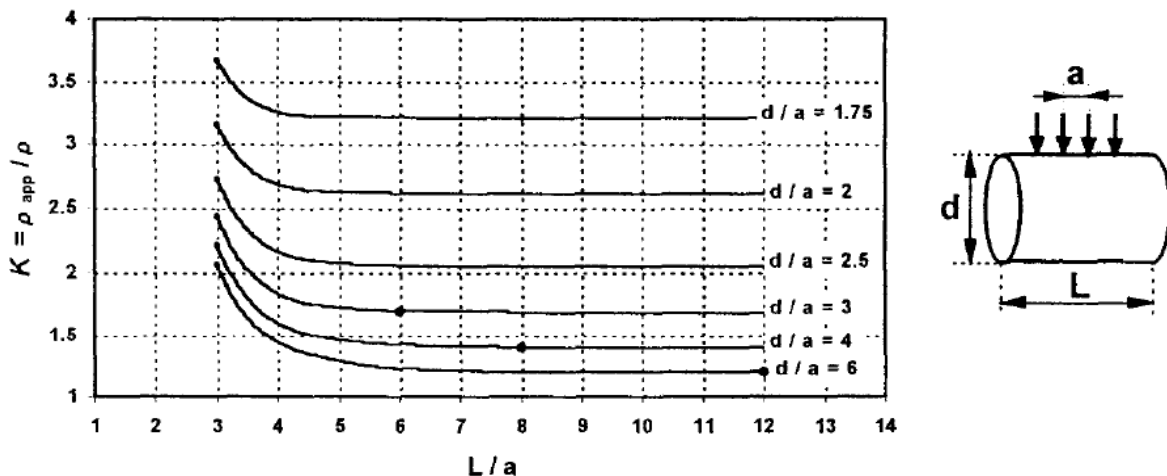


Fig. 15: Ábaco para la estimación del factor K de forma y tamaño

Un aspecto importante a destacar es la gran influencia del grado de saturación del hormigón sobre el valor de la resistividad eléctrica. A medida que el hormigón se seca, el incremento de resistividad puede superar 2 y hasta 3 órdenes de magnitud,

como se muestra en la Fig. 16. Esta circunstancia impone una fuerte limitación al empleo de la medida de la resistividad eléctrica para caracterizar la calidad del recubrimiento in situ.

Los procedimientos de medida de la resistividad están normalizados por AENOR y existen recomendaciones de RILEM al respecto.

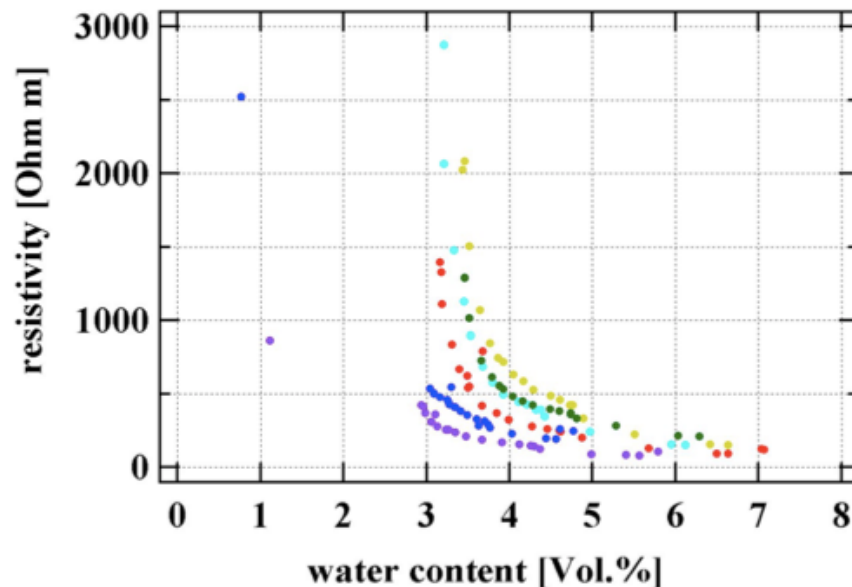


Fig. 16: Influencia del contenido de humedad sobre la resistividad eléctrica del hormigón.

9. COMENTARIOS FINALES

La valoración de la calidad del hormigón de recubrimiento, unida a la medida de los espesores efectivos de recubrimiento, constituyen las herramientas más confiables para la aplicación de criterios prestacionales en el diseño de hormigones por durabilidad.

El continuo avance de los procedimientos y técnicas de medida, así como las posibilidades de monitoreo a distancia de diferentes tipos de medida brindan posibilidades no previstas hasta el presente para asegurar la calidad de las nuevas estructuras.

10. REFERENCIAS

Nota: se indican referencias generales que permiten complementar la información incluida en este trabajo.

Kollek, J. J., CEMBUREAU Recommendation, "The determination of the permeability of concrete to oxygen by the Cembureau methods – a recommendation", *Materials and Structures*, 1989, 22, 225-230.

Whiting, D., "Rapid determination of the chloride permeability of concrete", Report No. FHWA/RD-81/119, Federal Highway Administration, Washington DC, 1981. 5.25 ASTM C1202-05, "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration"

Andrade, C., "Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements". *Cement and Concrete Research*, 23, (3) (1993) 724-742.

Castellote M., Andrade C., Alonso C.: "Measurement of the steady and non-steady state chloride diffusion coefficients in a migration test by means of monitoring the conductivity in the anolyte chamber. Comparison with natural diffusion tests". *Cement and Concrete Research*, 31 (2001) 1411-1420.

Mehta, P.K., "Durability - critical issues for the future", *Concrete International.*, July 1997, pp.27-33.

Neville, A., "Maintenance and durability of structures", *Concrete International.*, Nov. 1997, pp.52-56.

Peacock, W.J., "The maintenance of buildings and structures - the problem, some causes and remedies", Proceedings of Thomas Telford Seminar, 'Improvement in concrete durability', Institution of Civil Eng's., London, May 1985, pp. 131-161.

Browne, R., "Durability of reinforced concrete structures", New Zealand Concr. Constr., Sept. 1989, pp. 2-10 and Oct. 1989, pp. 2-11.

Vanier, D.J., "Why industry needs asset management tools", NRCC Seminar Series 'Innovations in Urban Infrastructure', 1999, pp. 11-25

Hoff, G.C., "Integrating durability into the design process" , 'Controlling concrete degradation', Ed. R.K. Dhir and M.D. Newlands, Thomas Telford, London, 1999, pp. 1-14

Coppola L., "Concrete durability and repair technology", 5th CANMET/ACI Intern. Conf. On 'Durability of Concrete', Barcelona, Spain, 4-9 June 2000, pp. 1209-1220.

Calavera Ruiz, J., "Patología de estructuras de hormigón armado y pretensado", INTEMAC Eds., Madrid, 1996.

De Sitter, W.R., "Costs for service life optimization: The Law of Fives", 'Durability of Concr. Struct.', Workshop Report, Ed. S. Rostam, Copenhagen, 18-20 May, 1984, pp. 131-134.

Kreijger, P.C., "The skin of concrete: composition and properties". Mater. & Struct., v17, n100, 1984, pp. 275-283.

Dewar, J.D., Proceedings of Thomas Telford Seminar, 'Improvement in concrete durability'., Institution of Civil Eng's., London, May 1985.

Mayer A., "The importance of the surface layer for the durability of concrete structures", ACI SP-100, V.1, 1987, pp. 49-61.

Newman, K., "Labcrete, realcrete, and hypocrete. Where we can expect the next major durability problems", ACI SP-100, V.2, 1987, pp. 1259-1283.

Neville A. "Concrete cover to reinforcement – or cover up?", Concrete International., v.20, n.11, Nov. 1998, pp. 25-29.

"CEB-FIP Model Code 1990", Final Draft, CEB Bulletin d'Information 203-205, Lausanne, July, 1991.

Owens, P. and Newman, J., "The future specification of cement type, class and water/cement ratio", Concrete, March 2004, pp. 46-49.

EHE, "Instrucción de Hormigón Estructural", Comisión Permanente del Hormigón, Madrid, 2000, 476p.

Kropp, J. and Hilsdorf, H.K. (Eds.), "Performance criteria for concrete durability", RILEM Report 12, TC 116-PCD, E&FN SPON, London, 1995.

Alexander M.G., Mackechnie, J.R. and Ballim, Y., "Guide to the use of durability indexes for achieving durability in concrete structures", Research Monograph, No. 2, Univ. Cape Town and Witwatersrand, South Africa, 1999.

Alexander, M.G., "Towards a performance specification for reinforced concrete, based on durability indexes". Proc. Intern. Conf. on Performance of Construction Materials, Cairo, 2003, pp. 837-846.

Torrent, R.J., " Towards a performance-based specification and conformity control of durability", Proc. fib Symp. 'Structural Concrete and Time', La Plata, Argentina, 28-30 Sept., 2005, v. 1, pp. 267-274.

M. Romer, L. Fernández Luco, RILEM TC 189-NEC "Non-destructive evaluation of the concrete cover": Comparative test - Part I: Comparative test of 'penetrability' methods - Part II: Comparative test of 'Covermeters', Materials and Structures, v. 38, n. 284, Dec. 2005, pp. 895 - 911.

UNE 83988-2 Durabilidad del Hormigón. Método de ensayo. Determinación de la resistividad eléctrica – Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner.

SIA 262/1: 2013 Obras de Construcción – Especificaciones complementarias

Torrent, R., Fernandez Luco, L, RILEM Report 40 – TC 189 Non-destructive Evaluation of Covercrete Final Report (ISBN: 978-2-35158-054-7), 2007.
