

Medición "in situ" de la permeabilidad al aire del hormigón: status quo

Concrete air permeability "in situ" test: status quo

Luis Ebensperger*, Roberto Torrent**¹

* Consultor en Hormigón y sus Componentes, Buin. CHILE

** Materials Advanced Services SRL, Buenos Aires. ARGENTINA

Fecha de recepción: 01/ 10/ 2010

Fecha de aceptación: 01/ 11/ 2010

PAG. 371 - 382

Resumen

Los autores han estado involucrados en la creación y primeros ensayos y desarrollos del llamado "Método Torrent" para medir la permeabilidad al aire del hormigón. Transcurridos más de 15 años de ese trabajo fundacional, el artículo presenta una revisión de la evolución y estado de situación del método, incluido como Norma Oficial Suiza en 2003. Se presentan ejemplos de su aplicación en laboratorio y en obras (puentes, túneles, etc.), con datos de valores medidos, provenientes de distintos países del mundo. Se presentan correlaciones entre el coeficiente de permeabilidad al aire kT y otros indicadores de durabilidad, tales como la migración de cloruros (ASTM C1202) y la penetración de agua a presión (EN 12390-8) o por capilaridad. Finalmente se discuten sus perspectivas de uso futuro, como herramienta de control de calidad de estructuras nuevas, con las importantes implicancias que ello acarreará, así como de diagnóstico de estructuras existentes.

Palabras Clave: Hormigón, método Torrent, permeabilidad

Abstract

The authors have been involved in the creation, preliminary tests and development of the "Torrent Method", which is intended to test air permeability in concrete. It's been more than 15 years since such foundational research and, now, this paper presents a review of the evolution and current situation of the Method, included in the Switzerland standards in 2003. Application examples conducted in laboratory and civil works (bridges, tunnels, and so on) are introduced, including data from different countries worldwide. Correlations between the air permeability coefficient kT and other durability indicators, such as chloride migration (ASTM C1202), penetration of water under pressure (EN 12390-8) or capillary action are presented. Finally the future prospective uses are discussed, as quality control tool for new structures, considering relevant implications they would lead to, as well as the diagnosis on existing structures.

Keywords: Concrete, Torrent method, permeability

1. Introducción

Los problemas de durabilidad - más frecuentes de lo que sería deseable - que se encuentran en estructuras de hormigón, asociados principalmente a la depasivación y corrosión de las armaduras, al ataque químico (p.ej. por sulfatos) y a los ciclos de congelación y deshielo, han puesto en tela de juicio los enfoques tradicionales para la especificación y control de las estructuras de hormigón.

En tanto que la capacidad portante de un elemento estructural es la resultante de su comportamiento integral, su durabilidad frente a acciones agresivas del medio ambiente depende básicamente del desempeño protector de una capa superficial relativamente delgada (20-50 mm), como se ilustra en la Figura 1.

1. Introduction

The more frequent than expected durability problems found in concrete structures, mainly due to reinforcement depassivation and corrosion, chemical attack (e.g. sulfate attack), frost and thaw cycles, have questioned traditional approaches on specification and control of concrete structures.

Whilst the bearing capacity of a structural element is the result of its integral behavior, its durability against aggressive environment conditions basically depends on its protective cover performance, which is relatively thin (20-50 mm), as depicted in Figure 1.

¹ Autor de correspondencia / Corresponding author:

E-mail: roberto.torrent@holcim.com



Esta capa de recubrimiento debe proteger a las armaduras contra la corrosión inducida por la carbonatación o por ingreso de cloruros, y es también la más afectada por ataques químicos, congelación, etc. Lamentablemente, por ser la zona de más difícil compactación o por recibir las tareas de acabado y por ser la más expuesta a las consecuencias del mal hábito de no curar las estructuras, esta vital capa superficial suele ser la de peor calidad en el elemento estructural.

This cover layer must protect reinforcement against corrosion induced by carbonation or chlorides and is also the most affected by chemical attacks, frost damage, etc. Unfortunately it is the most affected by bad compaction, finishing and curing practices. Therefore, such essential surface layer turns out to be the one of poorest quality in the whole structural element.

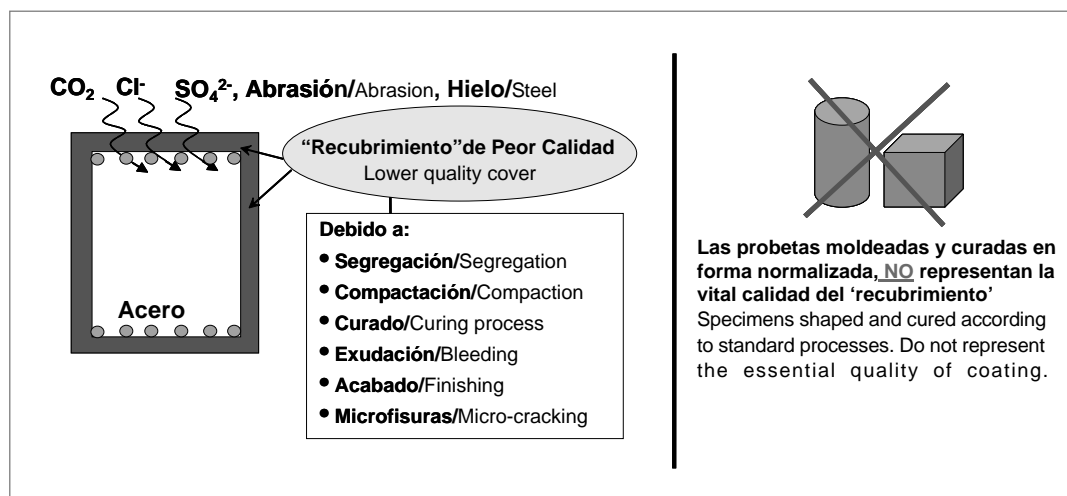


Figura 1. Concepto de Hormigón Superficial (Recubrimiento)
Figure 1. Surface Concrete Concept (Coating)

Los criterios clásicos de especificación y control del hormigón endurecido se basan casi exclusivamente en resultados de ensayos de probetas moldeadas y, especialmente en el caso de la durabilidad, en fijar límites máximos a la relación agua/cemento.

Está claro porqué ese enfoque ha fracasado en garantizar la durabilidad: los resultados de las probetas moldeadas nunca pueden representar la calidad de la capa superficial, porque se preparan y curan de una manera totalmente diferente a las condiciones reales en la estructura. Por otro lado, la relación agua/cemento es de difícil verificación en la práctica y últimamente ha sido cuestionada como indicador de durabilidad.

Así, la calidad real de esa capa vital es ignorada lo que explica, en gran medida, el desempeño insatisfactorio de muchas estructuras, desde el punto de vista de su durabilidad. La noción del hormigón de recubrimiento, que posee composición y propiedades diferentes a las del que se encuentra en el núcleo de las estructuras data de los años '80 (Kreijger, 1986; Newman,

The classic hardened concrete specifications and control criteria are almost exclusively based on results from cast test specimens and, specially as far as durability is concerned, by establishing maximum limits to the water/cement ratio.

It is now clear why this approach has failed in guaranteeing durability: the results of fast test specimens could never represent the surface layer quality, because those are prepared and cured in a very different way from the structure actual conditions. On the other hand, the water/cement ratio is hard to verify in practice and, later, it has been questioned as a durability indicator.

So, the actual quality of such essential layer is ignored, which explains to a great extent the unsatisfactory performance of several structures, from a durability point of view. The basic knowledge that cover concrete, having different properties than those in the center of the structure, goes back to the 80's (Kreijger, 1986; Newman,

1987; Meyer, 1987) y fue incorporada al Código Modelo (CEB-FIP, 1990), que expresaba en 1990 (traducción del inglés):

"No existe un método de aceptación general para caracterizar la estructura de poros del hormigón y relacionarla con su durabilidad. Sin embargo, diversas investigaciones han indicado que la permeabilidad del hormigón, al aire o al agua, es una excelente medida de su resistencia al ingreso de medios agresivos en el estado gaseoso o líquido y así constituye una medida de la durabilidad potencial de un hormigón dado."

"Actualmente no existen métodos de aceptación general para una determinación rápida de la permeabilidad del hormigón ni de valores límites de la permeabilidad del hormigón expuesto a diversas condiciones ambientales. Sin embargo es probable que se disponga de tales métodos en el futuro, lo que permitirá clasificar al hormigón en base a su permeabilidad. Entonces podrán postularse requisitos para la permeabilidad del hormigón; ellos dependerán de las condiciones de exposición a que esté sometida la estructura."

"Aunque el hormigón de mayor resistencia será en la mayoría de los casos más durable que el hormigón de menor resistencia, la resistencia a compresión 'per se' no es una medida completa de la durabilidad, porque ésta depende principalmente de las propiedades de las capas superficiales de un elemento de hormigón, las que ejercen sólo una influencia limitada sobre la resistencia a compresión."

La calidad del recubrimiento es el resultado, por un lado, de la dosificación de la mezcla elegida y, por el otro, del cuidado con el que el hormigón ha sido procesado (colocado, compactado, acabado, curado, etc.). Resulta obvio entonces que los ensayos sobre probetas moldeadas, que son procesadas de una manera completamente diferente a los elementos estructurales, no darán jamás una imagen realista y representativa de la calidad real del recubrimiento. Por lo tanto, la única posibilidad es medirla directamente en la estructura, preferentemente "in situ" con métodos no-destructivos o sino sobre testigos extraídos de ella.

El llamado "Método Torrent" para medir, de modo enteramente no-destructivo, la permeabilidad al aire del recubrimiento apunta exactamente a eso: a especificar y controlar la calidad del recubrimiento de la estructura terminada.

Transcurridos unos 18 años de su creación, el artículo presenta una revisión de la evolución y estado de situación del método, incluido como Norma Oficial Suiza en 2003.

1987; Meyer 1987) and was included by the Model Code (CEB-FIB, 1990), which in 1990 quoted:

"There is no generally accepted method to characterize the pore structure of concrete and to relate it to its durability. However, several experimental investigations have indicated that concrete permeability both with respect to air and to water is an excellent measure for the resistance of concrete against the ingress of aggressive media in the gaseous or in the liquid state and thus is a measure of the potential durability of a particular concrete."

"There are at present no generally accepted methods for a rapid determination of concrete permeability and of limiting values for the permeability of concrete exposed to different environmental conditions. However, it is likely that such methods will become available in the future allowing the classification of concrete on the basis of its permeability. Requirements for concrete permeability may then be postulated; they would depend on exposure classes i.e. environmental conditions to which the structure is exposed."

"Though concrete of a high strength class is in most instances more durable than concrete of a lower strength class, compressive strength per se is not a complete measure of concrete durability, because durability primarily depends on the properties of the surface layers of a concrete member which have only a limited effect on concrete compressive strength."

The quality of cover concrete is the result, on one hand, of the chosen mix design and, on the other hand, the care applied during concrete processing (placement, compaction, finishing, curing, etc.) Then, it is obvious that cast test specimens, processed under very different conditions from those in structural elements, would never provide a real and representative picture of the cover concrete real quality. Therefore, the only possibility is to measure it directly on the structure, preferably "in situ" by using non-destructive methods or on cover drilled from it.

The so called "Torrent Method" employed to measure cover concrete air permeability, in a completely non-destructive way, aims directly to it: to specify and control the cover concrete quality in a finished structure.

18 years from its creation, this paper presents a review on shows the method's evolution and current situation, included as a Switzerland Standard Method in 2003.



2. Descripción del “método torrent”

La disposición del instrumental del aparato se esquematiza en la Figura 2. Sus dos características distintivas son:

- a) una celda con doble cámara, basada en el principio del anillo de guarda. Consiste en una cámara interna *i* y una cámara externa *e*.
- 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 como sigue: con la válvula 1 cerrada y la 2 abierta, se crea vacío en ambas cámaras mediante la bomba. 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 Figura 2) 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.

2. “Torrent method” description

The layout of the device is sketched in Figure 2. Its two distinctive characteristics are:

- a) A double-chamber cell, based on the guard-ring principle. It consists of an internal chamber *i* and an external chamber *e*.
- b) A membrane pressure regulator, which function is to always keep both chambers at the same pressure ($P_i = P_e$).

This device operates as follows: valves 1 is closed and valve 2 is opened creating a vacuum inside both chambers by means of vacuum pump. When pressure P_i drops to ~30 mbar then valve 2 closes, from this moment the pump can only work (when the regulator allows it) on the external chamber, so as to equilibrate at any moment the pressure in both chambers. In this way the excess of air indirectly entering the external chamber will be evacuated by the external chamber. Thus, a basically unidirectional air flow into the central chamber is achieved (see flow lines in Figure 2), and not affected by the ingress of spurious air because of a deficient sealing of the external chamber or through the most permeable surface “skin”.

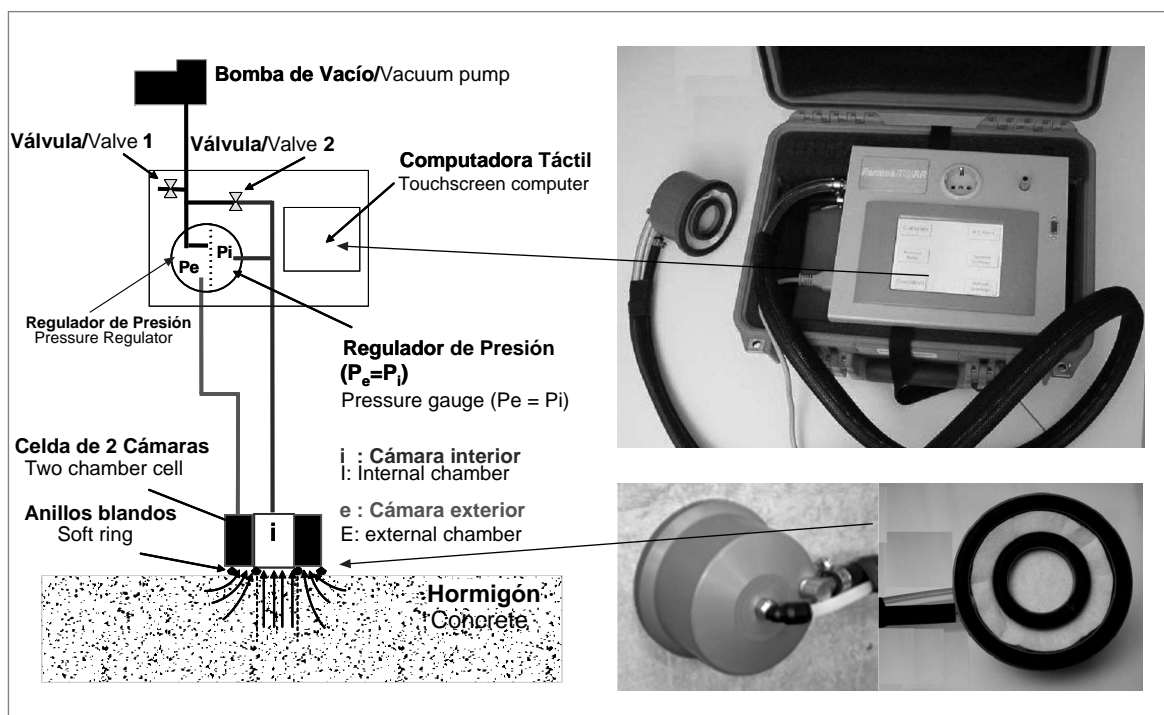


Figura 2. Esquema y detalles del Método Torrent
Figure 2. Scheme and Details of Torrent Method

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 360 s desde el comienzo del ensayo. Así, dependiendo de la permeabilidad del hormigón, el ensayo puede durar de 2 a 12 minutos. 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.

Dado que en este método la geometría del problema está bien definida, mediante un modelo teórico es posible calcular el coeficiente de permeabilidad, tal como se describe en (Torrent y Frenzer, 1995), aplicando la Ecuación 1.

El conocimiento de kT permite estimar la profundidad de hormigón afectada por el ensayo, que también es indicada por el equipo.

La permeabilidad al aire kT es muy sensible a la microestructura del hormigón de recubrimiento, abarcando unos 6 órdenes de magnitud (0.001 a $100 \cdot 10^{-16} m^2$). La Tabla 1 muestra la clasificación de la permeabilidad del hormigón (con edades entre 28 y 180 días) en función de kT .

The evolution of P_i Pressure is measured after 60 sec. by a pressure gauge commanded by a microprocessor with a built chronometer. The microprocessor stores the information and automatically calculates the air permeability coefficient value kT (m^2), that is displayed at the end of the test. The end of the test occurs when the pressure of internal chamber P_i rises by 20 mbar or, in cases of highly permeable concrete, after 360 s. from the beginning of the test. Consequently, depending on the concrete permeability, the test may take from 2 to 6 minutes. The microprocessor is well able to store tests' data and the information can be sent to a PC for further analysis and file.

The function of valve 1 is to restore the system for a new test by ventilating it with air at atmospheric pressure.

Since the problem geometry of the method is well defined, by means of a theoretical model, it is possible to calculate the permeability coefficient by means of equation 1, as described in (Torrent and Frenzer, 1995).

The kT knowledge allows the estimation of concrete depth affected by the test, which is also indicated by the device.

The air permeability kT is very sensitive to the cover concrete microstructure, comprising some 6 orders of magnitude (0.001 to $100 \cdot 10^{-16} m^2$). Table 1 shows the classification of concrete permeability (ages from 28 to 180 days) in function of kT .

$$k_T = \left(\frac{V_c}{A} \right)^2 \frac{\mu}{2\varepsilon p_a} \left(\frac{\ln \left(\frac{p_a + p}{p_a - p} \frac{p_a - p_o}{p_a + p_o} \right)}{\sqrt{t} - \sqrt{t_o}} \right)^2 \quad (1)$$

donde:

kT : coeficiente de permeabilidad al aire [m^2]

V_c : volumen de la cámara interior [m^3]

A : área de la cámara interior [m^2]

μ : viscosidad dinámica del aire [Ns/m^2]

ε : porosidad del hormigón [-]

p_a : presión atmosférica [N/m^2]

p_o : presión en la cámara interior al inicio del ensayo ($t_o = 60$ s) [N/m^2]

p : presión en la cámara interior al final del ensayo ($t \leq 360$ s) [N/m^2]

Where:

kT : coefficient of air permeability [m^2]

V_c : volume of inner chamber [m^3]

A : surface area of inner chamber [m^2]

μ : dynamic viscosity of air [Ns/m^2]

ε : porosity of concrete [-]

p_a : atmospheric pressure [N/m^2]

p_o : inner chamber pressure at initiation of test ($t_o = 60$ s) [N/m^2]

p : inner chamber pressure at end of test ($t \leq 360$ s) [N/m^2]

Tabla 1. Clasificación de la permeabilidad del hormigón en función de kT
 Table 1. Classification of concrete permeability in function of kT

Class	kT (10 ⁻¹⁶ m ²)	Permeability
PK1	< 0.01	Very Low
PK2	0.01 - 0.1	Low
PK3	0.1 - 1.0	Moderate
PK4	1.0 - 10	High
PK5	>10	Very High

3. Hitos en el desarrollo, aplicación y normalización del método

3. Milestones in the development, application and standardization of the method

Año/Year	Evento/Event	Ref.
1990	Torrent desarrolla el método en "Holderbank Management & Consulting Ltd." (HMC), Suiza, construyendo el 1° prototipo Torrent develops the method at "Holderbank Management & Consulting Ltd." Switzerland, creating the first prototype	Torrent (1992)
91-93	Torrent y Ebensperger (HMC) desarrollan un exhaustivo programa de ensayos de laboratorio, financiado por el Departamento Federal de Rutas Suizo, evaluando el desempeño de un mejorado 2° prototipo. Primeras pruebas tentativas "in situ". Propuesta de combinar el método con la medición de resistividad eléctrica. Torrent and Ebensperger (HMC) develop an exhaustive laboratory tests program, financed by the Swiss Roads Federal Department, evaluating the improved performance of a second prototype. First preliminary "in situ" tests. Proposal of combining the method with an electric resistivity measurement.	Torrent y Ebensperger (1993)
1993	Proceq S.A. desarrolla un 3° prototipo con vistas a su comercialización Proceq S.A. develops a third prototype intended for comercialization.	
93-95	Torrent y Frenzer (HMC) desarrollan un programa de ensayos en obra (túnel y varios puentes), financiado por el Departamento Federal Vial Suizo, usando el 2° y 3° prototipo. La fórmula definitiva para calcular la permeabilidad es mejorada y se perfecciona el uso combinado con la resistividad eléctrica mediante un nomograma Torrent and Frenzer (HMC) develop a test program in job sites (tunnels and several bridges) financed by the Swiss Road Federal Department, employing prototypes 2 and 3. The final permeability calculation formula is improved and also the combined use with the electric strength is improved by means of a Nomograph.	Torrent y Frenzer (1995)
1995	Proceq S.A. lanza al mercado un producto comercial en base al 3° prototipo designado "Torrent Permeability Tester" Proceq S.A. launches into the market a commercial product based on the third prototype named "Torrent Permeability Tester"	
2003	Normalización del método en Suiza: SIA 262/1-E: "Permeabilidad al aire en las estructuras" Regulation of the method in Switzerland: SIA 262/1-E, "Air Permeability in Structures"	SIA 262/1, 2003
2004	Primera aplicación para medir la permeabilidad de rocas First application able to measure rocks permeability.	Bueno, 2004
2005	Recomendación RILEM 189-NEC. Mejor desempeño en un ensayo comparativo con otros métodos RILEM 189-NEC Recommendation. Improved performance of a comparative test using other methods.	Romer, 2005
2008	Materials Advanced Services S.R.L. lanza al mercado un instrumento de última generación designado "Permea-TORR" Material Advanced Services S.R.L. launches into the market a state of the art device named "Permea-TORR"	
	Más de 80 publicaciones referidas a aplicaciones del "Método Torrent" en 15 países More than 80 publications referred to Torrent Method applications in 15 countries	Torrent, 2008 ^a



4. Correlación con otros ensayos de transporte

Torrent (2008b), efectuó una detallada revisión de la literatura, extrayendo datos comparativos de kT y de otros métodos reconocidos para medir fenómenos de transporte a través del hormigón.

Las Figuras 3 a 7 muestran los resultados obtenidos; información sobre las fuentes pueden encontrarse en (Torrent, 2008^a y 2008b).

4. Correlation with other transport tests

Torrent (2008b) conducted a detailed literature review, extracting comparative data from kT and from other well known methods employed to measure transport phenomena in concrete.

Figures 3 to 7 show the obtained results. Further information on the sources can be found in (Torrent, 2008a and 2008b).

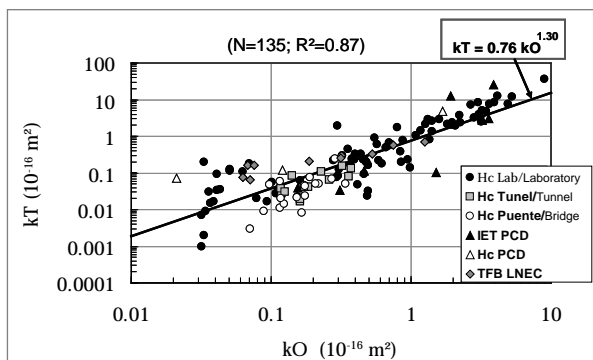


Figura 3. Correlación entre kT y la permeabilidad al oxígeno (Recomendación RILEM PCD-116)
 Figure 3. Correlation between kT and oxygen permeability (Recommendation RILEM PCD-116)

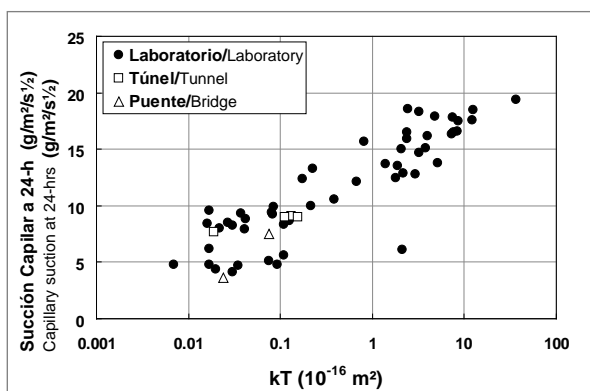


Figura 4. Correlación entre kT y el coeficiente de succión capilar a 24 h (SIA 262/1A)
 Figure 4. Correlation between kT and the capillary suction coefficient at 24-hrs (SIA 262/1A)

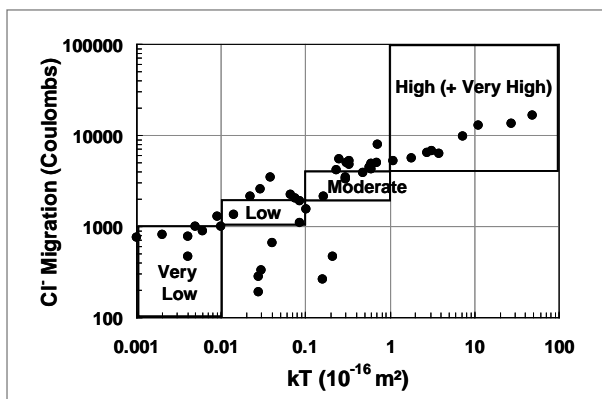


Figura 5. Correlación entre kT y la migración de cloruros (ASTM C1202)
 Figure 5. Correlation between kT and chloride migration (ASTM C1202)

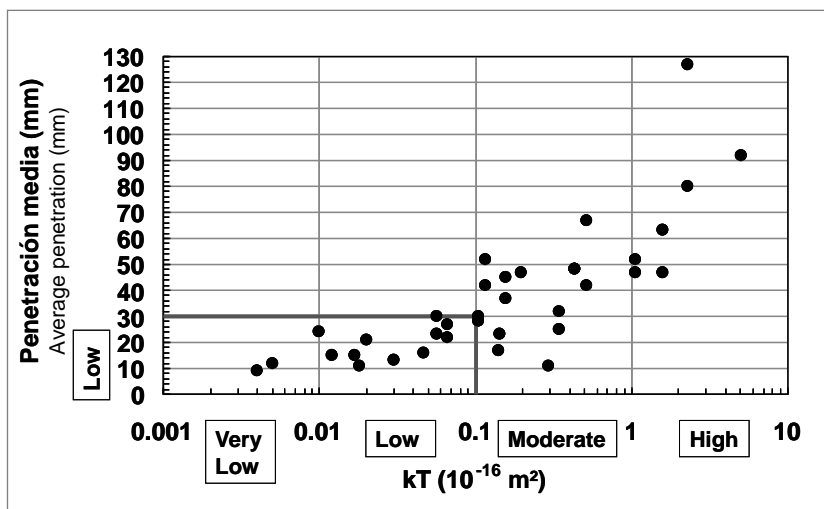


Figura 6. Correlación entre kT y la penetración de agua bajo presión (EN12390-8 / DIN1048)
 Figura 6. Correlation between kT and water penetration under pressure (EN12390-8/DIN1048)

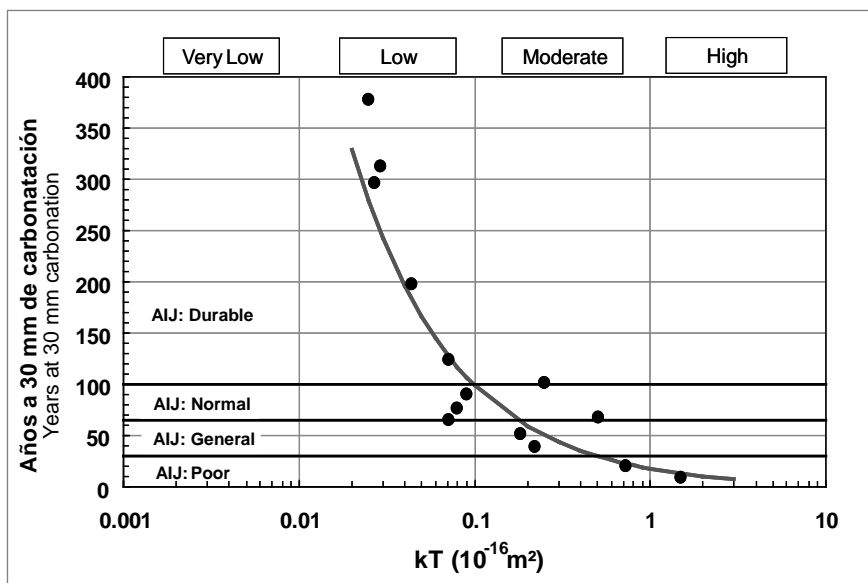


Figura 7. Correlación entre kT y la edad para alcanzar 30 mm de carbonatación, extrapolada en base a ensayos a 4 años con la ley de la raíz cuadrada
 Figura 7. Correlation between kT and the age required to reach 30 mm carbonation, extrapolated according to 4 years-old tests with the square-root law

Aparte de la buena correlación existente, remarcable dada la diversidad de mecanismos de transporte involucrados y la diversidad de fuentes de datos, es interesante notar que las clases de permeabilidad basadas en kT (ver Tabla 1) se corresponden bastante bien con las establecidas en la Norma ASTM C1202 (Figura 5), con la Norma EN 12390-8 (Figura 6) y con las AIJ, establecidas en las normas japonesas (Figura 7).

Se puede concluir, entonces, que el valor de kT es un buen indicador de durabilidad frente a la penetración de agentes agresivos a las estructuras.

Besides the good existing correlation, remarkable considering the diversity of transport mechanisms involved and the wide diversity of data sources, it is important to highlight that the permeability classes based on kT (see Table 1) correspond quite well with the ones established by the Standard ASTM C1202 (Figure 5), Standard EN 12390-8 (Figure 6) and with the AIJ, established by the Japanese Standards (Figure 7).

It can be concluded that kT value is a good durability indicator regarding the intrusion of aggressive agents in the structures.

5. Aplicación del método en el control de nuevas estructuras

El nuevo código Suizo de construcción en hormigón [SIA 262 (2003)] establece:

- “with regard to durability, the quality of the cover concrete is of particular importance”
- “the impermeability of the cover concrete shall be checked, by means of permeability tests (e.g. air permeability measurements), on the structure or on cores taken from the structure”

En 2009 se espera la emisión, por parte del ente normativo suizo SIA, de un documento detallado sobre dónde y cómo efectuar las mediciones de kT y sobre cómo especificar los valores de kT y controlar su cumplimiento en obra. Este documento se basará en el trabajo desarrollado por una comisión de especialistas, en un proyecto financiado por el Departamento Federal Vial Suizo (ASTRA, 2009).

6. Aplicación del método en el diagnóstico de estructuras antiguas

Si bien el “Método Torrent” ha sido desarrollado pensando en su aplicación en función preventiva (asegurar la vida útil de estructuras nuevas), se han reportado diversos casos de aplicación en estructuras antiguas.

La Figura 8 muestra datos comparativos de kT, medida directamente sobre dos puentes suizos de 30 y 60 años y la profundidad de carbonatación medida con fenolftaleína sobre testigos extraídos de los mismos lugares (Torrent y Frenzer, 1995).

5. Application of the method to the control of new

The new Swiss Code of Concrete Construction [SIA 262 (2003)] states:

- “with regard to durability, the quality of the cover concrete is of particular importance”
- “the impermeability of the cover concrete shall be checked, by means of permeability tests (e.g. air permeability measurements), on the structure or on cores taken from the structure”

In 2009 the emission of the standard by the Swiss Regulation Organization SIA was expected, which is a detailed document that specifies where and when kT measurements are to be made and, how the kT values shall be specified and its compliance to be controlled at work sites. This document is based on the work developed by a specialist commission in a project financed by the Swiss Road and Traffic Federal Department (ASTRA, 2009).

6. Application of the method to the diagnosis of a existing structures

Even though the “Torrent Method” has been developed considering its preventive role (ensuring the service life of new structures), several application cases have been reported for existing structures.

Figure 8 shows kT comparative data, measured directly on two Swiss bridges 30 and 60 years-old, with the carbonation depth measured with phenolphthalein on cover drilled from the same places (Torrent and Frenzer, 1995).

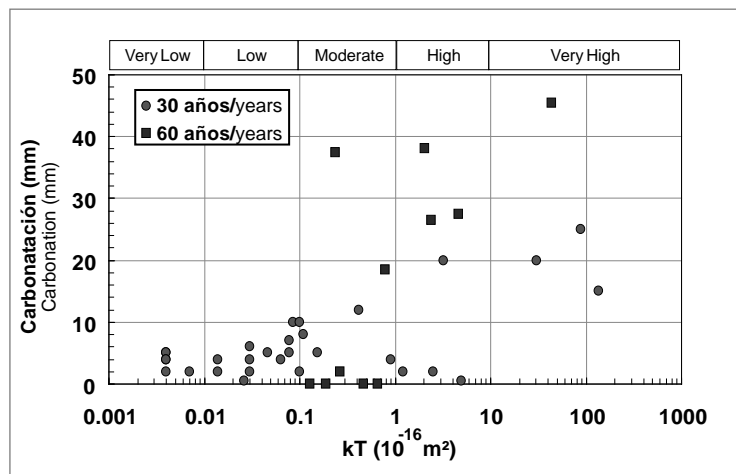


Figura 8. Valores de kT y profundidad de carbonatación en antiguos puentes suizos
Figure 8. kT values and carbonation depth in old Swiss bridges



La Figura 9 corresponde a una investigación similar en otro puente suizo de 30 años donde, aparte de la carbonatación, se midió el contenido de cloruros a 25 mm de profundidad (Jacobs, 2008).

La Figura 10 muestra los contornos de valores de kT medidos en Japón sobre un muro de 6 años de edad, con una cara tratada con un coating y la otra no (Quoc y Kishi, 2006). Es interesante ver que los valores de kT en la cara tratada son un orden de magnitud inferiores a los de la no tratada y mucho más uniformes, excepto en zonas localizadas donde una inspección detallada reveló fallas en la aplicación del recubrimiento.

Figure 9 corresponds to a very similar research conducted in another 30 years-old Swiss bridge, where besides carbonation, the content of chlorides at 25 mm depth was measured (Jacobs, 2008).

Figure 10 shows kT value contours measured on a Japanese 6 years-old wall, which has one side treated with coating and the other side untreated (Quoc and Kishi, 2006). It is quite interesting that kT values on the treated side are an order of magnitude lower than on the untreated side and a uniform distribution, except in localized zones where a detailed inspection revealed faults of the coating.

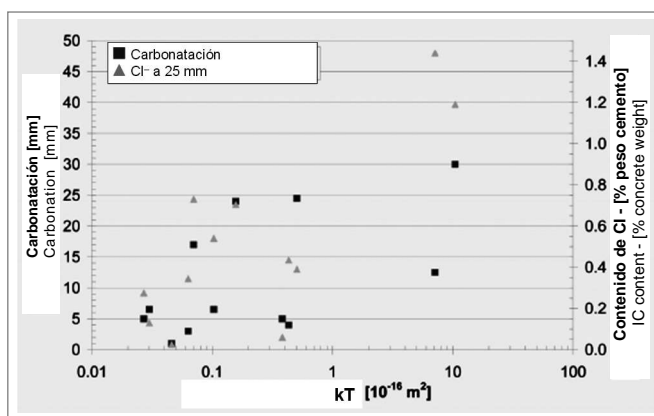


Figura 9. Valores de kT, carbonatación y contenido de cloruros en un puente suizo de 30 años
 Figure 9. kT values, carbonation and chloride content in a Swiss 30 years-old bridge

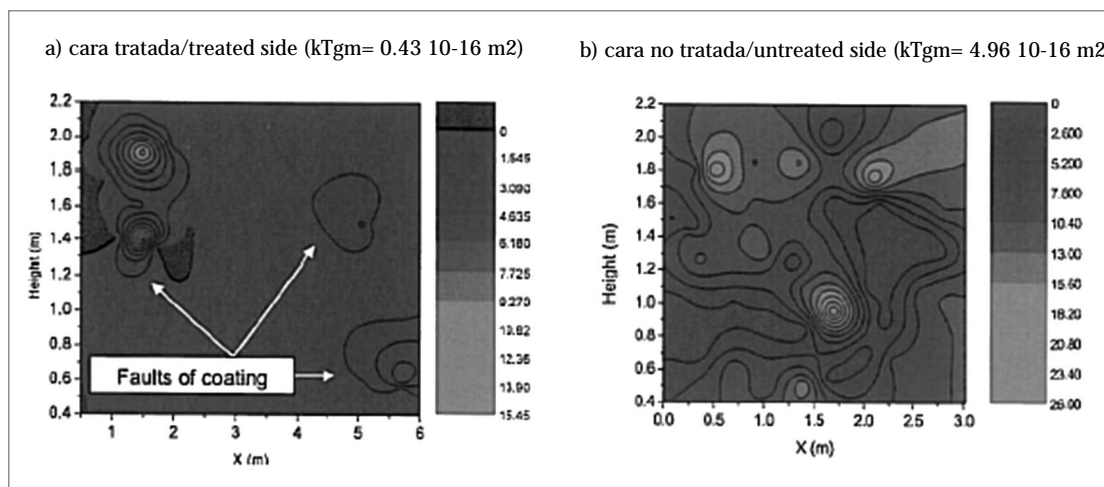


Figura 10. Contornos de valores de kT, medidos en dos caras de un muro de 6 años
 Figure 10. kT Value Contours, measured at both sides of a 6 years-old wall

7. Conclusiones

Este paseo por la evolución del “Método Torrent” y su situación actual permite extraer las siguientes conclusiones:

- El método es adecuado para medir la resistencia del hormigón de recubrimiento a la penetración, por distintos mecanismos, de agentes agresivos que afectan la durabilidad de las estructuras
- Se correlaciona muy bien con otros métodos para medir fenómenos de transporte en el hormigón, con la ventaja de ser más rápido y totalmente no destructivo
- Su introducción en las Normas Suizas SIA 262 y 262/1 constituye un paso fundacional hacia el empleo de conceptos de desempeño para especificar y controlar la durabilidad de las estructuras, con las siguientes ventajas:
 - o Al controlar el producto terminado (la estructura “in situ”), consolida una mentalidad orientada al desempeño en todos los actores del proceso constructivo (constructoras, hormigoneras, proveedores de materiales, etc.)
 - o Tiende a erradicar malas prácticas (adición indiscriminada de agua al hormigón, insuficiente compactación, falta de curado, adición de agua y/o cemento en el acabado de pisos, etc.)
 - o Fomenta el uso de soluciones innovadoras, que mejoren la calidad del recubrimiento (membranas permeables en los encofrados, “dewatering” por vacío de losas, uso de hormigones especiales, tales como autocompactantes, de alto desempeño, “autocurantes”, etc.)
- Constituye una herramienta útil en el diagnóstico del estado de estructuras antiguas, identificando las áreas más vulnerables, donde profundizar otros estudios
- Algunas experiencias puntuales indican la posibilidad de usarlo sobre otros materiales porosos, tales como piedras (conservación de monumentos) y tejas o baldosas cerámicas.

7. Conclusions

This tour along the evolution and current situation of “Torrent Method” allow us to draw the following conclusions:

- The method is suitable to measure the resistance of the concrete cover against the intrusion of aggressive agents (by diverse mechanisms) that affect structures durability.
- It correlates very well with other methods to measure transport phenomena in concrete, having the advantage of being faster and completely non-destructive.
- Its inclusion in Swiss Standards SIA 262 and 262/1 constitutes a foundational step towards the use of performance concepts to specify and control structures durability, with the following advantages:
 - o By controlling the finished product (the structure on site), it consolidates a new mindset, performance oriented, in all the parties involved in the construction process (construction and concrete companies, material suppliers, etc.)
 - o It tends to eradicate bad practices (uncontrolled water addition to concrete, poor compaction, lack of curing, water or cement addition for floor finishing, etc.)
 - o It stimulates the use of innovative solutions to improve the quality of cover concrete (permeable membranes for formworks, vacuum “dewatering” of slabs and the use of special concretes, such as self-compacting, high performance or self-curing concretes, etc.)
- It constitutes a useful tool for the diagnosis of structures conditions, by identifying the most vulnerable areas where other studies may be conducted.
- Some pioneering work indicates the possibility of employing this method on other porous materials, such as stones (monument conservation), tiles or ceramic tiles.

8. Referencias / References

- ASTRA (2009), ASTRA empfehlungen zur Qualitätskontrolle von Beton mit Luftpermeabilitätsmessungen, Office Fédéral des Routes, VSS Report 641, December 2009, Bern, Switzerland. Downloadable from http://partnershop.vss.ch/downloadAnhang.aspx?ID=8e2c2936-d3a4-43d7-8dd6-b0706e9a65fb&ID_Sprache=1
- Bueno V. (2004), "Estudio de Factibilidad de un Nuevo Ensayo de Permeabilidad en Rocas" (in Spanish), Univ. del Zulia, Maracaibo, Venezuela, Oct. 2004, 88 p.
- CEB-FIP (1990), MODEL CODE 1990, Final Draft, Section d.5.3: "Classification by Durability", CEB Bulletin d'Information N° 205, Lausanne, July 1991.
- Jacobs F. (2008), "Beton zerstörungsfrei untersuchen" (in German), der Bauingenieur, n.3, pp. 24-27.
- Kreijger P.C (1984), "The skin of concrete. Composition and properties", Mater. & Struct. 17(100) 275-283.
- Meyer A. (1987), "The importance of the surface layer for the durability of concrete structures", ACI SP-100, v.1, 49-61.
- Newman K. (1987), "Labcrete, realcrete and hypocrete. Where we can expect the next major durability problems", ACI SP-100, v.2, 1259-1283.
- Quoc P.H.D. y Kishi T. (2006), "Measurement of air permeation property of cover concrete", Proc. JSCE Annual Meeting, v. 61, Disk 2, 2 p.
- Romer M. (2008), RILEM Recommendation TC 189-NEC "Comparative test - Part I - Comparative test of penetrability methods", Materials & Structures, v38, Dec 2005, pp. 895 - 906, updated in v41, Apr 2008, pp. 443-447.
- SIA 262 (2003), Swiss Standard: "Concrete Construction", part of Swiss structural codes (German, French, Italian and English versions available).
- SIA 262/1 (2003), Norme Suisse: "Construction en béton – Spécifications complémentaires", Annexe E: Perméabilité à l'air dans les Structures, pp. 30-31 (in German and French)
- Torrent R. J. (1992), "A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of air-permeability of the concrete cover on site", Materials & Structures, v. 25, n.150, pp. 358-365.
- Torrent R. (2008a), "Non-destructive Site Air-Permeability Test – Annotated Bibliography", Materials Advanced Services Ltd., Buenos Aires, October 2008. www.m-a-s.com.ar
- Torrent R. (2008b), "Non-destructive Site Air-Permeability Test – Relation with other transport test methods", Materials Advanced Services Ltd., Buenos Aires, October 2008. www.m-a-s.com.ar
- Torrent R. y Ebensperger L. (1993), "Studie über Methoden zur Messung und Beurteilung der Kennwerte des Überdeckungsbetons auf der Baustelle" (in German), Office Fédéral des Routes, Rapport No. 506, Bern, Suiza, 119 p.
- Torrent R. y Frenzer G. (1995), "Methoden zur Messung und Beurteilung der Kennwerte des Ueberdeckungsbetons auf der Baustelle", Report N° 516, Office Fédéral des Routes, Zürich.