

Desafíos y oportunidades para conocer las propiedades dependientes de los mecanismos de transporte en concretos de alto desempeño

K. Yang^{1,2}, S. Nanukuttan³ , W. J. McCarter⁴ , A. Long³ ,
P. A. M. Basheer^{2*} 

*Autor de Contacto: P.A.M.Basheer@leeds.ac.uk

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i3.301>

Recepción: 03/03/2018 | Aceptación: 04/07/2018 | Publicación: 31/08/2018

RESUMEN

En este artículo, se realiza una revisión de esas técnicas, destacando los desafíos y las oportunidades para evaluar las propiedades de transporte del concreto de alto desempeño. El conocimiento del desempeño del concreto estructural es necesario para propósitos de diseño y conformidad. Una de las fuertes ventajas para el uso de concreto de alto rendimiento (HPC) es obtener una durabilidad destacada, pero sería erróneo suponer que todos los HPCs pueden ofrecer, automáticamente, un nivel de desempeño deseado. La caracterización in situ de las propiedades de permeabilidad del concreto y el medio más viable para evaluar la durabilidad y se ha vuelto cada vez más importante en los últimos 20 años. Existe una variedad de métodos que presentan una gama de parámetros como, por ejemplo, permeabilidad al aire, absorción de agua, absorción capilar, y coeficiente de migración de cloruros.

Palabras clave: concreto de alto rendimiento; permeabilidad; especificación por rendimiento; ensayos no destructivos NDT; confiabilidad.

Citar como K. Yang, S. Nanukuttan, W. J. McCarter, A. Long, M. Basheer (2018), “Desafíos y oportunidades para conocer las propiedades dependientes de los mecanismos de transporte en concretos de alto desempeño”, Revista ALCONPAT, 8 (3), pp. 246-263, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i3.301>

¹ School of Materials Science and Engineering, Chongqing University, China

² School of Civil Engineering, University of Leeds, United Kingdom.

³ School of Natural and Built Environment, Queen’s University Belfast, United Kingdom.

⁴ School of Energy, Geoscience, Infrastructure and Society, Heriot-Watt University, United Kingdom.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2019 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2019.

Challenges and opportunities for assessing transport properties of high-performance concrete

ABSTRACT

In this paper, a review of techniques is given so that both, the challenges and opportunities for assessing transport properties of high-performance concrete, are highlighted. A knowledge of performance of structural concrete is required for design and compliance purposes. One driving force for the use of high performance concretes (HPC) is enhanced durability yet it would be wrong to assume that all HPCs can deliver the desired performance level. In situ characterisation of the permeation properties of concrete is the most viable means for assessing durability and has become increasingly important over the past 20 years. A variety of methods exist that provide a range of parameters, e.g. air permeability, water absorption rate, sorptivity and chloride migration coefficient.

Keywords: high-performance concrete; permeation properties; performance-based specification; NDT test methods; reliability.

Desafios e oportunidades para conhecer as propriedades dependentes dos mecanismos de transporte nos concretos de alto desempenho

RESUMO

Neste artigo, é feita uma revisão dessas técnicas, destacando os desafios e as oportunidades para avaliar as propriedades de transporte do concreto de alto desempenho. O conhecimento do desempenho do concreto estrutural é necessário para propósitos de projeto e conformidade. Uma das fortes vantagens para o uso de concreto de alto desempenho (HPC) é obter uma durabilidade destacada, mas seria errado supor que todos os HPCs podem fornecer, automaticamente, um nível de desempenho desejado. A caracterização in situ das propriedades de permeabilidade do concreto é o meio mais viável para avaliar a durabilidade e tem se tornado cada vez mais importante nos últimos 20 anos. Existe uma variedade de métodos que fornecem uma gama de parâmetros, como, por exemplo, permeabilidade ao ar, absorção de água, absorção capilar, e coeficiente de migração de cloretos.

Palavras-chave: concreto de alto desempenho; permeabilidade; especificação por desempenho; ensaios não destrutivos NDT; confiabilidade.

Nomenclatura

| | |
|------------|--|
| A | el área de la sección transversal sometida al flujo (m^2) |
| ΔC | la diferencia de concentración (g / m^3) |
| C | la concentración a la profundidad x (g / m^3) |
| C_0 | concentración de iones en la superficie expuesta (g / m^3) |
| D_c | el coeficiente de difusión de carbonatación ($m / s^{0,5}$) |
| D_g | el coeficiente de difusión del gas (m^2 / s) |
| D_v | el coeficiente de difusión del vapor (m^2 / s) |
| D_{is} | el coeficiente de difusión de iones (m^2 / s) |
| D_{ia} | el coeficiente de difusión (m^2 / s) |
| D_{js} | el coeficiente de migración (m^2 / s) |
| D_{in} | el coeficiente de migración (m^2 / s) |
| d | profundidad de penetración (m) en el tiempo t (s) |
| d_c | la profundidad de carbonatación (m) |

| | |
|------------|---|
| ΔE | la diferencia de potencial aplicada (V) |
| F | Constante de Faraday (c / mol) |
| ΔH | la diferencia de presión expresada en la cabeza del agua (m) |
| i | el volumen absorbido por unidad de área (mm) |
| J_g | flujo masivo de gas (g / m ² • s) |
| J_v | flujo de masa de vapor (g / m ² • s) |
| J_s | flujo masivo de iones (g / m ² • s) |
| J_j | el flujo de especies (kg / m ² • s) |
| K_{gs} | el coeficiente de permeabilidad (m ²) |
| K_{gn} | el coeficiente de permeabilidad (m / s) |
| K_{ws} | el coeficiente de permeabilidad al agua (m / s) |
| K_{wn} | el coeficiente de permeabilidad (m / s) |
| L | el espesor de la muestra (m) |
| P_e | la presión aguas arriba (N / m ²) |
| P_s | la presión aguas abajo (N / m ²) |
| P_i | a presión al inicio de la prueba (N / m ²) |
| P_t | la presión al final de la prueba (N / m ²) |
| Q_s | la tasa de flujo de volumen de estado estacionario (m ³ / s) |
| R | constante de gas universal (J / mol • K) |
| S_w | la sorptividad de los materiales (mm / min ^{0.5}) |
| S_d | la sorptividad (mm / min ^{0.5}) |
| T | la temperatura absoluta (K) |
| t | tiempo transcurrido (s) |
| t_r-t_i | la duración de la prueba (s) |
| v | porosidad de la muestra (%) |
| V_c | el volumen de la cámara de prueba (m ³) |
| erf | la función de error |
| x | profundidad de penetración de iones (m) |
| Z_j | la carga eléctrica de las especies |
| μ | la viscosidad dinámica del gas (Ns / m ²) |

1. INTRODUCCIÓN

En el diseño de estructuras de hormigón, la durabilidad y la predicción de la vida útil han ganado importancia en los últimos años. Esto se debe a la inadecuada durabilidad de muchas estructuras de hormigón armado construidas en las últimas décadas, lo que supone una carga considerable para los presupuestos de construcción. Este es un problema mundial (Beushausen y Luco, 2016). El uso de concreto de alto rendimiento (HPC) es un enfoque establecido para aumentar la durabilidad de estructuras de concreto armado y pretensado (Aitcin, 1998). Sin embargo, con los niveles de desempeño del HPC es frecuentemente evaluado en ensayos de laboratorio, el desempeño a largo plazo de las estructuras de concreto en servicio depende, en gran parte de factores como la calidad de la construcción. Con ese escenario la capacidad de realizar una evaluación de calidad precisa y en el sitio del HPC es fundamental.

Cuando se discute el ensayo de durabilidad del concreto, son las propiedades de permeabilidad y transporte de masa que son más importantes en términos de adsorción¹, difusión, migración, absorción y permeabilidad y son utilizados en ese sentido. Los ensayos son normalmente realizados en probetas cilíndricas de 150 ± 300 mm, utilizando métodos de ensayo patrón, generalmente con

¹ La adsorción no se discute aquí, ya que este parámetro no se utiliza comúnmente como un indicador de durabilidad.

edad de 28 días. Debe ser recordado que las propiedades de transporte pueden ser determinadas por técnicas de laboratorio y/o técnicas *in situ* (Basheer et al., 2008, McCarter et al., 2017). Las técnicas de laboratorio son fáciles de ejecutar y fueron estandarizadas para determinar la conformidad de las estructuras con su proyecto (Dhir et al., 1989; Zhang et al., 2017). Ensayos de permeabilidad en el local pueden ser usados para obtener mucha información. Sin embargo, eso no sugiere la interrupción total de las mediciones de laboratorio, conforme lo observado en el Informe Técnico de la Concrete Society-31 (2008). Caída clara la importancia de los ensayos *in situ* para asegurar al propietario una documentación robusta de aceptación de la estructura terminada en comparación con la documentación requerida para otros aspectos de la garantía de calidad de concreto armado (Bentur y Mitchell, 2008).

Numerosas técnicas han sido aplicadas para evaluar las propiedades de permeabilidad de concreto normal (NC), pero pocas de ellas son adecuadas para distinguir HPCs. Existen dos desafíos técnicos para las técnicas de ensayo actuales: en primer lugar, las características de la HPC debido a su estructura de poros densos y en segundo lugar la dificultad en controlar las condiciones de ensayo antes y durante las mediciones. Este artículo revisa las técnicas actuales de ensayo de permeabilidad con el objetivo de identificar un método confiable para los HPCs. El alcance de los métodos de ensayo revisados está limitado a métodos directos de permeabilidad.

2. MÉTODOS DE ENSAYO Y MONITOREAMIENTO DEL DESEMPEÑO DE LAS ESTRUCTURAS DE CONCRETO

2.1 Métodos de laboratorio para evaluar las propiedades de permeabilidad

2.1.1 Métodos de permeabilidad

Los métodos para determinar la permeabilidad del concreto pueden ser ampliamente divididos en dos categorías, ensayos de permeabilidad en el gas (aire) y ensayos de permeabilidad al agua, coeficientes de permeabilidad de gas pueden ser determinados midiendo el flujo de gas, a una presión constante ó a través del monitoreo de la caída de presión a lo largo de un intervalo de tiempo especificado (Basheer, 2001). La velocidad de salida es la medida para el ensayo de permeabilidad al gas o aire en estado estacionario. El otro tipo de ensayo de aire, conocido como ensayo de caída de presión, usa esa caída de presión para calcular el coeficiente de permeabilidad del gas. Ensayos de permeabilidad al gas se volvieron populares por su corta duración y el efecto limitado de las variables de ensayo sobre a la estructura de poros que tiene durante mediciones (Torrent, 1992, Basheer, 2001; Yang et al, 2013.).

Permeabilidad al agua puede ser determinado por mediciones de flujo de agua en cualquier estado estacionario o no estacionario bien como la penetración de agua sobre la influencia de una carga de presión externa (Basheer, 1993; Yang et al 2013.). La principal diferencia entre ellos es la duración del ensayo. El tiempo necesario para obtener un flujo constante varía de algunos días a varias semanas o meses, dependiendo de la calidad del concreto (Hearn y Morley, 1997; El-Dieb y Hooton, 1995), en cuanto que la duración del ensayo no estable es más corta, generalmente menos de 3 días. El ensayo desarrollado por El-Dieb y Hooton (1995) debe ser destacado debido a su novedad. En comparación con otros métodos este ofrece un amplio rango de presión de ensayo de 0,5 MPa a 3,5 MPa y mejora la precisión de la medición de salida. El rango de coeficiente de permeabilidad al agua de HPC determinado por Nokken y Hooton (2007) varió de 10-13 a 10-15 m / s, lo que está de acuerdo con los resultados relatados por otros, utilizando un régimen de ensayo semejante (Galle et al., 2004 Reinhardt y Jooss, 2003).

Como los ensayos de estado estacionario requiere larga duración del ensayo para alcanzar el estado estacionario, la profundidad de penetración del agua en el concreto también ha sido utilizada para determinar el coeficiente de permeabilidad al agua para concretos de baja permeabilidad. Este método fue estandarizado y está descrito por la norma BS-EN 12390-8 (2009). Chia y Zhang (2002) y Pocock y Corrans (2007) verificaron que la dispersión de los resultados es muy elevada y el

coeficiente de variación de los resultados del ensayo es superior a 100%. La Tabla 1 presenta un resumen de los valores típicos y su varianza para diferentes métodos de ensayo.

Tabla 1. Resumen de los valores típicos y varianza de los coeficientes de permeabilidad determinados por los diferentes métodos de ensayo

| Coeficiente de permeabilidad | Concreto | | | Coeficiente de variación |
|------------------------------|-------------|-------------------------|-------------|--------------------------|
| | pobre | normal | rico | |
| K_{gs} (m ²) | $>10^{-13}$ | 10^{-14} - 10^{-15} | $<10^{-16}$ | 15%-30% |
| K_{ws} (m/s) | $>10^{-11}$ | 10^{-11} - 10^{-13} | $<10^{-14}$ | 20%-40% |
| K_{wn} (m/s) | $>10^{-10}$ | 10^{-10} - 10^{-12} | $<10^{-13}$ | 40%-100% |

2.1.2 Difusión de iones

El transporte de iones cloruro puede ser evaluado por medio de un ensayo de difusión iónica (Basheer, 2001, Tang et al., 2011). Esos resultados pueden ser agrupados en dos categorías; métodos basados en difusión y basados en migración. Los ensayos de difusión simulan el movimiento de iones cloruro bajo la influencia de un gradiente de concentración y la configuración tradicional incluye células de difusión (estado estacionario y estado no estacionario) o inmersión / sumergido (estado no estacionario). En el caso de ensayos en estado estacionario, la velocidad de transporte iónico es medida y usando la primera ley de difusión de Fick, donde el coeficiente de difusión es calculado. En el caso de ensayos no estacionarios, la profundidad de penetración de cloruros es usada para calcular el coeficiente de difusión usando la función error da segunda ley de difusión de Fick. El ensayo de difusión em estado estacionario, normalmente, requiere seis meses ó más para alcanzar un estado estacionario de flujo. La duración es corta para ensayos de estado no estacionario. Los ensayos de inmersión generalmente llevan cerca de 91 días, lo que puede ser usado para evaluar la resistencia al cloruro para la mayoría de los proyectos de construcción, se hubiese tiempo disponible.

Desde la década de 1980, muchos métodos han sido propuestos, que aplican un campo eléctrico externo para acelerar la entrada de iones cloruro. Algunos de los ensayos usaron una alta concentración de solución de fuente de cloruro para acelerar aún más el movimiento iónico (Tang et al., 2011). Uno de los primeros ensayos en esta categoría es el Ensayo de Permeabilidad Rápida en Cloruro (RCPT) y este fue adoptado como un ensayo patrón por la AASHTO T277 (2015) y por la ASTM C1202 (2017). En este ensayo la resistencia del concreto frente al cloruro es categorizada por la carga total que pasa por la muestra durante las primeras 6 h. Como la carga es realizada por todos los iones y no apenas por los cloruros, este ensayo ha sido criticado por algunos investigadores durante la década de 1990 (Andrade, 1993, Tang y Nilsson, 1992). El ensayo más reciente es el ensayo de migración en estado estacionario. El arreglo del ensayo es semejante al RCPT, sin embargo, en este caso la concentración de cloruro del ánodo es medida en función de la carga pasante. El coeficiente de migración es calculado usando una ecuación de Nernst-Planck modificada (Tang et al., 2011). Tang y Nilsson (1992) propusieron un ensayo rápido basado en la teoría de la migración de cloruro es el estado estacionario, conocido como ensayo de migración rápida de cloruro (RCM). El coeficiente de migración de cloruro es calculado a partir de la profundidad del cloruro y usando una ecuación de Nernst-Planck modificada. Actualmente, este método está incluido en normas nórdicas NT-Build 492 (1999). Debido a la corta duración y simplicidad del ensayo, los tres métodos basados en migración existen una ventaja sobre los ensayos basados en difusión para determinar la resistencia del concreto al transporte de cloruro. No obstante, como ha sido afirmado anteriormente, el RCPT tiene varios problemas inherentes. Es relatado que este método mide la conductividad de la solución, contrario a las propiedades de

transporte de cloruro (Andrade, 1993, Basheer et al., 2005). El aumento de la temperatura debido a la alta tensión puede afectar significativamente la conductividad de los iones y por lo tanto el resultado final en Coulombs. Por lo tanto, el RCPT no puede ofrecer una indicación confiable de la migración de cloruros. Los otros dos métodos son basados en la teoría bien establecida y ampliamente aceptada por los investigadores para evaluar los HPCs. Los resultados típicos de los coeficientes de difusión / migración iónica son presentados en la Tabla 2.

Tabla 2. Resumen de los valores típicos y varianza de los coeficientes de difusión / migración de iones determinado por diferentes métodos de ensayo

| Coeficiente de difusión | Concreto | | | Coeficiente de variación |
|------------------------------|--------------------|--------------------------------------|--------------------|--------------------------|
| | Pobre | Normal | Rico | |
| D_{is} (m ² /s) | >10 ⁻¹¹ | 10 ⁻¹¹ -10 ⁻¹² | <10 ⁻¹² | 15%-25% |
| D_{ia} (m ² /s) | >10 ⁻¹¹ | 10 ⁻¹¹ -10 ⁻¹² | <10 ⁻¹³ | 20%-35% |
| D_{js} (m ² /s) | >10 ⁻¹¹ | 10 ⁻¹¹ -10 ⁻¹² | <10 ⁻¹³ | 20%-35% |
| D_{in} (m ² /s) | >10 ⁻¹¹ | 10 ⁻¹¹ -10 ⁻¹² | <10 ⁻¹³ | 20%-35% |

2.1.3 Métodos de Absorción Capilar

Sortividad es el parámetro para estimar la capacidad de penetración del líquido debido a la absorción capilar (Basheer, 2001; McCarter et al., 2009). Dos tipos de ensayos son usados para medir la sortividad: (1) método de ganancia de peso; y (2) profundidad de penetración de agua. El método de ganancia de peso fue aceptado como un método patrón europeo: EN-13057 (2002). Basheer (2001) revisó los resultados para NC, que varían de 0,05 y 0,15 mm / min^{0.5}. La profundidad de penetración de agua - estimado utilizando una técnica de división de la muestra - causada por succión capilar puede ser utilizada para evaluar también la sortividad (McCarter et al., 1995). Sin embargo, la necesidad de varias muestras es la principal desventaja de ese método. También es difícil observar una clara frente al agua para el concreto que contiene ceniza volante y microsíllica. Ganjian y Pouya (2009) estudiaron los efectos de materiales cementíceos complementarios (MEC) en sortividad de HPCs y no encontraron ninguna diferencia significativa entre los diferentes HPCs. Resultados semejantes también fueron relatados por otros Sortividades (Elahi et al., 2010) Así la sortividad no es un parámetro sensible en la evaluación del desempeño de los concretos.

2.1.4 Consideraciones sobre la evaluación de las propiedades de permeabilidad de los HPCs por técnicas de laboratorio

Para evaluar las propiedades de permeabilidad de los HPCs usando métodos de ensayos de laboratorio, ensayos de permeabilidad al agua y difusión iónica en estado estacionario, ofrecen un procedimiento de análisis simple. Sin embargo, tienen una limitación en común, y es la larga duración del ensayo lo que puede llevar a interacciones químicas y físicas acopladas. Los ensayos de estado no estacionario presentan mejor desempeño en este aspecto y pueden ser usados en el HPC. Otro punto que debe ser destacado es la condición inicial de una muestra, incluyendo la cantidad y distribución de la humedad, que tiene un efecto predominante en los resultados y debe ser evaluada antes de las mediciones. La Tabla 3 resume los métodos de ensayo de laboratorio y sus ecuaciones fundamentales conjuntamente con recomendaciones para evaluar el HPC.

Tabla 3. Métodos de ensayo de permeabilidad laboratorial y ecuaciones fundamentales

| Mecanismo de transporte | Medio de ensayo | Condición de humedad | Teoría | Ecuación fundamental | Adecuado para ensayar HPCs |
|---------------------------------------|--------------------|----------------------|------------------------|---|----------------------------|
| Permeabilidad | Gas | Seco | Estado estacionario | $K_{gs} = \frac{2\mu L P_s Q_s}{A(P_e^2 - P_s^2)}$ | Si |
| | | | Estado no-estacionario | $K_{gn} = \frac{V_c L}{RTA} \times \ln \frac{P_i}{P_t} / (t_t - t_i)$ | Si |
| | Agua | Saturado | Estado estacionario | $K_{ws} = Q_s / A \times L / \Delta H$ | No |
| | | | Estado no-estacionario | $K_{wn} = d^2 v / t \Delta H$ | Si |
| Difusividad y Migración | Gas | Seco | Estado estacionario | $D_g = J_g L / \Delta C$ | No |
| | | | Estado no-estacionario | $D_c = d_c / t^{0.5}$ | Si |
| | Vapor | Seco | Estado estacionario | $D_v = J_v L / \Delta C$ | No |
| | | Saturado | Estado estacionario | | |
| | Difusividad iónica | Saturado | Estado estacionario | $D_{is} = J_s L / \Delta C$ | No |
| | | | Estado no-estacionario | $C = C_0 [1 - \text{erf}(x / 2\sqrt{D_{ia}t})]$ | Si |
| | Migración iónica | Saturado | Estado no-estacionario | Clasificación de la resistencia al cloruro de acuerdo con la carga total que pasa a través de una muestra | No |
| | | | Estado estacionario | $D_{js} = J_j / C_j \times RT / Z_j F \times L / \Delta E$ | Si |
| | | | Estado no-estacionario | $D_{in} = RT / Z_j F \Delta E \times (x_d - 1.061x_d^{0.589}) / t$ | Si |
| Sortividad (absorción capilar) | Agua | Seco | Estado no-estacionario | $S_w = i / t^{0.5}$ | No |
| | | | Estado no-estacionario | $S_d = d / t^{0.5}$ | No |

2.2 Métodos de campo

2.2.1 Ensayos de permeabilidad al aire in situ

Ensayos de permeabilidad al aire adquirieron popularidad debido a su corta duración de ensayo y al hecho de que la estructura de concreto no es afectada durante el ensayo. Schonlin y Hilsdorf (1987) desarrollaron un método de ensayo de permeabilidad al aire montado sobre la superficie que permite medir la caída de presión para calcular un índice de permeabilidad al aire. Este método de presión decreciente es extremadamente rápido y puede ser realizado por un único operador. Más tarde numerosos investigadores modificaron la configuración y la teoría de ese método. Una modificación para ser destacada es el método de Torrent (1992) que introdujo un anillo de protección para desarrollar un aparato de cámara doble. Asumiendo el flujo unidireccional de aire a través del concreto en la cámara interna, el coeficiente de permeabilidad al aire es calculado a partir del cambio de presión de la cámara interna. De la misma forma, Guth y Zia (2001) usaron patrones de flujo a través de dos células concéntricas para determinar la permeabilidad al aire del concreto. La aplicación de un anillo de protección fue propuesta para el ensayo de absorción de agua in situ. En el sentido más estricto, el anillo de protección no puede garantizar el flujo de aire unidireccional en toda la sección, como la simulación de flujo realizada por Yang et al. (2015) indicó que el anillo de protección puede confinar el flujo en la superficie más cercana y que el flujo unidireccional no alcanza toda la profundidad de la probeta. Sin embargo, el método de Torrent puede servir como una aproximación conservadora de la permeabilidad al aire con las hipótesis simplificadoras. El otro tipo de ensayo de permeabilidad al aire aplicado en la superficie es el ensayo de flujo de aire en la superficie. Whiting y Cady (1992) aplicaron la técnica de vacío para medir la permeabilidad al aire in situ, denominado ensayo de flujo de aire en la superficie (SAF). La velocidad de flujo de aire en estado estacionario bajo un nivel de vacío constante es considerada como un indicador de permeabilidad al aire.

Ese tipo de ensayo de permeabilidad al aire montado en la superficie puede identificar los efectos de la relación a/c, tiempo de curado y temperatura de curado en la permeabilidad bajo condiciones de ensayo controladas. En el método Torrent, el dispositivo de la Guth-Zia es el Autoclam fueron usados para medir la permeabilidad de los HPCs. Romer (2005) relató que resultados engañosos fueron obtenidos usando el ensayo de Torrent cuando las muestras de concreto húmedo fueron probadas. Resultado semejante también fue relatado por Guth y Zia (2001) y Elahi et al. (2010). O Autoclam modificado (método de ensayo de bajo volumen) fue concebido para medir la permeabilidad al aire in situ de HPCs (Yang et al., 2015) y la Fig. 1 evidencia el progreso de desarrollo de ensayo Autoclam y los resultados típicos para medir la permeabilidad al aire de 1 CNs y 5 HPCs. La pesquisa confirmó fuertes relaciones positivas entre el método de ensayo propuesto y el método de evaluación de permeabilidad patrón existente y alto potencial para ser hacerse reconocidos como métodos internacionales para determinar la permeabilidad de HPCs.

Figg (1973) desarrolló el ensayo de succión de agujero de perforación durante su trabajo en el Building Research Establishment. Una aguja hipodérmica es empujada para dentro de la cavidad y conectada a un manómetro lleno de mercurio y a una bomba de vacío manual. Posterior a la aplicación de vacío en la cavidad el tiempo necesario para el aumento de la presión de aire de 15 a 20 kN / m² es considerado una medida de la permeabilidad al aire del concreto. Dos métodos de ensayo también son igualmente encontrados en la literatura: desarrollada por Parrott y Hong (1991) en la British Cement Association, y el otro desarrollado por Dinku y Reinhardt (1997) de la Universidad de Stuttgart. Una cuestión indicada por Figg (1973) es que las micro fisuras son inducidas por la aplicación de la broca de acción del martillo y pueden afectar los resultados de manera significativa. Para HPCs, la situación puede volverse aún más severa debido a la alta fragilidad y dificultad de perforación de concreto de alta resistencia (Aitcin, 1998). Es evidente a partir de la literatura, que hay unos escasos de datos sobre las medidas de permeabilidad al aire para HPCs.

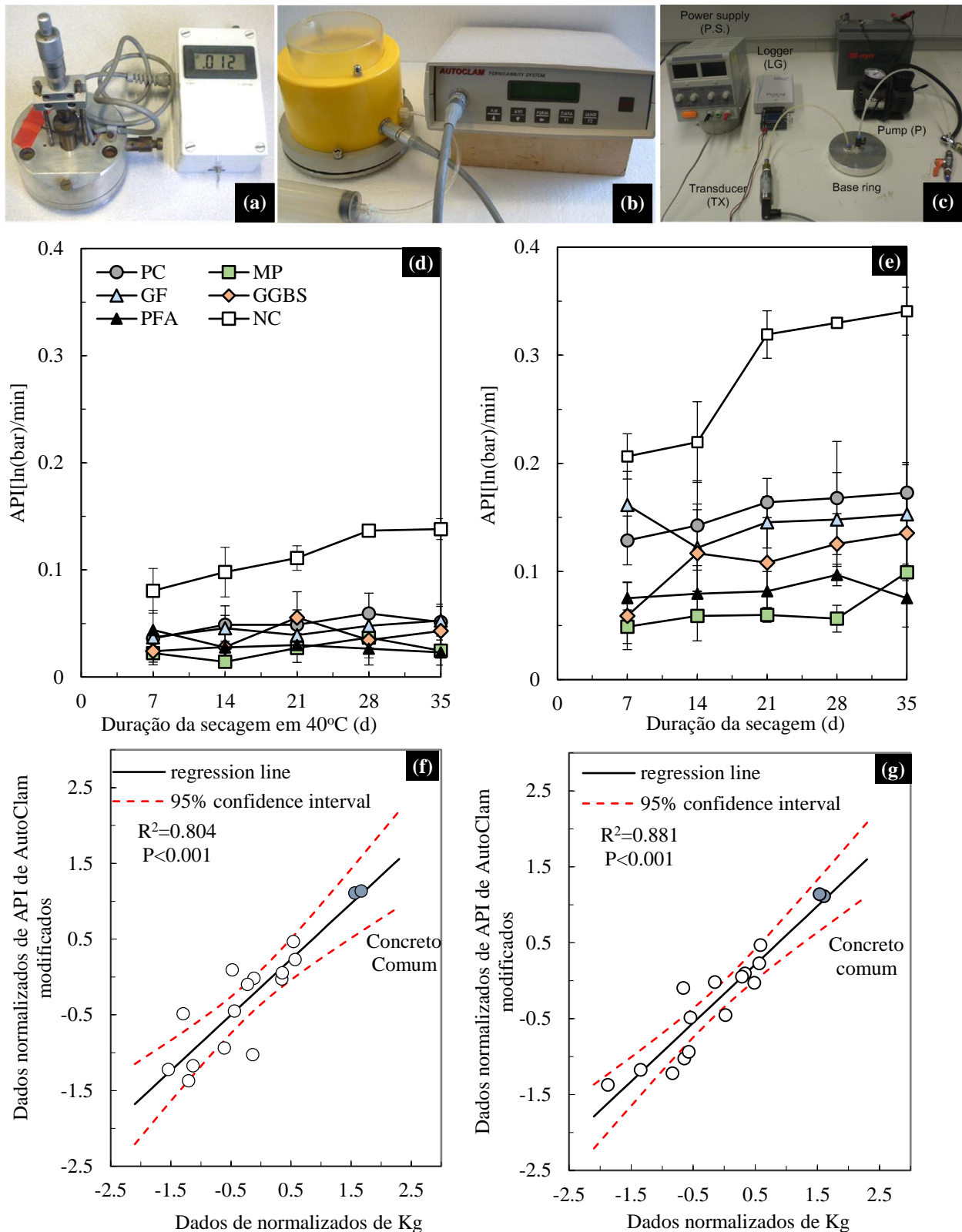


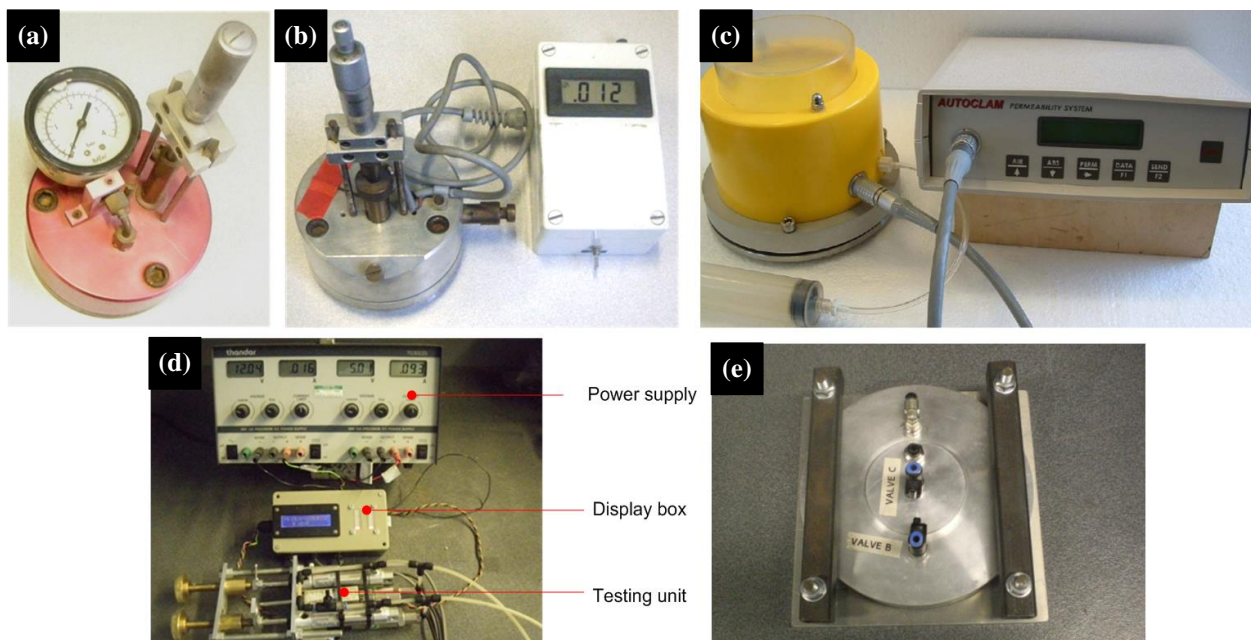
Figura 1. Desenvolvimento do ensaio de permeabilidade ao ar (Autoclam): (a) Ensaio de ar CLAM Universal (1985), (b) Ensaio de ar Autoclam (1992), (c) ensaio de ar Autoclam modificado (2011), (d) resultados do ensaio de ar Autoclam convencional (e) Resultados do ensaio de ar Autoclam modificado, (f) ensaio de ar Autoclam convencional vs ensaio de ar de la RILEM

2.2.2 Ensayo de Permeabilidad de Agua in situ

Se debe notar que, para producir resultados confiables, el concreto debe estar con una humedad equivalente a 21 días de secado en estufa a 40°C (Yang et al., 2013). Eso puede ser asegurado por la obtención de una humedad relativa inferior a 60% en la región cercana a la superficie, con aproximadamente 40 mm de espesor (Basheer, 2001; Yang et al., 2013). Esta condición de humedad no es fácil de obtener in situ, especialmente en la mayor parte del norte de Europa, donde la precipitación anual es de 80 a 110 veces y la precipitación anual varía de 600 a casi 2000 mm (Perry y Hollis, 2003). Por lo tanto, es lógico que el concreto en estructuras debe ser probado cuando se está en estado saturado, en vez de estado seco y por ese motivo, los ensayos de permeabilidad al agua in situ son preferibles para ensayos de permeabilidad de aire para la evaluación de la calidad de concreto en esas regiones.

El primer ensayo estandarizado tuvo como objetivo medir la absorción de campo del ensayo de absorción de superficie inicial (ISAT) en la BS: 1881-208 (1996): Ensayo de concreto - Recomendaciones para la determinación de la absorción inicial de la superficie del concreto. La absorción de superficie inicial es definida como la velocidad de flujo de agua en concreto por unidad de área bajo una presión constante. El Autoclam usa el mismo procedimiento de ensayo y puede medir tanto la absorción de agua como la sortividad del concreto (Basheer et al., 1994). Figg (1973) y Dhir et al. (1989) desarrollaron métodos de perforación que son capaces de realizar mediciones de absorción de agua, pero no es apropiado estimar la sortividad usando métodos intrusivos, pues el proceso de absorción de agua capilar es hecho a partir del agujero, y no de la superficie. El ISAT puede ser usado para estudiar la sortividad del concreto, en cuanto el Autoclam es una manera directa, fácil y rápida de determinar esa propiedad. Según lo discutido en la sección 1, la sortividad no es un parámetro para los HPCs.

El ensayo Clam, primeramente, relatado por Montgomery y Adams (1985), para medir la permeabilidad al agua en el concreto in situ fue modificado por Basheer et al. (1994), que está actualmente disponible como el Sistema de Permeabilidad Autoclam (Figura 2). Es un ensayo de permeabilidad de superficie y la permeabilidad al agua es estimada por la teoría de flujo en estado estacionario o no estacionario. En la última versión, una presión de ensayo de 7 bar puede ser seleccionada para evaluar los HPCs y mejorar la repetitividad y la precisión de las mediciones (Yang et al., 2015), cuyos resultados son datos de la Fig. 2.



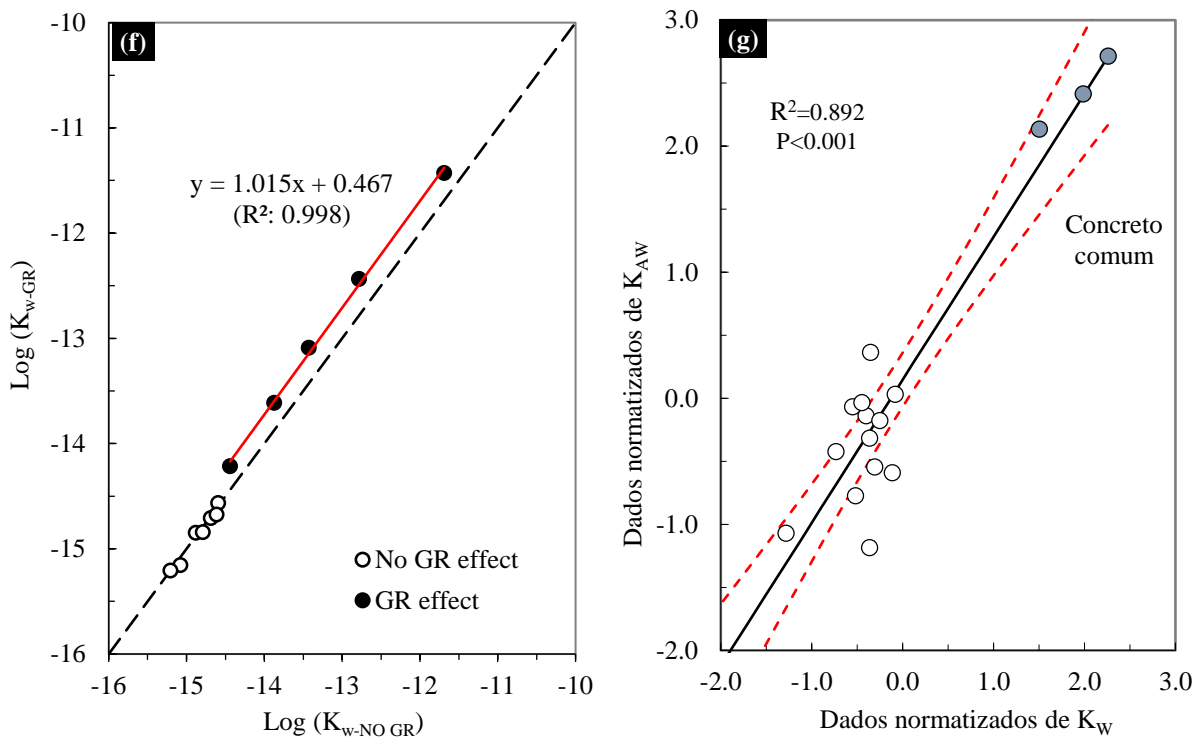


Figura 2. Desarrollo de los ensayos de permeabilidad al agua CLAM (a) ensayo CLAM (1985), (b) ensayo CLAM Universal (1989), (c) Ensayo Autoclam (1992), (d) Ensayo de agua CLAM de alta presión (2012), (e) célula de ensayo con el anillo de seguridad, (f) relación entre el coeficiente de permeabilidad de los ensayos con y sin o anillo de seguridad, (g) ensayo de agua CLAM de alta presión (K_{AW}) Vs BS-EN ensayo de penetración de agua (K_W)

Un ensayo de permeabilidad de campo (FPT) desarrollado por Meletiou et al. (1992) usa un procedimiento de permeabilidad al agua en estado estacionario y para remover la influencia de la humedad en los resultados del ensayo, la saturación el vacío es aplicado antes de las mediciones. El flujo de agua es monitoreado por el nivel de agua en el tubo del manómetro. Se presume que el flujo establezca luego de 2 horas y la velocidad de flujo en régimen permanente es usada para calcular el coeficiente de permeabilidad. Los resultados indican que el efecto de las variaciones de humedad y casi removido luego de la aplicación de la saturación la vacío, aunque el potencial que influye adicionalmente en las de micro fisuras no sea totalmente abordado.

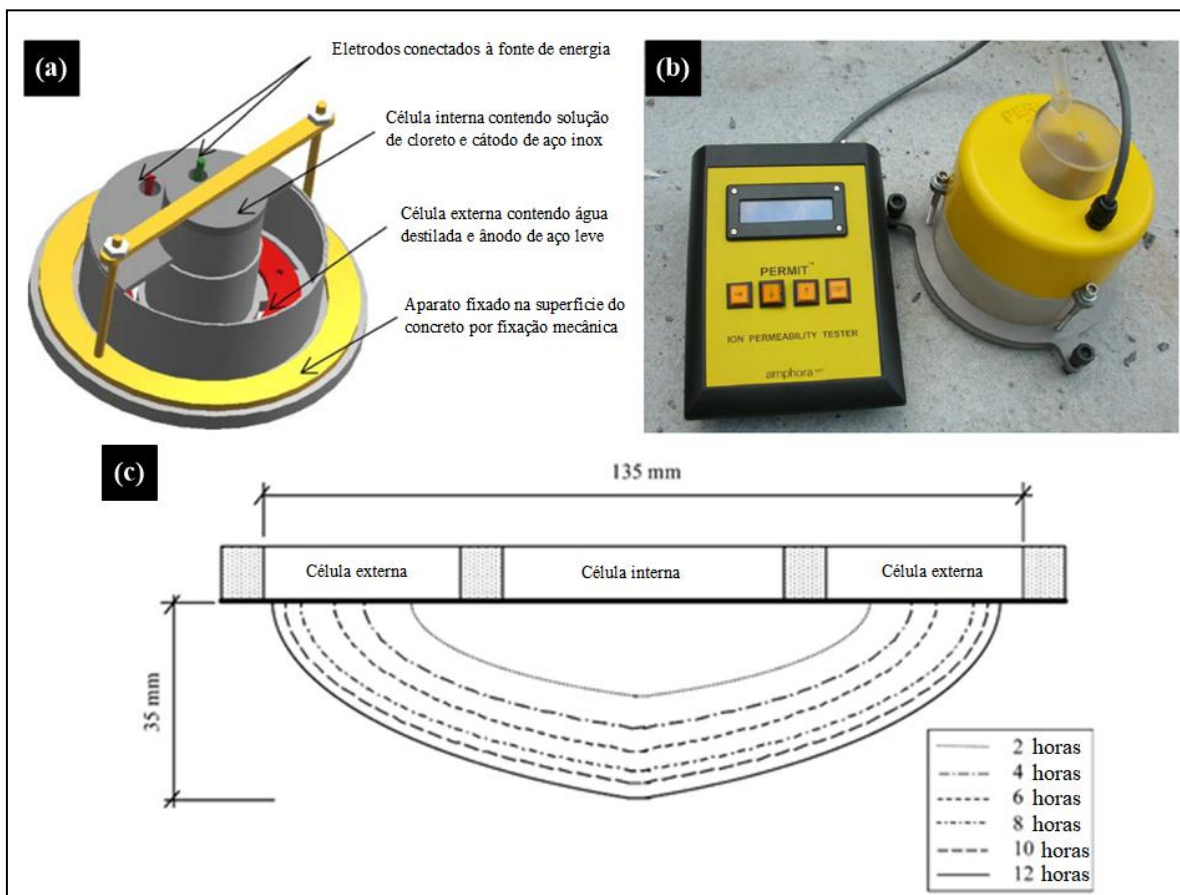
2.2.3 Ensayos de migración in situ

Ensayos de difusión en estado estacionario no son adecuados para la aplicación in situ debido a la larga duración del ensayo. Un campo eléctrico externo puede acelerar el transporte iónico y como consecuencia, algunos ensayos de migración fueron proyectados como técnicas de ensayo de campo. Tales métodos incluyen el ensayo de Coulomb desarrollado por Whiting (1981) el ensayo rápido de migración de cloruro in situ (ensayo RCM) (Tang et al., 2011) y el ensayo de migración de iones PERMIT (Nanukuttan et al., 2015).

Whiting (1981) desarrolló el ensayo de Coulomb con base en el método RCPT. La carga pasante es considerada como un índice para evaluar la difusividad del concreto. Como ha sido discutido anteriormente, el ensayo de Coulomb ofrece una estigmatización de la carga realizada por todos los iones y no apenas por los cloruros. Además de eso, esta técnica no ofrece un coeficiente de migración. El segundo método de campo fue desarrollado por Tang y Nilsson (Tang et al., 2011) es basado en el ensayo de migración rápida de cloruro (RCM). Un potencial externo es aplicado a través de la armadura y cátodo en la cámara. Posterior a la medición, un testigo es retirado de la posición de ensayo y el frente de penetración de cloruros es examinado por la técnica colorimétrica.

Como los testigos son necesarios para la interpretación del método RCM in situ, no hay ventaja obvia en comparación con los métodos de laboratorio.

El ensayo de migración iónica PERMIT (Figura 3) fue desarrollado por Nanukuttan et al. (2009). Tanto el ánodo como las cámaras catódicas están en forma de tanques cilíndricos concéntricos. Los iones cloruro se mueven del cátodo en dirección al ánodo a través del concreto influenciado por la diferencia de potencial creada por el campo eléctrico externo. El cambio en la conductividad del ánodo es usado como un medio de monitorear el movimiento del cloruro. El coeficiente de migración in situ es evaluado usando una ecuación de Nernst-Planck modificada. La validación de la autorización fue efectuada por comparación de los coeficientes de ensayo PERMIT contra el ensayo unidimensional de migración de cloruro, el coeficiente de difusión eficaz del ensayo de difusión patrón y el coeficiente de difusión aparente determinado a partir de perfiles de cloruros (Basheer et al., 2005; Nanukuttan et al. 2015). Los resultados muestran que, para una amplia gama de mezclas de concreto, existe una alta correlación entre los ensayos de migración in situ y los ensayos de laboratorio, cuyos resultados son presentados en la Figura 3. Se nota que el desempeño del PERMIT es confirmado en laboratorio y para el local de aplicación, como el área de ensayo es saturada por un período de 24 horas, no es posible obtener saturación completa de la superficie hasta 30 mm, especialmente para HPCs. Por lo tanto, el ensayo PERMIT requiere ser validado por su capacidad de evaluar los HPCs in situ.



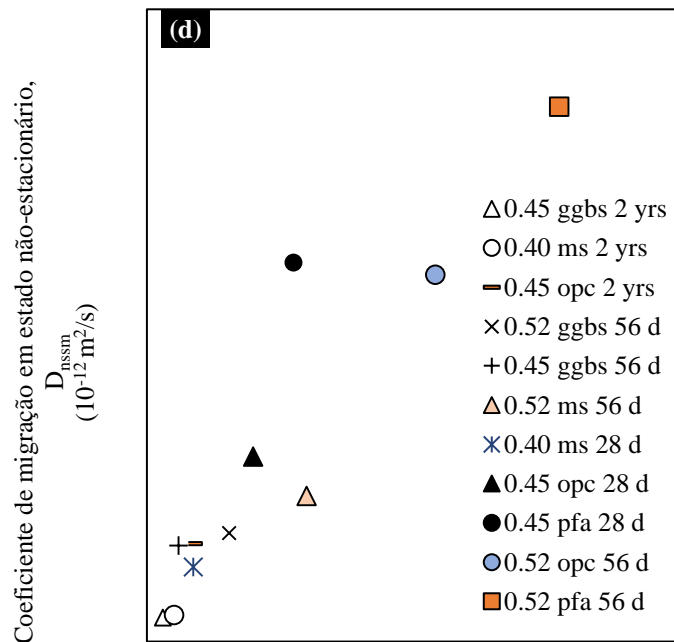

 Coeficiente de migração in loco, D in loco ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)

Figura 3. Desarrollo del ensayo PERMIT (a) esquema del ensayo PERMIT, (b) el aparato de ensayo de migración iónica PERMIT (2005), (c) área de flujo de cloruro en diferentes tiempos de ensayo, (d) PERMIT Vs ensayo de migración no-estacionario

Las técnicas comercialmente disponibles son agrupadas en ensayos de permeabilidad, ensayos de difusión y de sortividad (absorción de agua), semejantes a los métodos de laboratorio, cuyas principales características están resumidas en la Tabla 4.

Tabla 4 Resumen del método de ensayo in situ para evaluar las propiedades de permeabilidad del concreto

| Nombre | Medio de penetración | Abordaje para controlar el efecto de humedad | Parámetros determinados | Confianza | Costo por ensayo | Métodos montados en la superficie o intrusivos |
|---------------------|----------------------|--|-------------------------------------|-----------|---------------------|--|
| Schonlin e Hilsdorf | Aire | Uso de una pistola de calor para remover a humedad | Caída de presión | Buena | Bajo | Montado en la superficie |
| Torrent | Aire | Medida de la Resistividad | Caída de presión | Buena | Relativa mente bajo | Montado en la superficie |
| Guth e Zia | Aire | Ninguna exigencia | Caída de presión | Débil | Bajo | Montado en la superficie |
| SAF | Aire | Ninguna exigencia | Velocidad de salida | Buena | Alto | Montado en la superficie |
| Autoclam | Agua, Aire | RH exigido | Caída de presión ou volumen de agua | Buena | Relativa mente bajo | Montado en la superficie |

| | | | | | | |
|--------------------|------------|--|------------------------|-------|---------------------|--------------------------|
| LV Autoclam | Aire | RH exigido | Caída de presión | Buena | Bajo | Montado en la superficie |
| Figg | Agua, Aire | Ninguna exigencia | Caída de presión | Buena | Bajo | Método intrusivo |
| Parrot | Aire | RH medida | Caída de presión | Buena | Relativa mente bajo | Método intrusivo |
| Dinku e Reinhardt | Aire | Uso de alta presión | Caída de presión | Buena | Relativa mente bajo | Método intrusivo |
| Dhir | Aire | Uso de vacío para remover a humedad | Caída de presión | Buena | Bajo | Montado en la superficie |
| CLAM | Agua | inmersión por 24 horas | volumen de agua | Buena | Relativa mente bajo | Montado en la superficie |
| Alta presión CLAM | Agua | Saturación de vacío | volumen de agua | Buena | Relativa mente bajo | Montado en la superficie |
| GWT | Agua | RH medida | Velocidad de salida | Débil | Relativa mente bajo | Montado en la superficie |
| ISAT | Agua | Superficie de ensayo protegida del agua por al menos 48h | volumen de agua | Débil | Bajo | Montado en la superficie |
| FPT | Agua | Saturación de vacío | Velocidad de salida | Buena | Alto | Método intrusivo |
| CAT | Agua | Ninguna exigencia | volumen de agua | Débil | Relativa mente bajo | Método intrusivo |
| PERMIT | Ión | inmersión por 24 horas | Conductividad | Buena | Relativa mente bajo | Montado en la superficie |
| <i>In situ</i> RCM | Ión | Ninguna exigencia | Espesor de penetración | Débil | Alto | Montado en la superficie |
| Coulomb test | Ión | Saturación de vacío | Coulomb | Débil | Relativa mente bajo | Montado en la superficie |

Nota: Algunos métodos de ensayo *in situ* no están incluidos em esta tabla porque no hay informaciones suficientes.

2.2.4 Recomendación de métodos de permeabilidad *in situ* en el contexto de la evaluación de HPCs

Dos aspectos siempre surgen para el ensayo *in situ*. Una es si este puede ofrecer la información que es realmente necesaria, una objeción obvia es que la mayoría de las técnicas mide algo relacionado con las propiedades de transporte, excepto las características de permeabilidad intrínseca. El otro

se refiere a la capacidad de esas técnicas para probar nuevos materiales cementíceos. Debido a la diferencia en la microestructura entre NC y HPCs, las características de desempeño del equipamiento de ensayo deben ser cuidadosamente examinadas y validadas. Con relación a los métodos de permeabilidad discutidos anteriormente, algunos puntos están brevemente destacados a continuación:

- 1) El método de perforación es un método parcialmente destructivo, pues la reparación es inevitable luego de la realización de las mediciones. Mas importante aún, es la acción de percusión de la broca de perforación usada para realizar el agujero, este puede hacer daño perjudicial e incontrolable del concreto en las cercanías del agujero. Eso puede causar discrepancias en los resultados del ensayo. Como tal, este tipo de método no es recomendado. El método montado en la superficie puede superar las desventajas antes comentadas. El flujo de la mayoría de los métodos basados en la superficie es asimétrico, no unidireccional. Eso significa que el análisis de flujo multidimensional es necesario para examinar los resultados del ensayo.
- 2) Las diferencias en la permeabilidad de los HPCs son mucho menores y eso desafía a la mayoría de los aparatos de ensayo in situ para diferenciarlos. Los ensayos de caída de presión y de presión constante son posibles para caracterizar HPCs. El primero exige que la geometría del estanque sea conocida y registre la disminución de la presión dentro del mismo, en cuanto al segundo, necesita del conocimiento de los ensayos de geometría, salida y presión. El ensayo de agua de alta presión y el ensayo de aire modificado son proyectados con base en esos conceptos para medir la permeabilidad de HPCs.
- 3) El éxito de las evaluaciones de campo está muy influenciado por la cantidad de agua y por los gradientes de humedad del concreto. La importancia de la condición inicial antes de las mediciones debe ser destacada. Muestras "secas" o "saturadas" son preferidas para medir las propiedades de transporte. Además de eso la presencia de fisuras y heterogeneidades en el concreto también puede afectar significativamente las velocidades de flujo.
- 4) La mayoría de los trabajos se concentra en los ensayos de permeabilidad in situ, en cuanto solo tres ensayos de migración iónica fueron evaluados para la aplicación en campo. Mayores esfuerzos deben ser datos en la investigación laboratorial para mejorar totalmente la eficacia de esos métodos y para su aplicación en campo, pues los ensayos de migración de iones son capaces de evaluar la calidad del recubrimiento superficial hasta 30 mm.

3 CONCLUSIONES

Si el ensayo fue realizado más temprano en el proceso de construcción, entonces posibles problemas pueden identificarse y tomarse medidas apropiadas al inicio de la vida de las estructuras. Los métodos de ensayo de permeabilidad in situ y de laboratorio muestran potencial para evaluar el desempeño de durabilidad de HPCs. Aunque testigos obtenidos a partir de estructuras en servicio pueden ser evaluados en laboratorio bajo condiciones de temperatura y humedad controladas, ensayos confiables de permeabilidad in situ dan la ventaja de realizar diversos ensayos en el mismo local de ensayo sin dañar la estructura. Esos métodos de ensayo pueden formar la base del desarrollo de una estrategia de especificación basada en el desempeño para estructuras de concreto, pero ellos tienen sus propios beneficios específicos y también desventajas. Además de varios aspectos interesantes no fueron totalmente abordados en estudios anteriores, es decir la influencia del deterioro y de la carga, la influencia de la fisuración, la relación entre la microestructura y las propiedades de permeabilidad, adecuación de los métodos de ensayo de permeabilidad convencionales para evaluar nuevos materiales cementíceos multifuncionales. Por lo tanto, más pesquisas son necesarias para esclarecer esos factores. El conocimiento y técnicas establecidas para evaluar el desempeño de concretos de cemento Portland normales es un área que requiere desarrollo, si estos son usados para la evaluación del desempeño de HPCs.

4 AGRADECIMIENTOS

Este artículo fue preparado sobre la base de pesquisas realizadas por los autores junto a sus colegas y alumnos. No fue posible listar todos los que contribuyeron como autores, pero sus aportes en las discusiones y contribuciones para el contenido de este documento es reconocido con gratitud. El financiamiento para el trabajo fue recibido de una variedad de fuentes, incluyendo el consejo de Pesquisa de ingeniería y Ciencias Físicas, el Consejo de Estrategia de Tecnología y la Fundación Nacional de Ciencia de China.

5 REFERENCIAS

- Aitcin, P. C. (1998), *High performance concrete*. Spon Press.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (2015,) *AASHTO T-277, Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*, 15 pages.
- Andrade, C. (1993), *Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements*, Cement and Concrete Research, vol 23, 724-742. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(93\)90023-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(93)90023-3)
- ASTM C-1202(a) (2017), *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*, ASTM, 8 pages.
- Basheer, P. A. M. (1993), *A brief review of methods for measuring the permeation properties of concrete in-situ*, Structures and Buildings, Proceedings of the ICE, vol 99, 74-83. <https://doi.org/10.1680/istbu.1993.22515>
- Basheer, P. A. M., Long, A. E. and Montgomery, F. R. (1994), *The Autoclam - a new test for permeability*, Concrete, vol 28, 27-29.
- Basheer, P. A. M. (2001), *Permeation analysis, in Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology: Principles, Techniques and Applications*, Editors V.S. Ramachandran and J. J. Beaudoin, Noyes Publications. 658-727.
- Basheer, P. A. M., Andrew, R. J., Robinson, D., Long, A. E. (2005), *'PERMIT' ion migration test for measuring the chloride ion transport of concrete on site*, NDT & E International, vol 38, 219-229. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2004.06.013>
- Basheer, L., Cleland, D. J. and Basheer, P. A. M. (2008), *Autoclam Permeability System to assess the protection provided by surface treatments*. In: JIN W.-L., UEDA T. & BASHEER P.A.M., eds. *Advances in Concrete Structural Durability*, Proceedings of the International Conference on Durability of Concrete Structures, 26-27 November Zhejiang University, Hangzhou, China. Zhejiang University Press, 1186-1192.
- Bentur, A. and Mitchell, D. (2008), *Materials performance lessons*, Cement Concrete Research, vol 38, 259-272. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.009>
- Beushausen, H. and Luco, L. F. (2016), *Performance-based specifications and control of concrete durability*, RILEM TC 230-PSC State-of-the-Art report, 373 pages.
- BS 1881-208 (1996), *Testing concrete. Recommendations for the determination of the initial surface absorption of concrete*, BSI, 14 pages.
- BS-EN 12390-8 (2009), *Testing hardened concrete. Depth of penetration of water under pressure*, BSI, 10 pages.
- BS-EN 13057 (2002), *Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of resistance of capillary absorption*, BSI, 16 pages.
- Chia, K. S. and Zhang, M. H. (2002), *Water permeability and chloride penetrability of high-strength lightweight aggregate concrete*. Cement and Concrete Research, vol 32, 639-645. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00738-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00738-4)
- Concrete Society Technical Report: No. 31, *Permeability testing of site concrete*. 2008, 90 pages.

- Dhir, R. K., Hewlett, P. C., Chan, Y. N. (1989), *Near-surface characteristics of concrete prediction of carbonation resistance*. Magazine of Concrete Research, vol 41, 137-43. <https://doi.org/10.1680/mac.1989.41.148.137>
- Dinku, A. and Reinhardt, H. (1997), *Gas permeability coefficient of cover concrete as a performance control*. Materials and Structures. 30: 387-393. <https://doi.org/10.1007/BF02498560>
- Elahi, A., Basheer, P. A. M., Nanukuttan, S. V. and Khan, Q. U. Z. (2010), *Mechanical and durability properties of high performance concretes containing supplementary cementitious materials*. Construction and Building Materials, vol 24, 292-299. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.045>
- El-Dieb, A. E. and Hooton, R. D. (1995), *Water permeability measurement of high performance concrete using a high pressure triaxial cell*. Cement and Concrete Research, vol 25, 1199-1208. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00112-P](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00112-P)
- Figg, J. W. (1973), *Methods of measuring the air and water permeability of concrete*. Magazine of Concrete Research, 25: 213-219. <https://doi.org/10.1680/mac.1973.25.85.213>
- Galle, C., Peycelon, H. and Bescop, P. L. (2004), *Effect of an accelerated chemical degradation on water permeability and pore structure of cement-based materials*. Advances in Cement Research, vol 16, 105-114. <https://doi.org/10.1680/adcr.2004.16.3.105>
- Guth, D. L. and Zia, P. (2001), *Evaluation of New Air Permeability Test Device for Concrete*. ACI Materials Journal, vol 98: p. 44-51.
- Ganjian, E. and Pouya, H. S. (2009), *The effect of Persian Gulf tidal zone exposure on durability of mixes containing silica fume and blast furnace slag*. Construction and Building Materials, vol 23(2): p. 644-652. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.02.009>
- Hearn, N. and Morley, C. T. (1997), *Self-sealing property of concrete—Experimental evidence*. Materials and Structures, vol 30, 404-411. <https://doi.org/10.1007/BF02498563>
- McCarter, W. J., Emerson, M. and Ezirim, H. (1995), *Properties of concrete in the cover zone: developments in monitoring techniques*, Magazine of Concrete Research, vol 47, 243-251. <https://doi.org/10.1680/mac.1995.47.172.243>
- McCarter, W. J., Starrs, G., Kandasami, S., Jones, M. R. and Chrisp, M. (2009), *Electrode configurations for resistivity measurements on concrete*, ACI Materials Journal, vol 106, 258-264.
- McCarter, W. J., Suryanto, B., Taha, H. M., Nanukuttan, S. and Basheer, P. A. M. (2017), *A Testing Methodology for Performance-Based Specification*, Journal of Structural Integrity and Maintenance, vol 2, 78-88.
- Meletioui, C. A., Tia, M. and Bloomquist, D. (1992), *Development of a field permeability test apparatus and method for concrete*. ACI Materials Journal. 89: 83-89.
- Montgomery, F. R. and Adams, A. E. (1985), *Early experience with a new concrete permeability apparatus*, Proceeding of Structural Faults, ICE London, 359-363.
- Nanukuttan, S. V., Basheer, P. A. M., McCarter, W. J., Tang, L., Holmes, N., Chrisp, T. M., Starrs, G. and Magee, B. (2015), *The performance of concrete exposed to marine environments: predictive modelling and use of laboratory/on site test methods*, Construction and Building Materials, vol 93, pp. 831-840.
- Nokken, M. R. and Hooton, R. D. (2007), *Using pore parameters to estimate permeability or conductivity of concrete*. Materials and Structures, vol 41, 1-16. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9212-y>
- NT Build-492 (1999), *Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments*, Nordtest method, 8 pages.
- Parrott, L. J. and Hong, C. Z. (1991), *Some factors influencing air permeation measurements in cover concrete*. Materials and Structures. vol 24: 403-408. <https://doi.org/10.1007/BF02472013>
- Perry, M. and Hollis, D. (2003), *The generation of monthly gridded datasets for a range of climatic variables over the United Kingdom*. Met Office.

- Pocock, D. and Corrans, J. (2007), *Concrete durability testing in Middle East construction*. Concrete Engineering International, 52-54.
- Reinhardt, H. and Jooss, M. (2003), *Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width*. Cement and Concrete Research, vol 33, 981-985. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01099-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01099-2)
- Romer, M. (2005), *Effect of moisture and concrete composition on the Torrent permeability measurement*. Materials and Structures, vol 38 (279): 541-547. <https://doi.org/10.1007/BF02479545>
- Schonlin, K. and Hilsdorf, H. K. (1987), *Evaluation of the effectiveness of curing of concrete structures*, in Concrete Durability: Katharine and Bryant Mather International Conference, Scanlon J. M. (Editor). ACI, 207-226.
- Tang, L. and Nilsson, L. O. (1992), *Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electric field*. ACI Materials Journal, vol 89, 49-53.
- Tang, L., Nilsson, L. O. and Basheer, P. A. M. (2011), *Resistance of Concrete to Chloride Ingress: Testing and modelling*. Spon Press.
- Torrent, R. T. (1992), *A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site*. Materials and Structures, vol 25, 358-365. <https://doi.org/10.1007/BF02472595>
- Whiting, D. (1981), *Rapid Determination of the Chloride Permeability of Concrete*. in FHWA/RD-81/119. Federal Highway Administration. 173 pages.
- Whiting, D. and Cady, P. D. (1992), *Condition Evaluation of Concrete Bridges Relative to Reinforcement Corrosion*. Strategic Highway Research Program: Washington, D.C. 93 pages.
- Yang, K., Basheer, P. A. M., Magee, B. and Bai, Y. (2013), *Investigation of moisture condition and Autoclam sensitivity on air permeability measurements for both normal concrete and high performance concrete*, Construction and Building Materials, vol 48, 316-331. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.087>
- Yang, K., Basheer, P. A. M., Magee, B., Bai, Y. and Long, A. E. (2015), *Repeatability and Reliability of New Air and Water Permeability Tests for Assessing the Durability of High-Performance Concretes*, Journal of Materials in Civil Engineering, vol 27, 11 pages. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001262](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001262)
- Yang, K., Basheer, P. A. M., Bai, Y., Magee, B. and Long, A. E. (2015), *Assessment of the effectiveness of the guard ring in obtaining a uni-directional flow in an in situ water permeability test*, Materials and Structures, vol 48, 167–183. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0175-5>
- Zhang, P., Wittmann, F. H., Vogel, M., Müller, H. S. and Zhao, T. J. (2017), *Influence of freeze-thaw cycles on capillary absorption and chloride penetration into concrete*, Cement and Concrete Research, vol 100, 60-67. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.05.018>