

## Hydraulic diffusivity of different concrete mixtures based on sorptivity and moisture concentration profiles

**Lidia Argelia Juárez Ruiz<sup>1</sup>, Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita<sup>1\*</sup>,  
Pedro Castro Borges<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>CIIDIR Oaxaca. Hornos 1003. Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México. 71230.  
Tel. (52) 9515170610 Ext. 82715. lidiargelia@gmail.com; \*pcano@ipn.mx

<sup>2</sup>CINVESTAV Mérida. Km. 6 Ant. Carr. a Progreso. Mérida, Yucatán México. 97320.  
Tel (52) 9999429425. pcb1963@gmail.com

### Abstract

Unsaturated flow in porous media theory relates hydraulic diffusivity with water content assuming an exponential or power dependence on water saturation. Water sorptivity, a porous material property, describes the capillary absorption rate of a porous material exposed to a water source. It is an important parameter describing the concrete cover quality of reinforced concrete. Some authors suggest that knowing the sorptivity enables one to obtain the hydraulic diffusivity. This work is based on a previous research carried out to determine the effect of curing conditions on the drying and capillary water absorption of four concrete mixtures. The objective of this paper is to determine the hydraulic diffusivity of different concrete mixtures from water content profiles obtained with Magnetic Resonance Imaging (MRI) and from sorptivity, according to the method developed by Lockington and to demonstrate the validity of this solution for the concrete mixtures studied. Results showed that the exponential and power dependence of diffusivity with respect to the water content are not valid for all concrete types studied because rehydration effects may modify the capillary water ingress.

**Key words:** sorptivity, hydraulic diffusivity, porous media.

## Difusividad hidráulica de diferentes tipos de concreto basada en sortividad y en perfiles de concentración de humedad

### Resumen

La Teoría de Flujo insaturado en materiales porosos relaciona la difusividad hidráulica con el contenido de agua, asumiendo una dependencia exponencial o potencial del contenido de humedad. La sortividad, es una propiedad que describe la velocidad de absorción capilar de un material poroso expuesto a una fuente de agua y un parámetro determinante de la calidad del recubrimiento del concreto armado. La literatura plantea que conociendo la sortividad, puede obtenerse la difusividad hidráulica. Este trabajo está basado en una investigación anterior desarrollada para conocer los efectos de curado en las propiedades de secado y absorción capilar de cuatro mezclas de concreto. El objetivo actual fue determinar la difusividad hidráulica de las mezclas de concreto, a partir de perfiles de contenido de humedad obtenidos por medio de Imaginología por Resonancia Magnética (IRM), así como de la sortividad según el método desarrollado por Lockington, y demostrar la validez de esta solución para los tipos de concreto ensayados. Los resultados mostraron que la dependencia exponencial y potencial de la difusividad con respecto al

contenido de humedad no es aplicable en todos los tipos de concreto ensayados debido a efectos de rehidratación que pueden modificar el ingreso de agua por capilaridad.

**Palabras clave:** sortividad, difusividad hidráulica, medio poroso.

## Introducción

La permeabilidad del concreto al agua, y por lo tanto a sustancias agresivas, es factor de gran importancia dentro de los nuevos criterios para evaluar la durabilidad del concreto, más que únicamente el valor de la resistencia mecánica [1, 2]. A partir de los trabajos de Dhir [3], Hall [4] y Kelham [5], sobre el desarrollo de varios métodos de prueba para evaluar las características de absorción capilar en concreto, existe un mayor interés en relacionar la durabilidad del material con esta propiedad de transporte de fluidos [6, 7].

La sortividad, propiedad que describe la velocidad de absorción capilar de un material poroso cuando se expone a una fuente de agua [2, 4, 8-10], es un parámetro determinante de la calidad del recubrimiento del concreto armado y tiene relación directa con su vida útil [10-13].

La sortividad está relacionada matemáticamente con la difusividad hidráulica, la cual se emplea para modelar el transporte de humedad en un medio poroso y puede determinarse por tres métodos: 1°, a partir de la relación entre el coeficiente de absorción y el contenido inicial de agua [14]; 2°, a partir de perfiles de humedad en estado estacionario, requiere de saturación capilar y 3°, a partir de perfiles de humedad transitorios, empleando el método de Boltzmann [4, 14].

Este trabajo se basa en la investigación desarrollada por Cano [15], quien utilizó la imagenología por resonancia magnética (IMR) para estudiar la penetración de agua en distintos tipos de concreto curados en húmedo y con membrana. El objetivo del presente trabajo es determinar la aplicabilidad del método desarrollado por Lockington *et al.* [16] para encontrar la difusividad de la humedad a partir de la sortividad, en varios tipos de concretos y en consecuencia, si es posible aplicar este procedimiento en forma general en materiales porosos de base cemento.

## Teoría

La teoría de flujo insaturado describe el proceso de flujo capilar en materiales cementantes porosos. Aplicando la ecuación de Darcy [4, 14] modificada para flujo capilar en materiales no saturados (ec. 1) se relaciona la difusividad con el contenido de agua [4, 17], donde  $D(\theta)$  es la difusividad hidráulica;  $\Psi$ , el potencial de humedad y  $K$ , la permeabilidad (ec.2):

$$\theta = -D(\theta) \frac{d\theta}{dx} \quad (1)$$

$$D(\theta) = -K(\theta) \frac{d\Psi}{d\theta} \quad (2)$$

La penetración de agua en el concreto como flujo unidimensional puede definirse como [4, 16]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad (3)$$

bajo las condiciones de frontera:  $\theta = \theta_s$  cuando  $x = 0, t \geq 0$  y  $\theta = \theta_0$  para  $x \neq 0, t = 0$ .

$\theta_0$  y  $\theta_s$  son las fracciones de volumen de agua contenidas en el sólido en estados seco y saturado. Introduciendo la variable de Boltzmann,  $\phi = x t^{-1/2}$ , la ecuación (3) queda:

$$-\frac{1}{2} \Phi \frac{d\theta}{d\phi} = \frac{d}{d\phi} D(\theta) \frac{d\theta}{d\phi} \quad (4)$$

donde:

$$D_\theta = -\frac{1}{2} \frac{d\theta}{d\phi} \int_{\theta_0}^{\theta_s} \phi(\theta) d\theta. \quad (5)$$

Con  $\theta = 1$  para  $\phi = 0$  y  $\theta = 0$  cuando  $\phi \rightarrow \infty$ . La solución a la ecuación es por tanto [18]:

$$x(\theta, t) = \phi(\theta) t^{1/2}. \quad (6)$$

Como puede observarse a partir de la ecuación (6) el volumen total de agua absorbido de

manera unidimensional se incrementa en  $t^{1/2}$ . Esta ecuación es la base de la sortividad  $S$ , que puede determinarse fácilmente por el cambio de masa del material poroso debido a la absorción de agua en función del tiempo [6, 9]. Hall [4] definió la sortividad ( $S$ ) como:

$$i = St^{1/2} \quad (7)$$

donde  $i$  es el volumen acumulado de agua absorbida por unidad de área y  $t$  el tiempo.  $S$  se relaciona con  $D$  matemáticamente, mediante la solución de Philip [19] a la ecuación (1), dando  $\theta(x,t)$ . Para este caso unidimensional, donde  $\theta$  es una función de la variable  $\phi = xt^{-1/2}$ , la absorción acumulada en cualquier tiempo  $t$ , está dada por:

$$i = \int_{\theta_0}^{\theta_1} x d\theta = t^{1/2} \int_{\theta_0}^{\theta_1} \phi d\theta \quad (8)$$

por lo tanto:

$$S = \int_{\theta_0}^{\theta_1} \phi d\theta = (\theta_1 - \theta_0) \int_0^1 \phi d\theta_t \quad (9)$$

donde  $\theta_t = \frac{\theta - \theta_0}{\theta_1 - \theta_0}$  es el contenido normalizado de agua y  $S$  es la sortividad.

La difusividad  $D$  no es una función fácil de determinar [18] y normalmente se requiere información sobre perfiles de penetración de agua [10]. Lockington *et al.* [16] plantean que la difusividad puede estimarse a partir de medidas de sortividad y porosidad, asumiendo una dependencia exponencial o potencial de la difusividad del contenido de agua [4, 16], donde la relación entre  $D$  y  $\theta$  está dada por las ecuaciones (10) y (11) respectivamente:

$$D = D_0 e^{n\theta} \quad (10)$$

$$D = D_0 \theta^n \quad (11)$$

$\theta$  es el contenido reducido o normalizado de agua y  $D_0$  y  $n$  son constantes ajustadas empíricamente. Lockington [16] encontró que la difusividad de morteros ensayados por Hall [4], asumiendo una dependencia exponencial, correspondía a un valor  $n = 6.55$  y considera apropiado utilizar valores de  $n$  entre 6 y 8 para materiales de construcción, sugiere tomar el valor  $n = 6$  como valor estándar para concretos [16, 17]. Aplicando

el método de Lockington [16], a partir de la solución aproximada al problema no lineal de la ecuación (4) planteada como:

$$2 \int_{\theta}^1 \frac{D(a)}{a} da = s\Phi + \frac{A}{2} \Phi^2 \quad (12)$$

conocida la sortividad  $S$  y el valor  $n$ , es posible estimar el parámetro  $D_0$  y así determinar la difusividad hidráulica  $D$  [16, 17] mediante las siguientes ecuaciones para una dependencia exponencial

$$D_0 = \frac{n^2 s^2}{e^{n(2n-1)} - n + 1} \quad (13)$$

o potencial

$$D_0 = s^2 \frac{(1+n)(2+n)}{(3+n)} \quad (14)$$

donde  $s$  es la sortividad reducida (ec. 15), determinada a partir de la sortividad ( $S$ ) en función del contenido de agua en el espécimen saturado,  $\theta_s$  es el contenido de agua en estado húmedo y  $\theta_0$  es el contenido de agua en estado seco, esto es:

$$s = S / (\theta_s - \theta_0) \quad (15)$$

## Estudio experimental

La preparación de probetas y obtención de perfiles corresponde al experimento realizado por Cano [15]. Se analizaron los perfiles de concentración de agua obtenidos en pruebas de absorción capilar realizadas en especímenes elaborados con cuatro mezclas de concreto, ordinario (OPC), alta resistencia (HSC) y autoconsolidable con adiciones de ceniza volante en un 30% (SCC30) y 50% (SCC50), preparadas de acuerdo a la norma ASTM C 192 (Tabla 1). El tamaño máximo del agregado grueso fue 13 mm y el módulo de finura de la arena 2.67 [15].

En la Tabla 2 se muestran las propiedades físicas y análisis químico de los materiales cementantes [15]. Los perfiles fueron obtenidos de especímenes cilíndricos elaborados por triplicado de 48 mm de diámetro y 100 mm de altura, sometidos a diferentes regímenes de curado que corresponden a condiciones de clima cálido seco (Tabla 3), con duración de 1, 7 y 28 días (ASTM C 192).

Tabla 1  
Características de las mezclas [15] diseñadas de acuerdo a Okamura [20]

Mezcla	OPC	HSC	SCC30	SCC50
Relación a/c	0.60	0.30	0.33	0.36
Dosificación de la mezcla (kg/m <sup>3</sup> )				
Cemento Portland blanco	329	495	382	250
Humo de sílice	-	43	-	-
Ceniza volante Clase F	-	-	164	250
Agua	197	160	182	182
Arena	853	640	692	692
Grava	921	1040	871	871
HRWR (L/m <sup>3</sup> ) Tipo F (ASTM C494)	-	1.8	1.8	1.8
Retardante (L/m <sup>3</sup> ) Tipo B (ASTM C494)	0.6	1.0	-	-
Revenimiento (mm)	75	110	-	-
Flujo del revenimiento (mm)	-	-	605	635
Contenido de aire (%)	2.5	2.5	1.0	1.0
Peso unitario (kg/m <sup>3</sup> )	2300	2381	2293	2247
Temperatura inicial (°C)	25	25	23	22

Tabla 2  
Propiedades físicas y análisis químico de materiales cementantes [15]

	Propiedad física		Análisis químico (% por masa)									
	Gravedad específica	superficie específica (m <sup>2</sup> /kg)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	L,O,I	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A
Cemento blanco	3.15	404	22,45	4,37	0,24	66,5	0,76	2,87	2,27	62	17	11
Ceniza volante	2.08	306	52,4	23,4	4,7	13,4	1,3	0,2	0,3	-	-	-
Humo de sílice	2.16		92	0,4	1,5	0,4	0,4	0,2	3	-	-	-

El curado con membrana es un método común de curado del concreto (ASTM C 309). Después de los distintos tipos de curado, a la edad de 56 días se secaron los especímenes en un horno a 105°C, hasta alcanzar masa constante.

Para minimizar las microgrietas todos los especímenes se secaron a una temperatura de 38°C, previo al secado a 105°C se aplicó resina epóxica en los lados para garantizar un solo fren-

te de penetración de agua y se sometieron a pruebas de absorción capilar. Todos los experimentos se realizaron a una temperatura ambiental de 22± 2°C [15]. Las probetas con peso inicial seco, se sometieron al proceso de absorción capilar determinando el peso a diferentes intervalos de tiempo de exposición 30, 60, 120, 240 y 480 min; 24, 48 y 96 h, hasta alcanzar un peso constante. En cada tiempo de pesado uno de los especíme-

Tabla 3  
Regímenes de curado de los especímenes

Tipo	Características	
1	HMC28D	Curado en húmedo 28 d a 38°C y 28 d secado a 38°C y 40% HR
2	SMC28D	Curado húmedo estándar 28 d a 23°C y 28 d secado a 38°C y 40% HR
3	HMC1D	Curado húmedo 1 d a 38°C y 55 d secado a 38°C y 40% HR
4	HMC7D	Curado húmedo 7 d a 38°C y 49 d secado a 38°C y 40% HR
5	HAC	Curado en aire 56 d a 38°C y 40% HR
6	HCC	Curado con membrana 56 d a 38°C y 40% HR

nes se colocaba en un equipo de resonancia magnética General Electric a una frecuencia para hidrógeno de 85 MHz para obtener los perfiles de concentración de agua [15]. La información generada se analizó para obtener la difusividad hidráulica de cada espécimen a partir de los perfiles de penetración de agua según el método de Hall [4] empleando la ec. (4). La determinación de difusividad hidráulica a partir de la sortividad se realizó de acuerdo al método propuesto por Lockington *et al.* [16, 17] asumiendo funciones de difusividad expresadas por las ecuaciones (10) y (11). Este método se consideró porque no siempre es posible obtener los perfiles de penetración de agua, pues implica el uso de equipo especializado de resonancia magnética u otro método de prueba. Los valores de “*n*” considerados fueron de 6 a 8, recomendados por Lockington para materiales de construcción, aunque inclusive se hicieron determinaciones en el rango de valores de  $n = 4$  a  $n = 10$ . Con las funciones de difusividad obtenidas por ambos métodos se obtuvieron los perfiles de penetración de agua para cada espécimen empleando el programa COMSOL Multiphysics 3.3™ para solucionar la ec. (3).

## Resultados y discusión

### 1. Determinación de la difusividad hidráulica a partir de los perfiles de penetración

Los perfiles típicos de penetración transformados de Boltzmann (PTB) se presentan en la Figura 1-a; la difusividad en función del contenido de humedad se muestra en la Figura 1-b. Estos perfiles se compararon empleando la función de

difusividad, con COMSOL Multiphysics 3.3™ se dio solución a la ecuación (3) y se obtuvieron los perfiles mostrados en la Figura 1-c que se comparan con los originales. Se observa que es posible obtener una buena predicción de los perfiles de penetración. Las funciones de difusividad hidráulica obtenidas tuvieron un coeficiente de determinación de 99.99%.

En la Figura 2 se muestran las funciones de difusividad,  $D$  ( $\text{mm}^2 \text{min}^{-1}$ ), calculadas a partir de los perfiles de penetración originales en especímenes sometidos al mismo régimen de curado de cuatro mezclas de concreto. Es importante hacer notar la forma que toma  $D$  ( $\theta$ ) para las cuatro mezclas, ya que difiere de la forma obtenida con las funciones exponencial y potencial (Ec. 10 y Ec. 11) y es similar a la difusividad hidráulica reportada recientemente por Picandet *et al.* [21].

La evaluación de la difusividad con respecto a los regímenes de curado fue similar en las 4 mezclas, la menor difusividad fue para el régimen 1(HMC28D) y 4(HMC7D), seguido del 3(HMC1D); la difusividad mayor fue para el régimen 5(HAC), seguido del 6(HCC). Esto es indicativo del grado de permeabilidad de los especímenes [15, 22] y sobre los beneficios del curado en húmedo y la similitud de resultados en los curados a 28 y 7 días. Los perfiles de penetración obtenidos mediante el programa COMSOL Multiphysics 3.3™ fueron en algunos casos similares a los originales (Figura 1-c). La función de difusividad que mejor representó los perfiles originales corresponden a una ecuación polinomial del tipo:

$$y = (a+cx+ex^2) / (1+bx+dx^2) \quad (16)$$

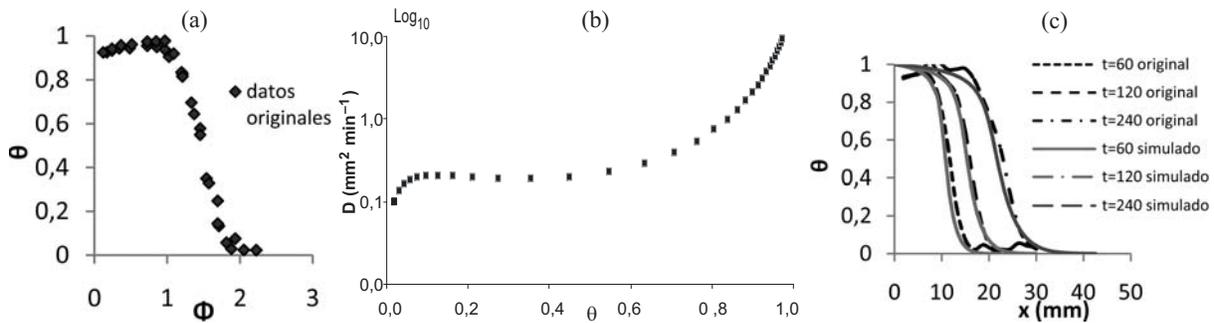


Figura 1. a) Perfiles transformados de Boltzmann (PTB); b) Difusividad en función del contenido de humedad; c) Perfiles de penetración de agua originales comparados con los perfiles obtenidos a partir de la difusividad (perfiles simulados).

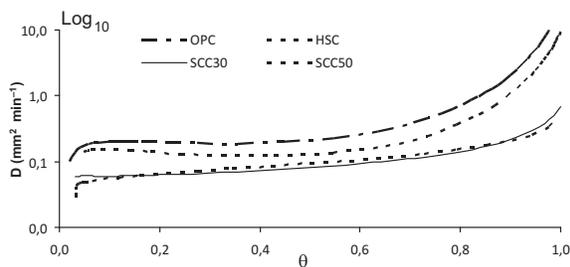


Figura 2. Difusividad hidráulica,  $D$  ( $\text{mm}^2 \text{min}^{-1}$ ), calculada a partir de los perfiles de penetración originales, para especímenes de cuatro mezclas de concreto con régimen de curado HMC28D.

donde  $a, b, c, d$  y  $e$  son valores empíricos. Esta función representa un perfil del frente de penetración saturado con una muy rápida disminución en el contenido de humedad, lo cual corresponde según la literatura [17] a un valor de “ $n$ ” mayor a 10, pero que en este caso no se ajusta al modelo exponencial o potencial asumido por el método de Lockington.

En la Figura 3 se muestra el PTB de los datos originales y los obtenidos mediante una ecuación polinomial (ec. 6). Es posible que este tipo de perfiles sea resultado de una microestructura modificada como resultado del proceso de rehidratación en función del tipo de curado [13, 23].

## 2. Determinación de la difusividad hidráulica a partir de la sortividad

El valor de la sortividad determinado para cada espécimen se muestra en la Figura 4. El valor de este parámetro fue menor para el concreto autoconsolidable (mezclas SCC30 y SCC50), es-

pecialmente para el curado en húmedo a 28 y 7 días. Los valores altos de sortividad de las mezclas SCC30-HAC y SCC50-HAC, especialmente curadas en aire, son probablemente debidos a la alta porosidad producida por la pérdida de agua a edades tempranas y la lenta reacción de la ceniza volante. Los valores mayores correspondieron al concreto ordinario (OPC) curado al aire y con membrana (HAC y HCC).

En el concreto autoconsolidable, el curado con membrana disminuye notablemente la sortividad con respecto al curado en aire y el curado en húmedo por 1 día, debido a que ambos contienen ceniza volante y requiere mayor tiempo de curado debido a la lenta reacción puzolánica.

Considerando investigaciones previas [10, 12, 24] que indican que a menor sortividad, mayor durabilidad, los resultados muestran claramente que el curado en húmedo a 28 y a 7 días fue el mejor y/o más efectivo ya que produjo un concreto con alta calidad en el recubrimiento, tal y como fue concluido por [15, 22, 23].

En la Figura 5(a) se muestra la difusividad de uno de los especímenes obtenida a partir de los perfiles de penetración y la difusividad obtenida por el procedimiento descrito por Lockington *et al.* [16] para las funciones exponencial y potencial; en la Figura 5(b) los PTB de dichas funciones.

En la Figura 6 se muestran los PTB originales, comparados con los PTB obtenidos por el método de Lockington *et al.* (16), usando una función exponencial. Los PTB originales corresponden a funciones de tipo polinomial que difieren de las funciones potencial y exponencial empleadas en este método.

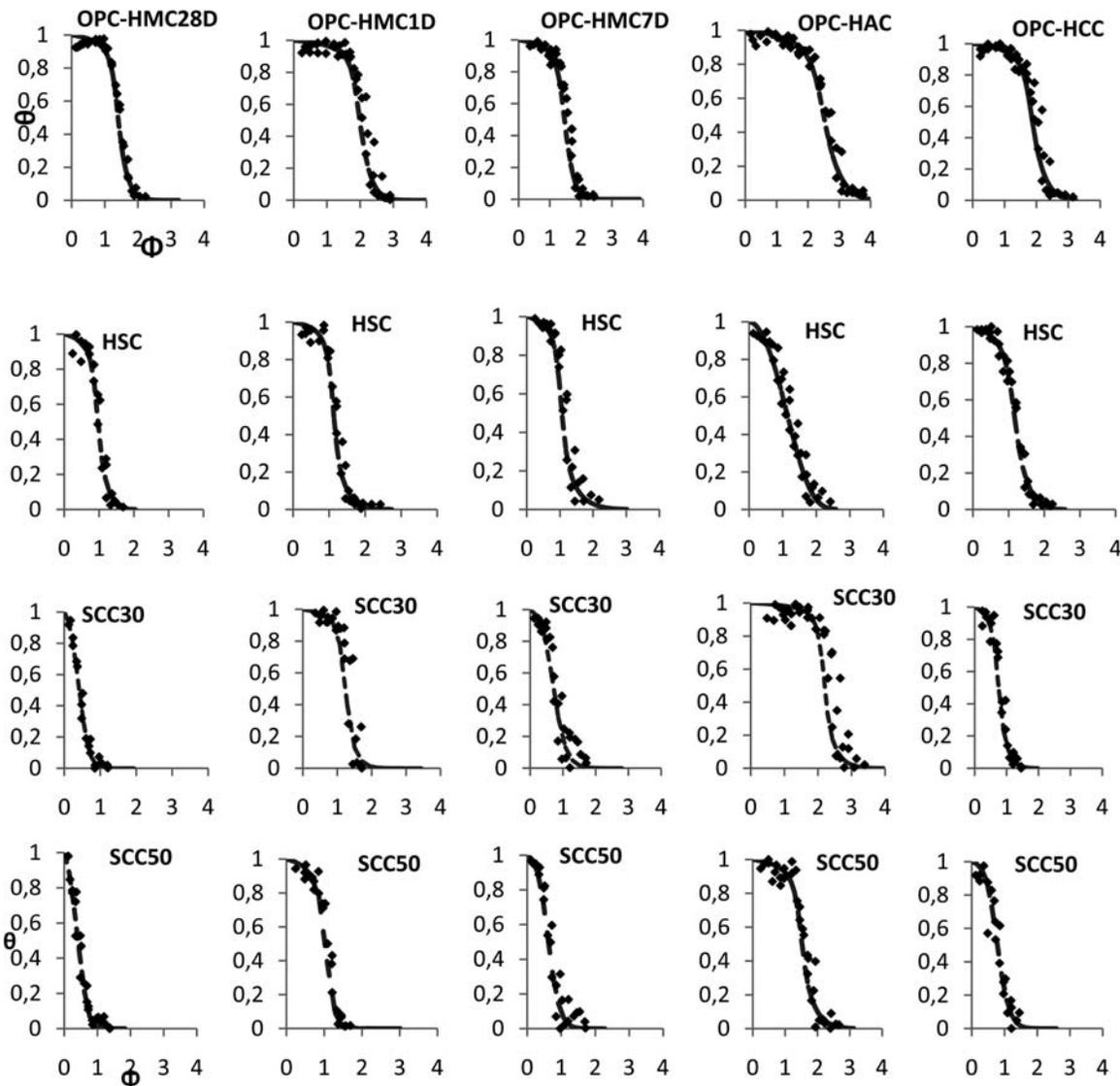


Figura 3. Comparación de los perfiles transformados de Boltzmann (PTB) originales que corresponden a una función polinomial obtenidos para las mezclas OPC, HSC, SCC30 y SCC50, para cada régimen de curado, contra los datos originales graficados en función de  $\Psi$ . (El símbolo  $\blacklozenge$  corresponde a los datos de PTB originales y ---- corresponde a la función polinomial).

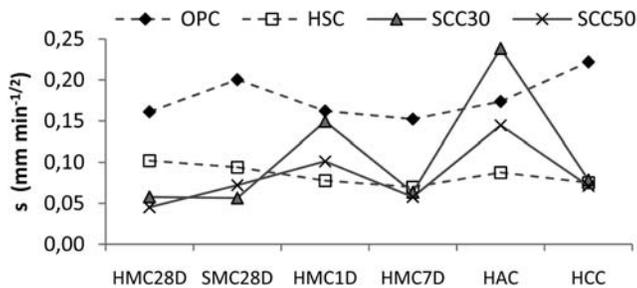


Figura 4. Valores de sortividad para las cuatro mezclas de concreto (OPC, HSC, SCC30 y SCC50) y los seis regímenes de curado correspondientes.

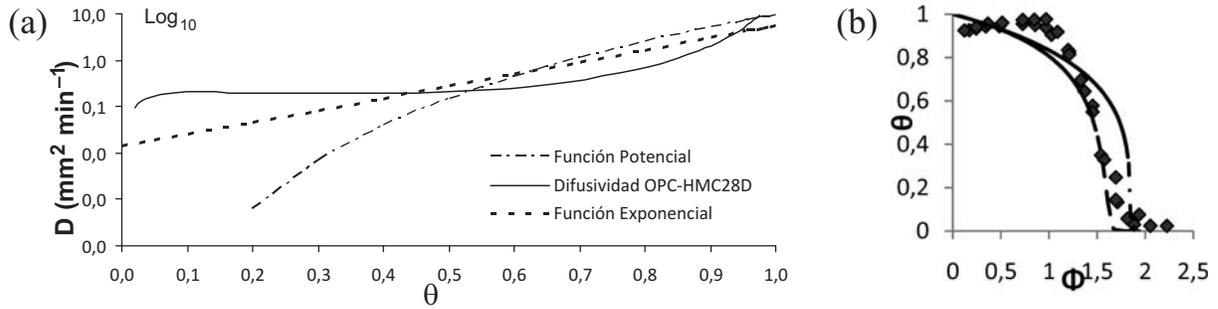


Figura 5. Comparación de la Difusividad hidráulica y perfiles transformados de Boltzmann (PTB), obtenidos mediante los perfiles de penetración y a partir del valor de sortividad, aplicando el método de Lockington para una función exponencial Ec. (10) y una función potencial Ec. (11).

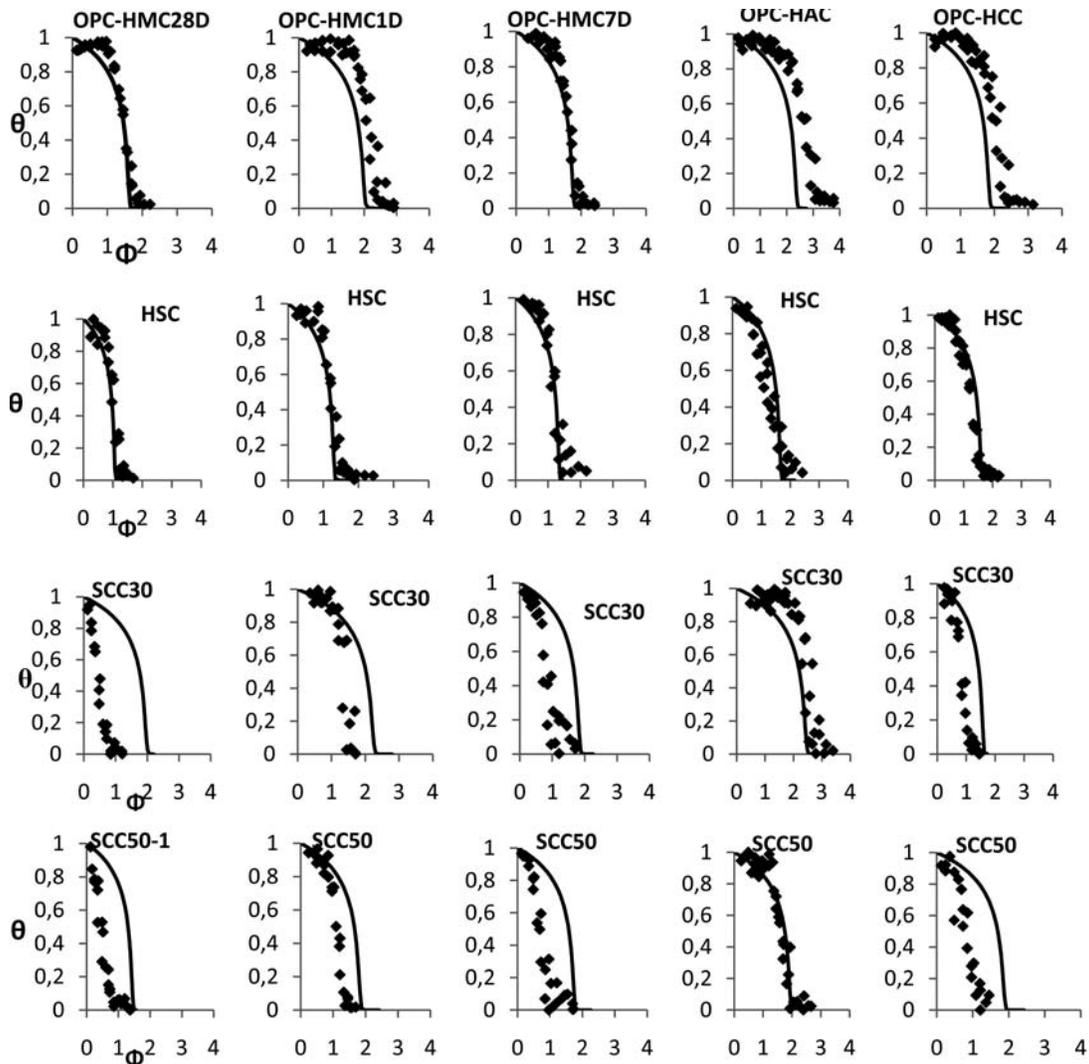


Figura 6. Comparación de los perfiles transformados de Boltzmann (PTB) obtenidos para las mezclas OPC, HSC, SCC30 y SCC50 mediante el uso de la función exponencial, Ec. (10), contra los PTB originales (función polinomial), para cada régimen de curado. El símbolo  $\blacklozenge$  corresponde a los datos de PTB originales y — corresponde a la función exponencial.

En la comparación de los perfiles se obtuvieron perfiles típicos de penetración; para los especímenes de las mezclas OPC y HSC se logró una buena aproximación, excepto una pequeña diferencia en los especímenes de OPC con proceso de curado HAC Y HCC; para las mezclas SCC30 y SCC50 no fue posible obtener la difusividad hidráulica de los perfiles de origen, excepto en los especímenes de proceso de curado en aire, HAC. Esto significa que las características del concreto autoconsolidable, como la porosidad, influyen significativamente en los resultados. Comparado con el concreto OPC, la microestructura del SCC es más densa.

En [15, 22] se comenta que el concreto SCC no solo posee una baja permeabilidad, sino que tiene una cualidad de auto-sellado cuando se presentan microgrietas, lo cual modifica su microestructura e influye en la difusividad hidráulica. Esto indica que el método de Lockington *et al.* [16] para determinar la difusividad hidráulica del concreto, asumiendo una función exponencial o potencial, no es representativo para todas las condiciones en materiales basados en cemento.

De hecho Hall [18] definió como fenómeno de difusión anómala en flujo no saturado este comportamiento, ya que la velocidad de absorción capilar de agua en materiales basados en cemento se ve afectada por la interacción entre el agua y la matriz de cemento endurecida [25]. Es posible que este fenómeno impida la aplicación general del método de Lockington y por lo tanto, las funciones de difusividad exponencial y potencial no representan adecuadamente todos los perfiles estudiados. Los resultados indican que al modelar la penetración de agua en materiales basados en cemento asumiendo una función exponencial o potencial, la predicción de perfiles de penetración de humedad estará sobreestimada y por lo tanto se tendrán desviaciones importantes en perfiles de penetración de cloruros, con respecto a resultados experimentales cuando la difusividad hidráulica sea incluida en este tipo de predicciones [26], sobre todo en concretos autoconsolidables cuyas características de rehidratación [27-29] pueden afectar la microestructura y modificar la absorción de agua. Aunque se ha estudiado la eficiencia de materiales suplementarios como *fly ash*, metakaolin [27, 29], y humo de sílice [28], con diferentes relaciones a/c encon-

trando que su uso disminuye la sortividad, será necesario realizar otras investigaciones para introducir los efectos de rehidratación y bloqueo de poros en una nueva función de difusividad.

## Conclusiones

Se determinó la difusividad hidráulica en cuatro tipos de concreto, a partir de perfiles de contenido de humedad y a partir de la sortividad obtenida con el método gravimétrico, con lo cual se obtienen las siguientes conclusiones:

1. La sortividad y la difusividad hidráulica tienen relación directa con el tipo y tiempo de curado del concreto.

2. En el concreto ordinario (OPC) y de alta resistencia (HPC) analizados, la difusividad hidráulica obtenida a partir de la sortividad con el método de Lockington (asumiendo una función exponencial) reproduce adecuadamente los PTB obtenidos experimentalmente para todos los tipos de curado.

3. En los concretos autoconsolidables SCC30 y SCC50 la difusividad hidráulica obtenida a partir de la sortividad con el método de Lockington (asumiendo una función exponencial o potencial) no reproduce los PTB obtenidos experimentalmente, probablemente debido al bloqueo de los poros durante la rehidratación de la pasta de cemento, lo cual reduce la penetración del frente húmedo. La excepción es el caso de curado al aire, donde la pérdida de agua a edades tempranas y la lenta reacción de la ceniza volante crean una alta porosidad, cuya permeabilidad no es afectada por los productos de rehidratación.

4. Se requiere encontrar una función de la difusividad que represente el comportamiento de concreto cuya penetración de agua sea fuertemente afectada por la rehidratación.

## Agradecimientos

Al CIIDIR Oaxaca IPN, al Programa de Becas de Movilidad Nacional Santander-Universia, a la SIP-IPN el apoyo al proyecto claves SIP 20090461, 20100391 y 20110616, a los Proyectos CONACYT Ciencia Básica 103763, CONACYT Ciencia Básica 57420 y CIAM 54826, al CINESTAV Unidad Mérida.

## Referencias

1. Bickley J.A., Hooton R.D. and Hoover K.C. Performance Specifications for Durable Concrete. *Concrete International*, September (2006), 51-57.
2. Basheer L., Kropp J. and Cleland D.J. Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review. *Construction and Building Materials*, 15 (2001), 93-103.
3. Dhir R.K., Hewlett P.C. and Chan Y.N. Near surface characteristics of concrete: assessment and development of in situ test methods. *Mag.of Conc. Res.* 39, No. 141 (1987), 183-195.
4. Hall C. Water sorptivity of mortars and concretes: a review. *Mag. of Conc.Res.* 41, No. 147 (1989), 51-61.
5. Kelham S. A water absorption test for concrete. *Mag.of Conc. Res.*40, No. 143 (1988), 106-110.
6. Claisse P. A., Elsayad, H. I. and Shaaban, I. G. Absorption and Sorptivity of Cover Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, August (1997), 105-110.
7. Romer M. Recommendation of RILEM TC 189-NEC: 'Non-destructive evaluation of the concrete cover' Comparative test - Part I - Comparative test of 'penetrability' methods. *Materials and Structures*,38 (2005), 895-906.
8. RILEM TC 116-PCD: Permeability of Concrete as a Criterion of its Durability. *Materials and Structures*, Vol.32, April (1999), 174-179.
9. ASTM C 1585-04. Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes, ASTM International, United States.
10. Ho D.WS. and Chirgwin, G.J. †A performance specification for durable concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 10, No. 5 (1996), 375-379.
11. Bentz D.P., Ehlen M.A., Ferraris Ch.F. and Garboczi E.J. Sorptivity-Based Service Life Predictions for Concrete Pavements. 7th International Conference on Concrete Pavements. Proceedings, International Society for Concrete Pavements. Sept 9-13 Vol. 1 (2001), 181-193.
12. Chirgwin G.J. † and Ho D.WS. The RTA approach and the use of water sorptivity for comparing the durability quality of concrete. Part B80-Concrete for bridgeworks. RTA (1990).
13. Güneysi E. and Mermerdas K. Comparative study on strength, sorptivity, and chloride ingress characteristics of air-cured and water-cured concretes modified with meta-kaolin, *Materials and Structures* 40, (2007), 1161-1171.
14. Janz M. Moisture transport and fixation in porous materials at high moisture levels. Lund Institute of Technology. Lund, Sweden, (2000), 13-19.
15. Cano-Barrita P.F. de J. Curing of High Performance Concrete in Hot Dry Climates Studied Using Magnetic Resonance Imaging, PhD Thesis, Univ. of New Brunswick, Canada. (2003).
16. Lockington D., Parlange J.-Y. and Duxl P. Sorptivity and the estimation of water penetration into unsaturated concrete. *Materials and Structures*. Vol.32, (1999), 342-347.
17. Conciatori D, Sadouki H. and Brühwiler E. Capillary suction and diffusion model for chloride ingress into concrete. *Cement and Concrete Research*, 38 (2008), 1401-1408.
18. Leech C., Lockington D. and Dux P. Unsaturated diffusivity functions for concrete derived from NMR images. *Materials and Structures*, Vol.36, July (2003), 413-418.
19. Hall C., Anomalous diffusion in unsaturated flow: Fact or fiction? *Cement and Concrete Research*, 37 (2007), 378-385.
20. Philip J.R. Numerical solution of equations of the diffusion type with diffusivity concentration-dependent. *Magazine of Concrete Research*, 41, No. 147, June (1989), 51-61.
21. Okamura H. Self-compacting high performance concrete. *Concrete International*ACI, Vol. 19, No. 7, (1997) 50.54.
22. Picandet V, Bastian G. and Khelidj A. Compared imbibitions of ordinary and high performance concrete with null or positive water

- pressure head. *Cement and Concrete Research*, 38 (2008), 772-782.
23. Cano-Barrita P., Bremmer T, and Balcom B. Water absorption of high performance concrete. *Raymundo Rivera International Symposium on Durability of Concrete* (2006), 521-543.
  24. RILEM Technical Committee. Final report of RILEM TC 205-DSC: durability of self-compacting concrete. *Materials and Structures*, 41 (2008), 225-233.
  25. Ho D.W.S. and Lewis R.K. The water sorptivity of concretes: The influence of constituents under continuous curing. *Durability of Building Materials*, 4 (1987), 241-252
  26. Hall C, Hoff W.D, Taylor C, Wilson M.A, Yoon Beom-Gi, Reinhardt H.W, Sosoro M, Meredith P. and Donald A.M. Water anomaly in capillary liquid absorption by cement-based materials. *Journal of Materials Science Letters*, 14 (1995), 1178-118.
  27. Lorenzo G.M.P. Influencia de dos tipos de cenizas volantes españolas en la microestructura y durabilidad de la pasta de cemento portland hidratado. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Ciencias Químicas. (1993).
  28. Gesoğlu M. Influence of steam curing on the properties of concretes incorporating metakaolin and silica fume. *Materials and Structures*. (2009) DOI 10.1617/s11527-009-9571-2.
  29. Güneysi E. and Gesoğlu M. Properties of self-compacting mortars with binary and ternary cementitious blends of fly ash and metakaolin. *Mat. and Structures*, 41 (2008), 1519-1531.

Recibido el 19 de Octubre de 2009

En forma revisada el 29 de Noviembre de 2010