

## Limitaciones de la velocidad de absorción capilar y la permeabilidad al agua para la estimación de la velocidad de penetración de cloruro en hormigón respecto a la consecución del diseño prescriptivo para durabilidad en ambiente marino

Y. A. Villagrán Zaccardi<sup>1, 2</sup> \* , M. E. Sosa<sup>1</sup> , Á. A. Di Maio<sup>1</sup> 

\*Autor de Contacto: [yuryvillagran@gmail.com](mailto:yuryvillagran@gmail.com)

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i3.302>

Recepción: 13/03/2018 | Aceptación: 18/07/2018 | Publicación: 31/08/2018

### RESUMEN

Este artículo presenta un análisis de datos experimentales de hormigón convencional respecto a la velocidad de absorción capilar y la penetración de agua a presión comparando estos parámetros con la velocidad de difusión de cloruro determinada en el laboratorio y en ambiente marino real. Las prescripciones para el aseguramiento de la durabilidad de estructuras de hormigón armado están basadas en la caracterización cualitativa de las propiedades de transporte. Para el caso específico del ambiente marino, se requiere evaluar la resistencia del hormigón al ingreso de cloruro. Los resultados muestran las limitaciones de ambos parámetros como índices prescriptivos, con la velocidad de absorción capilar mostrando algunas ventajas sobre la penetración del agua bajo presión.

**Palabras clave:** absorción capilar; penetración de agua; cloruro; durabilidad; diseño prescriptivo.

**Citar como:** Y. A. Villagrán Zaccardi, M. E. Sosa, Á. A. Di Maio (2018), “Limitaciones de la velocidad de absorción capilar y la permeabilidad al agua para la estimación de la velocidad de penetración de cloruro en hormigón respecto a la consecución del diseño prescriptivo para durabilidad en ambiente marino”, Revista ALCONPAT, 8 (3), pp. 301-316, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i3.302>

<sup>1</sup> LEMIT - Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica - 52 entre 121 y 122 - 1900 - La Plata - Provincia de Buenos Aires

<sup>2</sup> CONICET - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Godoy Cruz 2290, Buenos Aires.

### 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](mailto:alconpat.int@gmail.com), Página Web: [www.alconpat.org](http://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.

## **Limitations of sorptivity and water permeability for the estimation of the chloride penetration rate in concrete regarding the accomplishment of prescriptive design for durability in the marine environment**

### **ABSTRACT**

This paper presents an analysis of experimental data from conventional concrete regarding sorptivity and penetrability under pressure comparing these parameters to chloride diffusion rate determined in the laboratory and in actual marine environment. Prescriptions for durability assurance of reinforced concrete structures is based on the qualitative characterization of transport properties. For the specific case of the marine environment, it is required to assess the resistance of concrete to chloride ingress. The results show the limitations of both parameters as prescriptive indexes, with capillary absorption rate showing some advantages over water penetration under pressure.

**Keywords:** capillary absorption; water penetration; chloride; durability; prescriptive design.

## **Limitações da taxa de absorção capilar e da permeabilidade água para a estimativa da taxa de penetração de cloreto em concreto em relação à realização do design prescritivo para durabilidade em ambiente marinho**

### **RESUMO**

Este artigo apresenta uma análise de dados experimentais de concreto convencional em relação à velocidade de absorção capilar e à penetração de água sob pressão para comparar estes parâmetros com a velocidade de difusão de cloretos determinada no laboratório e no ambiente marinho real. Os requisitos para a garantia da durabilidade das estruturas de concreto armado baseiam-se na caracterização qualitativa das propriedades de transporte. Para o caso específico do meio marinho, é necessário avaliar a resistência do concreto à ingestão de cloreto. Os resultados mostram as limitações de ambos parâmetros como índices prescritivos, com a velocidade de absorção capilar apresentando algumas vantagens sobre a penetração de água sob pressão.

**Palavras chave:** absorção capilar; penetração de água; cloreto; durabilidade; desenho prescritivo

## **1. INTRODUCCIÓN**

La mayoría de los mecanismos de deterioro del hormigón están relacionados con el desempeño del hormigón de recubrimiento. Esta capa de hormigón es responsable de la durabilidad de la estructura en la medida en que proporciona protección física y química a la armadura contra sustancias agresivas externas. Los métodos de diseño para la durabilidad analizan las características de este recubrimiento de hormigón para evaluar una determinada vida útil.

La vida útil de una estructura con respecto a la degradación de los componentes se puede explicar aplicando el modelo propuesto por Tuutti (Tuutti, 1982). La vida útil estipulada es el período durante el cual se deben cumplir los requisitos de servicio, con un nivel superior al mínimo aceptable en cuanto a seguridad, comodidad y estética. Para esto, se deben considerar las condiciones de exposición a las que estará expuesta la estructura. En general, la reglamentación considera periodos de vida de servicio estipulados de 50 o 100 años, siempre que se controle la fisuración y el hormigón se coloque, compacte y cure adecuadamente. Se definen los requisitos mínimos para las propiedades y la profundidad del hormigón de recubrimiento. Este enfoque prescriptivo es ampliamente aceptado, pero es limitado con respecto a la precisión de la vida útil proyectada (Rostam, 2000). La clasificación general de los ambientes y los parámetros objetivo

impiden considerar todos los factores intermedios. Estos parámetros a menudo son restringidos cualitativamente, o se establece una cuantificación indeterminada para ellos (Anoop et al., 2002), y la vida real de servicio no se puede estimar con precisión. La corrosión de armaduras es uno de los procesos de deterioro más investigados respecto a la durabilidad de las estructuras de hormigón armado.

El modelo de Tuutti divide el proceso de corrosión en dos períodos de desarrollo que cubren la vida útil del servicio (Tuutti, 1982): iniciación y propagación. Durante el período de iniciación, se desarrolla la incubación de las condiciones necesarias para el comienzo de la degradación. Durante el período de propagación, la situación empeora progresivamente con un nivel de desempeño más y más bajo hasta el momento en que el grado de deterioro de la estructura es tal que no cumple con las condiciones mínimas de servicio requeridas. En general, el tiempo requerido para la despasivación de la armadura se concibe como el período de iniciación, mientras que la fisuración y los desprendimientos se conciben dentro del período de propagación (Tuutti, 1982; DURAR, 1997; Rostam, 2000).

Los factores que influyen en el período de iniciación en medio marino se clasifican en internos y externos. Los factores internos se relacionan principalmente con las características del hormigón de recubrimiento. Entre estos factores, los más importantes son los que determinan la resistencia del material al ingreso de cloruro: porosidad de la matriz (Collepari et al., 1970; Monosi et al., 1989) (determinado por la relación a/c, grado de compactación, curado), contenido y tipo de cemento (Collepari et al., 1970; Glass y Buenfeld, 2000), porosidad de la zona de transición interfacial (Delagrave et al., 1997a) y porosidad del agregado (Fernández Luco, 2001). La agresividad del entorno define factores externos (Sandberg et al., 1998; Traversa, 2001; Andrade et al., 2002; Traversa y Di Maio, 2002; Di Maio y otros, 2004), caracterizados por la temperatura y humedad relativa promedio, incidencia de vientos, lluvia, distancia y altura con respecto al nivel del mar. Finalmente, se debe considerar la presencia de capas superficiales protectoras en la estructura (pintura o acabado) ya que reducen el nivel de exposición (Di Maio et al., 2000). Todos estos factores determinan el tiempo requerido para que los cloruros alcancen a la armadura.

El ingreso de cloruro en el hormigón armado conduce a la formación de picaduras en la armadura. Cuando se alcanza el contenido umbral de cloruro en la superficie de la armadura, el acero se despasiva y comienza a corroerse si hay disponibilidad de oxígeno y humedad. Por lo tanto, el hormigón de recubrimiento debe evitar esta situación el mayor tiempo posible. Sus propiedades de transporte definen el tiempo requerido para que comience la corrosión. La menor velocidad de transporte de cloruros a través del hormigón de recubrimiento permitirá una mayor vida útil de la estructura.

La resistencia del hormigón de recubrimiento al ingreso de cloruro se define generalmente por el coeficiente de difusión aparente (Collepari et al., 1970),  $D_{ap}$ , que establece la mayor o menor velocidad a la que los iones entran en el hormigón. El diseño basado en el desempeño aplica este coeficiente para calcular una cierta vida útil de la estructura para una cierta profundidad de recubrimiento. Sin embargo,  $D_{ap}$  generalmente no es incluido explícitamente en la reglamentación de la construcción como un parámetro de diseño para el hormigón, ya que su medición requiere mucho tiempo. Persisten algunas incertidumbres con respecto a la aplicación de coeficientes de difusión para la predicción de la vida útil, ya que las condiciones reales de exposición son muy difíciles de simular en ensayos de corta duración, particularmente para considerar la dependencia de la difusividad aparente de la concentración superficial del cloruro (Andrade et al. 2000). En consecuencia, los ingenieros de diseño muestran renuencia a utilizar modelos complejos para predecir la entrada de cloruro en el hormigón, y son poco propensos a introducirlos en Códigos o Normas (Andrade et al., 2013). En cambio, la correlación entre la difusividad del cloruro con otras propiedades del hormigón se considera frecuentemente para el diseño. Este enfoque es la base del diseño prescriptivo.

Los criterios prescriptivos son básicamente valores máximos o mínimos que satisfacer para diferentes propiedades de hormigón. Estas propiedades pueden incluir a la resistencia del hormigón, la relación agua/ligante, la absorción de agua, la tasa de absorción capilar, la penetración de agua bajo presión, el contenido y tipo de cemento. Todos estos factores se informan como los principales parámetros de control para la durabilidad, y sobre esta base, se establecen límites a partir de valores de referencia que han demostrado proporcionar durabilidad del hormigón armado a largo plazo cuando es expuesto a cloruros en el laboratorio o en servicio.

Por razones prácticas, los criterios prescriptivos se incluyen ampliamente en las reglamentaciones para estructuras de hormigón armado durable. Las directrices sobre la durabilidad del hormigón armado en el medio marino se incluyen en las reglamentaciones (BS EN 206, 2013; ACI 201.2R, 2016; CIRSOC 201, 2005), donde los criterios prescriptivos se establecen generalmente para garantizar una vida útil de 50 años. Primero, el tipo de exposición al cloruro debe definirse y clasificarse de acuerdo con el nivel de agresividad. Luego, se requieren las características correspondientes para el hormigón de recubrimiento. Este tipo de límites son fáciles y confiables cuando son examinados. Sin embargo, el diseño prescriptivo para la durabilidad no permite inferir la vida útil en servicio real. Las regulaciones modernas están incluyendo progresivamente los criterios de diseño basados en el desempeño, pero se requiere un gran esfuerzo en este sentido debido al extenso trabajo experimental requerido para la validación de los modelos.

Este artículo informa las comparaciones entre el coeficiente de difusión de cloruro en condiciones saturadas e insaturadas y las propiedades tecnológicas tales como la relación  $a/c$ , la resistencia a la compresión, la absorción capilar y la penetración del agua bajo presión. Los principales aspectos de conexión y desconexión de estas comparaciones se analizan en función de los resultados experimentales.

## **2. DISEÑO PRESCRIPTIVO PARA DURABILIDAD EN EL AMBIENTE MARINO**

### **2.1. Relación agua/material cementíceos**

La porosidad capilar de la matriz cementícea es una función de la  $a/mc$ , dados ciertos grados de hidratación y compactación. Durante el período de iniciación, la disponibilidad de porosidad conectada que permite el transporte de humedad y iones es esencial para el desarrollo del proceso de deterioro. La limitación a una relación  $a/mc$  máxima conduce a una disminución en el volumen de porosidad capilar en el hormigón. Esta relación  $a/mc$  reducida se debe complementar con un tratamiento de curado adecuado que permita un avance suficiente de la hidratación del cemento, así como una compactación eficiente que elimine los macroporos.

La influencia de  $a/mc$  en la difusividad del cloruro del hormigón ha sido ampliamente investigada (ACI 222, 2003). Sin embargo, su utilidad como parámetro prescriptivo no puede sustentarse solo con la confirmación de la incidencia. JSCE propone una relación potencial entre  $a/mc$  y difusividad en el hormigón (Song et al., 2008), pero, como se dijo, otros parámetros interrelacionados que afectan causan una desviación significativa de esta relación. Por lo tanto, las propiedades del hormigón significativamente relacionadas con la relación  $a/mc$  generalmente se prescriben. Esto también se debe a las dificultades para controlar la relación  $a/mc$  en obra, ya que no hay un método experimental confiable disponible.

Con respecto a la corrosión activa de la armadura, el flujo de oxígeno a través del hormigón también es una función de la reducción de  $a/mc$  (ACI 222, 2003). Tanto la difusión de cloruro como la de oxígeno están conectadas con la relación entre la permeabilidad y  $a/mc$ .

## 2.2. Contenido de cemento

El contenido de cemento es determinante de la durabilidad en el ambiente marino en varios aspectos. Primero, para un cierto valor de  $a/mc$ , más cemento significa un mayor volumen de pasta en el hormigón. El uso de aditivos reductores de agua puede contribuir a reducir el contenido de cemento en el hormigón. La reducción del contenido de pasta en el hormigón es potencialmente un efecto beneficioso, ya que los agregados suelen ser menos porosos que la matriz y el aumento de su contenido ayuda a reducir las propiedades de transporte del hormigón siempre que se aplique una compactación adecuada.

Por el contrario, el  $C_3A$  contenido en el cemento es el mayor contribuyente a la capacidad de fijación del cloruro en el hormigón, y esta característica depende del tipo y contenido del cemento (Andrade, 1993; Delagrave et al., 1997b). La fijación de cloruro es un proceso de retraso del ingreso de cloruro, y la vida útil aumenta cuando se intensifica la fijación de cloruro. Entonces, aumentar el contenido de cemento en hormigón significa aumentar la capacidad de fijación de cloruro.

Los materiales cementíceos suplementarios contenidos en el cemento afectan la durabilidad en el ambiente marino por dos efectos opuestos, dilución y acción puzolánica. Estos efectos no son tan marcados en los resultados de los métodos de ensayo acelerados, sino que se verifican más extensamente con el tiempo. Por esta razón, algunos procedimientos intentan considerar la reactividad tardía de los materiales cementantes suplementarios. En cualquier caso, se producen cambios significativos con el tiempo según el tipo de cemento.

## 2.3. Resistencia a compresión

Como se dijo, la relación  $a/mc$  es el parámetro más importante con respecto a las propiedades de transporte del hormigón. Esta herramienta de diseño es difícil de controlar en obra. Entonces, su relación con la resistencia a la compresión, que ha sido probada y explicada ampliamente sobre la base de la conformación de la estructura de poro, se utiliza para el diseño. Esta relación directa es la más desarrollada en el campo de la tecnología del hormigón. Por lo tanto, se dispone de una base sólida para el uso de la resistencia a la compresión como parámetro de evaluación para prácticamente cualquier otra propiedad del hormigón, incluida la difusividad de cloruro. Como se esperaba, la difusividad en estado saturado disminuye consistentemente con el aumento de la resistencia a la compresión, y se han determinado relaciones empíricas simples entre la resistencia a la compresión a los 28 días y la difusividad del hormigón por cloruro (Frederiksen et al., 1997). Estas relaciones probablemente se vean afectadas por el aire retenido. También se esperan diferencias causadas por el tipo de cemento y las prácticas para acelerar la ganancia de resistencia (tratamiento de curado, aditivos).

Sin embargo, el factor determinante para el uso de la resistencia a la compresión como parámetro de control es su practicidad, costo y universalidad. Entonces, es muy fácil de implementar e interpretar. La aplicación de este parámetro de control ha mostrado un grado de éxito muy variable, y esta es la razón para la aplicación de parámetros de control más completos para la durabilidad en el medio marino.

## 2.4. Absorción capilar

La tasa de absorción capilar de agua es uno de los mecanismos de transporte a través del cual el cloruro puede penetrar en el hormigón del entorno marino. Esta propiedad es un descriptor efectivo de la estructura de poro del hormigón. La absorción capilar se desarrolla en el hormigón no saturado, y puede transportar cloruro en el hormigón a medida que avanza el frente húmedo. Sin embargo, la difusión pura solo tiene lugar cuando no se produce flujo líquido, y en este sentido, es diferente de la absorción capilar. Los rangos de tamaño de poro que participan en ambos procesos y los procesos en sí son diferentes. A pesar de esto, en la literatura se presentan buenas correlaciones entre la sorptividad y la difusión del cloruro (Basheer, 2001; Kropp y Basheer, 2000). Estas relaciones dependen de los métodos de ensayo aplicados para la determinación de cada

Limitaciones de la velocidad de absorción capilar y la permeabilidad al agua para la estimación de la velocidad de...

propiedad, que son muy sensibles al preacondicionamiento. En este sentido, se ha documentado una alta sensibilidad del valor obtenido para la absorción según las condiciones de ensayo y las proporciones de los constituyentes del hormigón (Taus, 2010; Bjevović et al., 2015). Además, debe tenerse especialmente en cuenta su contraste con la difusión de cloruro en condiciones no saturadas, ya que en este caso solo parte de la estructura de poro interviene en el proceso de transporte. La correlación directa entre la difusividad del cloruro y la sorptividad puede verse afectada por el grado de saturación del hormigón.

#### 2.4. Permeabilidad

En el caso de estructuras sometidas a una diferencia de presión hidrostática, la permeabilidad es el parámetro que mejor representa la penetración de sustancias agresivas desde el entorno externo, por ejemplo, transporte de cloruro en estructuras de agua de mar. Además, se ha obtenido una alta resistencia a la penetración de cloruro para hormigón de baja permeabilidad en relación con la conectividad limitada de la estructura de poro (CCAA, 2009). Nuevamente, los procesos de penetración de agua bajo presión y difusión de cloruros son diferentes, especialmente considerando su correspondencia con el grado de saturación del hormigón.

### 3. MATERIALES Y METODOLOGÍA

Las mezclas de hormigón estudiadas fueron 28 en total con pastones múltiples para la mayoría de ellas, lo que hace un total de 73 pastones. Las proporciones de los hormigones estudiados corresponden a  $a/mc$  entre 0,39 y 0,61, con contenidos de cemento entre 425 y 250  $kg/m^3$ . Los tres tipos de cemento Portland utilizados fueron: Normal (OPC), con Caliza (LPC, que incorpora 17% de polvo calizo) y Compuesto (CPC, 17% y 12% de incorporación de polvo calizo y escoria, respectivamente). Como agregado grueso se usaron agregados de granito triturado con tamaños máximos de 19 y 25 mm. El agregado fino fue arena de río silíceo. Se usaron materiales con contenido insignificante de cloruro. El contenido de cloruro del hormigón proveniente de los constituyentes (IRAM 1857, 2000) fue en todos los casos inferior al 0,03%. Para más detalles sobre las proporciones de estos hormigones, puede consultarse (Violini et al., 2006; Taus et al., 2008; Villagrán Zaccardi, 2012).

Se realizaron pruebas para determinar el cumplimiento de las mezclas de hormigón con los parámetros prescriptivos. Estos incluyen resistencia a la compresión, medida en probetas cilíndricas de 15x30 cm de diámetro y altura, compactadas y ensayadas según IRAM 1524, 1546 y 1553, tasa de absorción capilar, determinada según IRAM 1871 (IRAM 1871, 2004), y la penetración de agua bajo presión de acuerdo a IRAM 1554 (IRAM 1554, 1983). Todos los especímenes se compactaron manualmente, se desmoldaron después de 24 horas de moldeados y se curaron en cámara húmeda (temperatura:  $23 \pm 2$  ° C, HR > 95%) hasta la edad de 28 días.

La velocidad de transporte de cloruro se evaluó en muestras prismáticas de 7,5x15x25  $cm^3$ . Después del tratamiento de curado, estas muestras se impermeabilizaron con pintura de caucho clorado en todos los lados, excepto en la superficie de moldeo, desde la cual se permitió el ingreso de cloruro unidireccional. Las muestras se expusieron en un ambiente marino natural y se sumergieron en una solución de cloruro de sodio, con la cara de entrada configurada como el lado superior horizontal. Por lo tanto, fueron expuestos con la misma posición en la que fueron moldeados.

La exposición al ambiente marino natural se realizó en la ciudad de Mar del Plata, Argentina, aproximadamente a 50 metros de la costa y 5 m sobre el nivel medio del mar. El contacto directo entre las muestras y el agua de mar no se produjo en ningún momento durante la exposición, y la única fuente de cloruros fue el aerosol marino.

Las muestras expuestas en inmersión se saturaron primero durante 24 h en agua de cal saturada, y luego se sumergieron en solución de NaCl 30 g/l mantenida a  $23 \pm 5$  °C hasta las mediciones del perfil.

Los perfiles de ingreso de cloruro se analizaron después de 12 meses de exposición para las muestras en el ambiente marino y después de 6 meses para las muestras en inmersión. Primero, los lados pintados se descartaron en un grosor aproximado de 1 cm. Luego, se realizaron cortes paralelos a la cara de ingreso, obteniendo cortes progresivos de aproximadamente 5 mm. Las profundidades promedio de la superficie de ingreso se midieron para cada sector. Todos los cortes se hicieron en seco con un disco diamantado. Posteriormente, las rodajas se pulverizaron, y los contenidos de cloruro soluble en ácido se determinaron de acuerdo con IRAM 1857, método C (IRAM 1857, 2000).

Se realizaron regresiones de datos a la solución más común de la segunda ley de Fick, la ecuación (1), y se determinaron los valores para  $D_{ap}$ . En los casos en que se detectó un comportamiento no Fickiano, se siguió el procedimiento indicado en (Andrade et al., 2015).

$$C_{(x,t)} = C_s \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \right) \quad (1)$$

donde  $C_{(x,t)}$  es el contenido de cloruro a profundidad  $x$ , en el tiempo  $t$ , erf es la función de error,  $C_s$  es el contenido de cloruro de superficie aparente en el tiempo  $t$ , y  $D_{ap}$  es la difusividad aparente no estacionaria.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La penetración de cloruro es conducida por el gradiente de concentración entre la superficie y el interior del hormigón. En consecuencia, los contenidos de cloruro que penetraron en el hormigón en inmersión fueron hasta tres veces superiores a los determinados en el hormigón en la exposición atmosférica marina. Además, a diferencia de la penetración bajo exposición atmosférica, en hormigón saturado, toda la porosidad está ocupada por solución de poro, que constituye el medio a través del cual entra el cloruro. Entonces, una penetración más rápida en hormigón saturado que en insaturado es obvia. El contenido de la solución de poros definirá principalmente la correlación entre las tasas de penetración en especímenes sumergidos y expuestos al entorno marino. Este contenido no permanece constante en especímenes bajo exposición atmosférica, ya que está influenciado por las condiciones climáticas, especialmente en la zona más externa. Por lo tanto, la comparación debe tomar nota de que ambos mecanismos de ingreso no son totalmente equivalentes y el contraste es meramente empírico. Además, en un ambiente marino con diferentes condiciones climáticas como el considerado en este estudio, un equilibrio higroscópico diferente con el ambiente de hormigón dará como resultado un contenido diferente de solución de poro y diferentes ciclos de humedecimiento y secado.

De los perfiles de penetración, la comparación directa entre los valores calculados para la difusividad en especímenes expuestos en el entorno marino natural ( $D_{atm}$ ) e inmersión ( $D_{inn}$ ), se muestra en la Figura 1. Se nota una tendencia notable con poco impacto del tipo de cemento. Para velocidades de penetración bajas, se revelan mayores incrementos para  $D_{atm}$  que para  $D_{inn}$ . Esta relación parece revertirse sobre un cierto valor, y para altas tasas de penetración, se notan incrementos más pequeños para  $D_{atm}$  que para  $D_{inn}$ . Esto puede explicarse por el concepto mencionado anteriormente. La distribución del tamaño de poro y la porosidad total están conectadas. Las bajas difusividades corresponden a mezclas de hormigón con baja porosidad. En estos casos, el líquido de poro permanece en un volumen relativamente mayor de pequeños poros

de hormigón bajo exposición atmosférica. A medida que aumenta la porosidad, los poros más grandes contribuyen a la penetración de cloruro cuando el hormigón está en inmersión, pero no permanecen saturados en el hormigón en condiciones atmosféricas. Esto es, los cambios en la difusividad se relacionan más directamente con el cambio en el volumen total de poro cuando el hormigón está saturado, ya que toda la porosidad contribuye al mecanismo de transporte. Por el contrario, solo los poros más finos contribuyen al transporte en hormigón insaturado, y  $D_{atm}$  no continúa aumentando a la misma velocidad con un volumen creciente de macroporos (Saetta et al., 1993; Climent et al., 2002; Nielsen y Geiker, 2003; Zhang y Zhang, 2014).

La Figura 2 muestra  $D_{atm}$  y  $D_{imm}$  en comparación con  $a/mc$ . A pesar de la capacidad de fijación del cloruro potencialmente diferente, no se pueden establecer diferencias estadísticamente significativas entre los diferentes tipos de cemento. La influencia de  $a/mc$  encubre mucho cualquier diferencia.

Como se esperaba, el aumento de los valores de difusividad se obtiene al aumentar  $a/mc$ . Sin embargo, se obtuvieron variaciones significativas dentro de cada  $a/mc$ . La influencia de las otras variables (grado de hidratación, tamaño máximo del agregado y contenido de cemento) es la razón principal de esto. Es particularmente importante observar que la suma de estas influencias puede dar como resultado un grado de impacto similar a la variación de la relación  $a/mc$ , especialmente para las difusividades determinadas en la condición insaturada.

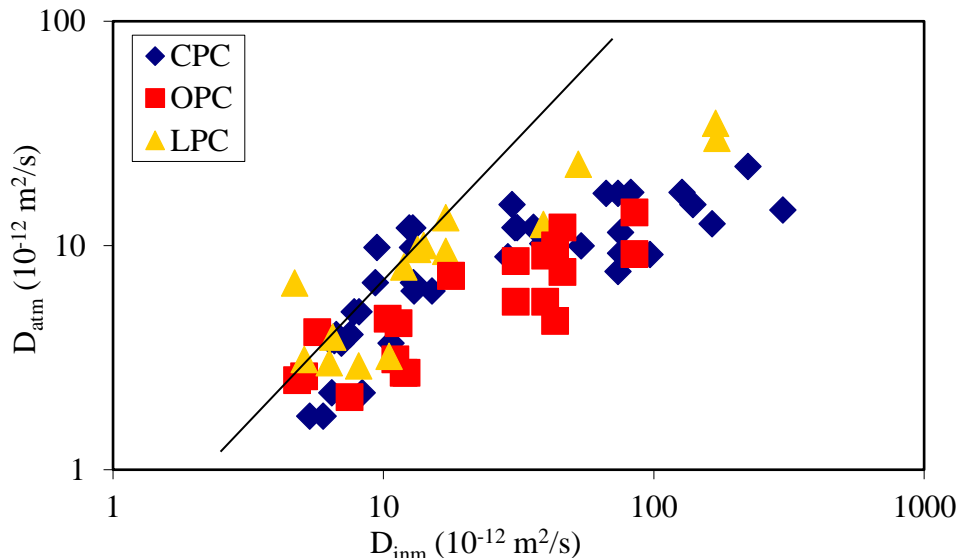


Figura 1.  $D_{imm}$  versus  $D_{atm}$ .

La diferenciación entre los valores de difusividad en inmersión y atmosférica es más pronunciada con una mayor  $a/mc$  ( $D_{imm}$  aumenta mucho más que  $D_{atm}$  con un aumento de  $a/mc$ ). La porosidad del hormigón aumenta con  $a/cm$ , pero este aumento de la porosidad da como resultado más contenido de líquido de poro solo en el estado saturado. Los macroporos no afectan de la misma manera a las muestras expuestas a la atmósfera. En condiciones no saturadas, el volumen de líquido de poro se define por los poros capilares finos, donde se producirá más o menos condensación dependiendo de la humedad relativa. En este rango de tamaños de poro,  $a/cm$  tiene menos importancia con respecto a la fracción de volumen de los poros que participan en el proceso de transporte.

En este sentido, los parámetros de transporte de ingeniería, como la capacidad de absorción y la capacidad de penetración bajo presión, están relacionados con el volumen y la conectividad de la estructura de poro. Por lo tanto, están indirectamente conectados a la difusividad del cloruro en hormigón saturado (como se muestra más adelante en las Figuras 3, 5 y 6).



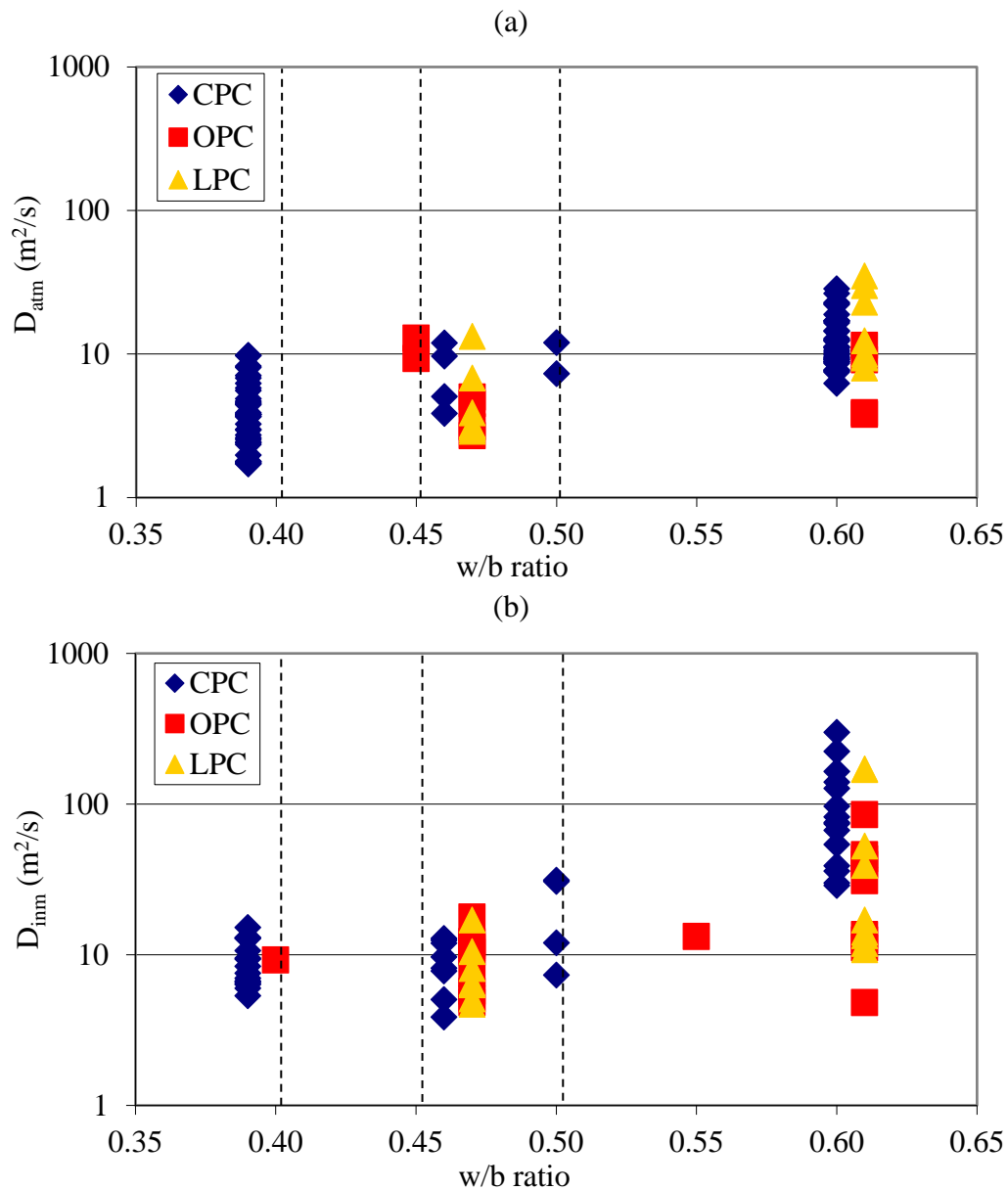


Figura 2. (a)  $D_{atm}$  y (b)  $D_{inm}$ , versus  $a/mc$ .

La Figura 3 muestra las comparaciones entre sorptividad y difusividad. De nuevo, la variación en sorptividad es más alta que la variación en  $D_{atm}$ . La variación en la tasa de absorción capilar está más directamente relacionada con  $D_{inm}$ . La variabilidad de sorptividad es mayor que la correspondiente a  $a/mc$ . Esto indica cuán inadecuado es la  $a/mc$  para definir la tasa de transporte en hormigón. Como en el caso de la difusividad, otros factores diferentes de la  $a/mc$  también están afectando la tasa de transporte, y estos se tienen en cuenta solo cuando se mide la propiedad de transporte en sí misma. La Fig. 2 muestra un número significativo de valores de conformidad por  $a/mc$  (generalmente se aceptan valores de 0,40, 0,45 y 0,50 dependiendo del ambiente y la consideración de hormigón armado o pretensado). Este número ciertamente se reduce cuando los límites se basan en un límite tolerable para la sorptividad. Debe mencionarse que la correspondencia entre la relación  $a/mc$  y la tasa de absorción capilar será ciertamente diferente en el hormigón hecho con aditivos reductores de agua, que permiten menor cantidad de agua de mezclado (y en consecuencia también menor volumen de pasta) para el mismo nivel de consistencia. En ese caso, se estima que la tasa de absorción capilar puede disminuir para el mismo valor  $a/mc$ .

Limitaciones de la velocidad de absorción capilar y la permeabilidad al agua para la estimación de la velocidad de...

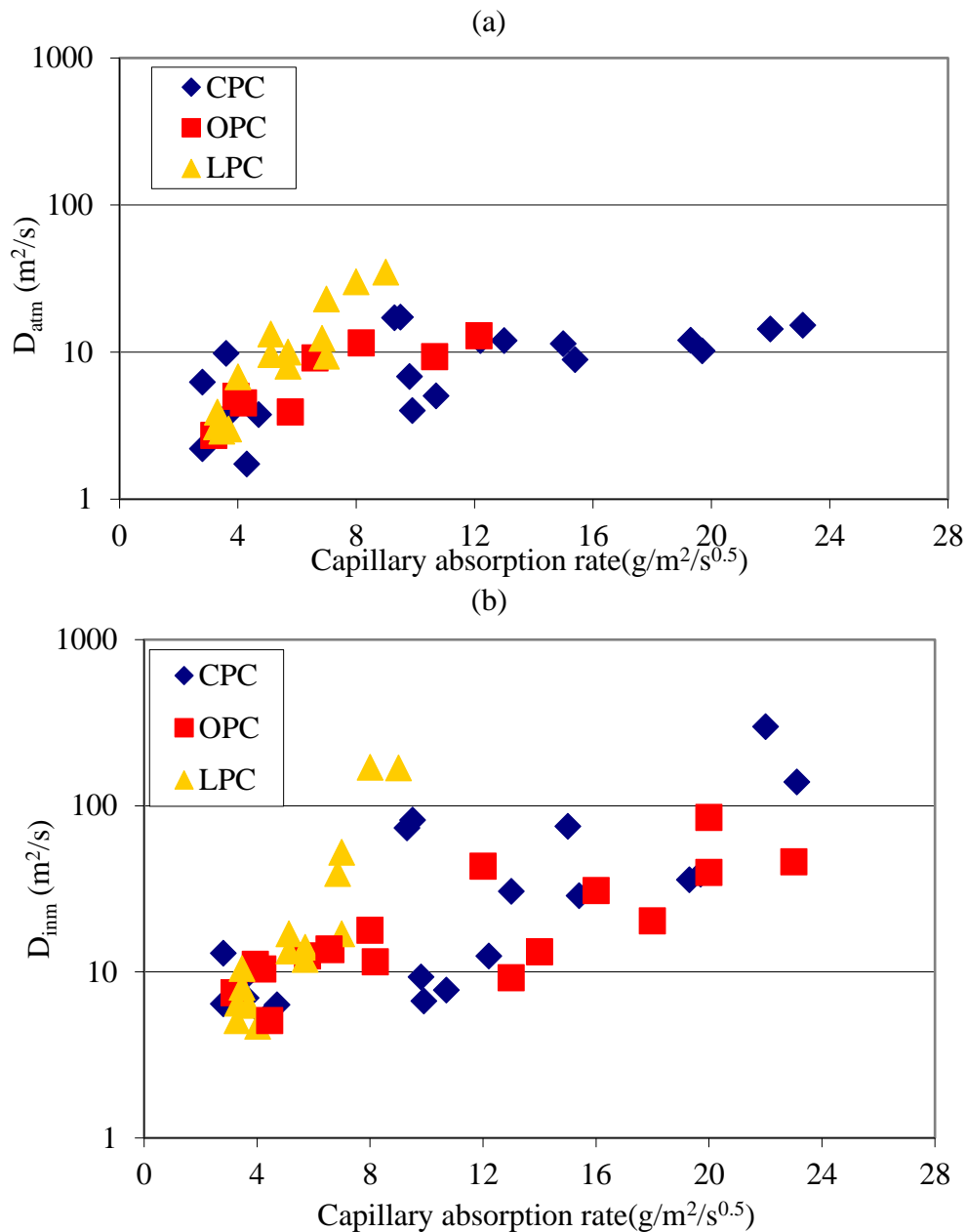


Figura 3. (a)  $D_{atm}$  y (b)  $D_{inm}$  versus sorptividad.

En la Figura 4, se presentan las comparaciones entre difusividades y resistencia a la compresión. Se obtiene una evolución inversa como consecuencia de las relaciones opuestas de ambas propiedades con la porosidad. Se observa una mayor dispersión para  $D_{inm}$  que para  $D_{atm}$ . El número de valores de conformidad según la resistencia es similar al de  $a/mc$ . Por lo tanto, la relación directa entre resistencia y  $a/mc$  permite un procedimiento de control confiable por parte del primero, para asegurar el cumplimiento del segundo. Este es un aspecto de necesidad práctica debido a la falta de métodos confiables para controlar experimentalmente la  $a/mc$  en hormigón fresco. Por otro lado, debe mencionarse que la resistencia del hormigón de recubrimiento en la estructura se verá muy afectada por el grado de compactación, que a su vez depende en gran medida de las prácticas de obra.

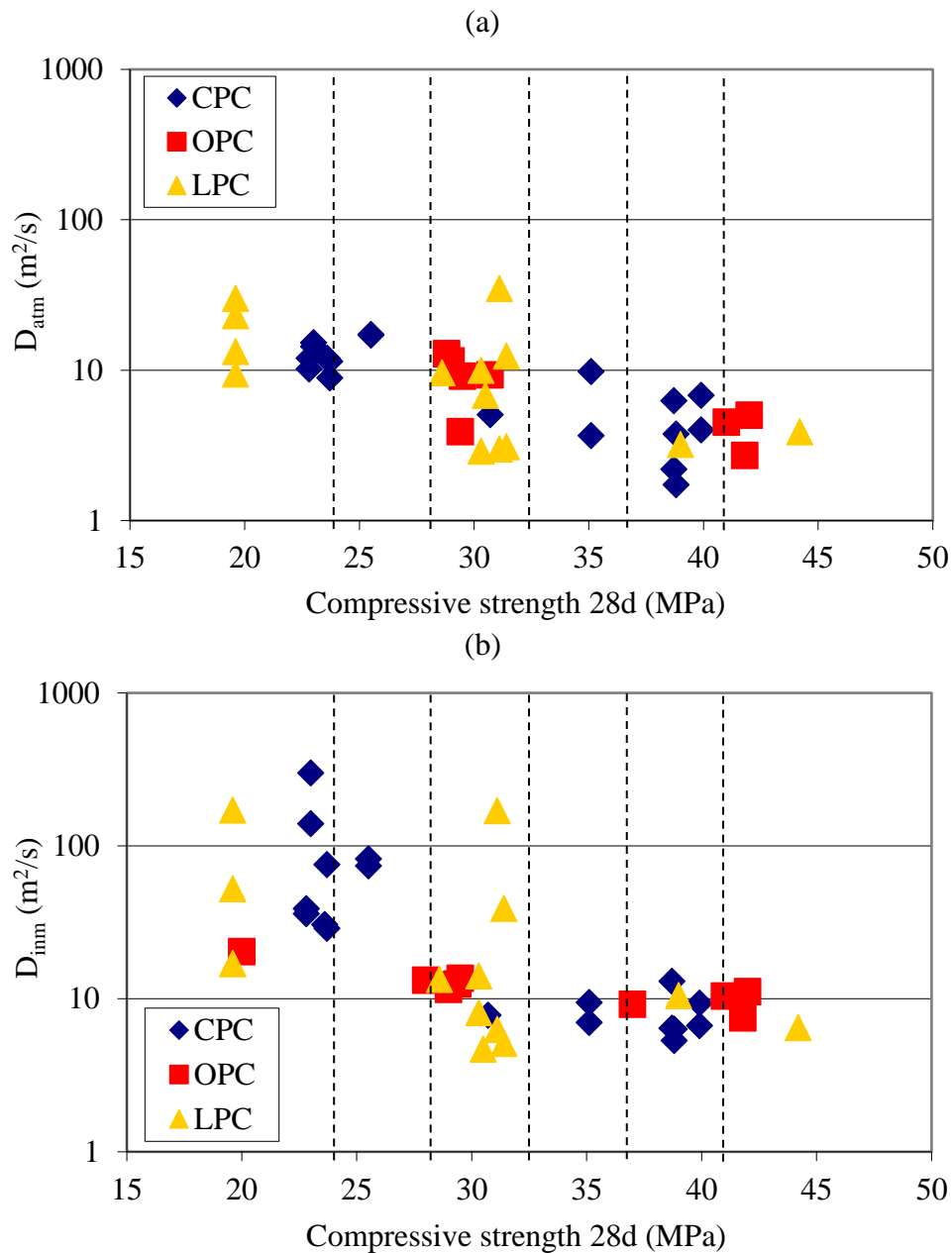


Figura 4. (a)  $D_{atm}$  y (b)  $D_{inm}$  versus resistencia a compresión.

La determinación experimental del índice de compactación del hormigón fresco es entonces recomendable para definir la sensibilidad del hormigón a la compactación y establecer un riesgo relativo indicativo para el nivel requerido de control durante la colocación del hormigón fresco. En la práctica, la falta de esta consideración comúnmente conduce a malos resultados con respecto a la durabilidad de la estructura.

En las Figuras 5 y 6, se presentan las comparaciones entre las difusividades y la penetración del agua bajo presión, media y máxima, respectivamente. La proporción de valores de conformidad muestra a la penetración del agua bajo presión como una propiedad menos exigente que la sorptividad.

El cumplimiento de las profundidades de penetración media y máxima del agua es equivalente. Son necesarios defectos de compactación en la muestra para obtener una diferencia significativa entre estos dos parámetros. La buena correspondencia de valores muestra que este no fue el caso para ninguno de los especímenes ensayados. Con esto en mente, se debe señalar el uso muy

limitado de la penetración máxima de agua bajo presión con respecto a la penetración de cloruros y otras propiedades de transporte del hormigón.

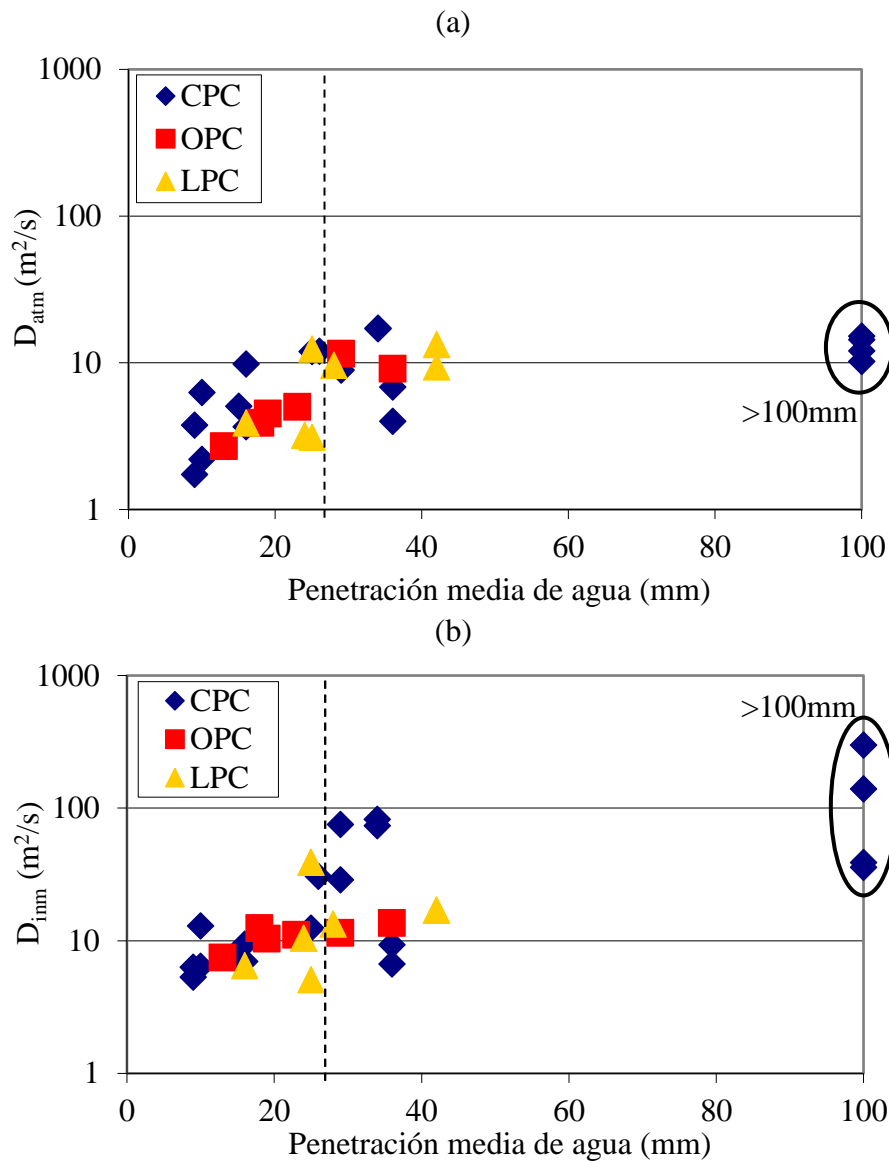


Figura 5. (a)  $D_{atm}$  y (b)  $D_{inm}$  vs. penetración media de agua bajo presión.

Entre los parámetros analizados, la sorptividad fue la que mostró la mejor correlación con la difusividad del cloruro. La resistencia a compresión,  $a/mc$  y la penetración de agua bajo presión le siguieron en ese orden. Esto es notable en el sentido de que la penetración del agua bajo presión puede ser erróneamente recomendada sobre la resistencia a la compresión para la estimación de la penetración del cloruro en el hormigón cuando solo se considera que las propiedades de transporte deberían estar mejor conectadas entre sí.

Sin embargo, todas las propiedades examinadas mostraron una mejor correlación con la difusividad del cloruro en la condición saturada. Para el hormigón no saturado, los macroporos no participan en el proceso de ingreso de cloruro, pero lo hacen en otros procesos como la absorción y penetración de agua. Por lo tanto, el hormigón insaturado con alto contenido de  $a/mc$  tiende a clasificarse como menos duradero en el ambiente marino cuando se prueba la sorptividad o la penetración de agua a presión que la tasa de ingreso de cloruro en sí. El grado de saturación del hormigón es un aspecto importante que siempre debe considerarse al respecto.

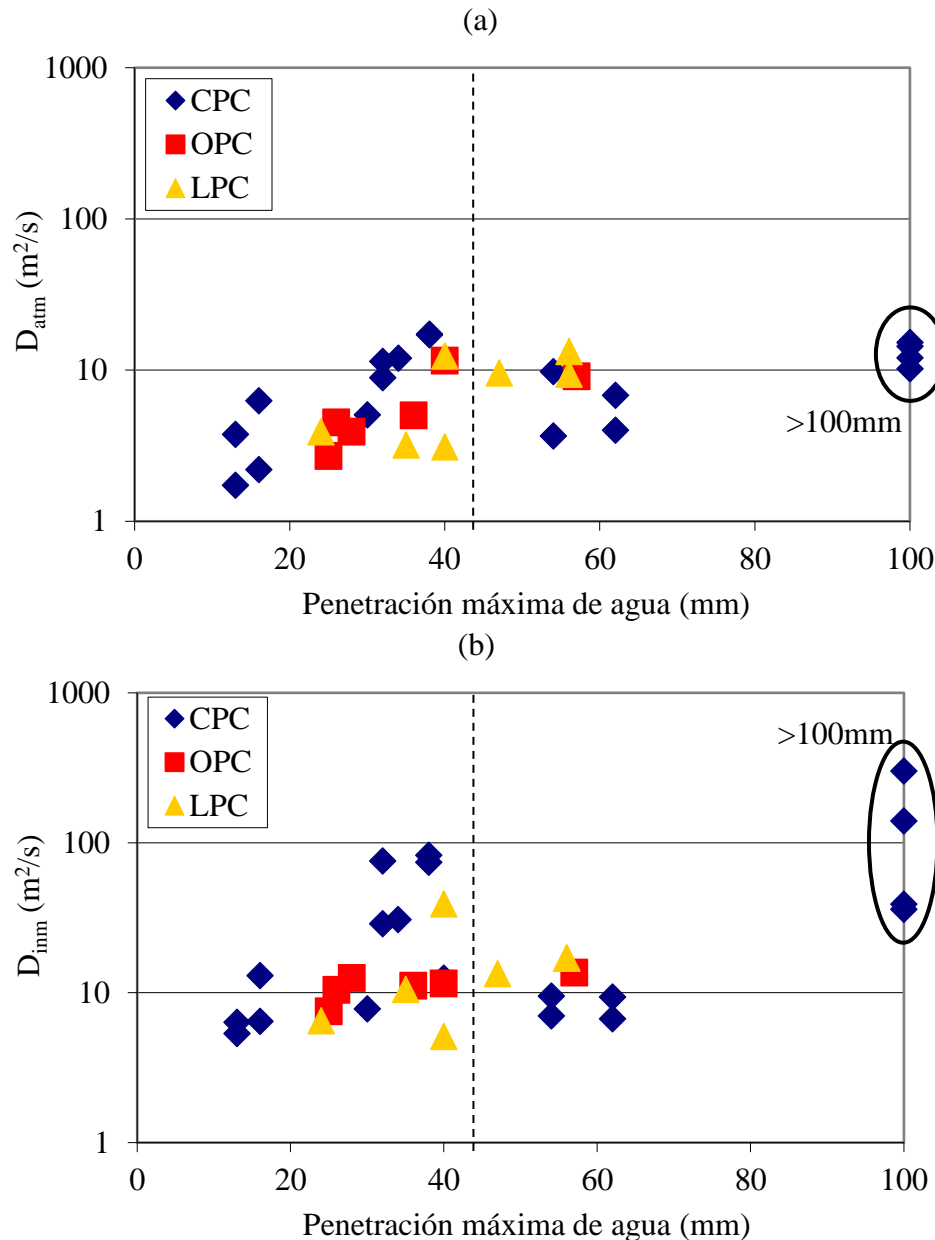


Figura 6. (a)  $D_{atm}$  y (b)  $D_{inm}$  vs penetración máxima de agua bajo presión.

## 5. CONCLUSIONES

La relación  $a/mc$  es el parámetro tecnológico más determinante de la tasa de ingreso de cloruro en el hormigón. Sin embargo, otros parámetros también afectan esta propiedad de transporte, como el grado de hidratación, el tamaño máximo de agregado, el grado de compactación y el contenido de cemento, y combinados, su efecto puede exceder al de la  $a/mc$ . Por lo tanto, la relación  $a/mc$  como parámetro de diseño para la durabilidad en el ambiente marino requiere la asistencia de prescripciones complementarias para las propiedades de transporte.

La tasa de absorción capilar demostró una correlación consistente con la tasa de difusión de cloruro en la condición saturada. Es conveniente ampliar la base de datos para esta correlación a fin de hacer predicciones confiables sobre esta base con aplicaciones en diseño prescriptivo. Sin embargo, la conexión entre sorptividad y la difusión de cloruro en hormigón insaturado es menos consistente, ya que el rango de tamaño de poro que participa en cada mecanismo de transporte es diferente.

Limitaciones de la velocidad de absorción capilar y la permeabilidad al agua para la estimación de la velocidad de...

La penetración de agua a presión mostró poca aplicación para el diseño de durabilidad con respecto a la penetración de cloruro en el hormigón. En este sentido, la resistencia a la compresión se considera más práctica y confiable para estimar el desempeño del hormigón en el ambiente marino. Por lo tanto, no se anticipa ningún valor agregado de penetración de agua bajo presión sobre la resistencia a la compresión. Se podría hacer una excepción para la penetración de cloruro en hormigón saturado, donde la tasa de penetración de cloruro puede anticiparse mejor por la penetración de agua máxima bajo presión que para el caso del hormigón insaturado.

Como resultado, los datos combinados de la tasa de absorción capilar y la resistencia a la compresión parecen funcionar bien como parámetros prescriptivos para la durabilidad en el entorno marino. En muchos casos, la determinación de la tasa de absorción capilar enfrenta algunos inconvenientes prácticos para su aplicación en obra, principalmente debido a su sensibilidad a las variables de prueba y el tiempo de prueba requerido. Los valores para los límites prescriptivos para la sorptividad todavía son una cuestión de estudio.

## 6. AGRADECIMIENTO

La Prof. Carmen Andrade es una gran inspiradora para los científicos e ingenieros que trabajan en la durabilidad del hormigón armado en todo el mundo. Ella ha buscado permanentemente métodos simples que sean prácticos y precisos para los ingenieros, y exactos y completos para los científicos. Realmente apreciamos los consejos y el apoyo que hemos recibido de ella a lo largo de los años.

## 7. REFERENCIAS

America Concrete Institute (2016), *"ACI 201.2R-16 Guide to Durable Concrete"*, Farmington Hills, USA, p. 84.

America Concrete Institute (2003), *"ACI 222.3R-03 Design and Construction Practices to Mitigate Corrosion of Reinforcement in Concrete Structures"*, Farmington Hills, USA, 29p.

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

[https://doi.org/10.1016/0008-8846\(93\)90023-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(93)90023-3)

Andrade, C., Castellote, M., Alonso, C., González, C. (2000) *"Non-steady-state chloride diffusion coefficients obtained from migration and natural diffusion tests. Part I: Comparison between several methods of calculation"*, Materials and Structures, Vol. 33, pp. 21-28.

<https://doi.org/10.1007/BF02481692>

Andrade, C., Alonso, C., Sarria, J. (2002) *"Corrosion rate evolution in concrete structures exposed to the atmosphere"*, Cement & Concrete Composites, Vol. 24, pp. 55-64.

[https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00026-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00026-9)

Andrade C., Prieto, M., Tanner, P., Tavares, F., d'Andrea, R. (2013) *"Testing and modelling chloride penetration into concrete"*, Construction and Building Materials, Vol. 39, pp. 9–18.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.012>

Andrade, C., Climent, M. A., de Vera, G. (2015) *"Procedure for calculating the chloride diffusion coefficient and surface concentration from a profile having a maximum beyond the concrete surface"*, Materials and Structures, Vol. 48, pp. 863-869. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0543-4>

Anoop, M. B., Rao, K. B., Rao, T. V. S. R. A. (2002), *"Application of fuzzy sets for estimating service life of reinforced concrete structural members in corrosive environments"*, Engineering Structures, Vol. 24, pp. 1229-1242. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(02\)00060-3](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(02)00060-3)

- Basheer, P. A. M. (2001), "*Permeation Analysis*", in: Ramachandran, V. S., Beaudoin, J. J. (Eds.), *Handbook of analytical techniques in concrete science and technology. Principles, Techniques and Applications*, Noyes Publications, New Jersey (USA), pp. 658-737.
- Bjegović, D., Serdar, M., Oslaković, I. S., Jacobs, F., Beushausen, H., Andrade, C., Monteiro, A. V., Paulini, P., Nanukuttan S. (2015) "*Test Methods for Concrete Durability Indicators*", in: Beushausen, H., Fernández Luco, L. (Eds.), *Performance Based Specifications and Control of Concrete Durability*. State-of-the-Art Report RILEM TC 230-PSC, Springer, New York (USA), pp. 51-105. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-7309-6\\_4](https://doi.org/10.1007/978-94-017-7309-6_4)
- British Standards Institution (2013), "*BS EN-206: Concrete. Specification, performance, production and conformity*", (London, UK: CEN), p. 106.
- CCAA (2009) "*Chloride Resistance of Concrete*", (Sydney, Australia: Cement Concrete & Aggregates Australia), p. 37.
- CIRSOC 201-2005 (2005), "*Proyecto de Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón*", (Buenos Aires, Argentina: INTI), p. 452.
- Climent, M. A., de Vera, G., López, J. F., Viqueira, E., Andrade, C. (2002), "*A test method for measuring chloride diffusion coefficients through non-saturated concrete. Part I: the instantaneous plane source diffusion case*", *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, p. 1113–1123. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00750-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00750-0)
- Colleparidi, L., Marcialis, A., Turriziani, R. (1970), "*La cinetica di penetrazione degli ioni cloruro nel calcestruzzo*", *Il Cemento*, N°67, pp. 157-164.
- Delagrave, A., Bigas, J. P., Ollivier, J. P., Marchand, J., Pigeon, M. (1997a), "*Influence of the interfacial zone chloride diffusivity of mortars*", *Advanced Cement Based Materials*, Vol. 5, pp. 86-92. [https://doi.org/10.1016/S1065-7355\(96\)00008-9](https://doi.org/10.1016/S1065-7355(96)00008-9)
- Delagrave, A., Marchand, J., Ollivier, J. O., Juliens, S., Hazrati, K. (1997b), "*Chloride binding capacity of various hydrated cement paste systems*", *Advanced Cement Based Materials*, Vol. 6, pp. 28-35. [https://doi.org/10.1016/S1065-7355\(97\)90003-1](https://doi.org/10.1016/S1065-7355(97)90003-1)
- Di Maio, A. A., Eperjesi, L., Gassa, L., Traversa, L. P., Zerbino, R. L., (2000) "*Exposed reinforcement: Assessment of corrosion activity*", *Concrete International*, Vol. 22, N°3, pp. 47-51.
- Di Maio, A. A., Lima, L. J., Traversa, L. P. (2004) "*Chloride profiles and diffusion coefficients in structures located in marine environments*", *Structural Concrete*, Vol. 5, N°1, pp. 1-4. <https://doi.org/10.1680/stco.2004.5.1.1>
- DURAR (1997), "*DURAR - Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*", (Maracaibo, Venezuela: CYTED), p. 205.
- Fernández Luco, L., "*La durabilidad del Hormigón: su relación con la estructura de poros y los mecanismos de transporte de fluidos*", in: E. F. Irassar (Ed.), *Durabilidad del Hormigón Estructural*, AATH, Buenos Aires (Argentina), (2001), pp. 1-45.
- Frederiksen, J. M., Sørensen, H. E., Andersen, A., Klinghoffer, O. (1997) "*HETEK, The effect of the w/c ratio on chloride transport into concrete - Immersion, migration and resistivity tests*", (Copenhagen, Denmark: The Road Directorate), 35 p. <https://doi.org/10.13140/2.1.3735.3600>
- Glass, G. K., Buenfeld, N. R. (2000), "*The influence of chloride binding on the chloride induced corrosion risk in reinforced concrete*", *Corrosion Science*, Vol. 42, pp. 329-344. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(99\)00083-9](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(99)00083-9)
- IRAM 1554 (1983), "*Hormigón de Cemento Pórtland. Método de determinación de la penetración de agua a presión en el hormigón endurecido*", (Buenos Aires, Argentina: IRAM), p. 13.
- IRAM 1857 (2000), "*Determinación del contenido de ión cloruro en el hormigón*". (Buenos Aires, Argentina: IRAM), p. 19.
- IRAM 1871 (2004), "*Hormigón. Método para la determinación de la capacidad y velocidad de succión capilar de agua para hormigón endurecido*", (Buenos Aires, Argentina: IRAM), p. 12.

- Kropp, J., Basheer, L. (2000) "Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: A Review", in: Basheer, P.A.M. (Ed.), V CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Barcelona (Spain).
- Monosi, S., Moriconi, G., Alverá, I. (1989), "Effect of water/cement ratio and curing time on chloride penetration into concrete", *Materials Engineering*, Vol. 1, pp. 483-489.
- Neville, A. M. (1977), "Concrete Technology, Volume 1", (Mexico D.F., Mexico: IMCyC), p. 383.
- Nielsen, E. P., Geiker, M. R. (2003), "Chloride diffusion in partially saturated cementitious material", *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, p. 133-138. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00939-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00939-0)
- Rostam, S. (2000), "Vida útil de las estructuras de hormigón. Cómo satisfacer los requerimientos del nuevo milenio", *Hormigón*, N°36, pp. 11-44.
- Saetta, A. V., Scotta, R. V., Vitaliani, R. V. (1993), "Analysis of chloride diffusion into partially saturated concrete", *ACI Materials Journal*, Vol. 90, p. 441-451.
- Sandberg, P., Tang, L., Andersen, A. (1998), "Recurrent studies of chloride ingress in uncracked marine concrete at various exposure times and elevations", *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, pp. 1489-1503. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00124-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00124-0)
- Song, H. -W., Lee, C. -H., Ann, K. Y., (2008) "Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments", *Cement & concrete Composites*, Vol. 30, pp. 113-121. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.09.005>
- Taus, V. L., "Análisis de la Succión Capilar en Hormigones: Influencia de distintos Parámetros de Ensayo", MSc Thesis, UNCPBA, (2010) p. 170.
- Taus, V. L., Villagrán, Y. A., Di Maio, A. A. (2008), "Influence of curing conditions on transport properties of blended cement concrete", in: Pazzini et al. (Eds.), Fifth ACI/CANMET International Conference on High-Performance Concrete Structures and Materials, Manaus (Brazil).
- Traversa, L. P. (2001) "Corrosión de armaduras en atmósferas rurales, urbanas, marinas e industriales", in: E.F. Irassar (Ed.), Durabilidad del Hormigón Estructural, AATH, Buenos Aires (Argentina), (2001), pp 217-257.
- Traversa, L. P., Di Maio, A. A. (2002) "Difusión de cloruros en el hormigón", in: L. P. Traversa, A. A. Di Maio (Eds.), Memoria Jornadas Tecnológicas sobre Corrosión de Armaduras en Estructuras de Hormigón: Evaluación, Diagnóstico y Reparación, AATH, Mar del Plata (Argentina), pp. 87-95.
- Tuutti, K., "Corrosion of steel in concrete", PhD Thesis, SCCI, CIB, Research Report No. 4, (1982) p. 468.
- Villagrán Zaccardi, Y. A., "Estimaciones del ingreso de cloruro en hormigón y de la despasivación localizada de armaduras", PhD Thesis, UNLP (2012), p. 226.
- Violini, D., Giaccio, G., Milanese, C. A., Zerbino, R. (2006), "Efecto del contenido de caliza, en las propiedades del hormigón. Parte 3: Evaluación de la durabilidad", in: Sota et al. (Eds.), 16ª Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Córdoba (Argentina).
- Zhang, Y., Zhang, M. (2014), "Transport properties in unsaturated cement-based materials – A review", *Construction and Building Materials*, Vol. 72, p. 367-379. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.037>