

DIFUSIÓN DE CLORUROS EN HORMIGONES AUTOCOMPACTABLES REFORZADOS CON FIBRAS DE ACERO

Villagrán Z., Y.A.¹

RESUMEN

El ingreso de cloruros en el hormigón es determinante en la vida útil de estructuras construidas en ambientes marinos. Este ingreso puede producirse por difusión en la solución de poros del hormigón. La incorporación de fibras de acero podría suponer modificaciones en las propiedades de transporte del hormigón. En el presente trabajo se establece la influencia de la incorporación de fibras de acero en la difusión de cloruros en hormigones autocompactables. Se determinaron coeficientes de difusión y concentraciones superficiales de hormigones autocompactables sin fibras y con fibras, luego de 230 días y 410 días inmersión en solución de cloruros. Los resultados muestran que la incorporación de fibras de acero no afecta significativamente la difusividad del hormigón, pero sí aumenta el flujo de cloruros ingresantes. Esto se debe a que aumenta la concentración superficial a edades tempranas por la mayor escabrosidad superficial del hormigón con fibras de acero.

INTRODUCCION

La difusión de materia en el hormigón se produce debido a un gradiente de concentraciones entre la superficie expuesta a un ambiente con un elevado contenido de cloruros, y el interior, con concentraciones menores. Se genera un flujo de iones en la fase porosa a través de la solución de poros del hormigón. Aunque también se produce difusión en la fase sólida, su velocidad es despreciable frente a la velocidad de transporte en la fase acuosa. Por ello, la condición de humedad es fundamental cuando se trata la difusión de cloruros, siendo el estado más estudiado hasta el presente aquel en el que la totalidad de los poros del hormigón se encuentra ocupada por una solución acuosa (estado saturado).

Es posible elaborar hormigones autocompactables reforzados con fibras de acero con contenidos de fibras de hasta 60 kg/m^3 con los valores recomendados de fluidez, capacidad de pasaje y estabilidad (1). La resistencia a compresión, módulo de elasticidad y comportamiento en flexión resultan similares a los del hormigón convencional reforzado con fibras de acero (1). Respecto a las propiedades que definen la durabilidad del material, sería esperable que fueran adecuadas debido fundamentalmente a la baja relación agua/cemento y el alto contenido unitario de cemento. Sin embargo, las inclusiones de aditivos específicos, de filler calcáreo y/o de fibras hacen necesario profundizar estudios de la capacidad de transporte de materia a través de su estructura porosa.

¹ Becario CIC-LEMIT.

Director: A. A. Di Maio – (Inv. CONICET-LEMIT)

yuryvillagran@yahoo.com.ar

Se ha propuesto la posible existencia de una incompatibilidad entre algunos cementos y filler calcáreo, detectada mediante ensayos de penetración de cloruros (2). Una falta de dispersión del filler en la mezcla originaría coeficientes de difusión más altos en comparación con otros hormigones sin filler con igual relación agua/cemento. Si esta incompatibilidad no se presenta, la difusividad del hormigón autocompactable es igual o menor a la difusividad de un hormigón convencional de igual relación agua/cemento (2). Dado que el hormigón autocompactable muestra valores del coeficiente de permeabilidad significativamente más bajos que los hormigones convencionales para un mismo grado de resistencia (3), es esperable que sea comparativamente más durable.

Al incorporar fibras al hormigón autocompactable, se introduce un nuevo actor al sistema. La evaluación de su influencia en la penetración de cloruros es necesaria en aplicaciones en zonas marinas. Frente a la exposición en solución de cloruro de sodio, las fibras de acero ubicadas en los primeros milímetros de profundidad se corroen rápidamente (4). En el interior de la masa de hormigón la influencia de los iones cloruro es menor ya que su concentración no es suficiente como para producir la despasivación por picado del metal. Entonces, el factor más importante a tener en cuenta es cómo afecta la corrosión superficial de las fibras a las propiedades de transporte del hormigón autocompactable.

Con el objeto de estudiar la influencia de la incorporación de fibras de acero en el hormigón autocompactable, se realizó una investigación comparativa de hormigones autocompactables, con y sin fibras de acero, manteniéndolos en inmersión en una solución de NaCl. Los resultados de ingreso obtenidos muestran una fuerte influencia de las fibras en el ingreso de cloruros, focalizada en la zona cercana a la superficie.

MODELO DE FICK PARA LA DIFUSIÓN DE CLORUROS EN EL HORMIGÓN

Es habitual la implementación empírica de la solución [1] de la segunda ley de Fick para modelizar el transporte de cloruros en el hormigón.

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

Donde $C_{(x,t)}$ es la concentración a la profundidad x en el tiempo t , C_s es la concentración superficial aparente al tiempo t , erf es la función error, y D_{ap} coeficiente aparente de difusión.

La ecuación [1] considera condiciones de borde que no son aplicables al hormigón. Estas condiciones de borde representan a un material homogéneo, saturado, con difusividad (D_{ap}) constante, con un contenido inicial de cloruros nulo, y concentración superficial constante. Por otro lado, las leyes de Fick no son válidas para difusantes disociados (como lo son los iónicos), y no considera el efecto de fricción entre partículas en la red capilar, ni el contra campo generado por otros iones presentes. Por ello, la aplicación de la expresión [1] a la difusión de cloruros en el hormigón tiene carácter empírico.

La concentración superficial C_s y el coeficiente de difusión aparente D_{ap} son funciones del tiempo, de manera que en la aplicación de la ecuación [1] para el ajuste de los

perfiles de cloruros es necesario tener en cuenta el tiempo t considerado. Cada edad analizada presentará, entonces, valores particulares de C_s y D_{ap} . Además, la concentración superficial influye en la difusividad (5, 6), y D_{ap} disminuye cuando aumenta C_s . Entonces, dos hormigones con el mismo D_{ap} no resultan iguales desde el punto de vista del transporte de materia salvo que presenten el mismo C_s .

Entre las expresiones surgidas de la experimentación, pueden encontrarse las ecuaciones [2](7) y [3](8) para la evolución de los parámetros D_{ap} y C_s en el tiempo, respectivamente, donde D_i , m , C_o , y k , son constantes dependientes del material.

$$D_{ap(t)} = D_i \cdot t^{-m} \quad [2]$$

$$C_s = C_o (1 - e^{-k \cdot t}) \quad [3]$$

MATERIALES Y MÉTODOS

Se diseñaron hormigones autocompactables mediante una optimización preliminar de la fase pasta para definir la dosis óptima de aditivo superfluidificante, y del esqueleto granular de agregados para obtener el mínimo de vacíos entre partículas, luego se determinó el contenido mínimo de pasta de cemento para lograr la fluidez requerida mediante pastones de prueba. La composición de los hormigones con y sin fibras de acero obtenidos se indican en la Tabla 1.

Tabla 1. Proporciones y materiales de la mezcla (1).

Materiales	kg/m ³
Agua	142
Cemento Pórtland Fillerizado	465
Filler Calcáreo	63
Arena Fina	135
Arena Gruesa	890
Piedra Partida Granítica (6-14 mm)	665
Fibras de acero	0-40
Superplastificante (% sp/cemento)	1.5

Con los hormigones en estudio se llenaron tuberías de 100 mm de diámetro dispuesta en forma de U (Fig. 1). El análisis de la homogeneidad del hormigón a lo largo de la tubería se realizó mediante el estudio de porciones seccionadas en distintas partes de la tubería (ubicaciones 1, 2, 3 y 4), resultando testigos cilíndricos de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura, sobre los que se determinó resistencia a compresión (f_c), densidad y absorción (Tabla 2). La resistencia, la densidad y la absorción de agua en 24 horas de inmersión fueron determinadas para las distintas ubicaciones de las muestras de ambos hormigones, obteniéndose resistencias, densidades y absorciones con coeficientes de variación bajos entre las diferentes ubicaciones. Así, la pieza en U estudiada se constituía de un hormigón uniforme a su largo, tanto en resistencia como en porosidad relativa.

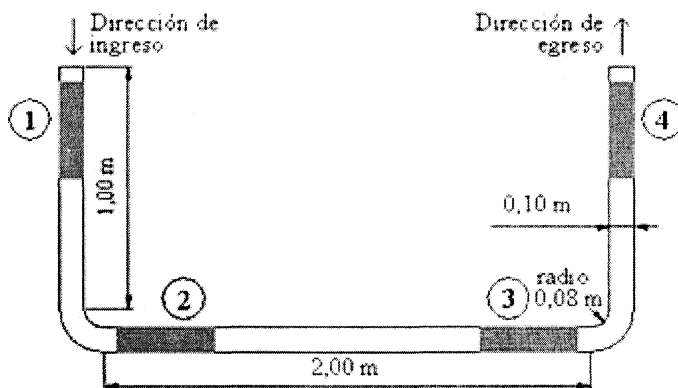


Figura 1. Esquema de tubería en U.

Tabla 2. Propiedades del hormigón endurecido a la edad de 28 días (1).

Hormigón endurecido	f_c (MPa)		Densidad (g/cm^3)		Absorción (%)	
	Media	Desviación estándar	Media	Desviación estándar	Media	Desviación estándar
Sin fibras	35.2	5.3	2.30	0.13	4.1	0.003
Con fibras	30.0	2.7	2.16	0.22	4.2	0.035

Para estudiar la resistencia al ingreso de cloruros, se seccionaron partes de la pieza en U de hormigón en las mismas ubicaciones. Luego de 28 días de curado, las mismas se ubicaron inmersas en solución salina de concentración 3% de Cl^- , manteniendo sólo una cara expuesta y el resto impermeabilizadas, para generar un flujo unidireccional de iones. Las muestras permanecieron sumergidas 230 y 410 días, determinándose los contenidos de cloruros a profundidades desde la cara expuesta iguales a 0.25 cm, 1.25 cm, y 2.25 cm. Los contenidos especificados corresponden a fracciones de cloruros solubles en agua (libres), determinados mediante titulación con nitrato de plata (9).

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los perfiles de cloruros para los dos tipos de hormigones se muestran en la Figs. 2 y 3. Los contenidos de cloruros están expresados en porcentaje en peso respecto al peso del hormigón, y corresponden a los promedios entre las medidas de las probetas en ubicaciones 1 y 4, y en las ubicaciones 2 y 3, para el sentido vertical y el sentido horizontal, respectivamente. Asimismo, se muestran las curvas promediadas obtenidas por regresión de ajuste de cada perfil de ingreso a la expresión [1]. Los valores promedio de los parámetros de la expresión y la correlación media de cada tipo, se muestran en la Tabla 3.

Del análisis de las Figs. 2 y 3 surge que existen diferentes resultados de concentraciones entre los perfiles de las ubicaciones verticales y los de ubicaciones horizontales, especialmente en la primera profundidad y acentuada en el hormigón con fibras. Esto puede atribuirse a la influencia de la exudación en la porosidad superficial de las probetas, cuya magnitud provocaría una mayor concentración superficial. Puede verse en la Tabla 3 que D_{ap} disminuye con el tiempo para ambos hormigones, y que además es menor para el hormigón con fibras. De manera que el coeficiente m de la expresión [2] resulta positivo. Resulta baja la correlación de algunos resultados con la ecuación [1], especialmente en el caso de las muestras de moldeo vertical del hormigón autocompactable sin fibras evaluado a los 230 días.

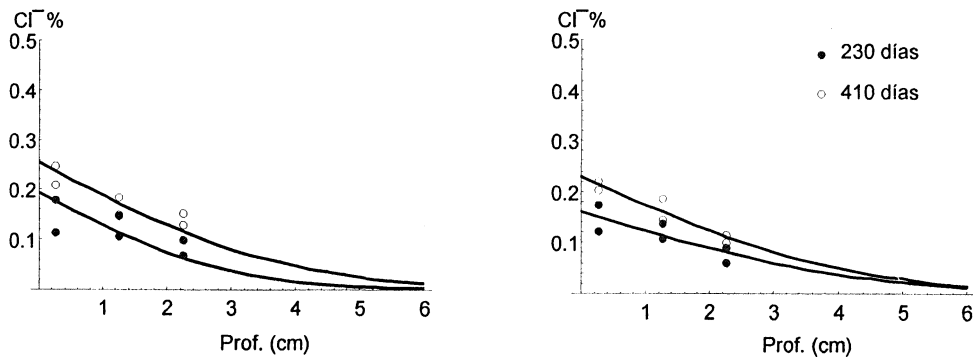


Figura 2. Perfiles de cloruros y ajuste a la expresión [1] para los hormigones sin fibras (izq) probetas en tramos verticales; (der) probetas en tramos horizontales.

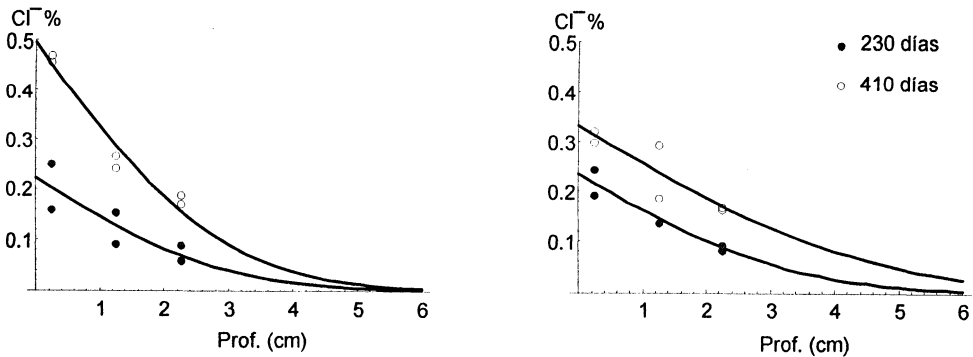


Figura 3. Perfiles de cloruros y ajuste a la expresión [1] para los hormigones con fibras. (izq) probetas en tramos verticales; (der) probetas en tramos horizontales.

Tabla 3. C_s y D_{ap} obtenidos por regresión de ajuste a la ecuación [1].

Parámetros	Hormigón sin fibras				Hormigón con fibras			
	230 días		410 días		230 días		410 días	
	Vert.	Horiz.	Vert.	Horiz.	Vert.	Horiz.	Vert.	Horiz.
C_s (%)	0,19	0,16	0,25	0,25	0,22	0,23	0,50	0,34
D_{ap} (10^{-12} m ² /seg)	13,5	28,8	12,8	15,0	12,6	17,2	7,1	16,9
Coefficiente de correlación (%)	53,9	93,6	94,2	94,9	99,2	99,4	95,7	82,6

En la Fig. 4 se muestran los promedios de las concentraciones de cloruros determinadas a 0,25 cm de profundidad para las muestras de las distintas ubicaciones. Las concentraciones superficiales aumentan a los 410 días respecto a los 230 días, y son mayores para el hormigón que contiene fibras.

Examinándose la concordancia de la evolución de las concentraciones cerca de la superficie obtenidas con la expresión [3], resultan correlaciones bajas, iguales a 68.3% y 60.7%, para el hormigón sin fibras y con fibras, respectivamente.

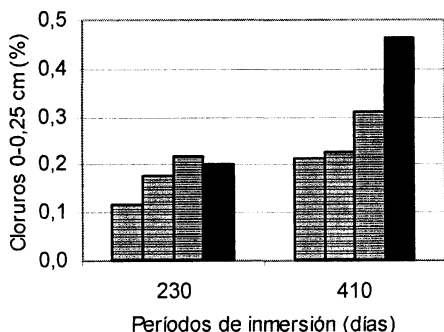


Figura 4. Promedios de concentraciones de cloruros a 0,25 cm de profundidad.

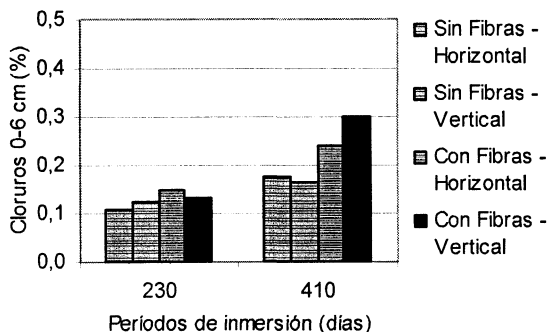


Figura 5. Contenidos de cloruros medio hasta los 6 cm de profundidad.

El área bajo las curvas teóricas obtenidas orienta acerca de la cantidad total que ha ingresado en cada probeta. El cociente entre el área bajo la curva y la zona de profundidades entre las que se encuentra determina la concentración de cloruros promedio en esta zona. En la Fig. 5 se muestran las concentraciones de cloruros promedio entre 0 y 6 cm de profundidad. Puede apreciarse que, aunque los coeficientes de difusión son menores en el hormigón autocompactable con fibras, las cantidades de cloruros que han ingresado en estas muestras son mayores que aquellas que han ingresado en el hormigón sin fibras. Esto indica que, a edades tempranas, cuando la concentración superficial no se ha estabilizado, no es suficiente la difusividad como parámetro comparativo, sino que el D_{ap} debe estar referido a la concentración superficial promotora. En la Fig. 5, los hormigones sin fibras y con fibras presentan un acumulado de cloruros similar luego de 230 días de inmersión, y una diferencia mucho más pronunciada luego de 410 días de inmersión. Este avance por parte del hormigón autocompactable con fibras de acero sucede debido al fuerte incremento de la concentración superficial.

La mayor concentración superficial en el hormigón con fibras puede ser atribuida al aumento de la exudación debido a la incorporación de las fibras, o a algún tipo de microfisuración causada por los productos de corrosión de las fibras, en los primeros milímetros de profundidad. Aunque este fenómeno no afectaría las propiedades de transporte interiores del hormigón, si modificaría sus condiciones superficiales. Y de esta forma, aunque el hormigón presenta las mismas condiciones de transporte, la carga es mayor, y esto provoca una mayor cantidad de materia difundida para igual difusividad. Sin embargo, este análisis no resulta así de simple debido a la influencia de C_s en D_{ap} .

Cuando se pretende comparar coeficientes de difusión obtenidos con diferentes concentraciones superficiales, es posible estar cometiendo un error cuando no se tenga en cuenta la influencia que la concentración superficial tiene sobre la difusividad, en estos casos, podría considerarse más útil el análisis de las profundidades de penetración para una concentración de cloruros específica.

CONCLUSIONES

Las experiencias desarrolladas hasta el presente indican que:

- a) Se corrobora que las concentraciones superficiales en el hormigón autocompactable reforzado con fibras de acero y en el hormigón autocompactable convencional aumentan con el tiempo entre las edades de 230 días y 410 días.
- b) La concentración superficial resultó mayor en hormigones autocompactables reforzados con fibras de acero, en comparación con el hormigón sin fibras. Aunque se estima que puede deberse a una mayor exudación del hormigón o a la corrosión superficial de las fibras, las causas requieren una investigación suplementaria.
- c) La velocidad de flujo de iones fue mayor en el hormigón en que se incorporaron fibras. El hormigón autocompactable con fibras de acero resultó ser más penetrable por los iones cloruros que el hormigón sin fibras, cuando el ingreso se produce debido a un gradiente de concentraciones.

Como conclusión general puede resumirse que se ha determinado una influencia importante de la incorporación de fibras de acero en la concentración superficial C_s , y por esta, indirectamente en la difusividad de los iones cloruros en el hormigón endurecido cuando se encuentra inmerso en una solución salinas.

AGRADECIMIENTOS

A Ing. Ángel Di Maio, Dr. Ing. Raúl Zerbino e Ing. Luis P. Traversa, por sus valiosas sugerencias y contribuciones.

REFERENCIAS

- (1) Barragán, B., Giaccio, G., Soriano, M. y Zerbino, R. "Desarrollo y caracterización de hormigones autocompactables reforzados con fibras de acero" en Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón (Ed.), XV Reunión Técnica de Tecnología del Hormigón, Santa Fe (Argentina), 2003, en CD.
- (2) Tang, L., Andalen, A., Johansson, J.-O. and Hjelm, S. "Chloride diffusivity of self-compacting concrete" in Proceedings 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Estocolmo, Suecia, 1999, pp. 187-198.
- (3) Zhu, W. and Bartos, P.J. "Permeation properties of self-compacting concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 33, 2003, pp. 921-926.

- (4) Corinaldesi, V. and Moriconi, G. "Durable fiber reinforced self-compacting concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, 2004, pp. 249-254.
- (5) Tang, L. "Concentration dependence of diffusion and migration of chloride ions. Part 1. Theoretical considerations", *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, 1999, pp. 1463-1468.
- (6) Tang, L. "Concentration dependence of diffusion and migration of chloride ions. Part 2. Experimental evaluations", *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, 1999, pp. 1469-1474.
- (7) Mangat, P.S. and Molloy, B.T. "Prediction of long term chloride concentration in concrete", *Materials and Structures*, Vol. 27, 1994, pp. 338-346.
- (8) Poulsen, E. "Estimation of chloride ingress and service life prediction in RC structures exposed to marine environment", in *Proceedings Mario Collepardi Symposium on Advances in Concrete Science and Technology*, Roma, Italia, 1997, pp. 219-237.
- (9) IRAM 1857, Hormigón de cemento pórtland. Determinación del contenido del ión cloruro en el hormigón, IRAM, Argentina, 2000, 17 p.