Ingreso y retención de cloruro en hormigón reciclado con aire incorporado

Y.A. Villagrán Zaccardi
C.J. Zega
A.A. Di Maio

Área Tecnología del Hormigón, LEMIT-CICPBA,
52 entre 121 y 122, B1900AYA, La Plata, Argentina
CONICET, Argentina

Resumen

El hormigón reciclado es útil para la construcción sostenible. Los agregados provenientes de la trituración de hormigón de desecho se diferencian de los agregados naturales principalmente en cuanto a absorción, porosidad y reactividad química. El mortero adherido en los agregados reciclados otorga una capacidad extra de retención de cloruro, lo que significa un factor de retardo del ingreso de cloruro.
El objetivo de este trabajo es evaluar el desempeño del hormigón reciclado respecto a la durabilidad del hormigón armado en ambiente marino. Se estudió hormigón reciclado con aire intencionalmente incorporado, comparativamente con hormigón convencional equivalente. Se evaluaron velocidad y retención de cloruro en ambiente natural marino y en inmersión en solución NaCl 30g/l. Los resultados indican que, aún siendo el agregado reciclado más poroso que el natural, es factible el diseño de hormigones reciclados con un desempeño durable similar al hormigón convencional respecto al ingreso de cloruro.

Palabras Clave: hormigón reciclado, ingreso de cloruro, retención de cloruro.

Abstract

Recycled concrete is required for sustainable construction. Aggregates from crushed waste concrete differ from natural aggregates as regards absorption, porosity, and chemical reactivity. Attached mortar in recycled aggregate provides an extra chloride binding capacity, which means a delaying in the chloride ingress.
The aim of this paper is to evaluate the performance of recycled concrete in relation with durability of reinforced concrete in the marine environment. Air-entrained recycled concrete was compared with equivalent conventional concrete. Testing for the chloride ingress rate and binding capacity in the marine environment and in immersion in NaCl 30g/l solution, was performed. From the results, it is derived that, even being recycled aggregate more porous than natural aggregate, it is feasible to design recycled concrete with similar performance to that of conventional concrete, when considering chloride ingress

Keywords: recycled concrete, chloride ingress, chloride binding

Introducción

La durabilidad de estructuras en ambiente marino resulta dependiente de la resistencia del hormigón de recubrimiento al ingreso de cloruro. El ingreso de cloruro en el hormigón conduce a la despasivación localizada de armaduras. Cuando se alcanza un contenido suficiente de cloruro a nivel de las armaduras, denominado contenido umbral, se produce la rotura localizada de la capa pasiva de las armaduras.

La matriz cementícea posee la capacidad de inmovilizar cierta proporción del cloruro que ingresa. Esto es importante ya que es el cloruro libre el que resulta perjudicial respecto a la durabilidad de las armaduras de acero dispuestas en el interior del hormigón. La capacidad de retención de cloruro presenta una dependencia no lineal de la concentración total, influenciada principalmente por el grado de hidratación del cemento (1) y formación tardía de productos de hidratación (2).

Los efectos de la retención de cloruro conducen a un retardo en el ingreso de cloruro en el hormigón. En una sección transversal, una fracción del total de cloruro ingresante quedará inmovilizada en la matriz y el resto permanecerá libre para continuar penetrando. En efecto, la retención de cloruro en el hormigón reduce la cantidad de cloruro libre, y su influencia sobre el inicio de la corrosión es doble (3): 1) la velocidad del transporte iónico en el hormigón se reduce; y 2) la cantidad de cloruro libre que se acumula en la superficie del acero de refuerzo y propicia el picado es menor.

Por lo tanto, los modelos de ingreso de cloruro son significativamente dependientes de la relación de retención asumida entre cloruro libre en la solución de poro del hormigón y el cloruro retenido en los productos de hidratación (4).

La relación entre cloruro fijo y libre no es permanente, ya que además de depender del contenido de cloruro fijado, también influyen el pH del medio (5) (más exactamente la cantidad de iones hidróxido libres (6)), la temperatura, la humedad relativa y la presencia de otros aniones.

La retención de cloruro puede producirse por fijación química o adsorción físico-química. La fijación química de cloruro está determinada principalmente por el contenido de fase alumino ferrito (AFm) (2, 7-8), mientras que la adsorción de cloruro se produce primordialmente sobre el SCH (1-2). El contenido de AFm tiene una pequeña influencia en la inmovilización del cloruro incorporado una vez alcanzado un grado de hidratación equivalente a 48 horas de curado húmedo (8), exceptuando a los hidratos aportados tardíamente por adiciones minerales como la escoria de alto horno. Estas adiciones incrementan la capacidad de fijación de cloruro a medida que se produce la reacción puzolánica. Por lo tanto, cuando el cloruro está presente durante la hidratación del cemento, es incorporado en los hidratos.

Esta fijación química de cloruro por parte del cemento conduce principalmente a la formación de sales de Friedel [1], de Kuzel, y oxicloruro de calcio.

$$2\ NaCl\ (aq) + C3A \cdot 6\ H_2O\ (s) + Ca(OH)_2\ (aq) + 4\ H_2O \rightarrow C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O + 2\ NaOH\ (aq) \qquad [1]$$

Los agregados reciclados tienen la capacidad potencial de incrementar la capacidad de retención de cloruro (9-10), debido principalmente al contenido de cemento correspondiente al mortero adherido en el agregado reciclado. Esta capacidad potencial puede eventualmente contrarrestar inicialmente efectos negativos de una mayor porosidad del tipo de agregado sobre la velocidad de ingreso de cloruro. Al mismo tiempo, el contenido de mortero adherido y sus propiedades dependen en gran medida de las características del hormigón original del cual provienen (11), con lo cual es esperable que el incremento en la capacidad de cloruro debido al agregado reciclado sea variable.

En este trabajo se presentan resultados relacionados con la velocidad de ingreso y la capacidad de retención de cloruro en hormigones en inmersión en solución NaCl 30g/l y en atmósfera natural marina, elaborados con agregados reciclados y hormigones convencionales de referencia. Se realizan comparaciones de la capacidad de retención de cloruro total y de los perfiles de ingreso de cloruro.

Experimental

Se elaboraron hormigones con cemento pórtland compuesto comercial CPC 40, con inclusiones de filler calizo y escoria de alto horno, y un aditivo incorporador de aire. Los agregados naturales utilizados fueron arena silícea de río: fina (ASF) y gruesa (ASG); y piedra partida granítica de tamaño máximo nominal de 19 y 25mm (PPG 19mm y PPG 25mm). El agregado reciclado (AR 25mm) fue obtenido a partir de la trituración del hormigón convencional sin clasificar. Se realizaron reemplazos de 50, 75 y 100% del total de contenido de agregado grueso. En la Tabla 1 se presentan las propiedades de los agregados.

Las proporciones de los hormigones estudiados se presentan en la Tabla 2. En estado fresco se determinaron asentamiento, contenido de aire mediante el aparato de Washington y peso unitario. En estado endurecido se determinó la resistencia a compresión en probetas normalizadas de 15x30cm a la edad de 28d. Estas propiedades se incluyen en la Tabla 2.

Previo a la elaboración de los hormigones, los agregados gruesos fueron saturados durante 24h en inmersión, para evitar pérdidas de asentamiento debido a la absorción incrementada del agregado reciclado.

A fin de evaluar el ingreso de cloruro en los distintos hormigones, se moldearon probetas prismáticas de 7x15x25cm, que fueron impermeabilizadas en todas sus caras a excepción de la cara de moldeo, de 7x25cm. Las muestras fueron expuestas en inmersión en solución NaCl 30g/l (referido a continuación simplemente como NaCl). Al mismo tiempo, muestras de los hormigones con 0% y 75% de agregado reciclado fueron expuestas en un

Propiedades	ASF	ASG	PPG	PPG	AR
Tamaño máximo (mm)	-	-	25	19	25
Módulo de finura	1,66	2,67	7,44	6,83	6,99
Densidad sss (g/cm³)	2,62	2,60	2,70	2,65	2,44
Material de tamaño menor a 75µm (%)	1,51	0,70	0,40	0,55	0,10
Absorción (%)	0,80	0,20	0,30	0,40	4,70

Tabla 1: Propiedades de agregados.

Materiales (kg/m³)	Contenido de agregado reciclado (%)			
	0	50	75	100
Agua	145			
CPC40	422			
ASF	157			
ASG	627			
PPG 19mm	195	95	48	-
PPG 25mm	791	397	197	-
AR 25mm	-	451	674	897
Aditivo incorporador de aire	0,126			
Propiedades				
Aire (%)	5,0	4,7	5,1	4,2
Peso unitario (kg/m³)	2380	2323	2295	2295
Asentamiento (cm)	12,0	11,0	10,0	10,0
Resistencia media a compresión 28d (MPa)	33,3	32,5	33,3	36,5

Tabla 2: Proporciones de hormigones estudiados.

ambiente natural marino (referido como MdP), en la ciudad de Mar del Plata, Argentina, a 30m de la línea de costa y 5m por sobre el nivel del mar (Figura 1). En ambiente marino se expusieron solo algunos de los hormigones estudiados, ya que se esperaba que la tendencia repitiera los resultados de las muestras en inmersión en un rango disminuido de contenido de cloruro.

Figura 1. Sitio de exposición de muestras en ambiente marino.

Transcurridos 6 y 12 meses de exposición, se evaluaron los perfiles de ingreso de cloruro en las muestras en inmersión. Se determinaron a profundidades crecientes los contenidos de cloruro soluble en agua y cloruro total. Los perfiles de ingreso en la zona marina fueron evaluados luego de 6, 12 y 30 meses de exposición.

El contenido de cloruro libre fue determinado en preparados de 20g de muestra molida y 100ml de agua, que fueron estacionados 24h en ambiente de laboratorio. Luego se tomó una alícuota del sobrenadante y se tituló el contenido de cloruro por volumetría con detección colorimétrica del punto final de acuerdo al método de Mohr. Asimismo, se determinó el contenido de cloruro retenido mediante la diferencia entre el contenido de cloruro total y el contenido de cloruro soluble en agua previamente descripto. El contenido de cloruro total se determinó mediante digestión ácida con ácido nítrico diluido y valoración volumétrica por retorno con detección colorimétrica del punto final mediante el método de Volhard.

Resultados y discusión

En las Figuras 2 y 3 se presentan los perfiles de ingreso de cloruro total para los hormigones en solución NaCl, luego de 6 y 12 meses de exposición, respectivamente. Se realizaron dos perfiles por cada tipo de hormigón y período de exposición.

Se observa una clara paridad entre los perfiles de ingreso en el hormigón convencional y los hormigones con distintos contenidos de agregado reciclado. Si bien el agregado reciclado presentaba una notable mayor porosidad que el agregado natural (véase Tabla 1), la matriz cementícea con la que se elaboraron los hormigones fue altamente impermeable, principalmente debido a la baja relación a/c empleada (0,35). Esto significó una disminución clara de la incidencia de las propiedades de los agregados sobre las propiedades de transporte del hormigón. La baja relación a/c no sólo disminuyó la porosidad de la matriz, sino que también posibilitó la generación de una zona de interfase de buena calidad. Esto es importante ya que la zona de interfase resulta ser la más débil en cuanto a su resistencia a la penetración de agentes agresivos. Asimismo, la mayor porosidad del agregado reciclado, permite una mejor compatibilidad del agregado grueso con la matriz. Así, es posible que un volumen mayor de finos se ubique en la zona de interfase, con un efecto reductor del espesor de la zona de interfase y una mejora de su compacidad. Esta hipótesis es compatible con los resultados presentados, pero requiere estudios complementarios que permitan su comprobación experimental.

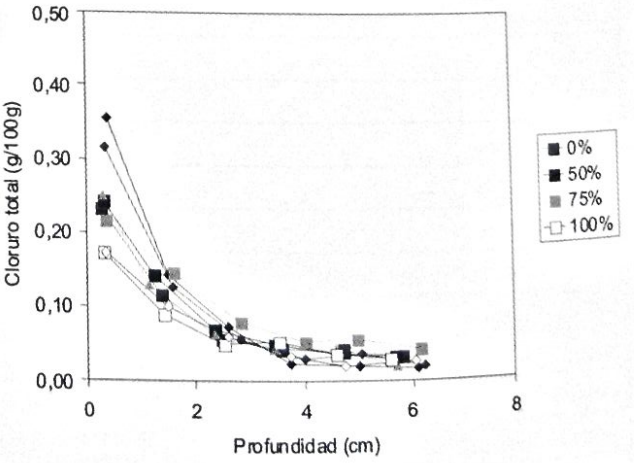

Figura 2. Perfiles de ingreso de cloruro, inmersión solución NaCl 30g/l, 6 meses de exposición.

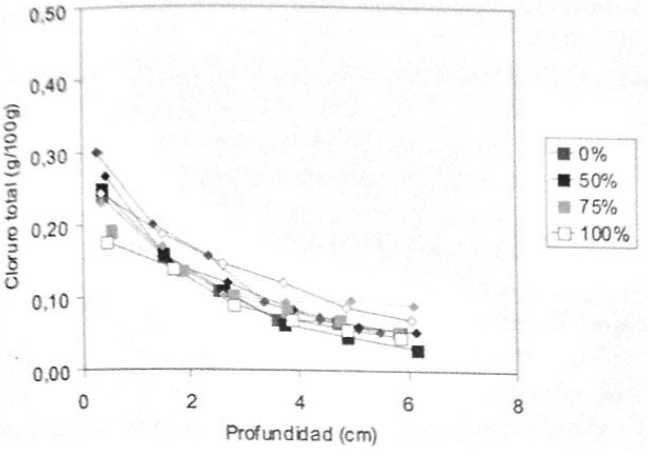

Figura 3. Perfiles de ingreso de cloruro, inmersión solución NaCl 30g/l, 12 meses de exposición.

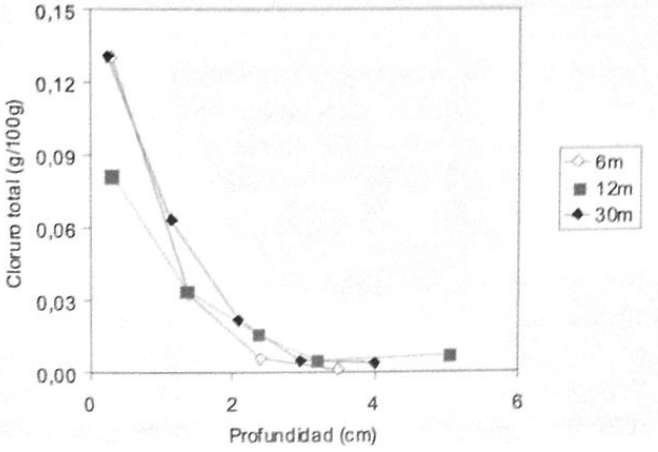

Figura 4. Perfiles de ingreso de cloruro, atmósfera marina, contenido de agregado reciclado=0%.

En las Figuras 4 y 5 se presentan los perfiles de ingreso en los hormigones 0% y 75%, en atmósfera marina. Nuevamente se observan mínimas diferencias entre ambos tipos de hormigón. El avance del frente de penetración de cloruro resulta sumamente lento, en relación con la baja relación a/c empleada. A diferencia de la exposición en inmersión, en atmósfera marina el hormigón está sujeto a variaciones en el contenido de humedad, debido a los sucesos y variaciones climatológicas. La absorción capilar de agua de lluvia que pudiera arrastrar cloruro hacia el interior del hormigón se ve notablemente disminuida con la estructura interna originada con la incorporación intencional de aire. La disposición de microburbujas que acaban siendo poros esféricos en el interior del hormigón endurecido disipa la tensión superficial y limita el avance del frente de penetración por succión capilar. Esto contribuye a disminuir la velocidad de ingreso de cloruro por convección de solución de poro.

En la Figura 6 se presentan las relaciones entre contenidos de cloruro libre y cloruro retenido, conjuntamente para los hormigones en solución NaCl y en ambiente marino.

En ninguno de los dos tipos de exposición (NaCl y MdP) se observan diferencias importantes de acuerdo al contenido de agregado reciclado de cada hormigón, hecho que sí pudo observarse en otros estudios realizados (9-10). Esto se relaciona con el alto contenido de cemento de las mezclas analizadas, que origina una menor influencia relativa del tipo de agregado grueso.

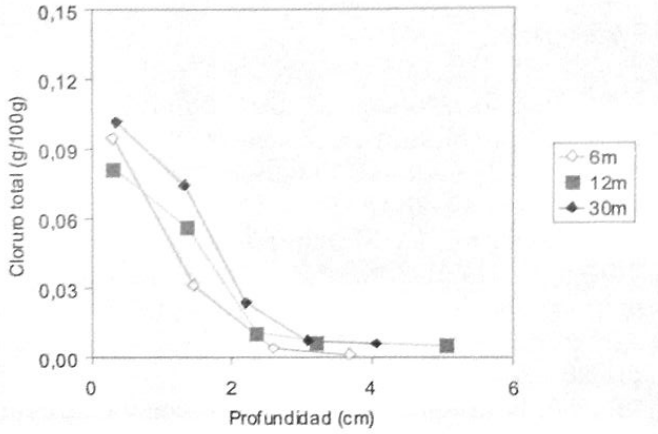

Figura 5. Perfiles de ingreso de cloruro, atmósfera marina, contenido de agregado reciclado=75%

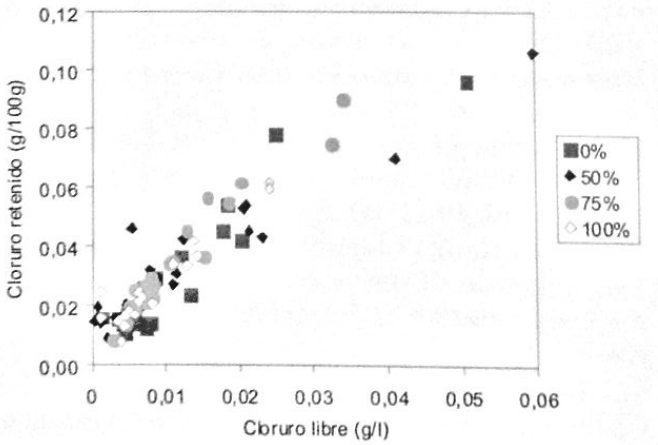

Figura 6. Curvas de retención de cloruro en solución NaCl y ambiente marino.

Conclusiones

Los resultados presentados muestran una limitada influencia del uso de agregados reciclados sobre el ingreso de cloruro en los hormigones estudiados, con relación a/c=0,35 e incorporación intencional de aire.

No se aprecian diferencias significativas en cuanto al contenido de agregado grueso reciclado en lo referido a la capacidad de retención ni a la velocidad de ingreso de cloruro. Es de destacar que los hormigones estudiados presentaban una baja relación a/c, lo que dio lugar a matrices poco porosas e interfases compactas, disminuyendo la incidencia del agregado reciclado sobre las propiedades del hormigón.

Referencias

(1) Tang, L., Nilsson, L.O.: "Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC pastes and mortars", Cement and Concrete Research, Vol. 23 (1993), pp. 247–253.

(2) Delagrave, A., Marchand, J., Ollivier, J.O., Julien, S., Hazrati, K.: "Chloride binding capacity of various hydrated cement paste systems", Advanced Cement Based Materials, Vol. 6 (1997), pp. 28–35.

(3) Nilsson, L.O.: "Interaction between microclimate and concrete - a prerequisite for deterioration", Construction and Building Materials, Vol. 10 (1996), pp. 301–308.

(4) Martín Pérez, B.: Service life modeling of r.c. highway structures exposed to chlorides, PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, Canadá, (1999).

(5) Glass, G.K., Reddy, B., Buenfeld, N.R.: "The participation of bound chloride in passive film breakdown on steel in concrete", Corrosion Science, Vol. 42 (2000), pp. 2013–2021.

(6) Tritthart, J.: "Chloride binding in cement. II. The influence of the hydroxide concentration in the pore solution of hardened cement paste on chloride binding", Cement and Concrete Research, Vol. 19 (1989), pp. 683–691.

(7) Biczok, I.: Corrosión y protección del hormigón, 715 p., Ed. Urmo, Madrid, España, (1972).

(8) Arya, C., Buenfeld, N.R., Newman, J.B.: "Assessment of simple methods of determining the free chloride ion content of cement paste", Cement and Concrete Research, Vol.17 (1987), pp. 907–918.

(9) Villagrán Zaccardi, Y.A., Taus, V.L., Zega, C.J., Di Maio, A.A., Traversa, L.P.: "Propiedades de transporte en hormigones convencionales y reciclados y su influencia en la corrosión de armaduras", en Proceedings of the fib Symposium "Structural Concrete and Time", Volume I, La Plata (Argentina), pp. 91–98, (2005).

(10) Villagrán Zaccardi, Y.A., Zega, C.J., Di Maio, A.A.: "Chloride Penetration and Binding in Recycled Concrete", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 20 (2008), pp. 449–455.

(11) Zega, C.J., Villagrán Zaccardi, Y.A., Di Maio, A.A.: "Effect of natural coarse aggregate type on the physical and mechanical properties of recycled coarse aggregates", Materials and Structures, Vol. 43 (2010), pp. 195–202.