



**2º ENCUENTRO NACIONAL DE CORROSIÓN
Asociación Chilena de Corrosión. ACHCORR-2008.**

**ESTRUCTURAS PORTUARIAS DE HORMIGÓN ARMADO EN CHILE. ESTUDIO DE
LAS VARIABLES: TIPO DE CEMENTO Y RAZÓN AGUA/CEMENTO, QUE INCIDEN
EN SU DURABILIDAD**

A. M. Carvajal ⁽¹⁾, J. F. Benavides ⁽¹⁾, C. Silva ⁽²⁾, J. Valiente ⁽²⁾, A. Venegas ⁽²⁾.

- (1) Profesores Adjuntos de la Pontificia Universidad Católica de Chile, Facultad de Ingeniería, Escuela de Construcción Civil.
(2) Tesistas de pre-grado. Egresados de Construcción Civil de la PUC de Chile, 2003.

RESUMEN

Este trabajo presenta el análisis experimental de las variables tipo de cemento y razón agua/cemento, que inciden en la durabilidad de las estructuras portuarias de hormigón armado, frente a la acción de los agentes agresivos: Cl⁻ y CO₂.

Se utilizaron cuatro tipos de cemento: Pórtland corriente, Pórtland Puzolánico, Pórtland Siderúrgico y Siderúrgico y tres razones agua/cemento: 0,45; 0,50 y 0,55. Se fabricaron 88 probetas de hormigón de dimensiones 15 x 15 x 15 cm.

Las experiencias de carbonatación acelerada indicaron que el tipo de cemento de mejor comportamiento fue el cemento Pórtland corriente, atribuible a su gran reserva alcalina. La razón a/c con mejor comportamiento fue la razón 0,45, para todos los hormigones.

La resistencia a la compresión fue un parámetro de comparación relevante: a mayor resistencia a compresión, menor penetración de CO₂, es decir su comportamiento es inversamente proporcional, como se esperaba.

El sistema acelerado de penetración de cloruros permitió comparar los distintos tipos de cemento y razones agua/cemento y diferenciarlos según la resistencia que presentaron a la penetración de cloruros. Entre los resultados obtenidos, el cemento Pórtland Puzolánico presentó un mejor comportamiento para la razón a/c 0,45.

A mayor resistencia a compresión, se obtuvo menor penetración de cloruros, es decir, inversamente proporcional, como también se esperaba.

SUMMARY



**2º ENCUENTRO NACIONAL DE CORROSIÓN
Asociación Chilena de Corrosión. ACHCORR-2008.**

This paper presents an experimental analysis of type of cement and water/cement ratio, that impacting of the durability of port structures of reinforced concrete, in front of the action of aggressive agents: chloride and CO₂.

Four types of cement were used: Regular Portland, Pozzolanic Portland, Siderurgical Portland and Siderurgical and three w/c ratios: 0,45, 0,50 and 0,55. There were 88 concrete specimens manufactured, dimensions 15 x 15 x 15 cm.

The results of the acceleration analysis of carbonation indicated that the a/c ratio that show the best behavior was the normal Pórtland attributable to its grate alkaline reserve. The relation a/c 0,45 presented the best performance for all type of concrete.

The compressive strength was a relevant paremeter because the higher compressive strength has a lower CO₂ penetration, as expected.

The acceleration system of chloride penetration enabled comparing the different types of cement and water/cement ratio and differentiate them according to the chloride penetration resistance showed. Between the results obtained, the Pozzolanic Portland cement showed the best performance for a/c 0,45.

With the higher compressive strength, was obtained the lower Cl⁻ penetration, as expected.

1 OBJETIVOS



2º ENCUESTRO NACIONAL DE CORROSIÓN Asociación Chilena de Corrosión. ACHCORR-2008.

El objetivo principal de esta investigación es analizar las variables: razón agua/cemento y tipo de cemento, que incidirían en la durabilidad de las estructuras de hormigón armado, desde el punto de vista químico, en sistemas acelerados de penetración de iones cloruro y de CO₂.

Para el logro de este objetivo principal, se plantea:

- 1) Desarrollar sistemas acelerados de penetración de CO₂ y de cloruros, que permitan seleccionar materiales según su comportamiento frente a estos agresivos.
- 2) Desarrollar un sistema analítico cualitativo que permita medir la penetración de cloruros en la misma forma en que se mide la profundidad de carbonatación en la actualidad.
- 3) Determinar el tipo de cemento que presente mejor comportamiento frente al ataque del ambiente marino, simulando tal condición en cámara de penetración acelerada de cloruros.
- 4) Determinar el tipo de cemento que presente la mayor resistencia a la penetración de CO₂, simulando tal condición en cámara de carbonatación acelerada.
- 5) Determinar la razón agua/cemento que otorgue una mejor protección al acero estructural, para distintos tipos de cemento, frente al ataque acelerado de cloruros y CO₂.

2 RELEVANCIA DEL TEMA

Las investigaciones realizadas en el campo de la corrosión coinciden al afirmar que la agresividad del medio marino e industrial, principalmente la presencia de cloruros y el fenómeno de la carbonatación, incide desfavorablemente sobre la durabilidad de las estructuras de hormigón armado.¹ La situación en nuestro país no es diferente, ya que de estudios realizados sobre las estructuras portuarias en el Ministerio de Obras Públicas de nuestro país,² fue posible constatar la gran cantidad de recursos que se debe destinar a la reparación de estructuras dañadas por corrosión.

¹ MATERIALES de construcción, Madrid, 41 (221). Enero/ febrero/ marzo 1991.

² Catastro de proyectos ejecutados entre 1945 y 2002. M.O.P.

**2º ENCUENTRO NACIONAL DE CORROSIÓN
Asociación Chilena de Corrosión. ACHCORR-2008.****3 METODOLOGÍA**

Se utilizaron 4 tipos de cemento: Pórtland corriente, Pórtland Puzolánico, Pórtland Siderúrgico y Siderúrgico y tres razones a/c: 0,45; 0,50 y 0,55, con el fin de comparar la permeabilidad relativa de cada una de ellas en los sistemas acelerados de penetración de agresivos: cámara de carbonatación y cámara de penetración de cloruros.

En la Tabla 1, se indica un número para cada muestra de hormigón, según el tipo de cemento y la razón agua/cemento, los cuales se utilizarán en todas las figuras del presente trabajo.

MUESTRA Nº	RAZÓN A/C	TIPO DE CEMENTO
1	0,45	PORTLAND PUZOLÁNICO
2	0,50	PORTLAND PUZOLÁNICO
3	0,55	PORTLAND PUZOLÁNICO
4	0,45	SIDERÚRGICO
5	0,50	SIDERÚRGICO
6	0,55	SIDERÚRGICO
7	0,45	PORTLAND SIDERÚRGICO
8	0,50	PORTLAND SIDERÚRGICO
9	0,55	PORTLAND SIDERÚRGICO
10	0,45	PORTLAND CORRIENTE
11	0,50	PORTLAND CORRIENTE
12	0,55	PORTLAND CORRIENTE

Tabla 1. Caracterización de las muestras según tipo de cemento y razón agua/cemento

Para realizar las experiencias correspondientes, se confeccionaron 88 probetas cúbicas de 15 cm, a las cuales se les incorporó dos barras de acero A44-28H, sobresalientes 5 cm por la cara superior, para mediciones de potencial de corrosión y su variación en el tiempo.

2º ENCUENTRO NACIONAL DE CORROSIÓN
Asociación Chilena de Corrosión. ACHCORR-2008.



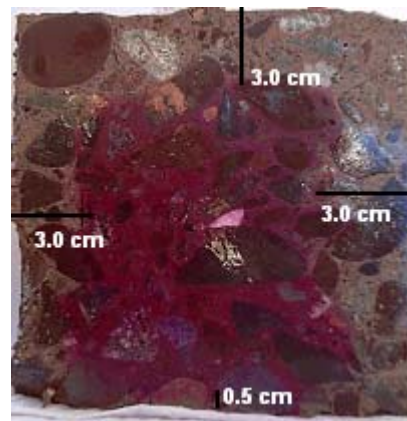
Figura 1. Fotografía de Probeta sometida a carbonatación y penetración de cloruros.

Unas probetas ingresan a la cámara de carbonatación acelerada y otras a la cámara de penetración de cloruros, las que son expuestas a distintos períodos de tiempo. Extraídas las probetas, se someten a los análisis químicos cualitativos correspondientes. Otras probetas se ensayan a resistencia a la compresión a 28 días.

Para medir la profundidad de carbonatación, las probetas son cortadas verticalmente por la mitad, e inmediatamente después se aplica el indicador fenolftaleína.

La profundidad promedio de penetración en cada probeta, es determinada en base a la media de las cuatro mediciones realizadas desde cada cara del plano cortado.

En la figura 2 se muestra el registro fotográfico de la profundidad de carbonatación, como ejemplo del tratamiento realizado a cada probeta, determinada por diferencia de coloración frente al indicador fenolftaleína, en función del tiempo, para los distintos tipos de cementos y razones agua/cemento.





2º ENCUENTRO NACIONAL DE CORROSIÓN
Asociación Chilena de Corrosión. ACHCORR-2008.

Figura 2. Registro fotográfico de profundidad de carbonatación en probeta de Cemento Pórtland Puzolánico de razón a/c = 0,50.

Para medir profundidad de penetración de iones cloruro en el tiempo, las probetas se cortan en la misma forma que para medir profundidad de carbonatación.

En este caso se utiliza dos reactivos químicos, una disolución de nitrato de plata, que forma un precipitado de color blanco con los iones cloruro, que a veces no es posible visualizar. El segundo reactivo, que se agrega sobre el primero, es una disolución de cromato de potasio, que reacciona con los iones plata libres, formando cromato de plata de color café (oscuro), lo que indica ausencia de cloruro.

En la figura 3 se observa el registro fotográfico de la profundidad de penetración de iones cloruro, como ejemplo del tratamiento realizado a cada probeta.

2º ENCUENTRO NACIONAL DE CORROSIÓN
Asociación Chilena de Corrosión. ACHCORR-2008.

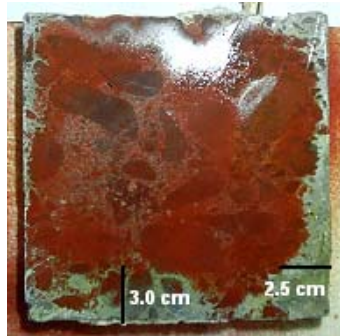


Figura 3. Registro fotográfico de penetración de Cloruros en probeta de Cemento Siderúrgico de razón a/c = 0,45.

4 RESULTADOS

4.1 Se diseñó una cámara de carbonatación, con el objetivo de carbonatar al hormigón en la forma más rápida y efectiva posible. La temperatura y la humedad relativa, se mantiene entre 20 y 25°C y entre 50 y 70% respectivamente, puesto que éstas son las condiciones ambientales de mayor velocidad de penetración de CO₂.

Las dimensiones elegidas para las cámaras son: 1,0 x 0,5 x 0,5 m, en material acrílico de 5 mm de espesor, con tapa de 6 mm de espesor y sello hermético, para que resista la presión del gas. Su esquema se muestra en la figura 4 y un registro fotográfico de ellas en la figura 3.

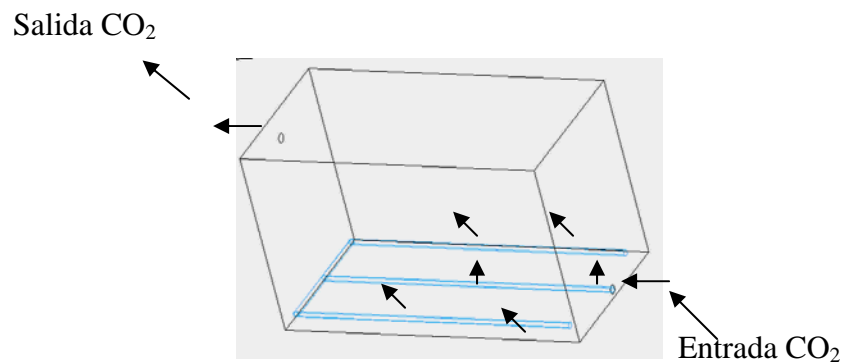


Figura 4. Esquema de Cámara de Carbonatación.

2º ENCUENTRO NACIONAL DE CORROSIÓN
Asociación Chilena de Corrosión. ACHCORR-2008.



Figura 5. Fotografía de las Cámaras de Carbonatación Acelerada

4.2 Se diseñó una cámara de penetración acelerada de iones cloruro, con el objetivo de contaminar al hormigón en la forma más rápida y efectiva posible. Las dimensiones de cada cámara son: 0,8 x 0,5 x 0,2 m, en polietileno de alta densidad.

El ataque acelerado de iones Cl^- se logró:

- sumergiendo parcialmente las probetas, simulando zona de intermarea.
- utilizando una solución acuosa de NaCl 3,42 M.
- aplicando ciclos de 72 horas de inmersión y 4 horas de secado al horno, cuya temperatura inicial era $40^{\circ}C$, aumentando gradualmente la temperatura para evitar fisuras en el hormigón, hasta $80^{\circ}C$.

Un esquema de esta cámara se muestra en la figura 6 y un registro fotográfico de una de ellas en la figura 7.

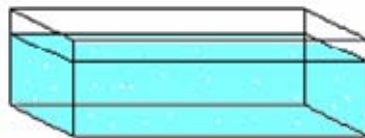


Figura 6. Esquema de Cámara de penetración de cloruro.

2º ENCUESTRO NACIONAL DE CORROSIÓN Asociación Chilena de Corrosión. ACHCORR-2008.



Figura 7 Cámara de penetración acelerada de cloruros.

4.3 Se desarrolló un sistema analítico cualitativo para determinar en forma rápida la profundidad de penetración de iones cloruro, como lo ha sido la fenolftaleína en el caso de la determinación de la profundidad de carbonatación.

En este caso se utilizan dos reactivos químicos, una disolución de nitrato de plata que reacciona con los iones cloruro formando precipitado de color blanco, y una disolución de cromato de potasio, que reacciona con los iones plata libres, formando cromato de plata de color café (oscuro), lo que indica ausencia de cloruro, como ya se explicó anteriormente.

4.4 La penetración media de CO_2 se observa en la figura 8, donde las muestras 1 a 12 corresponden a lo indicado en la Tabla 1. Puede notarse que el tipo de cemento con menor penetración de CO_2 es el cemento Pórtland corriente, para todas las razones agua/cemento, en los tres períodos de tiempo.

2º ENCUENTRO NACIONAL DE CORROSIÓN
Asociación Chilena de Corrosión. ACHCORR-2008.

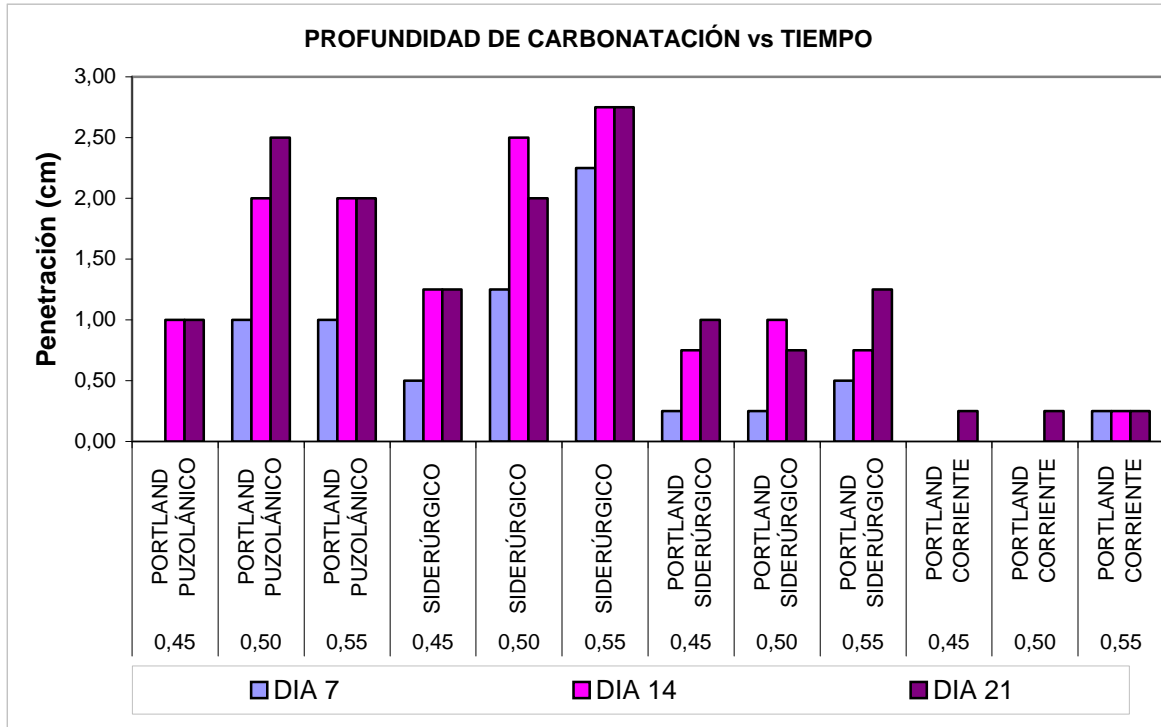


Figura 8. Penetración media de CO₂ de las distintas probetas expuestas a la cámara de carbonatación, versus tiempo de exposición.

El promedio de los máximos valores de penetración de CO₂, para los distintos cementos y razones agua/cemento se observa en la figura 9. Se deduce que el tipo de cemento con menor penetración de CO₂ es el cemento Pórtland corriente, para todas las razones agua/cemento.

2º ENCUENTRO NACIONAL DE CORROSIÓN
Asociación Chilena de Corrosión. ACHCORR-2008.

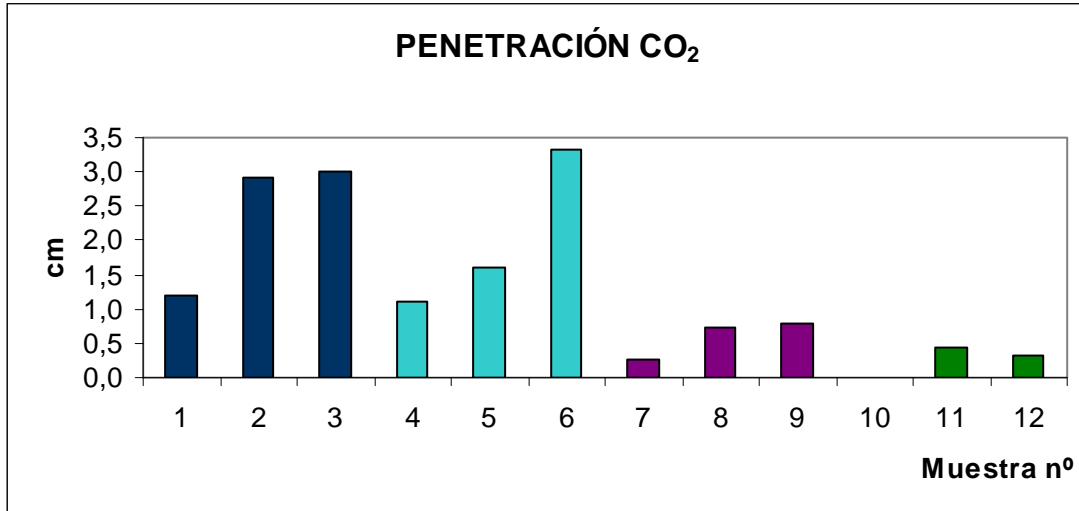


Figura 9. Promedio de los máximos valores de penetración de CO₂, para los distintos cementos y razones agua/cemento.

En la figura 10 puede notarse que la resistencia a la compresión a 28 días, es inversamente proporcional a la razón agua/cemento, lo que está dentro de lo esperado. El cemento que presenta mayor resistencia a la compresión es el portland siderúrgico, seguido del portland corriente.

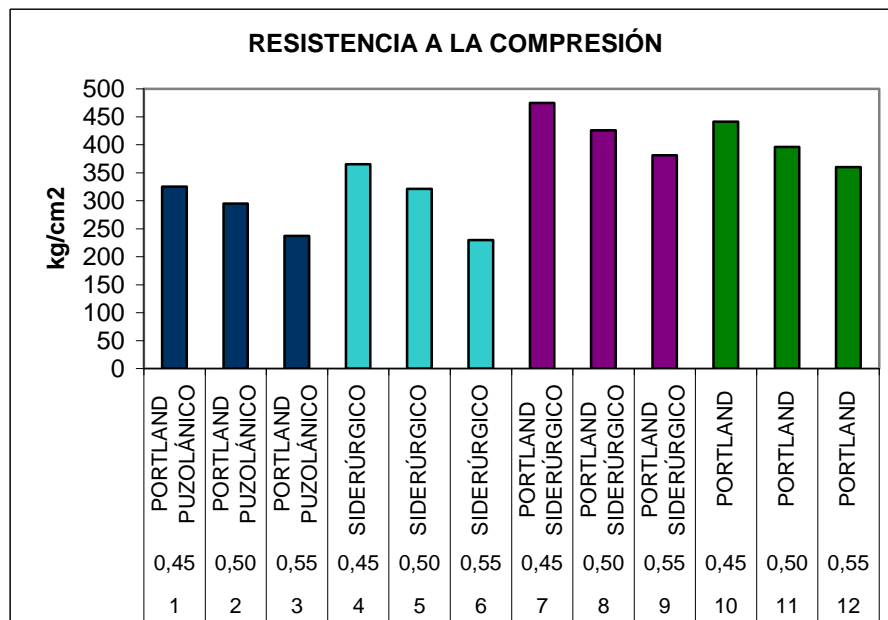


Figura10. Resistencia promedio a la compresión a 28 días, para las distintas muestras.

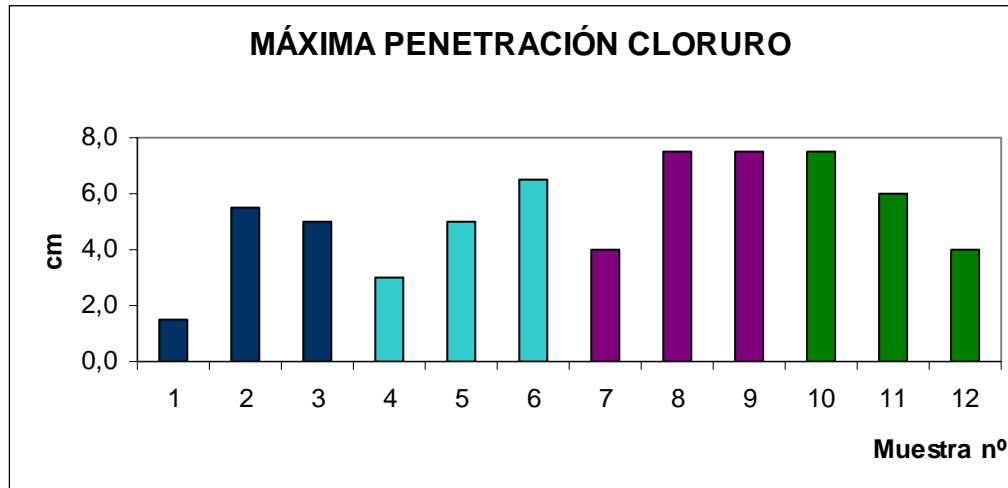
2º ENCUENTRO NACIONAL DE CORROSIÓN
Asociación Chilena de Corrosión. ACHCORR-2008.

Figura 3. Penetración máxima de Cl⁻, para los distintos cementos y razones agua/cemento.

6 CONCLUSIONES

Se logró desarrollar un sistema para análisis de penetración de CO₂ y de cloruros, en tiempos reducidos de 21 y 15 días respectivamente, que permiten seleccionar tipos de cemento y razón agua/cemento en función de los agentes agresivos estudiados en estos sistemas.

Es factible que con estos sistemas se tenga la posibilidad de seleccionar materiales y sistemas de construcción por durabilidad frente a los agentes agresivos CO₂ y Cl⁻, en tiempos que además pueden ser disminuidos, según los análisis realizados.

En forma paralela se colocaron probetas en la zona de intermareas, en Puertecito, Puerto de San Antonio, V región, para ser estudiadas cada 4 años aproximadamente y así obtener una relación entre el sistema acelerado y el tiempo real, que permitirán obtener un modelo de predicción de durabilidad frente a estos agentes agresivos.

En estas cámaras aceleradas se obtuvo resultados muy claros, en forma comparativa, respecto de los cementos y razones agua/cemento estudiados, los que se complementaron con las mediciones de potencial de corrosión de los aceros de cada probeta y que avalaron los resultados obtenidos junto con las mediciones de resistencia a compresión.

En base a la observación de las probetas cortadas por la mitad, a las que se aplicó fenolftaleína, se pudo observar que los cementos que presentaron el mejor comportamiento frente al ataque de CO₂ fueron el Pórtland corriente y el Pórtland Siderúrgico, siendo el segundo un 25% menos



2º ENCUENTRO NACIONAL DE CORROSIÓN Asociación Chilena de Corrosión. ACHCORR-2008.

efectivo. Las mayores penetraciones se encontraron en los cementos Pórtland Puzolánico y Siderúrgico, los cuales mostraron penetraciones que duplicaron las del Pórtland corriente.

Por otra parte, la penetración de CO₂ en probetas confeccionadas con la razón agua/cemento 0,45 fue aproximadamente el 50% inferior a la penetración obtenida con las razones agua/cemento 0,50 y 0,55. Además se pudo observar que no existe gran diferencia en los comportamientos de estas dos últimas por lo cual, si se considerara exclusivamente este factor, podría usarse una u otra indistintamente.

La resistencia a la compresión también fue un parámetro de comparación relevante: a mayor resistencia a compresión menor penetración de CO₂, es decir, su comportamiento es inversamente proporcional, como se esperaba.

En lo que respecta a la acción de los cloruros, los resultados obtenidos mediante el corte de las probetas, indican que los mejores resultados se obtienen con el cemento Pórtland Puzolánico para la razón 0,45, en el que se pudo observar una penetración 27% menor que con el cemento Siderúrgico de razón agua/cemento 0,45, que fue segundo en el orden. Sin embargo para las restantes razones agua/cemento, el comportamiento del cemento Pórtland Puzolánico fue notoriamente más deficiente, observándose penetraciones más de tres veces mayores. En segundo lugar se ubicó el cemento Siderúrgico, que presentó un comportamiento más parejo en cuanto a las razones agua/cemento. Se comprobó que a mayor razón agua/cemento mayor penetración.

En el análisis de las razones agua/cemento, la tendencia general fue que a menor razón agua/cemento se obtuvo menor penetración de cloruro. Se puede notar que la penetración en la razón agua/cemento 0,45 fue aproximadamente un 50% menor que en las restantes razones. La excepción a la regla la constituyó el cemento Pórtland corriente, en el cual se observó que a mayor razón agua/cemento menor penetración de cloruro.

La resistencia a compresión de las distintas probetas tuvo un comportamiento acorde a lo esperado en cuanto a su relación con la penetración de cloruro. A mayor resistencia a compresión, menor penetración de cloruro, es decir, inversamente proporcional. La excepción a la regla nuevamente la constituyó el cemento Pórtland corriente, en el cual los resultados nos indicaron que a mayor resistencia a compresión, mayor penetración de cloruro.

La resistencia a la compresión es un parámetro de comparación con la profundidad de carbonatación.

A mayor resistencia a compresión

7 RESTRICCIONES



2º ENCUENTRO NACIONAL DE CORROSIÓN Asociación Chilena de Corrosión. ACHCORR-2008.

Debido a los resultados auspiciosos de ambos sistemas acelerados, surgen los comentarios de lo que se podría hacer en el futuro. Las exponemos como restricciones con el fin de que sean evaluadas en investigaciones posteriores:

- a) El sistema implementado en esta investigación no permite efectuar mediciones en forma frecuente, puesto que la cámara de carbonatación requiere de un sello hermético para mantener las condiciones de ensayo (50 – 75% HR y temperatura $25 \pm 2^\circ\text{C}$).
- b) Otra restricción es el alto número de variables independientes y dependientes. Si se toma una variable independiente con una dependiente es factible realizar los ensayos con el material que se dispone actualmente (2 cámaras de carbonatación y 2 cámaras de cloruros).
- c) Manejando menos número de variables, se puede profundizar en el comportamiento de los distintos hormigones en función del tiempo, retirando probetas cada 5 días durante 20 días, para obtener curvas según la ley de Fick.
- d) Respecto a los resultados obtenidos en los ensayos a compresión se puede comentar que habría sido interesante, a la luz de los resultados, tener probetas para ensayar a 90 días debido a que investigamos también cementos de resistencia tardía.
- e) Respecto a las variables de la investigación, no se dosificó por docilidad, ésta podría ser una restricción dependiendo de lo que se desee estudiar. En esta investigación se fijó la cantidad de cemento y la razón agua/cemento.
- f) No se tiene análisis cuantitativo de cada cemento usado, incluso no se dispuso de datos estadísticos por parte de los fabricantes que manejan esta información. Los ensayos son de alto costo.

8 PROYECCIONES

Los resultados obtenidos nos permiten pensar que estos sistemas acelerados servirán para regular las prácticas de construcción teniendo en cuenta un nuevo aspecto como es la durabilidad frente a los agresivos CO_2 y Cl^- .

Podrán ser expuestos a estos sistemas acelerados toda muestra de hormigón que requiera ser analizada bajo estos aspectos.



2º ENCUENTRO NACIONAL DE CORROSIÓN Asociación Chilena de Corrosión. ACHCORR-2008.

El comportamiento real se podrá comparar con el de esta investigación, en 4 años más como mínimo y así entonces obtener un modelo del comportamiento de los materiales, comparando tiempo en días, con tiempo en años, probablemente.

Si se toma una variable independiente con una dependiente es posible obtener modelos de predicción para cada situación.

Este trabajo, experimental e investigativo, constituye una primera etapa de una serie de investigaciones complementarias entre sí. La clave quizás sea estudiar una variable independiente con una dependiente, en profundidad.

9 BIBLIOGRAFÍA

1. CALLEJA, J. (1998) Cemento-hormigón, cementos para obras marítimas.
2. CASTRO, P. (2001) Infraestructura de concreto armado: deterioro y opciones de preservación. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
3. CEMCO. (2001) Estructuras en ambientes marinos. Vida útil y conservación. Abril 2001.
4. CRUZ, M. (1996) Medidas preventivas contra la corrosión. Curso sobre patología del hormigón. (3): 14, Junio 1996.
5. DE GUTIÉRREZ, R., DELVASTO, S. and TALERO, R.(2000) Chloride binding capacity of blended mortars. LATINCORR 2000, September 2000, Cartajena de Indias, Colombia.
6. DURAR (1998) Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado, CYTED, 2º Edición, Julio 1998.
7. GEBAUER, C. (1974) Química. Universitaria. 62p. Santiago.
8. I CURSO Iberoamericano de planificación, explotación y dirección de puertos. (1981) Capítulo V. Tema 11, Madrid.
9. IMCYC, (2001) Infraestructura de concreto armado: deterioro y opciones de preservación. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 1ª edición, México.
10. INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN (INN Chile). NCh 170: Of 85 (1985) Hormigón-Requisitos Generales, 44p. Santiago, Chile.
11. JIMÉNEZ MONTOYA, P. (2000) Hormigón Armado. 14ª Edición. Madrid.
12. JOURNAL of materials in Civil Engineering.(2000) 12 (2). May 2000.
13. LINARES, D. y SÁNCHEZ, M. (2002) Diseño, construcción y puesta en funcionamiento de una cámara para carbonatación acelerada. Julio 2002. Venezuela.
14. MATERIALES de construcción, (1997) 47 (248-247). España.
15. MATERIALES de construcción, (1989) 39 (215). Julio/ agosto/ septiembre. España.
16. MATERIALES de construcción, (1995) 45 (237). Enero/ febrero/ marzo. España.
17. MATERIALES de construcción, (2001) 51 (263-264).Julio-septiembre/ octubre-diciembre.



ACHCORR

Asociación Chilena de Corrosión



PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATOLICA
DE VALPARAISO

**2º ENCUENTRO NACIONAL DE CORROSIÓN
Asociación Chilena de Corrosión. ACHCORR-2008.**

España.

18. MATERIALES de construcción, (1991) 41 (221). Enero/ febrero/ marzo. España.
19. MATERIALS and structures, (1996) 29 October 1996 476-484 pp. France.
20. MATERIALS and structures, (1999) 32 (217). April 1999. France.
21. MATERIALS and structures, (1999) 32 (218). May 1999. France.
22. MATERIALS and structures, (1999) 32 (219). June 1999. France.
23. MATERIALS and structures, (2000) 33 (225). January-February 2000. France.
24. MATERIALS and structures, (2001) 34 (236). March 2001. France.
25. MATERIALS and structures, (2001) 34 (240). July 2001. France.
26. MEHTA, Povindar K. (1991) Concrete in the marine environment., Elsevier Applied Science, 2 p. London.