



ESTUDIO DE PARÁMETROS DE DURABILIDAD DE HORMIGONES EN CONDICIONES DE SERVICIO

P. Martínez ¹, M. López ²

¹ Escuela de Ingeniería de la Construcción, Universidad de Valparaíso, Chile

² Depto. de Ingeniería y Gestión de la Construcción, Esc. Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile

Resumen

Esta investigación presenta una componente de terreno que caracteriza las propiedades físico-mecánicas de estructuras de hormigón armado expuesto a dos tipos de ambiente: urbano y marino-urbano, y una componente de laboratorio cuyo propósito fue determinar la influencia de las puzolanas naturales sobre la permeabilidad del hormigón.

Se pudo determinar, en condiciones de servicio, que tanto la profundidad de carbonatación como el perfil de cloruros son muy superiores a los esperados.

Los resultados de laboratorio indican que entre las edades de 28 y 90 días, el hormigón con 33% de puzolana aumentó su resistencia en un 19% y disminuyó su permeabilidad ante iones cloruros en un 65%. El hormigón sin puzolanas aumentó su resistencia en sólo 9% y disminuyó su permeabilidad en 25%.

El análisis conjunto de ambas componentes permite deducir el efecto sobre las propiedades de durabilidad obtenidas bajo condiciones ideales de laboratorio vs las obtenidas in situ.

Palabras clave: durabilidad, permeabilidad, resistencia superficial, carbonatación, capilaridad

Abstract

This research includes testing carried out in situ in urban and marine environment exposed concrete and laboratory testing to determine the effect of natural pozzolan on concrete development.

The laboratory study aimed to compare the strength and permeability gain with time of concrete mixtures with cements of different natural pozzolan contents (0, 14 and 33%). Between 28 and 84 days, concrete with 33% pozzolan increased strength by 19% and decreased chloride ion permeability by 65% while concrete with no pozzolan increased the strength by only 9% and reduced permeability by 25%.

The final conclusion highlights the effect of laboratory vs in situ conditions on the durability properties of concrete.

Keywords: Durability, permeability, superficial strength, carbonation, sorptivity



INTRODUCCIÓN

Probablemente la principal propiedad que controla la durabilidad de estructuras de hormigón armado es la permeabilidad del hormigón. La gran mayoría de las patologías que pueden comprometer la durabilidad están relacionadas con transporte a través del hormigón^{1,2}. Así problemas relacionados con retracción hidráulica y creep del hormigón se ven fuertemente afectados por la migración de agua desde el interior del hormigón al ambiente^{3,4}. Asimismo, el ataque de sulfatos y la reacción álcali-sílice dependen, entre otros factores, de la disponibilidad de agua al interior del hormigón la cual debe migrar desde el ambiente. Finalmente, la corrosión de armaduras, tal vez la patología que más daños produce a las estructuras de hormigón armado, depende del transporte de CO₂, iones cloruros y agua para desarrollarse. Sea cual sea el problema de durabilidad del hormigón, el transporte de agentes a través de la microestructura del hormigón es una de las condicionantes que puede ser reducida por una disminución de la permeabilidad del hormigón.

Investigación hecha en los últimos 20 años ha revelado que la permeabilidad del hormigón puede ser reducida mediante una disminución en la razón agua/cemento, mediante el uso de materiales cementicios suplementarios (adiciones minerales) y buenas prácticas de construcción^{5, 6, 7}. Son numerosas las adiciones minerales que pueden ser utilizadas en el hormigón, pero las más comunes son cenizas volantes, escoria siderúrgica granulada de alto horno, micro sílice, ceniza de cáscara de arroz y puzolanas naturales (cenizas volcánicas ricas en sílice). Debido a la abundancia de puzolanas naturales en Chile, la industrial local cementera optó desde sus inicios por la fabricación de cementos pórtland mezclados con puzolanas naturales. Así el estándar por casi 100 años ha sido un cemento que es aproximadamente entre 65 y 70% de cemento pórtland y 30 a 35% de puzolanas naturales. Chile se transforma así, sin proponérselo, en un laboratorio de durabilidad de 756000 km².

Esta investigación presenta una componente de terreno que caracteriza las propiedades más relevantes del hormigón presente en estructuras de hormigón armado en Chile expuesto a dos tipos de ambiente: urbano y marino-urbano, y una componente de laboratorio que investiga la influencia de las puzolanas naturales en la permeabilidad del hormigón medida con diferentes métodos de laboratorio.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El programa experimental contempla dos fases: la primera consiste en la evaluación en condiciones de servicio de diferentes estructuras de hormigón armado sometidas a dos diferentes condiciones ambientales de exposición; y la segunda contempla la evaluación en laboratorio de mezclas de hormigón con diferentes tipos de cemento, cuyo diseño de mezclas consideró la obtención de resistencias a compresión que se ubicarán dentro del rango de resistencias mecánicas evaluadas in situ. De este modo, fue posible comparar el desempeño del hormigón elaborado en condiciones ideales (laboratorio: condiciones controladas de temperatura, humedad y curado) con respecto al desempeño del hormigón en condiciones de colocación en obra.

Estudio de terreno

El propósito del estudio en terreno fue caracterizar el comportamiento de hormigones con cementos nacionales (portland puzolánicos: app. 20% puzolanas naturales) en condiciones de servicio. Los equipos empleados para la evaluación in situ, fueron: Poroscope plus para



permeabilidad a los gases y Pull-out (Capo-test) para determinación de resistencia superficial. Además se determinó profundidad de carbonatación y perfil de cloruros. Los hormigones evaluados corresponden a estructuras reales, 3 de ellas en ambiente urbano y 2 en ambiente marino-urbano. La Tabla 1 muestra la caracterización y codificación de cada uno de los hormigones estudiados.

Tabla 1: Caracterización hormigones en condiciones de servicio.

Nomenclatura Edificio	Ambiente de exposición	Fecha de Construcción	Edad Estructura	Tipo de Hormigón
FA	Marino-Urbano	2002	4	H – 25
PO	Marino-Urbano	2003	3	H- 25
SA	Urbano	2002	4	H – 35
HC	Urbano	1999	7	H – 25
P	Urbano	2005	1	H – 25

Previo a la ejecución de los ensayos, las estructuras fueron inspeccionadas visualmente, empleando un Protocolo de Inspección que consideró las siguientes secciones: Antecedentes Generales, Antecedentes Específicos, Tipificación de Daños, Ensayos y Diagnóstico

Estudio de laboratorio

El principal objetivo del estudio de laboratorio fue caracterizar la permeabilidad de hormigones fabricados con cementos con puzolanas naturales utilizando diferentes ensayos de laboratorio disponibles. Para ello se utilizó el mismo diseño de mezcla en tres hormigones diferentes en los cuales solamente se varió el tipo de cemento: hormigón denominado CC-05 con cemento corriente (33% de puzolana natural), CAR-05 con cemento alta resistencias (14% de puzolana natural) y PP-05 con cemento portland puro (0% de puzolana natural). Todos los hormigones consideraron las siguientes proporciones (en kg/ m³ de hormigón): Cemento 396, agua 198, agregado grueso 691, agregado fino 1036, plastificante 1.6, W/C 0.5.

Las características de cada cemento se muestran en Tabla 2.

Tabla 2: Propiedades físicas y mecánicas de los cementos.

Tipo de cemento	Finura Blaine (cm ² /gr)	Peso Específico	Tiempo de Fraguado Inicial/final (min)
Corriente	4543	2,85	132/205
Alta Resistencia	5233	2,95	130/201
Pórtland Puro	3600	3.18	150/200

La permeabilidad se caracterizó por medio de los ensayos de resistencia a la penetración de agua a presión (DIN 1048), permeabilidad a iones cloruros (ASTM C1202) y absorción capilar (ASTM C1585) a las edades de 28, 56 y 84 días. Resistencia a compresión fue también medida en todas las mezclas a las edades mencionadas (ASTM C39). El programa de ensayos consideró el ensayo de tres especímenes por edad.



RESULTADOS

Estudio de terreno

Las propiedades mecánicas y físicas de los hormigones evaluados en condiciones de servicio se muestran en la Tabla 3. A pesar de que todas las edificaciones estudiadas presentan hormigones que son considerados estructurales, por lo que se podría esperar que las condiciones de permeabilidad fueran las adecuadas, los resultados de la permeabilidad al aire obtenidos a través del equipo poroscope indican que la calidad de protección de estos hormigones varía de No muy Bueno (NmB) a regular.

Tabla 3: Ensayos y Resultados en relación a las propiedades mecánicas.

Edificación	HC	SA	P	FA	PO
Tipo de Hormigón	H-25	H-35	H-25	H-25	H-25
Edad, años	7	4	1	4	3
Resistencia a Compresión Promedio, (Kg/cm ²)	297	453	356	351	572
Pull – Out Promedio, (KN)	18	23	18	28	24
Martillo de Rebote Promedio, (N°)	46	50	46	42	45
Ultra Sonido Condición del Hormigón Tipo de Medición	Buena Directa	Excelente Indirecta	Buena Indirecta	Buena Directa	Buena Directa
Poroscope, Promedio (seg.) Calidad de Protección del Hormigón	14 Pobre	13 Pobre	100 NmB *	92 NmB	217 Regular
Capilaridad Coeficiente S, en (gr/(m ² * s ^{1/2}))	6.6	16.6	14.1	14.0	22.7
Porosidad % de Porosidad % de Huecos Permeables	9.3 9.4	12.0 12.6	13.9 14.5	s/m ** s/m	s/m s/m
Carbonatación In – Situ Promedio en mm	21.8	13.4	1.5	10	5
Ion – Cloruro Promedio en mm	s/m	s/m	s/m	17	6.3

* NmB = No muy Bueno ; ** s/m = sin medición

El edificio HC es el más antiguo, presentando los mayores valores de penetración de CO₂. Este hormigón puede ser clasificado como un hormigón de buena calidad y compacidad según su porcentaje de porosidad ⁸, además presenta el valor mas bajo de la velocidad de succión capilar de agua (Coef. S).

La Figura 1 permite establecer la velocidad con que estos hormigones se están carbonatando, en mm / año, determinando además el coeficiente K de carbonatación, en mm / año, de cada edificación, el que permite estimar en cuanto tiempo el frente de carbonatación alcanzará la armadura. Considerando un recubrimiento de 25 mm, se establece que dicho frente



de carbonatación, calculado desde la puesta en servicio de las estructuras, alcanzará las armaduras en 8 años en el caso más desfavorable, y en 17 años para el más favorable (Tabla 4). Al proyectar estos hormigones con la velocidad de carbonatación calculada, resulta interesante indicar que todos los hormigones estarán carbonatados antes de su vida útil proyectada (considerando 50 años). Para el primero de los casos, se concluye que las armaduras ya se encuentran despasivadas.

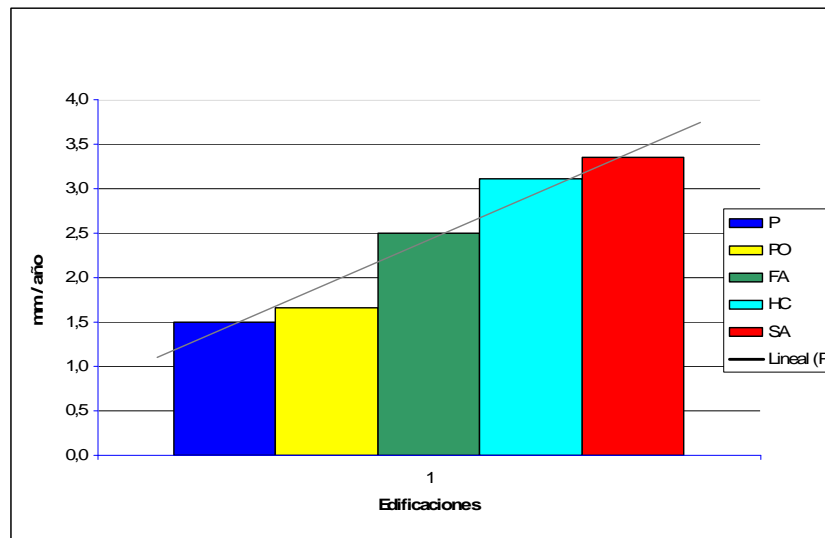


Figura 1: Velocidad de Carbonatación anual.

Tabla 4: Años en que la carbonatación llega a la armadura.

Edificaciones	HC	SA	P	FA	PO
Tipo de Hormigón	H - 25	H - 35	H - 25	H - 25	H - 25
Velocidad de Carbonatación, en mm / año	3,1	3,4	1,5	2,5	1,7
Recubrimiento Mínimo, en mm	25	25	25	25	25
Estimación de Carbonatación, años	8	7	17	10	15

Adicionalmente, para el ambiente marino se determinó el perfil de cloruros determinándose que éste sigue la misma tendencia del perfil de carbonatación, pero con una profundidad de penetración mayor. Realizando una estimación de la velocidad del frente de ataque de los cloruros, considerando nuevamente un recubrimiento de 25 mm, se determinan los valores mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5: Años en que el frente de cloruros llega a la armadura.

Edificaciones	FA	PO
Tipo de Hormigón	H - 25	H - 25
Velocidad del Frente de Ataque de Cloruros, en mm / año	4,3	2
Recubrimiento Mínimo, en mm	25	25
Estimación de daño por cloruros, años	6	12



Estudio de laboratorio

La resistencia a compresión presentada por cada hormigón a lo largo del tiempo se presenta en la Tabla 6 en donde se puede ver que todos los hormigones mejoraron su resistencia en el tiempo mostrando un comportamiento similar.

Tabla 6: Ensayo de Resistencia a Compresión (ASTMC39) según tipo de cemento

Tipo de hormigón	Resistencia a compresión cúbica (MPa)		
	28 días	56 días	84 días
CC-05	37	41	44
CAR-05	46	51	53
PP-05	54	59	59

La mezcla CC-05 presentó la mayor resistencia a todas las edades lo que era de esperarse al considerar el reemplazo progresivo de cemento portland puro por puzolanas (como el caso de CAR-05 y CC-05). Lo anterior debido a que se reducen algunas de las reacciones primarias de hidratación típicas del cemento portland (hidratación de aluminato tricálcico - C_3A , silicato tricálcico- C_3S y silicato bicálcico- C_2S) por las denominadas reacciones puzolánicas secundarias que utilizan el hidróxido de calcio-CH y sílice de las puzolanas. Las reacciones puzolánicas secundarias toman más tiempo en ocurrir por lo que se observa una disminución de la resistencia. Específicamente, se observa un la resistencia a 28 días de CC-05 y CAR-05 son aproximadamente un 68 y 85% de la resistencia de PP-05 a la misma edad que es muy similar al contenido de cemento portland presente en cada mezcla. Es decir a los 28 días casi no se observa el aporte en resistencia de las puzolanas naturales. A pesar de lo anterior, la mezcla CC-05 presenta un 20% de aumento de resistencia entre los 28 y 84 días mientras que PP-05 sólo aumentó en un 9%.

Los resultados del ensayo de penetración de agua (DIN1048) se muestran en la Figura 2 donde se indica además el coeficiente de variación que presenta cada hormigón.

Se observa que los hormigones presentan una tendencia a reducir su permeabilidad en el tiempo siendo esta disminución mayor según el tipo de cemento, obteniéndose una mejora de un 43% a 84 días para el hormigón PP-05 fabricado con cemento Portland puro, de un 54% para el caso del hormigón CAR-05 fabricado con cemento de alta resistencia y de un 19% para el hormigón CC-05. Cabe notar que se la penetración de agua en el hormigón CC-05 a 84 días es mayor que la registrada a 56 días lo que no es intuitivo y puede deberse a la imprecisión del ensayo que presenta variaciones de incluso 50% en la penetración en algunos casos (ver barras de variación en tres especímenes del ensayo).

La Tabla 7 presenta los valores de permeabilidad ante iones cloruro para los 3 hormigones en estudio y a las edades de 28, 56 y 84 días.

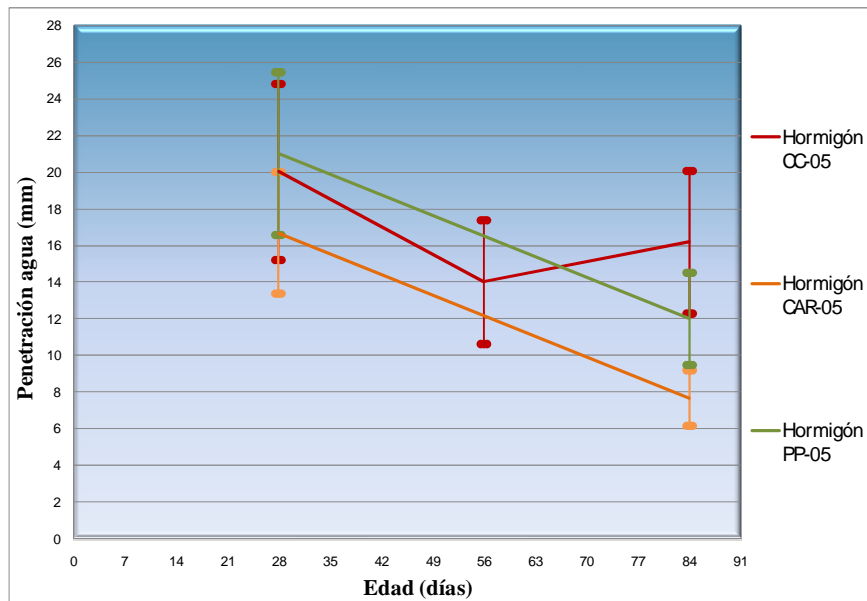


Figura 2: Evolución de penetración de agua (DIN1048) según tipo de cemento

Tabla 7: Ensayo permeabilidad a iones cloruros (ASTMC1202) según tipo de cemento

Tipo de hormigón	Coulombs promedio		
	28 días	56 días	84 días
CC-05	8303	4220	2950
CAR-05	8083	4499	3005
PP-05	7769	6288	5835

Como se puede ver en la Figura 2, a los 28 días no se ve mayor diferencia en cuanto a la permeabilidad de cada uno de los hormigones los cuales presentan permeabilidades altas. Sin embargo, a medida que aumenta la edad de ensayo se aprecia una disminución considerable en la permeabilidad, especialmente para los hormigones con puzolanas naturales (CAR-05 y CC-05) los que reducen su permeabilidad a cerca de un 63% entre 28 y 84 días que los hace ser clasificados con una permeabilidad moderada. Valores obtenidos de otra investigación (Cortes, 1997) sugieren que el hormigón CC-05 podría llegar a permeabilidades ante iones cloruros cercanas a 400 Coulomb a la edad de 9 meses clasificada como muy baja.

Las curvas de absorción vs. tiempo para los tres hormigón bajo estudio a la edad de 84 días muestran que las curvas correspondientes a los hormigones con puzolanas (CAR-05 y CC-05) se comportan de manera similar y después de 7 días de ensayo absorben aproximadamente el 82% de lo que absorbe el hormigón PP-05. Los resultados de absorción capilar sugieren más claramente que los de penetración de agua, que a la edad de 84 días, la presencia de puzolanas naturales habría contribuido a reducir la conectividad entre los poros y capilares de la microestructura del hormigón reduciendo notoriamente la absorción capilar.



CONCLUSIONES

El uso de puzolanas naturales como reemplazo de cemento portland reduce la velocidad de ganancia de resistencia mecánica del hormigón, lo que era de esperar de acuerdo a los antecedentes bibliográficos conocidos.

Se observa que el hormigón CC-05 que posee un 75% de la resistencia a 84 días de la de PP-05, presenta una permeabilidad equivalente al 50% de la de PP-05. Es decir el aporte de las puzolanas a reducir la permeabilidad a la edad de 84 días es mucho más significativo que el aporte en resistencia. Se concluye así que la resistencia no es un buen indicador de permeabilidad sobre todo en hormigones con contenido de puzolana.

Los resultados indican que a los 84 días aún no existe una estabilización de las propiedades, por lo que se debería observar una mayor mejora en los hormigones con puzolanas naturales en relación a al con cemento portland puro. Por ejemplo, valores de permeabilidad ante iones cloruro obtenidos de otra investigación sugieren que el hormigón CC-05 podría llegar a los 9 meses de edad a permeabilidades del orden del 5% de las medidas a 28 días.

No obstante lo anterior, que respalda el adecuado desempeño de los hormigones fabricados con cementos portland puzolánicos frente a condiciones de durabilidad, se detectó que bajo condiciones de servicio el desempeño del material es muy inferior a lo esperable de acuerdo a los ensayos de laboratorio. Esto permite establecer y respaldar la importancia que reviste el resguardo de las condiciones de colocación del hormigón en obra, y por sobretodo, indica que es absolutamente necesario controlar la calidad del hormigón colocado, haciendo énfasis en la calidad superficial del material, vale decir, hormigón de recubrimiento.

REFERENCIAS

1. L. Basheer, J. Kropp, D. Cleland, "Assessment of durability of concrete from its permeation properties: a review", *Construction and Building Materials* 15, (2001): p.p. 93-103
2. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón (AATH), *Durabilidad del Hormigón Estructural*, Argentina.
3. K. Mehta, "Greening of the Concrete Industry", *Concrete International*, July (2002).
4. American Concrete Institute, "ACI 224R-01: Control of Cracking in Concrete Structures", Reported by ACI Committee 224 (2008).
5. RILEM, "Reporte RILEM TC189-NEC: Non-destructive evaluation of Concrete Cover", (2005).
6. American Concrete Institute, "ACI 201.2R-01: Guide for Durable Concrete". Reported by ACI Committee 201, August (2002).
7. AFGC, "Conception des Betons pour une Duree de Vie Donee des Ouvrages", *Association Française de Génie Civil*, France (2004).
8. RED DURAR, "Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado", 3^{ra} Edición. DURAR, Red Temática XV.B, Durabilidad de la Armadura, Subprograma XV: Corrosión/Impacto de los Materiales, CYTED (2000).