

CARACTERIZACIÓN Y DESEMPEÑO DE HORMIGONES PARA ELEVADA DURABILIDAD

Claudio J. Zega¹, Yury A. Villagrán-Zaccardi^{1,2}, María E. Sosa³, Lautaro R. Santillán⁴

¹ LEMIT, CONICET, La Plata, Argentina, hormigones@lemit.gov.ar

² Magnel-Vandepitte Laboratory, UGent, Technologiepark-Zwijnaarde 60, Gent, Bélgica, yuryvillagran@gmail.com

³ CITEMA, CONICET, Berisso, Argentina, ingmesosa@gmail.com

⁴ LEMIT, La Plata, Argentina, lautarosantillan@gmail.com

RESUMEN

La vida útil de las estructuras impacta de un modo directo en la sustentabilidad del medioambiente al conducir a mayores o menores consumos de recursos naturales y energía. Asimismo, se puede reducir la cantidad y frecuencia de generación de los residuos de construcción y demolición con estructuras más durables. En el caso de las estructuras de hormigón armado, un diseño adecuado debe limitar la posibilidad de retención de humedad y el ingreso de sustancias agresivas, y también considerar aspectos vinculados a la durabilidad del material en el ambiente específico de exposición. En este trabajo se presentan mezclas de hormigón pensadas para su empleo en estructuras con requerimientos de vida útil superior a los 150 años. Se evalúan la resistencia a compresión a 7, 28 y 90 días, parámetros de transporte de agua (absorción, penetración de agua a presión, succión capilar), migración de cloruros y el desempeño en suelo con sulfato.

Palabras claves: sustentabilidad, vida útil, durabilidad, propiedades de transporte, sulfatos.

INTRODUCCIÓN

La vida útil de una estructura de hormigón armado constituye el período de tiempo durante el cual la misma reúne los requisitos mínimos de funcionalidad, seguridad y estética con que fue diseñada y construida [1]. Dicho período comienza cuando la estructura se pone en funcionamiento y resulta variable en función del destino que tenga la misma. De ahí que las edificaciones destinadas a vivienda, oficinas y comercios se piensen en función de una vida útil que rara vez excede los 50 años [2,3], mientras que estructuras más importantes como plantas de tratamiento de agua, puentes y viaductos se diseñan para alcanzar los 100 años de servicio. En algunos casos particulares, como el de repositorios para desechos de baja radiactividad provenientes de plantas de generación de energía nuclear, los requerimientos de vida útil previstos pueden alcanzar los 300 años [4].

Cuanto mayor sea la vida útil de una estructura, mayores serán los factores que puedan afectarla. En base a la experiencia recabada en el país, en general, podríamos indicar que hay un conocimiento adecuado respecto a los factores que gobiernan la durabilidad de las estructuras para períodos de tiempo del orden de los 50-60 años. Sin embargo, al aumentar el tiempo de exposición, resulta dificultoso e incierto poder predecir las condiciones a las que estará expuesta la estructura, motivo por el cual la premisa sería minimizar las posibilidades de ingreso de sustancias agresivas al hormigón [5]. Ello se logra, en parte,

mediante el diseño de mezclas de hormigón de baja relación agua/material cementiceo, lo cual permite disminuir el tamaño y la conectividad de la red de poros capilares de la pasta de cemento [3], sin la necesidad de emplear elevados contenidos unitarios de cemento. Por otra parte, están ampliamente comprobados los beneficios que ocasiona, desde el punto de vista de la durabilidad, el empleo de materiales cementiceos suplementarios (MCS) [6-13]. Ello permite un refinamiento de los poros capilares, y por ende la segmentación de los mismos, a partir de consumir el CH y generar nuevos productos de hidratación similares al C-S-H.

Extender la vida útil de las estructuras implica no solo cumplir con los requerimientos especificados en los reglamentos para las condiciones ambientes de exposición y tipo de estructura, sino que también involucra otros factores como el tamaño de los elementos estructurales y un diseño capaz de reducir la posibilidad de retención de humedad y el ingreso de sustancias agresivas, incluyendo una adecuada colocación y curado [14]. De este modo, se reducen la generación de residuos de demolición y la demanda de materias primas naturales.

El empleo de MCS también resulta ventajoso desde el punto de vista del medioambiente, por cuanto permite reducir el tenor de Clinker en el cemento Portland y con ello la generación de CO₂ y el consumo de recursos naturales no renovables [15]. En este trabajo se presentan los resultados de diferentes propiedades de transporte y durabilidad de hormigones elaborados con cemento Portland normal y puzolánico enfocados en su utilización en estructuras con requerimientos de vida útil superior a los 150 años.

EXPERIENCIAS

Materiales y mezclas

Se emplearon dos tipos de cemento Portland (CP40), Normal (CPN) y Puzolánico (CPP), cuyas propiedades físico-mecánicas y composición química se presentan en la Tabla 1. El agregado fino estuvo constituido por arena silíceo natural y el agregado grueso por piedra partida granítica de tamaño nominal 6-20mm. En la Tabla 2 se presentan las propiedades determinadas a los mismos.

Además, para lograr una buena conjunción entre elevada plasticidad de las mezclas en estado fresco y baja porosidad de la matriz en estado endurecido, se utilizaron aditivos reductores del agua de mezclado, un plastificante (p) de rango medio, que se incorporó con el agua de mezclado, y un superfluidificante (sf), el cual se adicionó en último término para incrementar la fluidez de las mezclas. En la Tabla 3 se presentan las características más importantes de ambos aditivos.

A fin de lograr hormigones con características acorde a una durabilidad superior a 150 años, se elaboraron hormigones con relación agua/cemento (a/c) 0,35 empleando los cementos normal (N35) y puzolánico (P35), y un hormigón de relación a/c 0,38 con el cemento puzolánico (P38). En la Tabla 4 se presentan las proporciones de los materiales para los hormigones en estudio y las propiedades evaluadas en estado fresco, tales como asentamiento, contenido de aire naturalmente incorporado y exudación.

Con cada uno de los hormigones se moldearon probetas de diferentes formas y tamaños, las cuales fueron desmoldadas a las 24 horas y colocadas en cámara con temperatura y humedad controladas (T: 23±2°C; HR > 95%) hasta las edades de ensayo.

Tabla 1: Propiedades y composición química de los cementos.

Propiedades físico-mecánicas	CPN	CPP
Superficie específica Blaine (m ² /kg)	288	281
Retenido tamiz 75µm (%)	2,4	2,1
Densidad (g/cm ³)	3,13	2,95
Resistencia a compresión 2d (MPa)	20,4	18,9
Resistencia a compresión 28d (MPa)	44,4	41,8
Composición química	CPN	CPP
Dióxido de Silicio (SiO ₂) (%)	19,86	14,79
Óxido de Calcio (CaO) (%)	63,82	50,32
Óxido Férrico (Fe ₂ O ₃) (%)	4,19	3,09
Óxido de Aluminio (Al ₂ O ₃) (%)	4,11	4,77
Óxido de Sodio (Na ₂ O) (%)	0,01	0,16
Óxido de Potasio (K ₂ O) (%)	0,93	1,24
Óxido de Magnesio (MgO) (%)	1,60	1,01
Trióxido de Azufre (SO ₃) (%)	1,73	1,40
Pérdida por calcinación (%)	0,87	1,20
Residuo insoluble (%)	2,65	21,65
Cloruro (Cl ⁻) (%)	0,03	0,03

Tabla 2: Propiedades de los agregados fino y grueso.

Propiedades	Agregados	
	Fino	Grueso
Módulo de finura	2,30	6,71
Tamaño máximo (mm)	-	19
Densidad saturada y superficie seca	2,67	2,75
Absorción de agua (%)	0,5	0,2

Tabla 3: Características de los aditivos.

Denominación Aditivo	Peso Específico (kg/l)	Color	Composición Base	Residuo Sólido (%)
p	1,142	Marrón Oscuro	Lignosulfonato modificado	52,7
sf	1,158	Marrón oscuro	Sulfonato de naftaleno	49,3

Se realizaron determinaciones de resistencia a compresión a edades de 7, 28 y 90 días sobre probetas cilíndricas de 100x200 mm. Los parámetros de transporte fueron evaluados a la edad de 28 días, empleándose probetas cilíndricas de 100x200 mm de las cuales se obtuvieron por aserrado las muestras para determinación de la absorción de agua, succión capilar y migración de cloruro [16]. La evaluación de la penetración de agua a presión se realizó sobre la cara de moldeo de probetas cilíndricas de 150x300 mm. Además, se evaluó

la evolución del módulo de elasticidad dinámico de probetas prismáticas de 75x100x430 mm expuestas en suelo con sulfato (semi-enterradas).

Tabla 4: Proporciones de los materiales (kg/m^3) y propiedades de los hormigones en estado fresco.

Materiales		N35	P35	P38
Relación a/c		0,35	0,35	0,38
Cemento	CPN	400	-	-
	CPP	-	400	400
Agregado fino		927	895	888
Agregado grueso		979	979	960
Aditivo p		3,2	3,2	1,6
Aditivo sf		4,0	5,6	4,0
Propiedades en estado fresco		N35	P35	P38
Asentamiento (mm)		110	150	180
Aire incorporado (%)		4,2	3,2	3,4
Exudación (%)		< 0,01	< 0,01	-

RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la Tabla 5 se presentan las resistencias a compresión medias y los desvío estándar de los hormigones en estudio determinados a las edades de 7, 28 y 90 días.

Tabla 5: Resistencia a compresión y desvío estándar (MPa).

Edad (días)	N35	P35	P38
7	53,2 (1,73)	52,4 (0,30)	41,9 (0,18)
28	58,2 (3,41)	57,4 (3,04)	51,5 (2,13)
90	68,8 (2,02)	65,0 (8,14)	56,6 (1,08)

En la Figura 1 se presentan los valores de absorción y porosidad de los hormigones a los 28 días. Las absorciones estuvieron en el rango 2,50-2,89 %, en tanto que las porosidades fueron de entre 6 y 6,85 %, las cuales se encuentran asociadas a las bajas relaciones a/c utilizadas. Los valores de absorción y porosidad del hormigón P35 fueron del orden del 14 % superior al del N35, debido a las características propias del cemento. Para el CPP, ambos parámetros no mostraron sensibilidad respecto a la modificación de la relación a/c.

En las Figuras 2 a) y b) se presentan las curvas promedio de succión capilar vs. tiempo de los hormigones en estudio y los valores de parámetros asociados, velocidad y capacidad de succión, respectivamente. La curva succión-tiempo del hormigón con cemento normal (N35) presentó pequeñas diferencias con relación a la del hormigón P35, mientras que la correspondiente al P38 se ubicó por encima de ambas. Si bien se aprecian leves diferencias entre las 3 mezclas evaluadas, las velocidades se encontraron entre 0,95 y 1,4 $\text{g/m}^2/\text{s}^{1/2}$, las cuales resultan muy inferiores al límite de 4 $\text{g/m}^2/\text{s}^{1/2}$ establecido en el Reglamento CIRSOC 201-05, mientras que la capacidad adquirió valores entre 580 y 780 g/m^2 . El hormigón N35 presentó la menor velocidad y capacidad de succión capilar, debido a que a la edad de evaluación (28 días) prevalece el efecto del mayor contenido de clínker del CPN. Es esperable que a edades avanzadas ambos parámetros disminuyan en mayor medida para los hormigones con CPP debido al aumento en la tortuosidad y

desconexión de los poros capilares motivado por la reacción de la puzolana [17, 18]. Asimismo, los valores que toman ambos parámetros dan cuenta de la reducida interconexión de la red de poros capilares de los hormigones en estudio a la edad de evaluación.

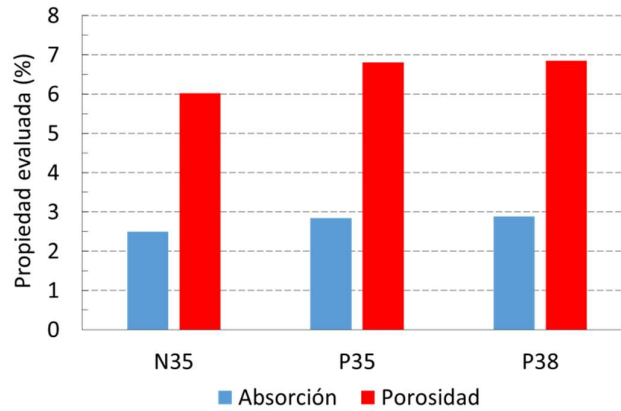


Figura 1: Absorción y porosidad de los hormigones.

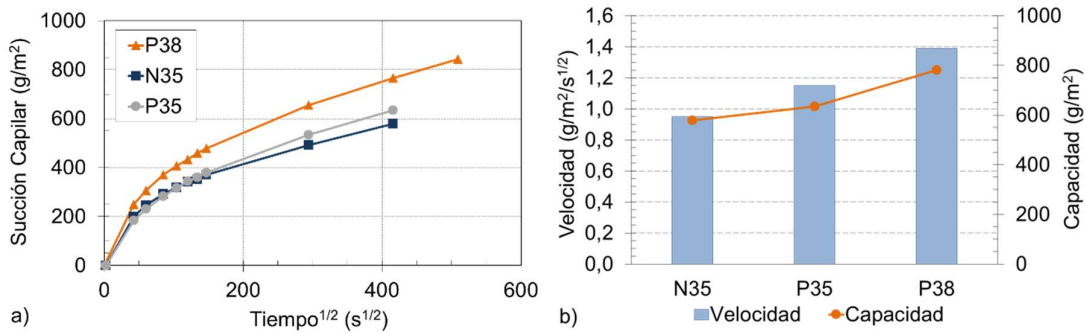


Figura 2: Absorción capilar de los hormigones: a) Curvas de incremento de masa; b) Velocidad y capacidad de succión capilar.

Los coeficientes de migración de cloruro resultaron en valores de $4,6 \pm 0,7$, $3,3 \pm 0,7$ y $4,2 \pm 0,3 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ para N35, P35 y P38, respectivamente. Estos resultados son valores medios y desviaciones estándar de tres muestras por hormigón. Los valores resultan algo mayores a los esperables por la relación agua/cemento. Sería esperable sobre todo para P35 y P38 que los valores disminuyeran sensiblemente con la edad [17].

En la Figura 3 se presentan las profundidades de penetración media y máxima de agua a presión, y en la Figura 4 la variación del módulo de elasticidad dinámico de probetas expuestas en suelo con sulfato (grado de ataque fuerte, conforme al CIRSOC 201-05) a lo largo de casi 8 años. Esta última tiene por finalidad evaluar el desempeño de los hormigones en ambientes de exposición similares a los que pudiera estar expuesta una estructura. En ambos casos, las determinaciones fueron realizadas solamente sobre las mezclas N35 y P35.

Ambos hormigones presentaron similares valores de penetración de agua, verificando por un amplio margen los límites establecidos en el CIRSOC 201-05. A diferencia de lo observado en los resultados de absorción, porosidad y succión capilar, el hormigón P35 mostró un leve mejor comportamiento. En tal sentido, con relación a los límites máximos especificados en el mencionado reglamento, la penetración media resultó 33 y 40% menor

y la penetración máxima 36 y 44 % menor para los hormigones N35 y P35, respectivamente en cada caso.

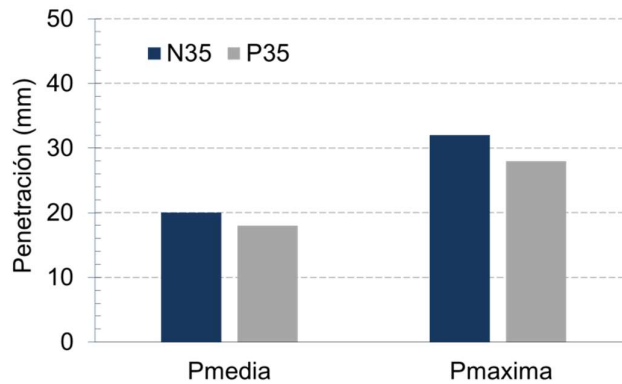


Figura 3: Valores medios y máximos de penetración de agua a presión.

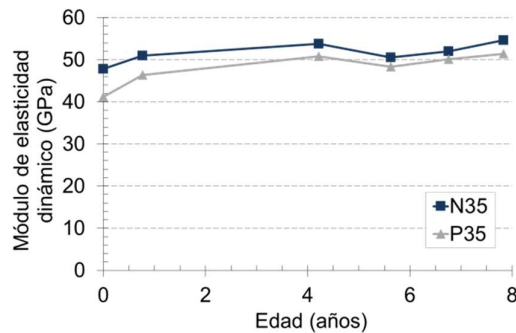


Figura 4: Variación del módulo dinámico de probetas en suelo con sulfato.

Con relación al desempeño de los hormigones en suelo con sulfatos, a la primera edad de evaluación el hormigón P35 presentó un menor módulo de elasticidad dinámico que el hormigón N35. Este hecho está asociado a menores valores de frecuencia y peso, debido a una menor densidad del P35, manteniéndose dicha tendencia a lo largo de los 8 años de exposición. Para ambos hormigones, el módulo dinámico presentó variaciones esperables y asociadas con cambios en el estado de humedad de las probetas al momento de la evaluación. Sin embargo, a la última edad de evaluación, se observaron en las probetas del hormigón P35 algunas mínimas alteraciones sobre las probetas, las cuales no son de magnitud suficiente como para modificar la frecuencia de vibración o el módulo dinámico. Dichas alteraciones se correspondieron con el deterioro de vértices y aristas de las probetas, como así también con la ocurrencia de delaminaciones parciales en algunas de sus caras. Todas ellas se encuentran asociadas al ataque físico por sulfatos [19].

En la Figura 5 se muestra el estado que presentaron las probetas en la última medición, y detalles de algunos de los deterioros observados (P35-a y P35-b). Considerando el grado de ataque fuerte del suelo y el estado visual de las probetas, es de esperar que la degradación en las P35 continúe progresando.



Figura 5: Aspecto visual general y en detalle de los hormigones en suelo con sulfato.

CONCLUSIONES

A partir de la evaluación de distintas propiedades de transporte de hormigones de baja relación a/c , elaborados con cementos normal y puzolánico, pensados para su empleo en estructuras con un requerimiento de vida útil mayor a 150 años, surge que:

- Los hormigones presentaron un adecuado nivel resistente en compresión, pudiendo ser caracterizados como de nivel H-45 o superior.
- Propiedades tales como absorción, porosidad y succión capilar mostraron reducidos valores en sus parámetros, asociado con las bajas relaciones a/c empleadas. Los menores valores fueron obtenidos para el hormigón con cemento portland normal.
- La penetración de agua también presentó valores bajos, entre 33 y 44 % inferiores a los límites del CIRSOC 201. Además, el hormigón con cemento portland puzolánico presentó penetraciones de agua del orden de 10 % inferior a las del hormigón con cemento normal.
- Luego de 8 años de exposición en suelo con sulfato, los hormigones presentaron un muy satisfactorio comportamiento sin disminución del módulo dinámico. Sin embargo, a la última edad de evaluación, se observó un deterioro parcial de vértices y aristas de las probetas moldeadas con el cemento puzolánico, sugiriendo una posible menor durabilidad, la cual se puede vincular con la mayor porosidad observada.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Sr. Alejandro Pittori, Técnico de Apoyo de la CICPBA, por la colaboración en la ejecución de los diferentes ensayos realizados, y al personal de las Áreas Tecnología del Hormigón y Durabilidad del LEMIT.

REFERENCIAS

- [1] Andrade C, "Vida útil das estruturas de concreto", II Simposio sobre a Durabilidade das estruturas de concreto, (2005).
- [2] CIRSOC 201-05, "Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón", Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Argentina.
- [3] Irassar EF, "Durabilidad del hormigón estructural", AATH, (2001), 306p.
- [4] Schultz FM, Arva EA, Duffó GS, "Studies concerning the reinforcement corrosion of concrete vaults for intermediate-level radioactive waste disposal", in: V. L'Hostis, R. Gens, C. Gallé (Eds.), Long Term Performance of Cementitious Barriers and Reinforced Concrete in Nuclear Power Plants and Waste Management, RILEM Publications SARL, Paris, (2009), 13-21.
- [5] Duffó GS, Arva EA, Schulz FM, Vázquez DR, "Durability of a reinforced concrete designed for the construction of an intermediate-level radioactive waste disposal facility", Journal of Nuclear Materials, Vol. 420, (2012), 382-387.

- [6] Collepardi S, Corinaldesi V, Moriconi G, Bonora G, Collepardi M, "Durability of high-performance concretes with pozzolanic and composite cements", Fifth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, SP 192-10, Barcelona, Spain, (2000), 159-172.
- [7] Molina Bas OI, "La influencia de las cenizas volantes como sustituto parcial del cemento Pórtland en la durabilidad del hormigón", Tesis Doctoral, universidad Politécnica de Madrid, (2008), 310p.
- [8] López M, Castro JT, "Efecto de las puzolanas naturales en la porosidad y conectividad de poros del hormigón con el tiempo", Revista Ingeniería de Construcción, Vol. 25, N°3, (2010), 419-431.
- [9] Alderete NM, Villagrán Zaccardi YA, Di Maio AA, "Propiedades de transporte de hormigones con adiciones minerales", Ciencia y Tecnología de los Materiales, LEMIT, N° 5, (2015), 33-43.
- [10] Villagrán Zaccardi YA, Taus VL, Di Maio AA, "Propiedades de transporte de hormigón con cemento puzolánico", Ciencia y Tecnología de los Materiales, LEMIT, N° 6, (2016), 29-40.
- [11] Rodríguez-Camacho RE, Uribe-Afif R, "Importance of using the natural pozzolans on concrete durability", Cement and Concrete Research, Vol. 32, (2002), 1851-1858.
- [12] Flores Medina N, Barluenga G, Hernández-Olivares F, "Enhancement of durability of concrete composites containing natural pozzolans blended cement through the use of Polypropylene fibers", Composites Part B: Engineering, Vol. 61, (2014), 214-221.
- [13] Juenger MCG, Snellings R, Bernal SA, "Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights", Cement and Concrete Research, Vol. 122, (2019), 257-273.
- [14] Hooton RD, "Improved sustainability through durability design", Proc. International Conference on Sustainable Structural Concrete", La Plata, Argentina, (2015), 25-34.
- [15] Miller SA, "Supplementary cementitious materials to mitigate greenhouse gas emissions from concrete: can there be too much of a good thing?", Journal of Cleaner Production, Vol. 178, (2018), 587-598.
- [16] NT BUILD 492 Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, Nordtest (1999), 8 p.
- [17] López M, Castro JT, "Efecto de las puzolanas naturales en la porosidad y conectividad de poros del hormigón con el tiempo", Revista Ingeniería de la Construcción, Vol. 25, N° 3, (2010), 419-431.
- [18] Alderete NM, Villagrán Zaccardi YA, Di Maio AA, "Propiedades de transporte de hormigones con adiciones minerales", Ciencia y Tecnología de los Materiales, LEMIT, N° 5, (2015), 33-43.
- [19] Neville A, "The confused world of sulfate attack on concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 34, (2004), 1275-1296.