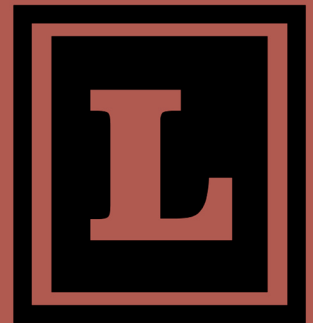


CIENCIA y de los TECNOLOGÍA MATERIALES

**LABORATORIO DE ENTRENAMIENTO
MULTIDISCIPLINARIO PARA LA
INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA**



CIENCIA Y de los TECNOLOGÍA MATERIALES

DIRECTOR Dr. Ing. ZEGA, Claudio J.

COMITE EDITOR

Dr. BIDEGAIN, Juan C.

Ing. DI MAIO, Ángel A.

Ing. GIACCIO, Graciela

Dr. Ing. GREGORUTTI, Ricardo

Ing. MARCOZZI, Rosana

Dr. Ing. MOREA, Francisco

Dra. Ing. TORRIJOS, María Celeste

Ing. TRAVERSA, Luis P.

Dra. ROSATO, Vilma G.

Dr. Ing. VILLAGRAN ZACCARDI, Yury A.

Arq. VITALONE, María Cristina

Dr. Ing. ZERBINO, Raúl L.

ÍNDICE

1.- Comportamiento de las rocas cuarcíticas de las sierras septentrionales (tandil) frente a la RAS. Petrografía, DRX y comparación con cuarcitas de otras regiones de Argentina. <i>G.S. Coelho dos Santos</i>	7
2.- Efectos del CO₂ ambiental sobre la carbonatación de hormigones elaborados con distintos cementos. <i>F.H. Iloro</i>	15
3.- Propiedades de transporte de hormigones con adiciones minerales. <i>N.M. Alderete, Y.A. Villagrán Zaccardi, Á.A. Di Maio</i>	33
4.- Atlas del hormigón arquitectónico. <i>A. López</i>	45
5.- Morteros elaborados con agregado fino reciclado con diferentes condiciones de humedad. <i>M.E. Sosa, C.J. Zega, Á.A. Di Maio</i>	61



Título:

Ciencia y Tecnología de los Materiales.

Editor responsable:

LEMIT - 52 e/121 y 122. 1900 - La Plata. Buenos Aires. Argentina.

Diseño y diagramación:

Prof. Sebastian Marquez

Cantidad de ejemplares: 500

Las opiniones expresadas en los artículos de esta Revista son responsabilidad exclusiva de los autores. Se permite la reproducción total o parcial de los trabajos, siempre que no se altere su sentido y se anexe los datos bibliográficos completos de la Revista, el artículo y los nombres de sus autores.

The views in the articles of this Journal are the sole responsibility of the authors. Reproducing all or part of the papers is allowed, provided its meaning is not changed and added the complete bibliographic data of the Journal, the article and authors names.

ASESORAMIENTO Y SERVICIO TECNOLÓGICO

El LEMIT brinda asesoramiento y servicio tecnológico al sector productivo, en el ámbito público y privado, sobre los siguientes temas:

Rocas

- Ensayos físico-mecánicos
- Análisis petrográficos y mineralógicos
- Evaluación de canteras y yacimientos
- Hormigones de Cemento Portland

Cemento Portland

- Agua para mezclado
- Agregados para morteros y hormigones
- Adiciones minerales
- Estudios de dosificación de hormigones tradicionales y especiales
- Aditivos para hormigón
- Durabilidad del hormigón
- Reacción álcali-sílice (RAS)

Estructuras de Hormigón

- Extracción de testigos
- Evaluación mediante Ensayos destructivos y no destructivos
- Corrosión de armaduras
- Patologías de estructuras

Patrimonio Construido

- Estudios integrales
- Técnicas de reparación y conservación

Materiales de Construcción

- Cales hidráulicas y aéreas
- Yesos e hidrófugos
- Ladrillos
- Baldosas y losetas aglomeradas con cemento
- Azulejos y revestimientos
- Bloques huecos de morteros
- Bloques de hormigón para pavimentos
- Paneles

Fundiciones

- Estudios metalográficos
- Fundición de piezas

Suelos

- Clasificación de suelos
- Análisis granulométricos
- Ensayos de compactación
- Determinación de densidad “in-situ”
- Suelo-cal
- Suelo-cemento
- Estabilizado granulométrico
- Valor soporte

Materiales Bituminosos

- Betunes asfálticos
- Emulsiones bituminosas
- Selladores para juntas
- Membranas asfálticas
- Clasificación de asfaltos por grado de performance (PG de SHRP)

Mezclas Bituminosas para Pavimentos

- Agregados para mezclas bituminosas
- Proyectos de mezclas y tratamientos bituminosos
- Diseño de mezclas según SUPERPAVE (SHRP)
- Ensayos de ahuellamiento (WTT)
- Ensayo de Hamburgo (HWTT)

Ensayos Físico-Mecánicos

- Metales ferrosos y no ferrosos
- Maderas
- Plásticos
- Tubos y accesorios para agua y cloacas
- Barras para hormigón
- Cables para hormigón pretensado
- Elementos de seguridad
- Caños y conexiones de mortero y hormigón

EDITORIAL

La revista *Ciencia y Tecnología de los Materiales* tiene como propósito favorecer la divulgación e intercambio con el medio científico y productivo de los estudios sobre distintos materiales que se desarrollan en el LEMIT. El lector podrá encontrar artículos que muestran los resultados obtenidos en diferentes líneas de investigación, o que surgen ante la necesidad de dar solución a problemáticas de aplicación específica.

Esta edición de *Ciencia y Tecnología de los Materiales* incluye otros cinco trabajos que también fueron presentados en la jornada de difusión “Investigaciones sobre Geología, Construcción, Arquitectura y Tecnología del Hormigón”, realizada en el LEMIT en septiembre de 2014. En este caso también los trabajos incluidos forman parte de estudios desarrollados por becarios doctorales y post-doctorales como parte de su trabajo de tesis, los cuales guardan relación con las diferentes líneas de investigación que actualmente se encuentran en desarrollo en el LEMIT.

En este número de la revista se presentan otros cinco artículos, los cuales hacen referencia a temáticas tales como Geología, Arquitectura y Tecnología del Hormigón. En el primer trabajo se presenta un estudio sobre la petrografía de rocas cuarcíticas provenientes de diferentes sectores del país, realizando una extrapolación con su posible comportamiento frente a la reacción álcali-sílice (RAS) al emplearlas en la elaboración de hormigones. En segundo lugar se puede encontrar un estudio sobre las diferentes variables que pueden modificar el aspecto final del hormigón arquitectónico, siendo necesario en este último caso lograr una sistematización de las características exigibles al mismo (textura, color, resistencia, durabilidad) a fin de facilitar su utilización. Con respecto a las investigaciones relacionadas con la tecnología del hormigón, se presentan estudios vinculados a la durabilidad de las estructuras de hormigón armado tales como el efecto del dióxido de carbono ambiental en la carbonatación de hormigones elaborados con distintos cementos (tercer trabajo) y la evaluación de diferentes propiedades de transporte en hormigones con adiciones minerales (cuarto trabajo), realizándose en este último caso una correlación entre los parámetros medidos en cada una de ellas. En el quinto trabajo se presentan los resultados de estudios llevados a cabo sobre el comportamiento en estado fresco y de algunas propiedades en estado endurecido de morteros elaborados con agregado fino reciclado, como sustituto del agregado fino natural de trituración.

La Plata, Agosto de 2015.-

COMPORTAMIENTO DE LAS ROCAS CUARCÍTICAS DE LAS SIERRAS SEPTENTRIONALES (TANDIL) FRENTE A LA RAS

BEHAVIOR OF QUARTZITE ROCKS OF THE NORTHERN MOUNTAIN RANGE (TANDIL) REGARDING THE ALKALI-SILICA REACTION IN CONCRETE

G.S. Coelho dos Santos¹

1.- Profesional de Apoyo CIC-LEMIT. gabys_geo17@yahoo.com.ar

RESUMEN

Uno de los temas más investigados vinculado a la durabilidad de las estructuras de hormigón es la reacción álcali-sílice (RAS), ya que esta reacción se produce dentro del hormigón y provoca fallas estructurales de gran importancia. Para que se produzca necesitamos un agregado potencialmente reactivo (que tenga algún tipo de sílice), álcalis (cemento portland) y humedad, además de otros factores como la temperatura y el tiempo.

La reacción origina como producto un gel silico-alcálico expansivo que genera fisuras y deterioro de las estructuras de hormigón. Otros factores que controlan la RAS son el porcentaje y el tamaño de partícula de agregado reactivo, que puede provocar un efecto de “pessimum” produciendo valores de máxima expansión en morteros u hormigones. Además el tamaño de grano de los componentes líticos, sobre todo en rodados y agregados de trituración, así como también la estabilidad estructural y la deformación de las partículas constituyen un rol fundamental en la velocidad en la que la reacción se desarrolla.

Las ortocuarzitas de la provincia de Buenos Aires, sobre todo las de la región de Tandilia son calificadas en estudios previos como de reacción lenta. En este trabajo se presentan estudios petrográficos preliminares de las variedades texturales de las cuarcitas de esta región y se las compara con rocas de similar origen de otras regiones de Argentina (Sierra de la Ventana y de Chaco). Esto permite establecer el diferente comportamiento de las rocas frente a la reacción álcali-sílice (RAS).

Palabras clave: *cuarcitas, petrografía, hormigón, reacción álcali-sílice (RAS).*

ABSTRACT

One of the most researched topics linked to the durability of concrete structures is the alkali-silica reaction (ASR), since this reaction – produced in the concrete because of the presence of a potentially

reactive aggregate, alkali (present in Portland cement) and humidity – causes structural failures of great importance when it is not controlled.

The reaction produces a silico-alkaline expansive gel generating cracks and deterioration of the concrete structures. Other factors controlling the ASR are the percentage and the particle size of reactive aggregate, which can generate an effect of “pessimum” on mortar and concrete studied.

The orthoquartzites in Buenos Aires (Tandilia area) were qualified in previous studies as slow reaction. In this preliminary paper, petrographic studies of the textural varieties of quartzites from this region are presented and compared with rocks of similar origin to other regions of Argentina (Sierra de la Ventana and Chaco). This allows to show the different behavior respect to the alkali-silica reaction (ASR) in the concrete.

Keywords: *quartzites, petrography, concrete, alkali-silica reaction (ASR).*

INTRODUCCIÓN

En nuestro país existen una gran variedad de rocas de posible uso en la construcción de obras civiles de diferente origen, ígneas (plutónicas y volcánicas), metamórficas y sedimentarias. Pueden utilizarse mediante procesos previos de trituración como es el caso de las rocas cristalinas, o directamente de depósitos o yacimientos de arena o rodados.

8 La composición mineralógica de algunos agregados que se utilizan en hormigón, bajo ciertas circunstancias, pueden producir reacciones deletéreas de diverso origen, por contener sulfatos, sulfuros, diversos óxidos, sílice metaestable, arcillas, etc.

En particular, la reacción álcali agregado, más específicamente la reacción álcali-sílice o RAS, es una reacción que para que se produzca es necesario que se presenten simultáneamente un agregado reactivo conteniendo sílice metaestable, álcali contenido en el fluido de poros del hormigón y elevada humedad, (además de una temperatura y tiempo adecuados). Antes de 1940 los agregados eran considerados químicamente inertes. Stanton (1940) [1] da a conocer el resultado de estudios realizados durante la década del 1930, poniendo en evidencia la existencia de agregados que bajo ciertas condiciones de humedad y temperatura reaccionan con los álcalis del hormigón, a la que denominó reacción álcali-agregado.

La agregados potencialmente reactivos que participan en la RAS son aquellos que contienen sílice metaestable o que están conformados enteramente por ella: vidrio volcánico y ópalo considerados como amorfos o carentes de una estructura cristalina ordenada, tridimita y cristobalita que son variedades de sílice criptocristalinas, calcedonia principalmente de hábito fibroso y cuarzo con deformación o tensionado.

La reacción entre la sílice metaestable y los iones hidroxilos en presencia de álcalis y calcio, provoca una transformación de la sílice en un “gel” de sílice y álcali, el cual produce una fuerza expansiva por aumento de volumen por la imbibición de agua de los poros que rodean al gel. Esta expansión puede provocar la fisuración y el deterioro de las estructuras de hormigón. Tomando en cuenta la velocidad de esta reacción química, los agregados se califican como de reacción rápida (contiene sílice amorfa o microcristalina) y de reacción lenta (contiene básicamente cuarzo con defectos estructurales y con signos de deformación o recristalización).

Las rocas sedimentarias, principalmente las arenitas con alto grado de compactación, o las areniscas muy bien cementadas son de uso habitual en el hormigón. La compactación por unión de los granos de arena como consecuencia de la diagénesis

producida en profundidad puede traer aparejada la formación de minerales nuevos en la roca, ya sea de la misma o de diferente composición, entre ellos, cuarzo secundario, sílice microcristalina, minerales laminares, etc. La presencia de material más fino que tamaño arena, puede llevar a rellenar los espacios intergranulares o formar una matriz de grano fino que rodea a los clastos arenosos o incluso a cementar los granos por aumento de la presión intracristalina. Fluidos circulantes entre los poros y fisuras de las rocas pueden precipitar formando también un material cementante que le confiera mayor coherencia a la roca, uniendo más fuertemente las partículas que la conforman. Este material puede estar compuesto por óxidos e hidróxidos de Fe, calcita, yeso, o sílice como el ópalo y la calcedonia, como los más comunes.

Las areniscas que están compuestas casi únicamente por cuarzo se denominan arenitas cuarzosas o cuarcitas, que a pesar de ser composicionalmente homogéneas, los clastos que las conforman pueden ser de diverso origen y presentar diferente tamaño, forma y grado de deformación previos. Además, el material cementante de las partículas no es siempre el mismo en todas las rocas y esto hace que la respuesta de estas rocas al ser usadas en el hormigón sea muy distinta.

Las rocas cuarcíticas aquí tratadas son de regiones distintas de Argentina (Figura I-a) con el fin de poder hacer una comparación de materiales considerados similares. En el área de las Sierras Septentrionales, se hallan rocas sedimentarias de diferentes edades geológicas. Más puntualmente en zonas próximas al sector atlántico se explotan canteras de rocas cuarcíticas de amplio uso en la construcción (Figura I-b). Estas son conocidas como cuarcita Mar del Plata, y desde el punto de vista geológico, esta unidad sedimentaria es denominada Formación Balcarce [2] de edad Paleozoica Inferior, en el rango Ordovícico-Silúrico [3, 4]. Esta roca utilizada como árido para hormigón son calificados petrográficamente como de reacción lenta [5].

También en el marco de la Provincia de Buenos Aires, Sierra de la Ventana, en la localidad de Pigüé (Figura I-a) se extraen rocas metacuarcíticas de similar edad que las rocas de Formación Balcarce, que corresponderían a la Formación Napostá, cuya edad llegaría hasta el Silúrico [6]. Estas son rocas originalmente cuarcíticas pero poseen un alto grado de deformación, y son calificadas por los ensayos como agregados de reacción rápida [7].

En el departamento de 9 de Julio, Provincia del Chaco, se extraen areniscas cuarcíticas silicificadas de la Formación Las Piedritas, única unidad rocosa identificada en superficie (Figura I-a). Existen diversas interpretaciones respecto a su origen, de posible correlación con areniscas fluviales pliocenas de la Formación Ituzaingó, y otra con la Formación Tacuarembó (Jurásico-Cretácico). Sin embargo, la edad y significado geológico son aún inciertos [8]. Pavlicevic [9] describe los afloramientos del frente de la cantera Las Piedritas, constituido por tres niveles de ortocuarcitas que completan 10 m de potencia, encontrando de base a techo: ortocuarcitas blanco-rosado, ortocuarcitas rosadas con cemento calcáreo y ortocuarcitas rojizas muy compactas con cemento silíceo. Este último nivel corresponde al material utilizado para la construcción de caminos, y ha sido intensamente estudiado desde el punto de vista de la reacción álcali-sílice y calificado desde el punto de vista petrográfico como de reacción rápida [9, 10].

En base a diferencias petrográficas podemos comparar, haciendo hincapié en la reacción álcali-agregado, a estas tres cuarcitas con características petrográficas diferenciables, de composición similar pero diferente grado de compactación, deformación del cuarzo y textura interna.

EXPERIENCIAS

Se realizaron estudios petrográficos sobre muestras de cuarcita de Mar del Plata, explotada en el área de Batán, una metacuarcita de la localidad de Pigüé y una muestra de arenisca del Chaco (Figura I) siguiendo las pautas desarrolladas en la norma

IRAM 1649 [11]. Bajo este procedimiento se determinó la presencia de cuarzo con extinción ondulante, de cuarzo policristalino, microcristalino, con migración de borde de grano, etc., es decir, clastos de cuarzo con algún tipo de deformación que pueda desencadenar local o puntualmente la reacción álcali-sílice. Según la norma IRAM 1531 [12], este tipo de sílice en su conjunto no debe exceder el 5%.

Se utilizó lupa binocular (Olympus (SZ 61) y microscopio óptico de polarización (Olympus BH2-UMA) para la petrografía de agregados y de hormigón. Difractometría de rayos X (DRX) para analizar e identificar las arcillas. La comparación petrográfica de la ortocuarcita de Mar del Plata (Fm. Balcarce) se realiza con la cuarcita de Pigüé y con la arenisca del Chaco, calificadas en trabajos previos como agregados potencialmente reactivos de reacción rápida [7, 9].

RESULTADOS

10

Petrografía de las muestras:

Las muestras de las canteras de la localidad de Batán pertenecen a ortocuarcitas compuestas por más de 95% de cuarzo, aunque también se hallan vaques y arcillitas en menor proporción (Figura 2). Mineralógicamente también se identificó muscovita (Figura 2c y 3a), minerales accesorios (turmalina, circón, apatita, rutilo) y minerales opacos. En algunos sectores se observa, en los espacios intergranulares, arcilla caolínica, aunque puede observarse láminas de illita de hasta 1mm de largo. La presencia de caolinita e Illita se confirma con el análisis mediante DRX (Figura 4) del material arcilloso que se halla en los frentes de cantera y que intercala con los gruesos bancos de cuarcita. Es frecuente observar la presencia de óxidos e hidróxidos de hierro que pueden observarse como pátinas o en algunos casos actúa como material cementante de los granos de cuarzo (Figura 2h).

Una característica particular de estas rocas es la variación en la textura (interna) y en el tamaño de grano. Las rocas pasan de ser sabulitas (granos entre 2mm y 4mm), arenitas sabulíticas a arenitas

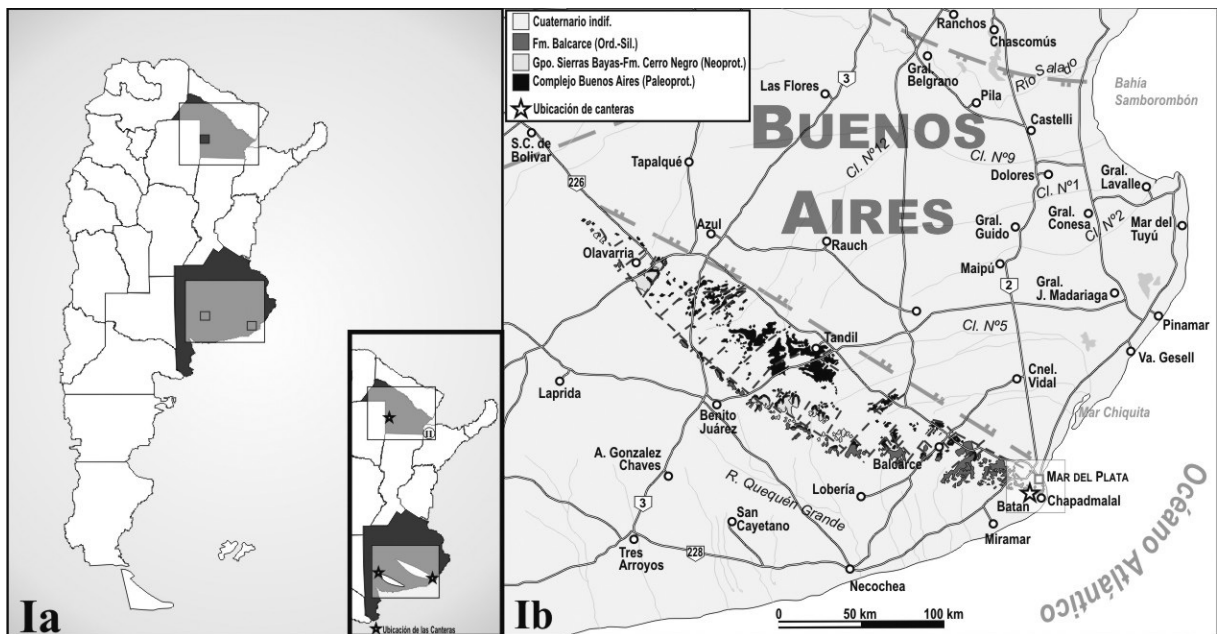


Figura 1. Ia. Ubicación de las canteras de rocas cuarcíticas estudiadas en mapa de Argentina y en detalle de la zona nororiental del país; Ib. Mapa geológico general de las Sierras septentrionales en el marco oriental bonaerense.

de grano grueso, medio o fino, con o sin arcilla en los intersticios. Presentan en algunos casos estructura muy compacta, cerrada, con bordes difusos, aserrados, hasta netos y con crecimiento secundario de sílice hacia los bordes de los granos. Los clastos de cuarzo se caracterizan por ser angulosos a subangulosos, presentan extinción normal, otros con extinción ondulante de ángulo variable (AEO hasta $\approx 23^\circ$); otros granos son policristalinos. El cemento de la roca puede ser silíceo, micáceo y/o ferruginoso. En la Figura 2 se muestran imágenes de cortes delgados de muestras tomadas en diferentes canteras de la localidad de Batán, en donde se puede apreciar las variaciones en el tamaño de grano, contacto entre granos, tipo de cemento natural de la roca, morfología y deformación de los clastos de cuarzo, presencia o ausencia de muscovita y arcillas, etc. Todas estas variaciones, hacen notar que las rocas pertenecientes a la Formación Balcarce (piedra Mar del Plata) son heterogéneas desde el punto de vista de su textura interna y que esto puede influir en su comportamiento frente a la reacción álcali-agregado.

Las muestras de la Formación Las Piedritas, denominada como arenisca del Chaco, corresponden a areniscas rojizas, compactas, con cemento silíceo, sin estructura sedimentaria evidente y con venas blanquecinas. Al microscopio se observan clastos redondeados a subredondeados de cuarzo, límpidos y en forma subordinada granos de cuarzo policristalino, calcedonia, feldespato, muscovita, minerales opacos y fragmentos líticos volcánicos. El cemento de la roca es ópalo y calcedonia (Figura 3c y d). Es común la presencia de rebordes rojizos-oscuros en los granos minerales, vinculados a pátinas ferruginosas (Figura 3d).

La cuarcita de Pigüé que se extrae en la localidad del mismo nombre, perteneciente al sistema de sierras de Australes, es una metacuarcita, compuesta por más de un 90% de sílice, presenta una textura granoblástica y estructura cataclástica (Figura 3e y f). Los granos de cuarzo, originalmente sedimentarios de la cuarcita están altamente

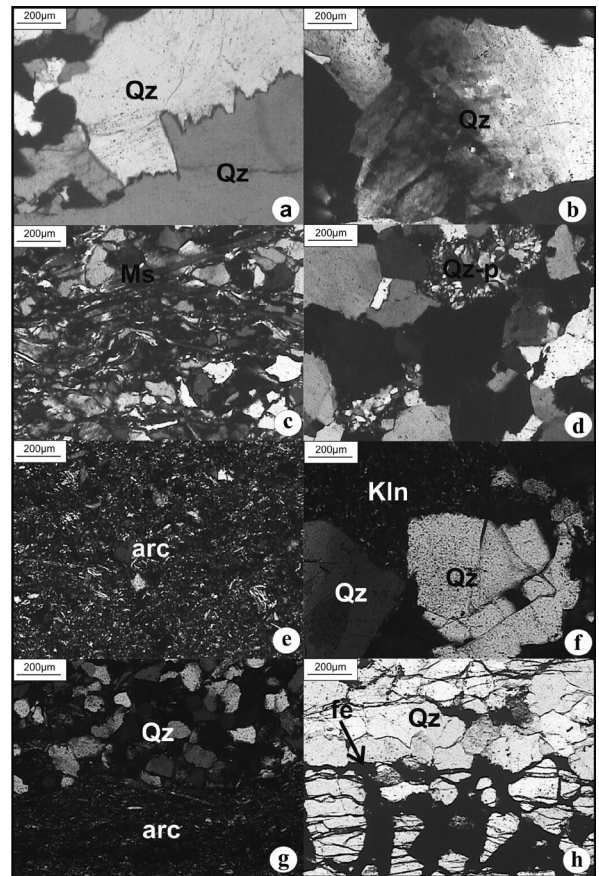


Figura 2. I (a) y (b) cuarcita de grano grueso, granos de cuarzo (Qz) anguloso, con contactos suturados. En (a) la extinción del cuarzo es normal y en (b) es ondulante. (c) Vaque cuarzo-micáceo de grano fino; láminas pequeñas de muscovita (MS). (d) Cuarcita de grano medio; se destaca un clasto subredondeado de cuarzo policristalino (Qz-p). (e) Arcillita (arc) caolinitica-illítica; se aprecian granos de cuarzo muy finos. (f) cuarcita de tamaño medio a grueso caolinita (Kln) intergranular. (g) cuarcita fina que intercala con material arcilloso. (h) cuarcita microfracturada e invidada por óxidos e hidróxidos de hierro (fe). (a-g) con polarizadores cruzados y (h) con luz paralela.

deformados, elongados, con bordes recrystalizados de grano muy fino o microcristalino, además de sílice amorfa generada por la intensa deformación sufrida por la roca [7].

Difractometría de rayos X: Los estudios realizados mediante difractometría de rayos X, efectuados para complementar los estudios petrográficos confirmaron al presenciad de Caolinita (Kln)

e Illita (Illt), esta última subordinada. El pico de mayor intensidad corresponde a cuarzo (Qz). La Figura 4 corresponde a un difractograma de una muestra de material arcilloso hallado en un acopio de un frente de cantera actualmente en explotación. No se halla material amorfo que pueda provocar el desarrollo de la reacción.

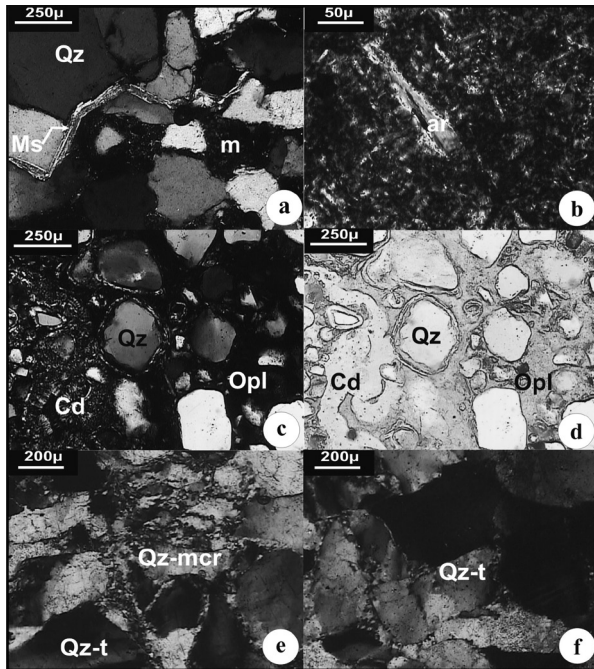


Figura 3. (a y b) agregado de Mar del Plata (Batán) vistas bajo polarizadores; (a) cuarcita constituida por cuarzo (Qz) algunas láminas elongadas de muscovita (Ms) y escasa matriz (m) de arcilla en los espacios intergranulares, (b) arcillita (ar). (c y d) Arenisca del Chaco con polarizadores cruzados y con luz paralela respectivamente; el cuarzo (Qz) es redondeado y posee abundante cemento de ópalo (Opl) y calcedonia (Cd). (e y f) metacarcita de Pigüé, con polarizadores cruzados, donde se observa cuarzo microcristalino (Qz-mcr) y altamente tensionado (Qz-t).

CONCLUSIONES

- A pesar de que las rocas son todas de origen sedimentario, las condiciones ambientales de su formación y los procesos posteriores como es el enterramiento, diagénesis, circulación de fluidos cargados de sílice, hierro, etc., deformación y metamorfismo, entre otros, hace que existan

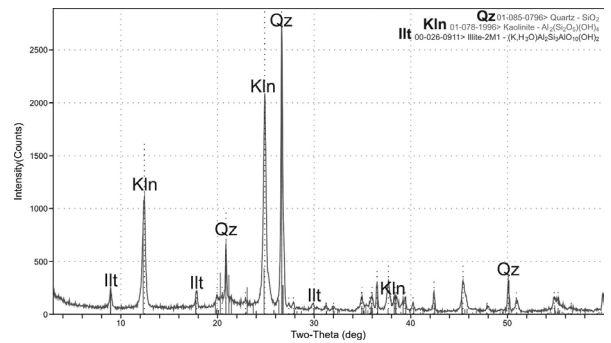


Figura 4. Difractograma del material pelítico-arcilloso muestreado en frente de cantera en explotación. Cuarzo (Qz), caolinita (Kln), illita (Illt).

diferencias de composición y en sus texturas internas (tamaño granulométrico, relación geométrica entre los clastos constituyentes, forma, angulosidad de las partículas, porosidad) y superficial.

- Petrográficamente, la arenisca de Chaco que contiene ópalo-calconia como cemento natural de la roca y la metacarcita de Pigüé que posee cuarzo altamente deformado y microcristalino en alto porcentaje, son calificados como agregados de reacción rápida, mientras que la cuarcita de Mar del Plata, a pesar de su heterogeneidad textural, presenta bajo porcentaje de cuarzo microcristalino y de cuarzo con extinción ondulante (cuarzo tensionado) por lo que se califica a este agregado como de reacción lenta o diferida.

- Por difracción de rayos X se determinó la presencia de cuarzo, caolinita e Illita, en ese orden, no identificándose material amorfo, deletéreo o reactivo en los materiales más finos de las canteras en explotación.

REFERENCIAS

- 1.- Stanton, T.E. 1940. Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. Proc. American Society of Civil Engineers 66: 1781-1811, Reston.
- 2.- Dalla Salda, L., Spalletti, L., Poiré, D., De Barrio, R., Echeveste, H. y Benialgo, A. 2006. Tandilia. Temas de la Geología Argentina I, INSUGEO, Serie Correlación Geológica 21: 17-46. Tucumán.
- 3.- Zimmermann, U. y Spalletti, L.A. 2009. Provenance of the Lower Paleozoic Balcarce Formation-Tandilia System, Buenos Aires Province, Argentina- Implications for paleogeographic reconstructions of SW Gondwana. *Sedimentary Geology* 219: 7-23.
- 4.- Cingolani C. "The Tandilia system of Argentina as a southern extension of the Río de la Plata craton: An overview *International Journal of Earth Sciences*". Volumen 100. Numbers 2-3, (2011), 221-242.
- 5.- Coelho dos Santos, G.S., Falcone, D.D., Marfil S.A. Maiza, P. Estudio de la reactividad alcalina potencial de rocas cuarcíticas de la Formación Balcarce. Relación entre los resultados de los ensayos físicos y los estudios petrográficos. XIX Congreso Geológico Argentino, Junio 2014. 2 p. Córdoba.
- 6.- Uriz N.J., Cingolani C.A. y Marques J.Ch. 2012. Procedencia sedimentaria del Paleozoico Inferior-Medio del Grupo Ventana y de la Formación Sierra Grande, Argentina. Nuevas edades U-Pb (LA-ICP-MS) en circones detríticos. 13a Reunión Argentina de Sedimentología: 215-216, Salta.
- 7.- Cortelezzi, C.R., Maiza, P.J. y Pavlicevic, R., 1990. Strained quartz in relation to alkali-silica reaction. En Erlin/Stark (ed.) *Petrography applied to concrete and concrete aggregates*, ASTM STP 1061. American Society for Testing and Materials: 145-158, Philadelphia.
- 8.- Peri VG, Rossello EA. 2010. Anomalías morfoestructurales del drenaje del Río Salado sobre las Lomadas de Otumpa (Santiago del Estero y Chaco) detectadas por procesamiento digital. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 66 (4): 634 – 645.
- 9.- Batic OR, Cortelezzi CR, Pavlicevic, R., Traversa LP. 1995. Caracterización Tecnológica de las Areniscas Cementadas con Calcedonia y Opalo del Noroeste de la Provincia del Chaco, República Argentina. *Memorias XII Reunión Técnica de la AATH*, 191-197.
- 10.- Coelho dos Santos, G.S. y Falcone, D.D. 2012. Reacción álcali-agregado en areniscas cuarzosas de la Formación Las Piedritas (Chaco) y cuarcitas de la Formación Balcarce (Buenos Aires), utilizadas como agregados para hormigón. 13a Reunión Argentina de Sedimentología: 53-54, Salta.
- 11.- IRAM 1649. "Examen petrográfico de agregados para hormigón" IRAM, (2008) ,15 p.
- 12.- IRAM 1531. "Agregado grueso para hormigón de cemento", IRAM, (2012), 27 p.

EFFECTOS DEL CO₂ AMBIENTAL SOBRE LA CARBONATACIÓN DE HORMIGONES ELABORADOS CON DISTINTOS CEMENTOS

EFFECTS OF ENVIRONMENTAL CO₂ ON THE CARBONATION OF CONCRETES MADE WITH DIFFERENT CEMENTS

F.H. Iloro¹

1.- Profesional Adjunto CIC-LEMIT. patrimonio@lemit.gov.ar

15

RESUMEN

La carbonatación natural es una reacción originada cuando el CO₂ presente en la atmósfera entra en contacto con el hormigón a través de su red de poros interconectados con el exterior y reacciona con los productos hidratados, particularmente con los compuestos alcalinos. La velocidad del proceso depende del medio de emplazamiento (HR, concentración de CO₂, etc.) y de las características del hormigón (porosidad, relación a/mc, curado, contenido y tipo de cemento, estado de saturación, etc.).

La lentitud del proceso de carbonatación natural ha conllevado a la implementación de ensayos acelerados de carbonatación, en los cuales se varían las condiciones ambientales, particularmente la concentración de CO₂, que se incrementa considerablemente.

El objetivo de las experiencias programadas es promover el ensayo de carbonatación acelerada como ensayo prescriptivo para el hormigón a semejanza del ensayo de succión capilar o el de penetración de agua. Se han confeccionado distintos hormigones y morteros variando la relación agua/material cementante, el contenido y tipo de cemento, el tipo de agregado grueso (granítico, cuarcítico y canto rodado). Se infieren algunas conclusiones surgidas del análisis de la bibliografía y de experiencias realizadas sobre estructuras en servicio (carbonatación natural) y con una cámara de carbonatación acelerada.

Palabras clave: Carbonatación, cementos, hormigón, metodo acelerado de carbonatación.

ABSTRACT

The natural carbonation reaction is caused when the CO₂ in the atmosphere comes into contact with the concrete through its network of interconnected pores to the outside and reacts with hydrated

products particularly with alkaline compounds. Process speed depends on the location means (HR, CO₂ concentration, etc.) and the characteristics of concrete (porosity (ratio / cm, curing) cement content and type, state of saturation, etc.).

The slow process of natural carbonation has led to the implementation of accelerated carbonation tests, these tests are varied environmental conditions, particularly the concentration of CO₂, which increases considerably.

The objective is to promote experiences scheduled testing as prescriptive accelerated carbonation test for concrete likeness trial capillary suction or water penetration. We have made various concretes and mortars varying the water/cementitious material, content and type of cement, coarse aggregate types (granite, quartzite and boulders) relationship. Some conclusions arising from the analysis of the literature and experiences on service structures (natural carbonation) and accelerated carbonation chamber are inferred.

Keywords: Carbonation, cements, concrete, accelerated carbonation test.

INTRODUCCION

La carbonatación es el principal proceso de la reducción de la vida útil del hormigón en atmosferas urbanas, rurales o mixtas, libres de otros agentes agresivos como el ion cloruro. El hormigón endurecido posee una alta alcalinidad (pH entre 12.5-14) que mantiene la capa pasiva existente en la superficie del acero. El ingreso y reacción del CO₂ atmosférico en presencia de humedad hace disminuir el pH del hormigón de recubrimiento hasta alcanzar valores por debajo de 9 [1], rompiéndose así químicamente la capa pasiva, dejando a las armaduras expuestas a ser corroídas si la humedad y la disponibilidad de oxígeno son adecuadas [2][3].

La reacción del CO₂ se produce con los productos hidratados alcalinos del hormigón principalmente con el hidróxido de calcio (Ca(OH)₂) y con el silicato de calcio hidratado (CSH). El Ca(OH)₂ formado durante la hidratación del cemento Portland, disuelto en la red de poros capilares del hormigón, conjuntamente con otros álcalis del cemento (sodio y potasio). El CO₂ gaseoso presente en el aire, ingresa por difusión a la masa del hormigón a través de los poros interconectados con el exterior, transformando al Ca(OH)₂ y al CSH en carbonato de calcio (CaCO₃) según la Ec. 1.1 y 1. 2. (Figura 1)



Para analizar el proceso de carbonatación se realizan pruebas bajo condiciones ambientales naturales (pruebas naturales), las cuales pueden ser ejecutadas en laboratorio o en estructuras en servicio y también bajo condiciones aceleradas (ensayos acelerados que permiten variar y controlar las condiciones ambientales (HR, T) pero principalmente la concentración de CO₂, la cual es incrementada considerablemente respecto a la concentración natural a fin de acelerar el proceso de carbonatación. La comparación de los resultados acelerados con los de la exposición natural permite establecer modelos matemáticos o estadísticos predictivos del proceso de carbonatación.

La velocidad del proceso de carbonatación depende de varios factores directamente relacionados con las características agresivas del medio en contacto con la estructura (humedad relativa, precipitaciones, concentración de CO₂) y con el espesor y calidad del hormigón de recubrimiento, en particular con el tamaño y volumen de los poros capilares y de los macroporos (poros de

compactación y/o aire ocluido) interconectados con el exterior, que son los que cobran importancia en todos los mecanismos de transporte que inciden en la durabilidad.

CARBONATACIÓN NATURAL

En cuanto a las pruebas naturales de carbonatación en laboratorio o sobre estructuras en servicio para evaluar el comportamiento del hormigón, en forma general puede plantearse que las más empleadas están en función de variar el medio de exposición y las características (a/mc, cemento, curado, etc.) de los hormigones y morteros.

Las pruebas en laboratorio se realizan en ambientes internos y externos, estos últimos protegidos y no protegidos de la lluvia y el sol. Se evalúa, entonces, la velocidad de carbonatación debida a la diferencia de la concentración de CO₂ entre

el ambiente interno y externo mientras que en el externo se analiza principalmente la influencia de ciclos de mojado y secado debido al contacto con el agua de lluvia y por el soleamiento, que varían el estado de saturación de la solución de poros.

Las experiencias coinciden en que las condiciones de exposición del ambiente exterior hacen variar la velocidad del proceso de carbonatación de hormigones de iguales características, siendo menor la profundidad de carbonatación en el ambiente exterior en contacto con agua de lluvia. Las velocidades en ambientes internos resultan mayores debido a la elevada concentración del CO₂ (~ 600ppm). El EHE [4] por ejemplo propone un modelo de cálculo de durabilidad por carbonatación que incluye constantes que tienen en cuenta si el ambiente se encuentra protegido o no de la lluvia.

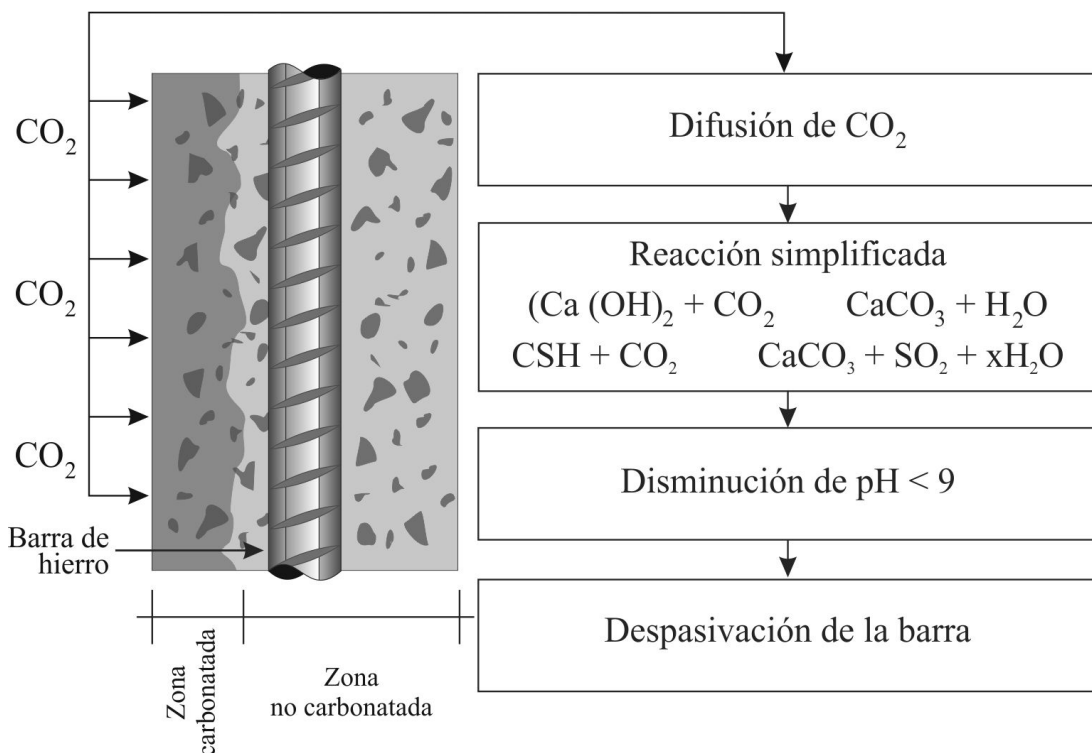


Figura 1. Esquema del proceso de carbonatación.

Las pruebas naturales también se efectúan en estructuras en servicio; consisten generalmente en la extracción de muestras o testigos y mediante el rociado con un indicador de pH (solución de fenoltaleína al 1% en volumen de alcohol etílico) se determina la profundidad que corresponde a la zona incolora ($\text{pH} < 9$). Cuando la cantidad de muestra lo permite en laboratorio se caracteriza al hormigón mediante ensayos físicos y químicos. Complementariamente, se pueden realizar pruebas en elementos protegidos y no protegidos y compararlos con los obtenidos en laboratorio. La complejidad de la evaluación en estructuras en servicio surge cuando no existe información acerca de las características del hormigón y por la heterogeneidad que puede presentar en función de la tecnología empleada para su elaboración, colocación y curado.

Puede plantearse, entonces, que en las pruebas naturales en laboratorio o sobre estructuras en servicio existen variables que pueden modificar la velocidad del proceso de carbonatación atribuibles a:

- Condiciones ambientales del emplazamiento particularmente la concentración de CO_2 y la HR [5] [6];
- HR del hormigón, condiciones de exposición ambiente interior o exterior protegido y no protegido de lluvias;
- Propiedades del hormigón como la porosidad (relación a/mc, compactación y el tiempo y tipo curado), el tipo y contenido unitario de cemento, [7][8].

Ambiente de emplazamiento

El Reglamento Argentino CIRSOC 201-2005, en vigencia desde el 2013 [9] clasifica a los ambientes o atmósferas de emplazamiento de una estructura hormigón armado de acuerdo al tipo de exposición que pueden producir degradación por corrosión de las armaduras. Relacionado lo especificado por el CIRSOC para los ambientes exteriores de emplazamiento con las zonas de precipitaciones anuales, puede plantearse, entonces, que la mayoría

de las atmósferas de Argentina corresponden a la clase A2 y A3 (Corrosión por carbonatación), a excepción de aquellas que se ubican en la zona de la costa atlántica que corresponden a Ambiente M1, M2 y M3 (corrosión por cloruros en ambiente marino) o CL (corrosión por cloruros en ambiente distinto al marino). En la Figura 2 se presentan los ambientes de exposición según el CIRSOC 201, destacándose además, el ambiente marino (M1, M2 y M3) correspondiente a la costa atlántica, en el cual también puede, originarse, además de la corrosión por cloruros, la carbonatación del hormigón.

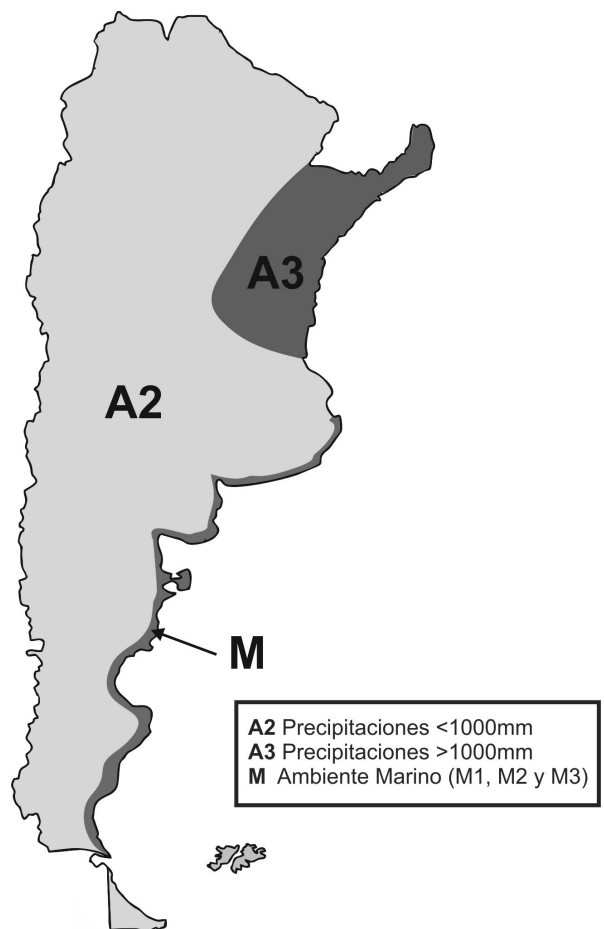


Figura 2. Clase de ambiente de exposición CIRSOC201/05.

La atmosfera en áreas rurales y urbanas se encuentra prácticamente libre de contaminantes agresivos, pudiendo presentar un aumento significativo

del contenido de CO₂, óxidos de azufre (SO_x) y de nitrógeno (NO_x). El CO₂ es originado especialmente en la combustión del parque automotor y la industria, y en casos particulares por la naturaleza (erupción de volcanes, plantas, deshielo, etc.).

Concentración de CO₂ atmosférico

La concentración de CO₂ en la atmósfera a nivel mundial se fue incrementando, estudios efectuados desde antes del año 1750, cuando comenzaron a desarrollarse las primeras maquinas a vapor han demostrado que, la concentración de CO₂ era de 280 ppm mientras que a principios del siglo XXI es de 375 ppm. En las últimas décadas, el incremento anual promedio de la concentración de CO₂ en el aire ha sido de 1,5 ppm por año, Figura 3. Según el National Oceanic & Atmospheric Administration de Estados Unidos (NOAA) en el mes de agosto del 2008 la concentración de dióxido de carbono alcanzó las 384,14 ppm mientras que en agosto de 2007 que se encontraba en 381,85 ppm, esto significa un crecimiento en la concentración interanual de 2,29 ppm. Por su parte el Observatorio de Mauna Loa [10], en últimos registros del monitoreo del CO₂ atmosférico informa que en el 2013 se ha alcanzado las 400 ppm. En la Figura 4 se informan las concentraciones de CO₂ medidas por distintos autores en ambiente rural y urbano [11], observándose un incremento significativo en el ambiente urbano.

En las atmósferas urbanas, existe una sub-

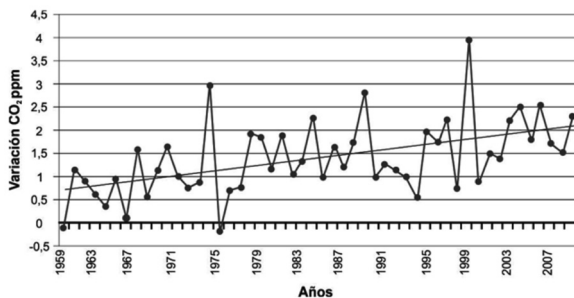


Figura 3. Variación del CO₂ durante los meses de agosto de 1959 y 2008.

atmósfera que cobra importancia y corresponde a los ambientes bajo techo o interiores como túneles viales, playas de estacionamiento vehicular, etc., que por lo general es considerada como relativamente suave, pero puede resultar bastante severa, ya que por ejemplo las concentraciones de CO₂ en túneles varía de 300 a 1000 ppm [11].

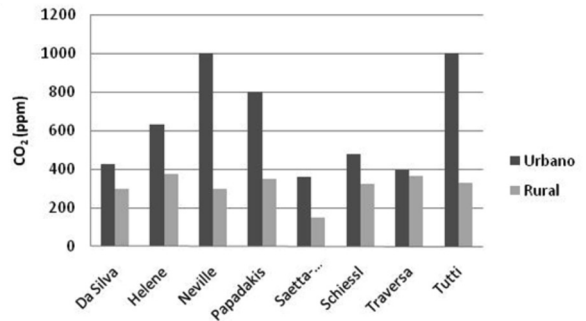


Figura 4. Concentraciones de CO₂ en ambiente urbano y rural, adaptado Possan 2010 [11].

Humedad relativa

De los factores climáticos del ambiente de emplazamiento, la humedad relativa (HR) es el más significativo; la velocidad de carbonatación es más lenta cuando la red porosa del hormigón se encuentra semiseca (HR < 40%) ya que no existe agua para la reacción o se encuentra saturada (HR > 80%), obstrucción de los poros, originando una disminución del coeficiente de difusión efectiva de gases en el hormigón [12], siendo entre 50 y 65% de HR el nivel crítico para que produzca la carbonatación, estado semi saturado del hormigón, Figura 5. En la Tabla 1 se informan los umbrales de HR empleados por algunos autores, la HR media (Hm) y la desviación standart (s), verificándose que el sector más crítico corresponde al antes mencionado.

En un hormigón semi saturado solo la fracción de volumen de poros ocupada por la solución es el medio a través del cual los iones ingresan por difusión. Por su parte no existe un estado de equilibrio permanente entre el hormigón y la HR, siendo los parámetros climáticos los que modifican

el contenido de solución de poros afectando el perfil de ingreso de agresivos [12]. Hunt et al. [13] midieron las cantidades fijadas de CO_2 en pastas sometidas a diferentes tratamientos previos y luego carbonatadas con altas concentraciones de CO_2 , concluyendo que la velocidad de reacción de CO_2 está determinada por la cantidad de agua libre (evaporable) existente en el hormigón, solución de poro.

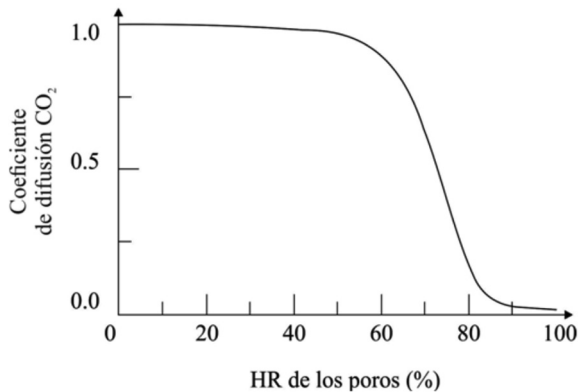


Figura 5. Variación del coeficiente difusión de CO_2 en función de la HR del hormigón.

Tabla 1. Umbrales de HR para el desarrollo del proceso de carbonatación.

Autor	Humedad (%)		Hm (%)	s (%)
ACI 222	50	80	65,6	14,1
Andrade	50	80		
Ceukelaire, Nieuwenburg	40	80		
Dal- Molin	50			
Helene	65	85		
Isaia	50	75		
Neville	50			
Papadakis et al	70			
Parrot	60			
Russell et al	55	75		
Saetta et al	50	70		
Ying-yu, Qui - Dong	50	75		

Condiciones de exposición

En la estructuras de hormigón emplazadas en un mismo ambiente existen condiciones macroclimáticas que influyen en el proceso de carbonatación si embargo se generan condiciones de exposición influenciadas por factores microclimáticos: En estructuras expuestas al aire los ciclos de mojado y secado de los elementos en contacto con agua o lluvias modifican el estado de saturación de los poros originando una atenuación del proceso de carbonatación respecto a los protegidos donde la velocidad de carbonatación resulta mayor. Lagerblad [14] en base al análisis de información y resultados propone de acuerdo la resistencia del hormigón y al tipo de ambiente de exposición, coeficientes de carbonatación para un mismo tipo de cemento. En la Tabla 2 se observa cómo la velocidad de carbonatación (K) se modifica en función de la condición de exposición de un hormigón de igual resistencia.

Tabla 2. Coeficientes de carbonatación y condición de servicio.

Condición	f'c (MPa)			
	15	15-20	25-35	> 35
	K (mm/año ^{0.5})			
Sumergido	2,0	1,0	0,75	0,5
Enterrado	3,0	1,5	1,0	0,75
Expuesto	5,0	2,5	1,5	1,0
Protegido	10	6,0	4,0	2,5
Interior	15	9,0	6,0	3,5

Características del hormigón

Porosidad

La porosidad del hormigón es un parámetro fundamental en la carbonatación, puesto que la red de poros conectados con el exterior constituye el camino de avance del CO_2 [15]. Moreno et al [16] han demostrado que la profundidad de carbonatación varió de acuerdo al tipo de mezcla, mayor profundidad de carbonatación conforme

aumenta la a/mc.

La porosidad total se emplea generalmente para caracterizar al hormigón endurecido, sin embargo esto no es tan correcto debido a que la porosidad capilar es la que tiene mayor influencia en los mecanismos de transporte de agresivos hacia su interior. La porosidad capilar (porosidad efectiva), interconectada y conectada a su vez con el exterior es por donde se produce el intercambio de humedad con el entorno y por lo tanto en la materialización de los mecanismos de transporte. El porcentaje de porosidad efectiva (pe) de los hormigones está considerado como una medida del grado de durabilidad de las estructuras frente a distintos agentes agresivos.

Entonces, en la difusión de CO₂, la porosidad efectiva es la que participa, Göran Fangerlund [17] propone un método para su determinación. La calcula como la ganancia de masa respecto al volumen cuando la muestra llega a la saturación en el ensayo de absorción capilar. En este modelo se considera que para el transporte de sustancias agresivas, el hormigón debe poseer un equilibrio higrométrico en una atmósfera a 80% HR, entonces, adopta un acondicionamiento previo de los especímenes para que alcancen ese equilibrio con una distribución homogénea de la humedad interior.

La carbonatación modifica significativamente el volumen de poros del hormigón. Las mediciones de la porosidad accesible al agua muestran que la carbonatación reduce entre 5% a 12% la porosidad abierta [18]. Entonces el proceso resulta asintótico en relación al eje del tiempo [2, 16], con el transcurso del tiempo los poros superficiales son colmatados por la precipitación de los carbonatos formados, generando así, una barrera física que frena la velocidad. [19]

Contenido y tipo de cemento

El tipo y contenido de cemento influye en la velocidad de carbonatación. En Argentina existen

distintos tipos de cemento, históricamente el de mayor empleo ha sido el cemento portland normal pero en las últimas décadas se han comenzado a producir otros que han surgido por cuestiones tecnológicas, por costos para disminuir la energía empleada en su fabricación y por cuestiones ecológicas y de sustentabilidad para el cuidado de los recursos naturales y la minimización de emanaciones de gases contaminantes a la atmósfera. En estos cementos se incluyen durante la molienda del clinker adiciones minerales para la obtención de cementos mezclas o compuestos.

El contenido del CaO del cemento es fundamental puesto que el carbonato cálcico que se forma como resultado de la carbonatación proviene de la reacción con los compuestos hidratados alcalinos principalmente los de calcio, es decir, el porcentaje de CaO da una idea de la cantidad de material carbonatable (CMC) o reserva alcalina, disponible en el cemento. Entonces, con un contenido semejante de CaO en el cemento se pueden obtener hormigones de diferente resistencia mecánica, dependiendo de la dosificación de cemento, agua y áridos.

En la Tabla 3 se presenta la composición química (Norma IRAM 50000, 2000) [20] de algunos cementos fabricados en Argentina y el contenido de material carbonatable (CMC) por contenido unitario de material cementante (CU_{mc}) según la Ec. 4., se aprecia que un cemento normal presenta el mayor contenido total de CMC. En experiencias con carbonatación acelerada se determinó que existe una relación inversa entre la profundidad de carbonatación y el contenido de cemento; obteniendo que la profundidad aumenta conforme el contenido de cemento disminuye [21].

Cementos Adicionados

Los cementos adicionados o compuestos están formados por cemento normal y uno o varios materiales inorgánicos, llamados adiciones minerales o materiales cementicios suplementarios (SCM), que participan en las reacciones de

hidratación e influyen notablemente en las propiedades del hormigón. El efecto principal que origina una adición, ya sea por reacciones hidráulicas (endurecen con el agua), puzolánicas (reaccionan con los compuestos hidratados del cemento), y/o física por disolución del cemento y/o obstaculización de los poros (tortuosidad), es densificar la microestructura del hormigón, disminuyendo su porosidad y aumentando la resistencia lo cual contribuye a mejorar la permeabilidad del hormigón incrementando así la durabilidad. Las adiciones minerales activas (hidráulicas o puzolánicas) más empleadas son las escorias de alto horno, las puzolanas naturales, las cenizas volantes y el humo de sílice.

Knut O. Kjellsen et al. [22], proponen partiendo del análisis de la profundidad de carbonatación determinada en estructuras en servicio, que la cantidad de CO₂ absorbida es definida por la

cantidad de material carbonatable por unidad de volumen. El estudio asume que el 100% del CaO presente en el hidróxido de calcio y en las fases AFt y AFm, así como el 50% del CaO presente en el gel CSH, puede transformarse en carbonato cálcico, lo cual significa que el 75% de todo el CaO presente en el cemento original puede carbonatarse, de forma que la cantidad de CO₂ absorbido la calculan mediante la Ecuación 3.

$$\text{CO}_2\text{abs.} = 0,75 \times \text{CUC} \times \text{CaO} \times \text{MCO}_2 / \text{MOCa}_2 \quad \text{Ec. 2}$$

donde: CUC Contenido de cemento en kg/m³, CaO: Contenido de CaO del cemento, en porcentaje MCO₂ y MCaO: Peso molecular del CO₂ y del CaO

Para evaluar la capacidad de fijación de CO₂ de distintos cementos empleando la técnica de carbonatación acelerada en morteros elaborados con cemento Portland normal y con adiciones

Tabla 3. Análisis químico de distintos cementos.

Componentes (%)	Tipo de cemento				
	CPN 40	CPC40	CPP	CPF	CPE*
Na ₂ O	0,19	0,21	0,33	0,23	0,53
MgO	1,75	1,54	3,09	1,01	2,81
Al ₂ O ₃	4,56	4,56	4,73	3,84	5,58
SiO ₂	19,1	19,03	20,94	19,55	27,51
P ₂ O ₅	0,11	0,09	0,26	0,12	0,18
SO ₃	3,76	3,32	3,3	2,88	2,28
Cl	---	---	0,02	---	---
K ₂ O	1,01	1,03	1,02	0,98	0,78
CaO	64,89	57,4	54,6	58,5	57,85
TiO ₂	0,27	0,28	0,43	0,23	0,29
Cr ₂ O ₃	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Mn ₂ O ₃	0,18	0,19	0,20	0,12	0,08
Fe ₂ O ₃	3,95	3,99	3,16	3,53	2,16
ZnO	0,07	0,05	0,00	0,01	0,02
SrO	0,07	0,07	0,12	0,06	0,07
CMC (Kg/KgCUmc)	0,51	0,45	0,43	0,45	0,44

*CPE: Cemento Portland Normal con reemplazo del 30% de escoria de alto horno.

minerales como reemplazo parcial del cemento, a la edad de 28 y 90 días de curado sumergido en agua. Los resultados confirman que existe una vinculación directa entre la profundidad de carbonatación versus el volumen de material carbonatable, ya que mayores profundidades se manifestaron en los morteros con menor contenido de material carbonatable (Tabla 4), a igual cantidad de CO₂ presente en el ambiente de exposición (4% en volumen) [21]. De los resultados obtenidos cuando se emplean adiciones minerales se propone la Ecuación 3 modificando la Ec 2, considerándose que el 0.75% del OCa presente en el material cementante, conformado por el contenido de cemento normal (CUC) mas el de la adición (CUAdc), participara de la reacción con el CO₂.

$$CO_2 \text{ abs.} = 0,75 \times [(CUC \times CaO) + (CUAdc \times CaOAdc)] \times MCO_2 / MCaO \quad \text{Ec. 3.}$$

donde: CUC: Contenido de cemento, en kg/m³
 CaO: Contenido de CaO del cemento, en porciento
 CUAdc: Contenido unitario de adición, en Kg/m³
 CaOA: Contenido de CaO de la adición, en porciento
 MCO₂ y MCaO: Peso molecular del CO₂ y del CaO.

Para la corrosión de las armaduras la absorción o fijación de CO₂ resulta, entonces, crítica cuando la

profundidad alcanza las barras, aunque el hormigón continuará fijando CO₂ (sustancia agresiva) hasta que se agoten los hidróxidos alcalinos (sustancias reactivas). Entonces, puede plantearse, que la máxima cantidad de CO₂ absorbida es función directa de la cantidad de productos alcalinos aportados por el cemento.

CARBONATACIÓN ACELERADA

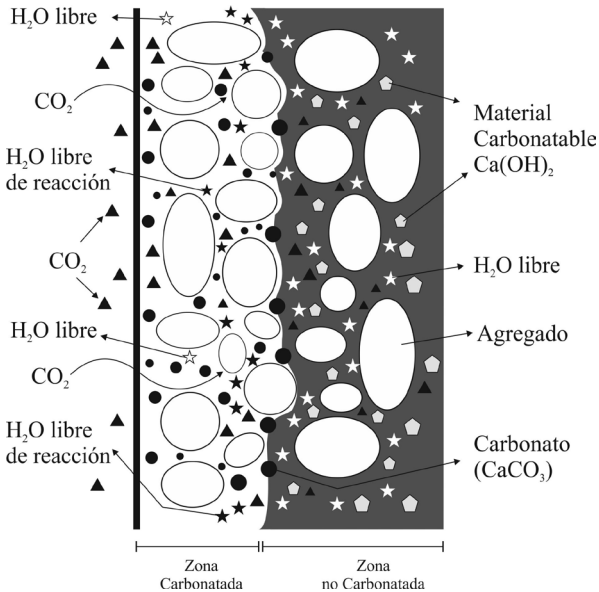
La carbonatación natural es un proceso demasiado lento para obtener resultados en cortos periodos de tiempo, por ello desde hace años se han implementado métodos de carbonatación acelerada. El proceso de carbonatación tiene su origen en la difusión de CO₂ en la estructura porosa del hormigón, según la segunda ley de Fick donde la penetración es proporcional a la diferencia de gradientes entre dos medios. Es conocido que cuanto mayor es la concentración en un medio y menor la cantidad de sustancias reactivas en el otro, mayor será la penetración del gas. En la Figura 6 se esquematiza el proceso de difusión del CO₂ en la estructura del hormigón y los productos que se forman en el proceso.

Se han propuesto diferentes procedimientos para el método acelerado existiendo poco consenso en cuanto a la concentración de CO₂ y los parámetros higrotérmicos (HR, T) empleados como así

Tabla 4. Proporciones de materiales y cantidad de material carbonatable (CMC)

Componentes (g)	Mortero				
	MCN	MCC	MCP	MCF	MCE
CPN	450	315	315	360	180
Ceniza volante	---	135	---	---	---
Puzolana natural	---	---	135	---	---
Filler calcáreo	---	---	---	90	---
Escoria de alto horno	---	---	---	---	270
CMC	172,10	123,26	125,08	137,68	134,71
Arena	1350				
Agua	225				
a/mc	0,50				

también al tipo de curado, el estacionamiento y condicionamiento previo de las muestras antes de carbonatarlas y a las dimensiones y formas de las mismas.



24 **Figura 6.** Reacción del CO_2 con el material carbonatable.

Las cámaras de carbonatación poseen diseños diferenciados en cuanto al tipo del material empleado para los gabinetes (vidrio, metal, acrílico, nylon, etc.). La concentración de CO_2 se logra inyectando CO_2 en estado gaseoso o sólido (hielo seco) mientras que la HR se obtiene mediante aire húmedo, vapor de agua o con distintas soluciones salinas saturadas. También, se pueden acoplar a las cámaras sondas para el control de la temperatura, HR y concentración de CO_2 . Existen, en la actualidad, cámaras de carbonatación normalizadas como lo especificado en de la norma UNE EN 83993-1:2009 [23].

En los ensayos de carbonatación acelerada la concentración de CO_2 puede variar del 1 al 100 % en volumen; en general, se acepta que a concentraciones de alrededor del 4% el proceso adquiere una condición similar al que ocurre al carbonatarse en ambientes naturales [2]

[24]. Analizando las metodologías empleadas en el método acelerado se observa que existen diferencias significativas en las condiciones de ensayos, por lo cual resulta difícil extrapolar los resultados a las condiciones naturales que es el objetivo del ensayo. Se han determinado distintas correlaciones del ensayo de carbonatación acelerada con la natural, algunos indican que 7 días en cámara acelerada con 4% de CO_2 , 23°C y 50 % HR corresponde a 360 días de exposición natural [2]. En hormigones de expuestos en ambientes protegidos de la lluvia, se han obtenido coeficientes de correlación para razones a/mc 0.80, sin y con la adición de 20 % de sílice, que indican que 7 días en cámara de carbonatación (5% de CO_2 , HR 70%, T 23°C), corresponden a 217 y 248 días de exposición natural [25].

La correlación entre el proceso natural y el acelerado es dificultosa debido a que algunas de las variables del método acelerado pueden afectar los resultados, en líneas generales pueden definirse:

- Estacionamiento y preacondicionamiento de las probetas: El estacionamiento y acondicionamiento de las probetas para el ensayo, definen los resultados que se obtienen en los métodos acelerados. En una primera etapa debe contemplarse el tipo y tiempo de curado, que definirán la densificación de la estructura porosa. Las condiciones del estacionamiento luego del curado, también, pueden afectar la estructura porosa y/o causar en ambientes severos (altas temperaturas ó baja humedad) microfisuraciones por donde puede ingresar el CO_2 .

La segunda etapa es la del preacondicionamiento de las probetas para alcanzar el equilibrio higrotérmico antes de comenzar el ensayo, ya que el estado de saturación de la muestra respecto a las condiciones de ensayo puede originar una distorsión en los resultados y no reflejar el comportamiento en un ambiente natural. RILEM [26] considera un estado de saturación cuando las muestras alcanzan el equilibrio a una HR $75 \pm 2\%$ y $20 \pm 1^\circ \text{C}$ con una distribución uniforme del agua

evaporable en las muestras de ensayo mientras que la norma EN 13295:2004 [27] recomienda mantener las muestras en atmósfera con HR 60 % durante un período mínimo de 14 días, finalizando cuando la variación de masa entre dos lecturas es inferior a 0,2 % en 24 hs.

- Concentración de CO₂: Una mayor concentración en la superficie expuesta del hormigón implica una mayor penetración, comportándose el hormigón como un sumidero [28]. En cuanto a la microestructura que genera la carbonatación natural comparada con la acelerada, Al-Kadhimi et al. [29] afirma que ambas no difieren mientras que Castellote et al. [30], confirma que bajas concentraciones de CO₂, inferiores al 4%, no modifican en forma substancial la microestructura.

Cuando se emplean concentraciones mayores al 10% se originan desviaciones en las profundidades de carbonatación, no siendo lineal el efecto del incremento de concentración versus las profundidades [31]. El fenómeno puede atribuirse a una desaceleración por la colmatación de los poros con moléculas de agua liberadas, modificando así el estado de saturación del hormigón, al transformarse el hidróxido de calcio en carbonato [32] y/o a la mineralogía de los carbonatos formados rápidamente, que presentan tamaños más pequeños que los que se forman en la carbonatación natural. Estos carbonatos, denominados vaterita se forman en zonas de pH 10-11.5, cuando existe una saturación del CO₂, siendo un mineral de grano fino y metaestable que precipita como calcita a menos de 20 °C [33].

- Humedad relativa en la cámara: A pesar de existir un consenso respecto al umbral del orden del 60 % existen numerosas experiencias que sobrepasan este umbral. El equilibrio higrométrico del material respecto a la atmosfera condiciona la cinética de la reacción por carbonatación ya que en un hormigón semi saturado solo la fracción de volumen de poros ocupada por la solución es el medio a través del cual los iones ingresan más fácilmente en la estructura porosa por el mecanismo de difusión.

Entre los métodos más empleados para originar la HR dentro de la cámara puede mencionarse el colocar soluciones salinas saturadas, ASTM 2002 [34]. Otras formas de generar la humedad dentro de la cámara es por medio de vapor de agua o inyectando aire húmedo.

- Forma y geometría de las probetas: La forma de las probetas, cilíndricas o prismáticas, modifican las profundidades de carbonatación, siendo algo más elevadas en las prismáticas, debido al efecto esquina. En base a pruebas aceleradas de carbonatación sobre probetas con ambas formas, se ha propuesto un coeficiente de correlación para extrapolar resultados de superficies cilíndricas a planas [12].

PROGRAMA DE EXPERIENCIAS

Para el análisis y la correlación de los resultados obtenidos con la carbonatación natural y acelerada se confeccionaron hormigones y morteros. Los hormigones se confeccionaron con distintos tipos y contenidos de cementos, razones de a/mc diferentes, se modificó también el tipo de agregado empleado (granítico, cuarcítico, canto rodado). Además, se empleo un contenido mínimo de cemento de acuerdo al CIRSOC 201/05.

Los cementos empleados en la dosificación de los hormigones corresponden a cementos comerciales existentes en el mercado, en la Tabla X se presenta la composición química de los mismos. En los morteros se reemplazó parte del cemento por adiciones minerales (filler calcáreo, escoria de alto horno, puzolanas, cenizas volantes) en la Tabla X se informa la composición y los percentiles de reemplazo. Se mantuvo constante la razón a/mc.

Para analizar el factor de influencia del medio ambiente de emplazamiento, se programó realizar pruebas sobre hormigones expuestos en distinta condiciones de exposición:

Ambiente A: exterior no protegido del agua de lluvia

Ambiente B: exterior protegido del agua de lluvia
 Ambiente C: interior laboratorio con temperatura y humedad controlada

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Medio ambiente de emplazamiento

Con las experiencias programadas en laboratorio, se determinaran las profundidades de carbonatación y analizara la influencia en función de los ambientes de exposición (A; B y C) determinando las profundidades y cantidades de CO₂ absorbidas a los distintos tiempos de exposición (6, 12, 18 y 24 meses).

Complementariamente en experiencias desarrolladas sobre estructuras en servicio, puentes viales de hormigón armado con más de 50 años de vida en servicio, emplazados en una atmosfera rural, con un concentración de CO₂ del orden de 360 ppm, con una temperatura media entre 13 y 17°C, un promedio de lluvias anuales de 1.100 mm y una humedad relativa de 70%, se determinaron mayores contenidos de humedad en elementos no protegidos de la lluvia que en los protegidos. Se verifica que el contenido de humedad, determinado según el método Powers [35] como el agua evaporable a 105°C (HRev), incide en la profundidad de carbonatación, ya que se obtiene una mayor profundidad en los elementos con menores contenidos de humedad (elementos protegidos del agua de lluvia). En la Tabla 5 se indican los contenidos de humedad y las profundidades de carbonatación en elementos protegidos y no protegidos determinadas en los puentes evaluados.

Concentración de CO₂

En mediciones realizadas en distintas ciudades de la Argentina empleando un medidor de CO₂ (Marca TESTO modelo 445 con sonda infrarroja), se determinó un valor promedio del orden de 413 ppm en ambientes urbanos (plaza principal de la ciudad), en la Tabla 6 se informan los promedios



Ambiente A



Ambiente B



Ambiente C

Figura 7. Ambientes de exposición para carbonatación natural.

Tabla 5. Profundidades de carbonatación y contenido de humedad del elemento estructural.

Tipo de Exposición	n	Xc	s	HRev	s
		(mm)		(%)	
Protegido de la lluvia	30	22	6,5	23,3	8,2
No Protegido de la lluvia			2,1	51,1	9,5

determinados observándose la influencia del parque automotor. Esta influencia también fue detectada en la ciudad de La Plata en la cual se realizaron determinaciones en el micro centro y en la avenida de circunvalación, que presentan distinta concentración vehicular (Ver Figura 8).

En cuanto a los valores determinados en la ciudad de Olavarría, corresponden a la ciudad ubicada

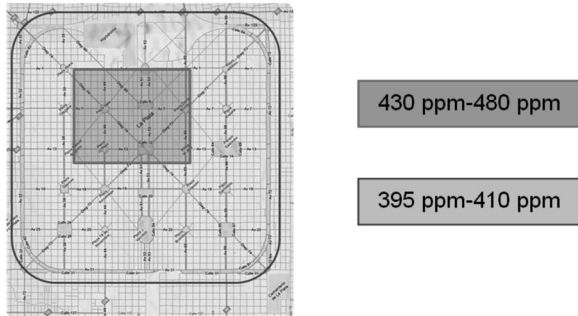


Figura 8. Concentraciones de CO₂ (ppm) ciudad de La Plata.

aproximadamente a 10 km de las industrias productoras de cemento; en las proximidades de las industrias cementeras se determinaron concentraciones de orden de 410-420 ppm, evidenciándose así la baja incidencia sobre las determinadas en la ciudad. La atenuación de los niveles de emisión por la industria cementera pueden atribuirse a los sistemas de tratamientos empleados, exigidos por la legislación ambiental provincial, para minimizar las contaminación atmosférica existiendo, además, un efecto de dilución de los gases respecto a la distancia desde la fuente de emisión siendo en este caso muy significativa la dirección de los vientos.

Contenido y Tipo de Cemento

El contenido de cemento afecta significativa en la profundidad de carbonatación debido a que define la cantidad de material carbonatable. Se ha demostrado que el empleo de adiciones

Tabla 6. Concentración de CO₂ atmosférico en ciudades de Argentina.

Provincia	Localidad	n	CO ₂	CO ₂ p	s
			(ppm)		
Buenos Aires		200	455	413	19,2
	Tandil	100	410		
	Azul		395		
	Bahía Blanca		413		
	CABA	50	435		
	Olavarría	100	410		
Mendoza	50				
Potreriillo	615*				
Entre Ríos	Puente del Inca		543*		
	Concordia	100	390		
	Guauguaychu		392		
San Jose	430				
Córdoba	La Falda		395		
	Carlos Paz		400		
Santa Fe	Rosario		420		
Misiones	Posadas	50	430		

*Valores influenciados por la presencia de nieve no incluidos en el promedio.

minerales origina un incremento de la durabilidad el hormigón, particularmente por la disminución y/o la tortuosidad de la porosidad, lo cual incide directamente sobre la resistencia mecánica y otras propiedades del hormigón.

En los resultados obtenidos, las profundidades determinadas en morteros y hormigones (Tabla 7, Figura 9) indican que se originan mayores profundidades conforme disminuye el contenido de material carbonatable a pesar de que las resistencias y las porosidades de los cementos adicionados resultan del mismo orden que la de un cemento portland normal. Las profundidades resultan mayores debido a una disminución de la reserva alcalina en los cementos adicionados y en los puzolánicos esta disminución es más levada ya que hay menor disponibilidad de $\text{Ca}(\text{HO})_2$ y CSH

Hormigón	Razón a/mc	Xc (mm)
CC	0,40	4,3
CF		6,8
CC	0,60	8,8
CF		11,4

Tabla 7. Profundidades de carbonatación a 7 días de exposición acelerada.

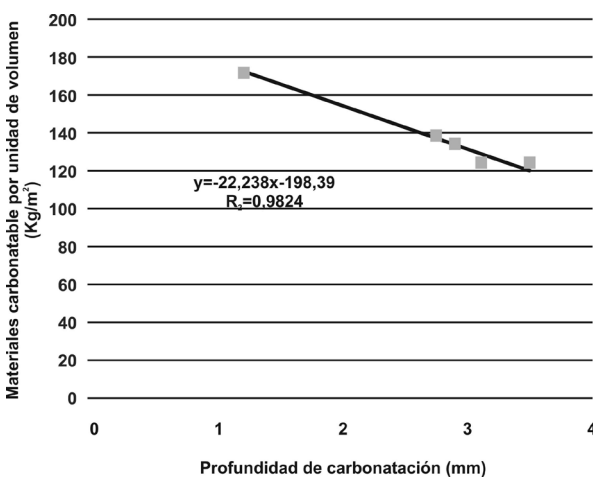


Figura 9. Profundidad de carbonatación vs. material carbonatable en morteros.

debido a la reacción puzolánica durante el periodo de hidratación total del cemento. Aunque existe una atenuación por el efecto de las adiciones en la refinación y tortuosidad de los poros capilares [2].

Carbonatación acelerada

Experiencias desarrolladas con morteros ejecutados con cemento portland normal y distintos reemplazos de adiciones, muestran que la técnica del ensayo acelerado es sensible al volumen de material carbonatable, definido por el 75% del total de compuestos alcalinos del cemento más el de las adiciones (Ca, Na, K) [21] Ec. 4. En la Figura 9 se muestra la influencia de dicho material sobre la profundidad de carbonatación. En la Tabla 7 se observan resultados obtenidos a 7 días de exposición acelerada de hormigones con diferente razón a/mc y distinto volumen de material carbonatable debido a los cementos empleados (cemento portland compuesto (CC) y cemento fillerizado (CF)). Las profundidades fueron determinadas rociando con solución de fenolftaleína sobre el corte transversal por fractura por carga de cada probeta. Los resultados confirman la sensibilidad del método en función del volumen de material carbonatable, que parece ser la variable más significativa en la profundidad de carbonatación.

CONCLUSIONES

Los ensayos acelerados de carbonatación reducen en forma significativa los tiempos, pero a veces resulta complejo extrapolar los resultados respecto al proceso natural. Las mayores divergencias entre los métodos acelerados desarrollados hasta el presente se verifican en las diferencias de la concentración de CO_2 , el estado de saturación de las muestras y las condiciones del estacionamiento luego del curado del hormigón. El método acelerado permite exponer probetas de tamaños reducidos siendo aconsejable emplear las recomendaciones existentes para otros ensayos que vinculan al tamaño de la muestra con el del agregado grueso.

El método acelerado permite exponer probetas de tamaños reducidos siendo aconsejable emplear las recomendaciones existentes para otros ensayos que vinculan al tamaño de la muestra con el del agregado grueso, obteniéndose resultados a muy corto plazo en condiciones normalizadas de temperatura y humedad.

En función de los resultados alcanzados en las experiencias realizadas como así también a la información disponible, podría proponerse la normalización del ensayo acelerado de carbonatación para predecir el comportamiento de los hormigones frente al mecanismo de ingreso por difusión de CO₂ como así también la incorporación del mismo en los reglamentos como ensayo prescriptivo. El contenido de CO₂ en la

cámara será de 4% en volumen con una humedad del orden de 60%. En lo que respecta al tiempo de exposición se recomienda un periodo de 7 días, cual correspondería a un año de carbonatación natural con lo cual se podría pronosticar el espesor carbonatado a la edad de 50 años, vida útil de las estructuras de hormigón de acuerdo al CIRSOC 201/05 y definir de este el espesor de recubrimiento de hormigón.

El ensayo de carbonatación acelerada podría optar la forma de un requisito prestacional del hormigón a semejanza del ensayo de penetración de agua o succión capilar, para ambientes en los cuales la carbonatación es el factor desencadenante de la corrosión de las armaduras.

REFERENCIAS

- 1.- Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M. "Concreto: estructuras, propiedades y materiales". San Pablo, IBRACON, 2008.674 p.
- 2.- Neville, A M. Propiedades del concreto. Editorial PINI, 1997, 828p.
- 3.- Ho, D. W. S., and Lewis, R. K. (1987) "Carbonation of concrete and its prediction," Cement and Concrete Research, Vol. 17, pp. 489-504
- 4.- EHE - 08. Instrucción del Hormigón Estructural. España. 2008
- 5.- Traversa L.P, "Corrosión de armaduras en atmosferas rurales, urbanas, marina e industriales". Durabilidad del hormigón estructural, pp. 217-257. 2001.
- 6.- Venuat, M., Relation entre la carbonatation du beton et les phenomenes de corrosion des armatures du beton, in Rencontres CEFRACOR 77. 1977: Paris, France.
- 7.- Fattuhi, N.I., Concrete carbonation as influenced by curing regime. Cement and Concrete Research, 1988. 18 (3): p.p 426-430.
- 8.- Ngala, V.T. and C.L. Page, Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes. Cement and Concrete Research, 1997. 27(7): p.p 995-1007.
- 9.- CIRSOC 201-2005 Proyecto del Reglamento Argentino para la Construcción.
- 10.- <http://www.esrl.noaa.gov/opop/mlo/index.html>

- 11.- Possan E. “Modelado de carbonatación y previsión de la vida útil estructuras de concreto en ambiente urbano” Tesis Doctoral. PortoAlegre.2010.
- 12.- Villagran Zaccardi Y., “Estimaciones del ingreso de cloruro en hormigón y de la despasivación localizada de armaduras” Tesis Doctoral.2012.
- 13.- Hunt, C.M., Tomes L. A.,” Reaction of hardened Portland cement paste with carbon dioxide”. Journal of Research of the National Bureau of Standards, 1962. 66 A(6): p.p. 473-481.
- 14.- Lagerblad, B. “Carbon Dioxide Uptake During Concrete Life Cycle, State of the Art”, Swedish Cement and Concrete Research Institute – CBI, www.cbi.se.
- 15.- Pihlajavaara, S.E., Some results of the effect of carbonation on the porosity and pore size distribution of cement paste. Materials and Structures, 1968. 1(6): p.p. 521-527.
- 16.- Moreno E. I., Domínguez Lara G. G., Enrique J. Cob Sarabia E. J., Duarte Gómez F., “Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración”, Revista Ingeniería 8-2, 2004: p.p 117-130. México.
- 17.- Fagerlund, G. “On the Capillarity of concrete” Nordic Concrete Research. Oslo, Noruega. Vol. Diciembre (1982).
- 18.- Rigo da Silva C.A., Pedrosa Reis R. J., Soares Lameiras F., Luiz Vasconcelos L., “Cambios microestructurales relacionados con la carbonatación en concreto de larga durabilidad” Ingeniería de Construcción. Volumen 17 n°. p.p. 144-150.
- 19.- Bakker R. F. M. “Initiation period. In: Schiessl, P., ed. Corrosion of steel in concrete. London, Chapman and Hall, 1988, cap. 3, p.22-55
- 20.- Norma IRAM 50000 “Cemento, Cemento para uso general. Composición, características, evaluación de la conformidad y condiciones de recepción”. IRAM. Buenos Aires, 31 p
- 21.- Iloro F. H., Sota J., Ortega N., “Influencia del tipo de cemento en el proceso de carbonatación acelerada de morteros”. VIII CINPAR Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras, Junio de 2012 - La Plata, Argentina.
- 22.- Hunt, C.M., Tomes L. A.,” Reaction of hardened Portland cement paste with carbon dioxide”. Journal of Research of the National Bureau of Standards, 1962. 66 A(6): p.p. 473-481.
- 23.- UNE 83993-1:2009, “Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la velocidad de penetración de la carbonatación en el hormigón endurecido”.
- 24.- Parrot, L. J. “A review of carbonation in reinforced concrete”. Cement and concrete Association report, 1987.

- 25.- Possan E. Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Curso de Pós graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 146p
- 26.- RILEM Technical Committee TC 116-PCD; “Performance Criteria for Concrete Durability”, Ed. by Kropp, J. & Hilsdorf, H.K., Ed. E&FN Spon, London, 1995.
- 27.- EN 13295:2004, “Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods: Determination of resistance to carbonation.” European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium. 2004.
- 28.- Iloro F. H. “Sustentabilidad del hormigón armado: Fijación de CO₂ en estructuras en servicio ubicadas en ambientes rurales”. V Congreso Internacional y 19a Reunión Técnica Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. Noviembre 2012. Bahía Blanca. Argentina.
- 29.- Al-Kadhimi, T.K.H., et al., An accelerated carbonation procedure for studies on concrete. *Advances in Cement Research*, 1996. 8(30): p. 47-59.
- 30.- Castellote, M., et al., Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO₂ concentrations. *Materials and Structures*, 2009. 42(4): p. 515-525.
- 31.- Hyvert N. Application de l’approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 2009.
- 32.- Saetta, A. V., Vitaliani, R. V. “Investigation and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete structures. Part I” *Cement and Concrete Research*, 2004. 34(4), 571-579.
- 33.- De Guillen O. A. “Estudio de los yacimientos calcáreos de las zonas de Aguada Cecilio, Valcheta y Aguda de Guerra, Provincia de Rio Negro, Republica Argentina, sus relaciones genéticas”. Tesis Doctoral. 1977. Departamento Geología. UNS.
- 34.- ASTM E104-02 “Standard practice for maintaining constant relative humidity by means of aqueous solutions.” *Annual book of ASTM standards*, Philadelphia. 2002
- 35.- Powers, T. C., “The non Evaporable Water Content of Hardened Portland – Cement Paste. Its Significance for Concrete Research and its Method of Determination”. *ASTM Bulletin*, pp 68 - 75. Mayo. (1949).

PROPIEDADES DE TRANSPORTE DE HORMIGONES CON ADICIONES MINERALES

TRANSPORT PROPERTIES OF CONCRETE WITH MINERAL ADMIXTURES

N.M. Alderete¹, Y.A. Villagrán Zaccardi², Á.A. Di Maio³

1.- Becaria Doctoral CONICET-LEMIT, natalia-alderete@hotmail.com

2.- Investigador Asistente CONICET-LEMIT

3.- Investigador Independiente CONICET-LEMIT

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es determinar el grado de influencia que la escoria granulada de alto horno, el filler calizo y la puzolana natural tienen en ciertas propiedades de transporte del hormigón.

Las adiciones minerales cumplen actualmente un rol fundamental en la industria del hormigón, tal es así que en Argentina no se puede pensar en un cemento que no tenga al menos un 5% de adiciones. Esta situación no sólo se debe a cierto factor benéfico en el plano económico sino también debido a la mejora en propiedades del hormigón en cuanto a la durabilidad, y a su vez al aporte favorable dado por la sustentabilidad. Se debe tener presente que el empleo de adiciones minerales implica una disminución en la utilización de clínquer, cuya fabricación es responsable de la emisión de grandes cantidades de uno de los principales gases del efecto invernadero, el CO₂. El empleo de la escoria particularmente consiste en darle utilidad a un sub-producto, en este caso de la industria del hierro y del acero. En el caso de las puzolanas naturales y el filler calizo, ambos se encuentran disponibles como un recurso que sólo requiere bajo consumos de energía dado que no necesita de ningún procesamiento más que la molienda. Las propiedades de transporte del hormigón reflejan la susceptibilidad del mismo frente a agentes agresivos. El modo de ingreso de dichos agentes se evaluó mediante succión capilar, penetración de cloruros, difusión de humedad y penetración de agua a presión. Se realizaron hormigones con diferentes porcentajes de reemplazo de cemento por adiciones, en algunos casos con cementos ternarios, y hormigones de control utilizando sólo cemento Portland normal, evaluando en cada caso la influencia de dichas variantes en las propiedades estudiadas.

En base a los estudios realizados se pudo determinar que las adiciones minerales tienen un notable efecto sobre las propiedades de transporte del hormigón. Estos resultados indican que es posible lograr un buen desempeño del hormigón durante su vida útil, alargando la misma y reduciendo el impacto ambiental.

Palabras clave: propiedades de transporte, adiciones minerales, sustentabilidad.

ABSTRACT

The aim of this work is to determine the influence that ground granulated blast furnace slag (GGBFS), limestone filler and natural pozzolan have on certain transport properties of concrete.

Mineral admixtures currently play a fundamental role in concrete industry, so that in Argentina all kinds of cement have at least 5% of admixtures. This situation is not only due to a beneficial economic factor but also to the improvement in concrete properties regarding durability, as well as sustainability. It must be taken into account that mineral admixtures use implies a reduction in clinker use, being clinker production the responsible of great quantities of CO₂, one of the main green-house effect gasses. Particularly, the use of GGBFS implies the use of a sub-product from iron and steel industry. In the case of natural pozzolan and limestone filler, these are available as resources that require low energy consumption because they do not need any processing other than milling.

Concrete transport properties reflect concrete susceptibility to aggressive agents. The ingress of those agents was evaluated through sorptivity, chloride penetration, moisture diffusion and water penetration resistance. Several concrete mixes with different percent of replacement were made, in some cases with ternary cement, and a control concrete mix with only Ordinary Portland cement. In each case, the influence of the replacement was evaluated through the studied properties.

Based on the results it could be determined that mineral admixtures have a large effect on concrete transport properties. These results indicate that it is possible to achieve a good concrete performance during its service life, extending it and reducing the environmental impact.

Keywords: *transport properties, mineral admixtures, sustainability.*

INTRODUCCIÓN

El empleo de adiciones minerales en el hormigón no es técnica novedosa, ya que incluso antes de la invención del cemento portland en 1842, se elaboraban morteros con cal y puzolanas. Muchas de las estructuras de la antigüedad sirven de testimonio de la durabilidad a largo plazo de dichos morteros [1]. Aún así, el empleo de las adiciones minerales ha recorrido un largo camino hasta llegar al auge actual. Primeramente se cuestionó fuertemente su incorporación en el hormigón, estando el uso de puzolanas durante un largo tiempo mayormente restringido a Italia y Grecia, donde existen considerables cantidades de reservas de puzolanas naturales (Tierra de Santoría). En otros países, el interés en estos materiales es relativamente reciente y ha surgido debido a la escasez de recursos. La adición de escoria granulada al cemento Portland fue primeramente realizada en Alemania en 1892, pero a pesar del apoyo de Michaelis y Passow, su desarrollo industrial se mantuvo retrasado. Recién para 1984 la producción de escoria llegaba a los

15 millones de toneladas [2].

Actualmente, existe una fuerte tendencia a nivel internacional hacia el empleo de cada vez mayor volumen de adiciones, ya que la incorporación de las mismas en reemplazo del cemento tiene una doble ventaja: el aporte que produce en relación a la durabilidad, debido a que la incorporación de adiciones contribuye a la desconexión capilar, y la sustentabilidad que implica una disminución en el empleo de clínquer. El remedio más efectivo para reducir el impacto ambiental que produce la industria del hormigón es utilizar menos clínquer, reemplazándolo lo máximo posible con materiales cementíceos suplementarios [3].

La estructura de poro del hormigón de recubrimiento determina la vulnerabilidad que tendrá el hormigón ante los diversos agentes externos. El nivel de porosidad, la distribución de tamaños de poro y la conectividad son indicadores de la influencia de los agentes externos en la masa

del hormigón, por lo que están estrechamente relacionadas con la durabilidad del mismo. Estos parámetros se hallan vinculados con el grado de hidratación alcanzado por la matriz de cemento, el cual depende fundamentalmente de la razón a/c, calidad, duración y tipo de curado, proporciones de los materiales y tipo de cemento.

El transporte de agua resulta relevante porque permite describir la conectividad de poros del hormigón y porque el agua está involucrada como participante necesario en casi todos los mecanismos de deterioro del hormigón armado. En este sentido es necesario conocer el tiempo requerido para que los agentes agresivos penetren en la masa del hormigón. Existen diversos métodos basados en propiedades de transporte que permiten la imposición de variables prescriptivas y en algunos casos de variables prestacionales, con vistas a asegurar la durabilidad del hormigón armado. Resulta de sumo interés la consistencia entre los diferentes métodos de evaluación de las propiedades de transporte cuando son considerados para una aplicación en común, y también es importante referir estas comparaciones para el caso particular del hormigón elaborado con adiciones, debido a sus características de hidratación y estructura de poro particulares.

En este trabajo se presentan evaluaciones de propiedades de transporte de hormigones elaborados con adiciones y/o cementos adicionados, incluyendo filler calizo, escoria y puzolanas naturales.

EXPERIENCIAS

Materiales y Propiedades

Se elaboraron 15 hormigones diferentes: 5 con cemento portland normal (CPN) (N35-1, N35-2, N40, N45 y N50), 1 con CPN y escoria (E40), 1 con CPN y filler calizo (F40), 1 con CPN, escoria y filler calizo (EF40), 4 con cemento portland compuesto (CPC) adicionado con escoria y filler calizo (C40-1, C60-1, C40-2 y C60-2), y 3 con

cemento portland puzolánico (CPP) (P35, P40 y P60). Como agregado fino se emplearon arenas silíceas de río, una fina (ASF) y otra gruesa (ASG), y como agregado grueso piedra partida granítica (PPG) de tamaño máximo nominal (TMN) de 19mm, a excepción de los hormigones C40-2 y C60-2, que se elaboraron con PPG de TMN 25mm.

La nomenclatura numérica de los hormigones indica la relación agua/material ligante (a/mc) incrementada 100 veces. Las letras se utilizaron para representar el correspondiente tipo de material cementante (N para CPN únicamente, E para CPN+ escoria, F para CPN + filler, EF para CPN + escoria + filler, C para CPC, y P para CPP). Se moldearon probetas que fueron desmoldadas a las 24hs de su llenado y curadas normalizadamente en cámara húmeda durante 28 días de acuerdo a la Norma IRAM 1534 [4]. Transcurrido dicho lapso de tiempo, se procedió a la realización de distintos ensayos de laboratorio.

En la Tabla 1 se informan las proporciones de los materiales correspondientes a los diferentes hormigones estudiados.

En estado fresco, se evaluaron el asentamiento (presentando niveles de consistencia entre plástica y seca), el peso unitario, el contenido de aire naturalmente incorporado y la exudación, mientras que para caracterizar el comportamiento de los hormigones desde el punto de vista durable, en estado endurecido se determinaron experimentalmente los parámetros relacionados con la estructura porosa del hormigón.

Desarrollo Experimental

El desarrollo experimental de los hormigones en estado endurecido consistió en la realización de los ensayos de penetración de agua presión, succión capilar, ingreso de cloruros, permeabilidad al aire y difusión de humedad. A continuación se detallan los procedimientos y resultados obtenidos de cada uno de ellos.

Tabla 1. Proporciones y propiedades de los hormigones estudiados.

Materiales (kg/m ³)	N35-1	N35-2	N40	N45	N50	E40	F40	EF40	C40-1	C60-1	C40-2	C60-2	P35	P40	P60
Agua	140	133	140	144	150	140	140	140	166	168	168	168	140	182	170
CPN1	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CPN2	-	380	350	320	300	227	262	227	-	-	-	-	-	-	-
CPP1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	400	-	-
CPP2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	442	290
CPC	-	-	-	-	-	-	-	-	425	277	425	280	-	-	-
Escoria	-	-	-	-	-	123	-	88	-	-	-	-	-	-	-
Filler calcáreo	-	-	-	-	-	-	88	35	-	-	-	-	-	-	-
ASF	188	189	190	193	193	190	190	190	157	183	162	186	182	-	-
ASG	739	749	754	766	767	755	755	755	624	733	642	741	713	800	929
PPG 6-20	979	980	980	980	980	980	980	980	1000	1000	-	-	979	981	992
PPG 10-30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1000	1000	-	-	-
Reductor de agua (l)	3,4	6,2	5,9	6	3,6	4,9	4,2	4,1	-	-	-	-	4,7	-	-
Aire incorporado (%)	4,2	3,0	3,1	3	3,1	3,2	3,5	3,4	2,3	3,0	2,6	3,3	3,2	1,7	1,9
Propiedades															
Peso unitario (kg/m ³)	2392	2404	2417	2392	2404	2392	2354	2385	2444	2394	2430	2352	2417	2404	2379
Asentamiento (cm)	11	8	10	6	6	10	9	7	8,5	5,5	9	5,5	15	4,5	5
Exudación (%)	<0,01	<0,01	<0,01	3,03	0,4	<0,01	<0,01	<0,01	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	<0,01	n.d.	n.d.
Absorción 24h (%)	2,5	3,4	3,6	3,8	3,8	4,6	3,8	4,6	3,6	5	4,1	6,1	2,8	5	5,2
Porosidad (%)	6,0	8,0	8,7	8,9	8,9	10,6	8,8	10,5	9,0	11,3	9,5	10,4	6,8	11,5	11,8
f _c 28d (Mpa)	44,4	60,2	53,8	45,6	46,2	52,6	42,2	51,1	38,8	25,5	38,8	23,8	41,8	31,5	23,0

Penetración de agua a presión y succión capilar

Las estructuras cuya función específica es la contención de líquidos se encuentran sometidas a presión hidrostática, y su permeabilidad definirá su aptitud en servicio. Una metodología empleada para calificar esta propiedad la constituye el ensayo de penetración de agua a presión IRAM 1554 [5], mediante el cual se obtiene una caracterización de la calidad del hormigón en lo que respecta a su estructura porosa. La técnica consiste en someter a la probeta a una serie de escalones de

presión variables durante un intervalo de tiempo normalizado en un permeámetro (Figura 1). La presión de agua aplicada sobre la muestra varía de 1 kg/cm², al inicio del ensayo, hasta 7 kg/cm² a su finalización. Luego, la muestra es sometida al ensayo de tracción por compresión transversal localizada, obteniéndose dos partes iguales, finalmente se mide la profundidad del perfil de agua penetrado en la misma.

Para evaluar a los hormigones C_{xx} y P_{xx} se utilizaron muestras prismáticas de 200mmx200mmx100mm,

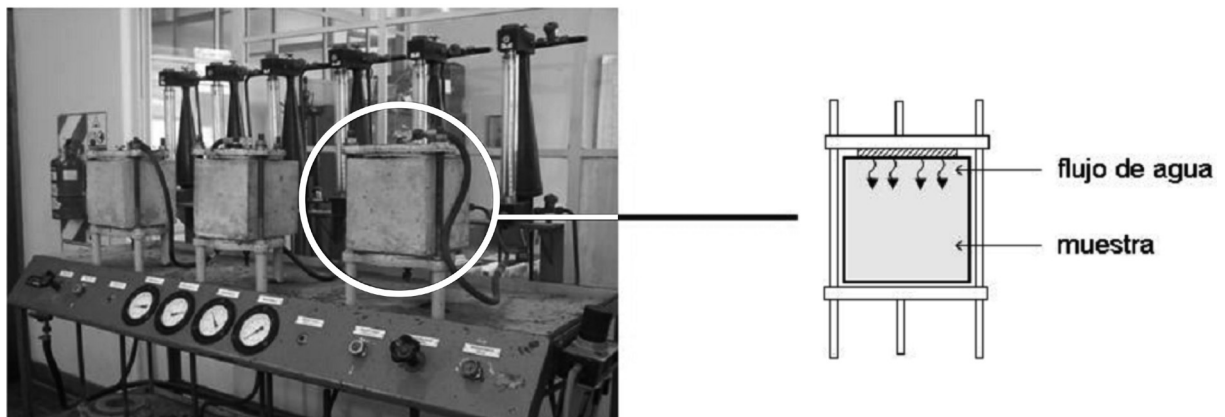


Figura 1. Permeámetro empleado en el ensayo de penetración de agua y esquema de ensayo.

siendo la cara de ensayo la correspondiente al moldeo (200mmx200mm) y estando el sector bajo ensayo delimitado por un círculo (aro de goma) de 100mm de diámetro circunscrito a dicha cara. Los hormigones Nxx, E40, F40 y EF40 fueron evaluados mediante muestras cilíndricas de 150mmx300mm, ensayándose también la cara de moldeo.

Este ensayo, permite evaluar la permeabilidad del hormigón, en relación con su estructura porosa y nivel de hidratación alcanzado. Según lo establecido en el Reglamento CIRSOC 201 [6], las penetraciones medias y máximas deberán ser inferiores a 30mm y 50mm respectivamente, cuando el hormigón se utilice para ejecutar una estructura de contención de agua.

En las estructuras de hormigón que se encuentran sometidas a ciclos de humedecimiento y secado, penetra agua a través de la estructura porosa del hormigón inducida por la tensión superficial actuando sobre los capilares del hormigón. Este mecanismo se denomina succión capilar y una forma de evaluar su efecto lo constituye el ensayo de succión capilar IRAM 1871 [7], a través del cual se obtiene un parámetro representativo de la estructura porosa del hormigón y de su respuesta al ingreso de los agentes agresivos desde el exterior.

Para llevar a cabo el ensayo se moldearon probetas cilíndricas de 100mm de diámetro por 200mm de

altura de las que se extrajo una muestra de 50mm de espesor por cada probeta ubicada próxima al sector inferior según se indica en el esquema de la Figura 2. La superficie de ensayo es la cara a 30mm desde la base de las probetas.

El ensayo consiste en registrar, en función del tiempo, la ganancia de masa que experimentan muestras de hormigón cuando las mismas se encuentran con una cara en contacto con agua. La succión capilar se cuantifica mediante la velocidad y la capacidad de succión capilar, la primera representa la velocidad de penetración por capilaridad y se expresa en $\text{g/m}^2 \cdot \text{seg}^{1/2}$, mientras que la segunda, la cantidad de agua requerida para producir la saturación capilar del hormigón con unidades en g/m^2 .

En la Tabla 2 se presentan los valores de penetración y de capacidad y velocidad de succión capilar obtenidos en los diferentes hormigones estudiados. Cada valor informado corresponde al promedio de 5 determinaciones.

Penetración de cloruros

Con los hormigones Cxx se confeccionaron probetas para realizar mediciones de perfiles de ingreso de cloruros en atmósfera marina (a aproximadamente 15 metros de la línea de costa y 5 metros de altura, en la ciudad de Mar del Plata, Argentina). Se elaboraron probetas prismáticas

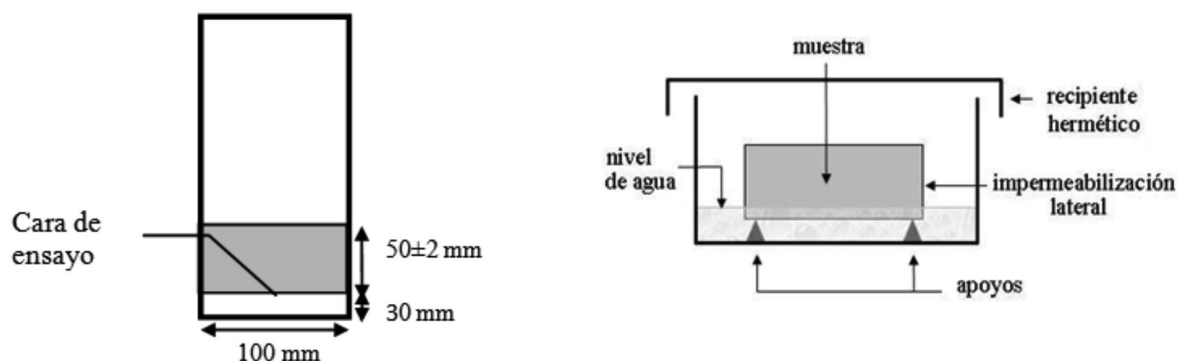


Figura 2. Esquema del ensayo de succión capilar y de la ubicación de la muestra.

Tabla 2. Resultados de succión capilar y penetración de agua a presión.

Hormigón	N35-1	N35-2	N40	N45	N50	E40	F40	EF40	C40-1	C60-1	C40-2	C60-2	P35	P40	P60
Succión capilar															
Velocidad (g/m ² .s ^{1/2})	1,31	1,44	1,68	2,42	2,88	0,88	0,91	1,48	3,64	10,92	5,89	15,37	1,68	1,60	2,90
Capacidad (g/m ²)	820	818	1125	1975	2119	552	1021	553	2738	4569	3428	4138	908	1337	2379
Penetración de agua a presión															
Media (mm)	n.d.	19	22	103	39	23	30	31	10	34	9	29	n.d.	23	47
Máxima (mm)	n.d.	41	48	151	56	41	46	55	16	38	13	32	n.d.	48	58

impermeabilizadas en todas sus caras a excepción de la cara de moldeo. Para la evaluación se determinaron por análisis químicos los perfiles de ingreso de cloruro, tomando muestras a distintas profundidades desde la superficie expuesta. Los análisis correspondieron a los contenidos de cloruros solubles en agua, valorados mediante titulación colorimétrica con nitrato de plata por el método de Mohr.

En la Figura 3 se muestran las evoluciones en el tiempo de las profundidades alcanzadas por las concentraciones de cloruros solubles en agua, para cada hormigón estudiado.

Por otro lado, en los hormigones Pxx se evaluó la migración de cloruros, empleando un procedimiento que determina la resistencia del hormigón a la penetración de cloruro cuando es sometido a un gradiente de potencial eléctrico. El proceso se desarrolla en estado no estacionario, y se encuentra normalizado según [8].

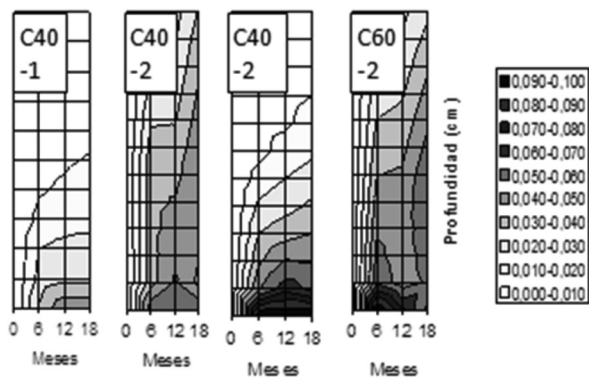


Figura 3. Perfiles de ingreso de cloruros solubles en agua en atmósfera marina natural.

La técnica consiste en aplicar en forma axial un campo eléctrico a una rodaja cilíndrica de hormigón saturado, de 100 mm de diámetro por 50 mm de espesor (Figura 4). Luego de un período bajo la aplicación de un determinado voltaje (ambos dependen de la conductividad del hormigón), la muestra es partida y rociada con solución de nitrato de plata 0,1M. La profundidad de penetración de cloruro puede medirse a partir del frente visible debido a la precipitación de cloruro de plata (Figura 4). Esta profundidad, junto con los parámetros de ensayo, permite el cálculo del coeficiente de migración de cloruro.

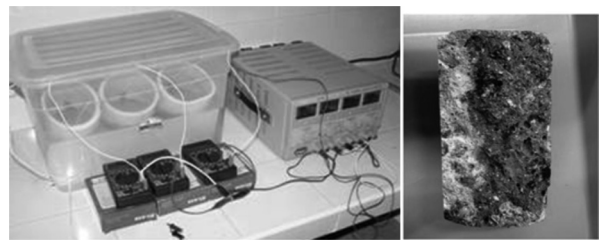


Figura 4. Equipamiento de ensayo de migración de cloruro y perfil de penetración.

En la Figura 5 se muestran los perfiles de penetración de cloruro obtenidos al aplicar un potencial de 40V. Pueden verse los perfiles para cada muestra ensayada, que permite apreciar una dispersión de resultados baja.

Permeabilidad al aire

La permeabilidad al aire es otro parámetro relacionado con la durabilidad. En este caso la evaluación se llevó a cabo con un equipo comercial (POROSCOPE modelo P 6000) (Figura 6), cuyo funcionamiento se basa en el método de Figg [9].

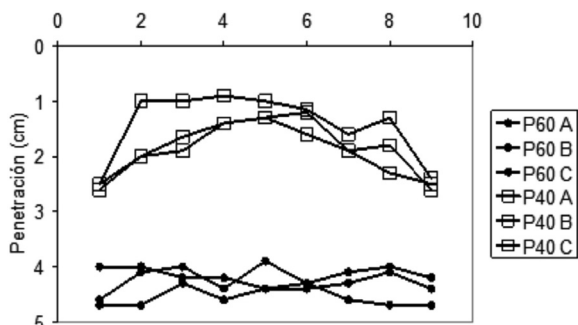


Figura 5. Resultados de migración de cloruro.

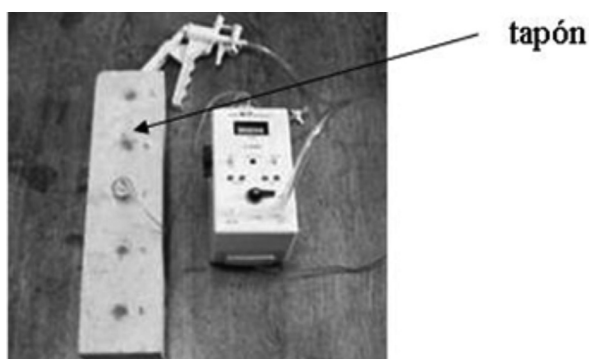


Figura 6. Permeámetro de aire.

El método empleado consiste en conformar una celda de ensayo, alcanzar una determinada presión de aire en la cámara y evaluar el tiempo en que la presión varía un cierto valor. A este valor, expresado en segundos, se lo vincula con la permeabilidad al aire del material. La cámara se realiza desde la superficie del hormigón endurecido. Para ello se efectúa, mediante una mecha, un orificio de 10 mm de diámetro y 40 mm de profundidad, luego se introduce un tapón de goma, desde la superficie hasta una profundidad de 20mm, con el fin de asegurar un correcto sellado, quedando de esta forma conformada la cámara de 10 mm de diámetro por 20mm de profundidad.

Para la realización de este ensayo se moldearon probetas prismáticas de 70x100x430 mm sobre las cuales se conformaron 5 celdas de ensayo. Los promedios de las lecturas realizadas en cada celda fueron de 107 y 87 segundos para los hormigones P40 y P60, respectivamente.

Difusión de humedad

Para la determinación de la velocidad de flujo de humedad en las muestras de hormigón se utilizó el método de la copa (Figura 7). Se evaluaron los hormigones Nxx, E40, F40 y EF40.

La humedad relativa implica una variable que afecta en forma amplia a la difusividad de vapor de agua [10], por lo que el análisis con diferentes gradientes de humedad aporta información sobre la relación entre la estructura de poros del hormigón. La metodología utilizada está diseñada para determinar difusividades en régimen estacionario, lo que implica posibles efectos de histéresis en el contenido de humedad de las muestras. Esto puede merecer estudios experimentales más extensos, pero se considera suficiente para el objetivo de este trabajo.



Figura 7. Determinaciones de difusión de humedad.

Se prepararon las copas, consistiendo en vasos plásticos conteniendo la sal higroscópica, e interponiendo en la boca de la copa la muestra de hormigón de aproximadamente 5 mm de espesor, herméticamente sellada en la junta. Las copas fueron estacionadas en cámara húmeda ($HR > 95\%$, $23 \pm 2^\circ\text{C}$), protegidas del humedecimiento por contacto directo; de esta forma los gradientes de humedad fueron en cada caso los correspondientes a las diferencias entre humedades relativas de $75,4 \pm 0,1\%$ (equilibrio con solución saturada de NaCl) y de $11,3 \pm 0,3\%$ (equilibrio con solución saturada de LiCl), y 95% como humedad externa. Se registraron los incrementos de peso de las copas en intervalos regulares de tiempo. Las determinaciones se realizaron para 5 muestras por cada serie estudiada.

En las Figuras 8 y 9 se muestran los resultados para humedad relativa interna de 11% (NaLi) y 75% (NaCl), respectivamente. Los incrementos de peso (masa de vapor difundida al interior de la copa) muestran una evolución lineal con el transcurso del tiempo a partir de las 100h de ensayo. Los datos iniciales corresponden al régimen transitorio de difusión, tiempo requerido para que evolucione la humedad en el interior de la muestra hasta que el perfil de humedad sea el correspondiente a régimen estacionario. A partir de este punto, la cantidad de masa de vapor de agua que ingresa por la cara superior de la muestra es la misma que la cantidad de masa que egresa por la cara inferior al interior de la copa. El régimen no estacionario presenta un período más prolongado cuando la humedad interna es más cercana a la externa, debido a que el gradiente de concentraciones de vapor es menor.

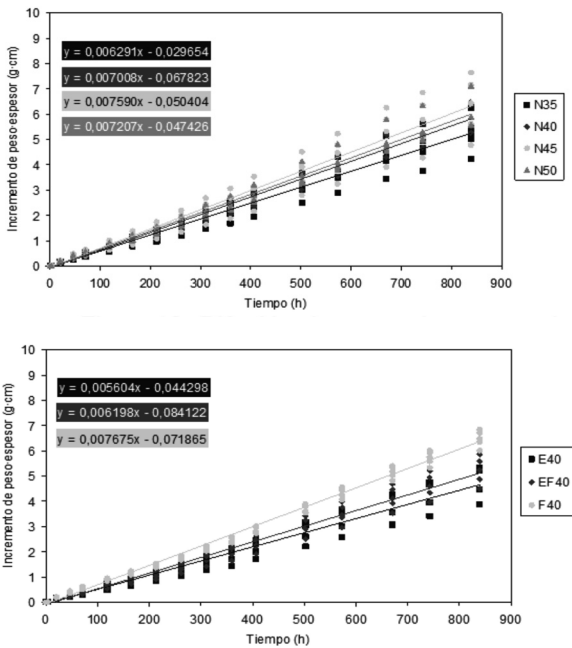


Figura 8. Difusión de vapor de agua en hormigones Nxx y E40, EF40 y F40, HR interna = 11%.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Porosidad y difusión de humedad

Si bien los valores de porosidad determinados a

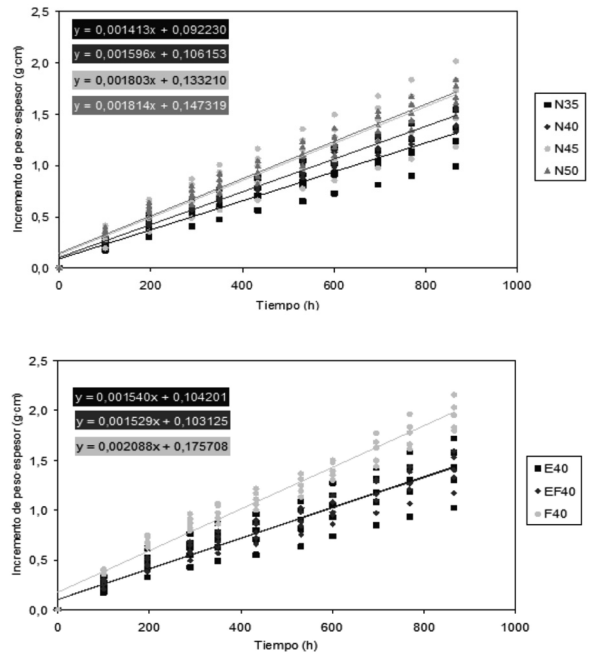


Figura 9. Difusión de vapor de agua en hormigones Nxx y E40, EF40 y F40, HR interna = 75%.

partir de la absorción de agua dan una idea del volumen de poro del hormigón, ésta propiedad no permite hacer inferencias confiables sobre la durabilidad potencial del hormigón. Entre los hormigones estudiados, se evidencian los hormigones E40 y EF40, que superan a las porosidades de otros hormigones con mayor relación a/mc, pero aún así, esta relación no se mantiene en las propiedades de transporte estudiadas.

En relación a la difusión de humedad se observa para todos los hormigones una clara disminución de la pendiente de la recta conforme disminuye la relación a/mc. Asimismo, se manifiesta una incidencia levemente perjudicial con la utilización de escoria y algo más notoria con la incorporación de filler calizo.

Penetración de agua a presión y succión capilar

La principal incidencia sobre la penetración de agua a presión resulta ser la de la relación a/mc.

Primeramente, en los hormigones Nxx puede verificarse esta incidencia, con la salvedad de N45, en el que la gran exudación contribuyó a incrementar notablemente su penetrabilidad.

En los resultados de los hormigones N35-2, N40, E40, C40-1, C40-2 y P40 puede observarse que cumplen holgadamente con los límites propuestos por el [6] por dos cuestiones fundamentales, por un lado el hecho de presentar una razón a/mc lo suficientemente baja y por el otro, que el curado normalizado garantiza las condiciones óptimas del desarrollo de los productos de hidratación. Bajo estas condiciones, prácticamente la totalidad de los canales capilares son obstruidos durante la hidratación.

En cuanto a las muestras de N50, E40, EF40, C60-1 y C60-2 tuvieron un comportamiento regular. Una razón a/mc tan elevada implica el empleo de una excesiva cantidad de agua de mezclado mayor que la necesaria para completar las reacciones de hidratación, el excedente resulta en un elevado número de capilares imposibles de llenar en su totalidad por los productos de hidratación. En el caso del hormigón P60 no cumple con los límites debido a la alta porosidad de la matriz en relación con la razón a/c respectiva. Sin embargo, es de destacar que las evaluaciones fueron efectuadas a los 28 días, por lo que, considerando que para aprovechar todo el potencial de hidratación del cemento CPP, se requeriría un mayor tiempo de curado y por lo tanto es esperable que evaluaciones efectuadas a edades mayores evidencien mejor comportamiento.

La incidencia del tipo de material cementante sobre la penetración de agua a presión no resulta notable. Esto se atribuye a que este mecanismo de transporte involucra la participación de todas las fracciones de tamaño de poro, incluyendo a los macroporos que no se saturan por capilaridad o absorción de agua. En ésta fracción de poros de gran tamaño, la acción hidráulica y/o puzolánica de las adiciones minerales no tiene gran incidencia respecto a la conductividad hidráulica del hormigón.

En los ensayos de succión capilar se manifiesta de manera muy evidente la dependencia de dicho parámetro con la razón a/mc. Pero también el tipo de material cementante contribuye ampliamente a la reducción de la capilaridad. En los hormigones N35-1, N35-2, N40, N45, N50, E40, F40, EF40, C40-1, C40-2, P35, P40 y P60 se destaca que a la edad de 28 días, todos cumplen con el límite máximo de velocidad de succión capilar de $4\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$ establecido en el Reglamento [6]. Los hormigones C60-1 y C60-2 resultaron los únicos que tuvieron un mal desempeño, esto puede atribuirse al efecto compuesto del elevado porcentaje de adiciones que contiene el cemento portland compuesto y la alta relación a/mc.

El uso de la escoria muestra una notable capacidad para reducir la capilaridad del hormigón (E40 y EF40 versus N40), que es menos notable para hormigones de igual relación a/mc que incorporaron filler calizo o puzolana (F40 y P40). Aún así, para mayores relaciones a/mc, la puzolana sí demuestra beneficios apreciables (P60).

La incidencia de la escoria posiblemente se deba a su acción dual hidráulica y puzolánica, que implica beneficios a edades más cortas que la puzolana. Sin embargo, los hormigones Cxx muestran un comportamiento más influido por la adición de filler que de escoria en el CPC, por lo que su capilaridad se vio incrementada respecto a hormigones con igual relación a/mc y CPN.

Ingreso de cloruros

Es clara la diferenciación entre los hormigones C40-1 y C40-2, con los C60-1 y C60-2. Los primeros tienen una relación a/mc más baja que los segundos, por lo que resulta lógica esta distinción. En los hormigones C40-2 y C60-2, que presentan un mayor tamaño máximo de agregado, y por lo tanto un mayor espesor de interfase, la velocidad de ingreso resulta algo mayor respecto a los hormigones C40-1 y C60-1, en los que la interfase tiene menor peso relativo. Esto es consecuente con la mayor porosidad que en general presenta la

interfase respecto a la matriz y los agregados.

De acuerdo a los resultados de migración de cloruros mostrados en la Figura 7, el perfil registrado por el hormigón P60 es marcadamente mayor que el perfil del hormigón P40. La diferenciación de acuerdo a la relación a/c de cada hormigón resulta significativa y acorde a las porosidades de cada uno.

En la penetración de cloruro, los hormigones Pxx mostraron resultados más favorables que los Cxx, sobre todo considerando que la escoria incluida en el CPC le conferiría mayor capacidad de retención de cloruro, pero cuyo impacto resulta minorado debido a la inclusión paralela de filler calizo e implica, entonces, menor incidencia que la desconexión capilar obtenida en los hormigones con CPP.

Permeabilidad al aire

Para los hormigones P40 y P60 se observa que al aumentar la razón a/mc se reduce el tiempo de ensayo. Un menor tiempo indica que el aire fluye más rápidamente por la estructura porosa del hormigón de recubrimiento, por resultar más abierta y presentar un mayor nivel de conectividad entre poros. En función del rango tentativo recomendado, la calidad del hormigón de recubrimiento resulta “adecuada” en el caso del hormigón P40 y “no muy buena” en el caso del P60. Por otro lado, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las propiedades anteriormente evaluadas, es esperable que a edades mayores la acción puzolánica aumente la tortuosidad y desconexión de poros, mejorando el comportamiento durable de los hormigones.

CONCLUSIONES

Se han presentado valoraciones de las propiedades de transporte de hormigones elaborados con diferentes tipos y contenidos de adiciones minerales en reemplazo del cemento. Se observa

la fuerte influencia de la relación a/mc en todos los ensayos realizados, evidenciando su estrecha relación con la estructura de poros y por lo tanto con la susceptibilidad frente al ingreso de sustancias agresivas. Los resultados demuestran la potencialidad del uso de las adiciones en ambientes agresivos. También es de destacar que todas las evaluaciones fueron efectuadas a los 28 días, siendo esperable que a edades mayores se obtengan mejores resultados desde el punto de vista durable, siempre y cuando se garanticen adecuadas condiciones de curado.

Respecto a la penetración de agua a presión, la incidencia de las adiciones es pequeña en hormigones jóvenes. Es esperable un mayor impacto de las mismas con el transcurso del tiempo, pero debe tenerse en cuenta la limitada acción que pueden demostrar en la reducción de la conectividad de macroporos, que participan con gran incidencia en este fenómeno de transporte.

En cuanto a la capilaridad, la escoria mostró los mayores beneficios en comparación con el filler calizo y la puzolana. Esto es atribuible a la acción también hidráulica de la escoria que supone una ventaja respecto al filler y la puzolana, que tienen acciones únicamente física y puzolánica, respectivamente.

Finalmente, en la penetración de cloruro, la puzolana se mostró más eficaz, superando mediante la disminución de la conexión capilar a la mayor capacidad de retención que pudiera aportarle la escoria al CPC y que se ve limitada por la acción dilutiva del filler calizo también incorporado. El CPC, como cemento adicionado, no implica necesariamente mejoras en cuanto a otras propiedades de transporte del hormigón cuando se lo compara con el CPN. Esto surgirá del balance de efectos benéficos por hidraulicidad y puzolanidad contra los efectos dilutivos asociados principalmente al filler calizo y su proporción en el cemento.

REFERENCIAS

- 1.- Mehta P. K. (1986). "Concrete: structure, properties and materials" Prentice Hall, New Jersey. Estados Unidos.
- 2.- Moranville-Regourd M. (2003). "Lea's Chemistry of Cement and Concrete - Chapter 13: Calcium Aluminate Cements". Ed.: Peter C. Hewlett.
- 3.- Farzadnia, N. ; et al. (2011). "Incorporation of Mineral Admixtures in Sustainable High Performance Concrete". International Journal of Sustainable Construction, Engineering & Technology. Vol 2, Issue 1, June.
- 4.- IRAM 1534. (2004). "Hormigón. Preparación y curado de probetas en laboratorio para ensayos de compresión y de tracción por compresión diametral". IRAM. Buenos Aires, Argentina.
- 5.- IRAM 1554. (1983). "Hormigón de cemento pòrtland. Método de determinación de la penetración de agua a presión en el hormigón endurecido". IRAM. Buenos Aires, Argentina.
- 6.- CIRSOC 201. (2005). "Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón". Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para Obras Civiles. Buenos Aires, Argentina.
- 7.- IRAM 1871. (2004). "Método para la determinación de la capacidad y velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido". IRAM. Buenos Aires, Argentina.
- 8.- NT Build 492. (1999). "Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments". Nordest. Espoo, Finlandia.
- 9.- Figg, J. W. (1973). "Methods of Measuring the Air and Water Permeability of Concrete" Mag. Concr. Res., 25 (85), pp. 213-219.
- 10.- Bažant Z.P., Najjar L.J. (1972), "Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete". Materials and Structures, Vol.5, N°25, pp. 3-20.

ATLAS DEL HORMIGÓN ARQUITECTÓNICO

ATLAS OF ARCHITECTURAL CONCRETE

A. López¹

1.- *Becaria Postdoctoral CONICET-LEMIT. lopezanahi2002@gmail.com*

45

RESUMEN

El Hormigón Arquitectónico es aquel que genera impacto visual debido a su apariencia estética, la cual se caracteriza por su textura y blancura o color. Existen infinitas alternativas para conseguirlo combinando los materiales apropiados para lograr el color deseado y/o aprovechando los moldes que lo contengan. Independientemente de la apariencia, también puede reunir las propiedades en estado fresco y/o endurecido que cumple cualquier otro tipo de hormigón. A su vez, estará expuesto a diferentes ambientes que modificarán su estado inicial. Sistematizar estas características para poder facilitar el uso del Hormigón Arquitectónico es el principal objetivo del “Atlas”. En este trabajo se presenta una metodología que permitirá abordar los tópicos relacionados con el diseño de mezclas, los aspectos estéticos, los moldes y el entorno de emplazamiento. El plan indica las actividades mínimas a realizar y se ejemplifica aplicando la metodología en morteros coloreados de elevada fluidez. Los resultados iniciales demuestran no sólo la importancia de considerar los diferentes contenidos de pigmentos, ya que los incrementos de pigmento rojo no producen los mismos niveles de variaciones que los del amarillo, sino también que los colores pueden ser distintos para una misma mezcla cementícea.

Palabras clave: atlas, hormigón arquitectónico, color.

ABSTRACT

The Architectural Concrete is one that generates visual impact due to their aesthetic appearance, characterized by its texture and whiteness or color. There are infinite ways to achieve this, through the combination of appropriate materials in order to obtain the desired color and /or taking advantage of the molds that contain it. Regardless of the appearance, it can also meet the properties of any other

type of concrete in fresh and / or hardened state. In turn, it will be exposed to different environments which modify its initial state. To systematize these features in order to facilitate the use of Architectural Concrete is the main objective of “Atlas”. In this paper it is presented a methodology that will allow to address topics related to the design of mixtures, aesthetic aspects, molds and site environment. The plan indicates the minimum activities to perform and as an example, applies the methodology on high fluidity colored mortars. Initial results show not only the importance of taking into account the different contents of pigments, since the increases of red pigment do not produce the same change levels than that of yellow, but also colors may be different for the same cementitious mixture.

Keywords: atlas, architectural concrete, color.

INTRODUCCIÓN

El hormigón Arquitectónico (HA) es un material compuesto que, además de poseer un amplio intervalo de resistencia mecánica y durabilidad, se destaca por la valoración estética de la superficie provista por su color y textura [1-3]. La valoración estética es una alternativa que extiende sus aplicaciones a monumentos, esculturas, elementos decorativos y mobiliarios urbanos [4-6]. Los principales componentes que contribuyen con el color son el cemento y los pigmentos. Muchas veces los colores proyectados no son alcanzados por las diferentes proporciones de los componentes sumados al elevado costo del pigmento y se desiste de elaborar la alternativa estética por medio de nuevos tonos. Un extenso estudio sobre el efecto del tipo e incremento de superfluidificante, del tipo y contenido de pigmentos tales como óxidos de hierro (colores rojo, amarillo y negro), negro de humo y ftalocianinas (azul y verde), y de las diferencias entre los cementos gris y blanco fue realizado para evaluar el color en morteros y hormigones autocompactantes coloreados [7]. El color fue definido según el sistema CIELAB estudiado por la Commission Internationale de l’Eclairage (CIE) [8-10] y permitió estimarlo a través de los parámetros luminosidad (L^*), saturación (C^*) y tono (h^*) del hormigón luego de realizar pruebas en morteros colocados en moldes de acero o madera. No sólo el color del hormigón obtenido de las proporciones de sus componentes influye en la terminación superficial, también lo hace la rugosidad o el brillo conseguido en contacto

con el molde. Por lo tanto, color y brillo resultan variables determinantes en la apariencia de las mezclas cementíceas [10,11] y se los mide con un espectrofotómetro. Por otro lado, la rugosidad superficial, que es el conjunto de irregularidades en la superficie y la geometría del perfil, induce a suponer si el brillo será mayor o menor. Los parámetros que definen la geometría de una superficie se miden con un rugosímetro.

A partir de lo expuesto surge la necesidad de sistematizar el concepto color-terminación con los componentes que permiten producirlo para facilitar las diferentes aplicaciones. En el campo del color, la bibliografía existente, Ostwald [12], Munsell [13], Villalobos [14] y Natural Colour System (NCS) [15], presenta diferentes alternativas para sistematizarlo y, salvando las diferencias, persigue el propósito de ordenar los colores según algún criterio. Para sistematizar el color existen Sistemas o Atlas ordenados según diferentes principios que lo clasifican en rangos de luminosidad, saturación y tonalidad y quedan esquematizados en figuras. Poco se ha encontrado sobre las clasificaciones de las terminaciones superficiales y menos aún de estos atributos relacionados con mezclas cementíceas.

Lo expresado justifica la importancia y necesidad de elaborar un Atlas de Hormigón Arquitectónico. La recopilación de información se sostiene según tres ejes que deben interactuar para delimitar el alcance de este material. Uno de los ejes consiste en

el diseño de las mezclas, aquí se toman como punto de partida parámetros tales como las relaciones agua/cemento (que define el nivel de resistencia) y pigmento/cemento (que contribuye con el color) [7]; otro está relacionado con la geometría de la superficie en donde el material de los moldes y los tratamientos recibidos se asumen como los principales factores que modifican y definen las diferentes rugosidades [16-20] y, por último, está la decisión sobre los márgenes tolerables de cambio de color, brillo y rugosidad, sustentados a partir de mediciones de estos parámetros y la correspondiente evaluación visual.

Para la elaboración del Atlas es necesario verificar algunas hipótesis, entre ellas, si los cambios de color son importantes ante modificaciones del material del molde y, en función del tipo de pigmento; si la variación de color es importante al utilizar elevados contenidos de pigmento. A su vez, ya que las texturas producen diferentes sensaciones del color, se constatará que una superficie más pulida produce mayor oscuridad en la superficie. Por último, corroborar si el color es más claro luego de prolongados períodos de curados.

El presente trabajo describe el plan de actividades destinadas a elaborar y contribuir al desarrollo del Hormigón Arquitectónico y lograr una vinculación de este con diferentes aplicaciones que, partiendo de criterios técnicos y ágiles, justifiquen su elección para el uso en la construcción. La investigación tiene como propósito favorecer la elección de los aspectos estéticos limitados a la interacción entre las variables relacionadas con las mezclas de morteros y hormigones, los moldes y los entornos de emplazamiento. Por ello se propone una metodología para abordar el Atlas de Hormigón Arquitectónico. Este mecanismo de razonamiento se ejemplifica con el estudio de morteros coloreados y puede ser una propuesta para elegir mezclas con ciertas propiedades en estado fresco o endurecido, incluyendo los aspectos estéticos. Con los pasos que se describirán se pudieron obtener rápidamente Hormigones Autocompactantes

Coloreados. El Atlas se completa con inspecciones visuales, no incluidas en este ejemplo.

ABORDAJE DEL ATLAS DEL HORMIGÓN ARQUITECTÓNICO

A continuación se describe el marco teórico que permitirá verificar las hipótesis planteadas y finalmente confeccionar el Atlas. El primer paso será: definir los materiales y las principales características que contribuirán a diseñar mezclas cementíceas. El criterio de elección es estudiar las más utilizadas en La Plata, Provincia de Buenos Aires. Luego, estas mezclas se colocarán en moldes de diferentes tipos y así conformar diferentes tipos de superficies. Las mezclas se fabricarán según parámetros de diseño y se utilizarán distintas técnicas y metodologías para evaluar las propiedades en estado fresco o endurecido de morteros y hormigones. Por último se evaluará su aspecto estético, en particular, se profundizará sobre la metodología de medición del color, brillo y rugosidad. Cabe destacar que los estudios en morteros permiten rápidamente obtener parámetros de diseños aplicables en los hormigones y tienen como objetivo principal abaratar costos y ahorrar tiempo [21].

Elección y caracterización de materiales

Se seleccionarán y evaluarán diferentes agentes colorantes particulados. Estas partículas aglomeradas están constituidas por óxidos de hierro con diferente color (rojo, amarillo o negro); también se utilizarán ftalocianinas cúpricas azul o verde. Los ensayos a realizar incluyen, entre otros, la determinación del tamaño de partícula predominante [22], de la densidad [23] y humedad [24] con el fin de cuantificar las características mínimas que permitan formular mezclas cementíceas [3, 25]. El material cementante elegido será el cemento portland color gris [26, 27]. Se utilizarán contenidos de aditivos químicos entre los márgenes que produzcan mínima variación del color [3] y agregados que acompañen al color de la pasta cementícea [28-31].

Elección de los moldes y su preparación

La terminación del hormigón también depende del molde, por ello se estudiarán diferentes materiales (acero, madera, plástico) y los agentes desmoldantes recomendados para estos se colocarán según indicaciones del fabricante en distintas cantidades. Los morteros preparados se colocarán en recipientes cilíndricos de 10 cm de diámetro y 3 cm de altura y la base irá remplazándose según el material del molde; en cambio, los hormigones se prepararán dentro de moldes más grandes (50 cm x 50 cm x 5 cm).

Diseño de mezclas

Se diseñarán mezclas de morteros según el procedimiento de mezclado indicado en la normativa europea EN12878 [32] y se la comparará con las especificadas en la normativa argentina IRAM 1622 [33]; como principales variables del estado fresco o endurecido se considerará la consistencia y la resistencia mecánica en morteros [33]. Para el diseño se tendrán en cuenta los parámetros relacionados con los efectos de los moldes seleccionados en el punto anterior y con la forma de colocación de las mezclas en estos.

Los parámetros de diseño incluirán estudios de mezclas realizadas con dos relaciones agua/cemento (a/c), 0,40 y 0,45, indicadas en el reglamento CIRSOC 201 para hormigones que se encuentran sometidos a ambientes agresivos en la Argentina [34]. La cantidad de cemento se mantendrá fija. Considerando estos parámetros, en el primer caso la resistencia mecánica aumentará y para mantener la misma consistencia que se obtiene con una relación a/c : 0,45 se utilizará la cantidad de aditivo superfluidificante necesaria. Una vez determinadas las proporciones de agua, cemento y superfluidificante adecuados según la consistencia, conjuntamente con el agregado fino para cada relación a/c evaluada se estudiarán diferentes pigmentos en concentraciones menores a 10% calculadas según el peso del cemento [2, 32]; si bien se considerará un extenso barrido de estos

porcentajes para realizar verificaciones en mayor escala (por ejemplo hormigones), se evaluará el porcentaje de pigmento que se corresponda con la saturación (C^*) de los agentes colorantes en morteros. Esto a los fines de correlacionar los resultados sobre Color-Molde-Mezcla con los hormigones.

Métodos y técnicas para evaluar las propiedades en estado fresco de morteros y hormigones

En morteros y hormigones se evaluará el contenido de aire [35] y exudación [36] ya que pueden ser las propiedades que, además de modificar la resistencia mecánica entre otras, genera superficies con burbujas. Se evaluarán diferentes consistencias de morteros [33] y hormigones [37].

Métodos y técnicas para evaluar las propiedades en estado endurecido de morteros y hormigones

En estado endurecido se evaluarán las propiedades mecánicas con los siguientes métodos: resistencia a la compresión y flexión de morteros [33] y hormigones [38]. Las muestras serán expuestas a diferentes condiciones de curado en laboratorio (21°C y 55 ó 95% de humedad) y exposiciones ambientales severas en atmósferas industriales.

Métodos y técnicas para evaluar los aspectos estéticos de morteros y hormigones

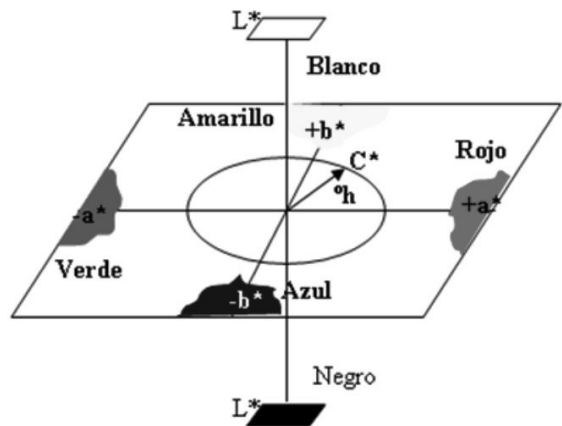
Los aspectos estéticos que se estudiarán estarán orientados a definir una metodología para evaluar superficies claras, oscuras y coloreadas [7] y la influencia del brillo de una superficie. El valor de las variables mencionadas se determinará con el espectrofotómetro BYK-Gardner. Este equipo permite evaluar el color y brillo de superficies. A su vez, el brillo se contrastará con la rugosidad medida con el rugosímetro Hommel Tester T1000 E. En primer lugar se caracterizarán estos aspectos y luego se sistematizará la información considerando diferencias de colores tolerables por el ojo humano y cuantificable según fórmulas de diferencia de color [9, 39]. También se considerará

la correlación entre los aspectos estéticos de los morteros y sus hormigones.

El color es una percepción sensorial que coexiste con tres elementos fundamentales: un objeto, un iluminante y un observador [8]. Tal como fuera indicado anteriormente, para evaluarlo se utilizará el modelo CIELAB el cual queda definido por tres variables que se representan en sistemas cartesianos o polares; en el primero se utilizan los valores L^* , a^* y b^* y, en el segundo, los parámetros luminosidad L^* , saturación C^* y tono h^* (Ver ecuación 1 y 2). El modelo se representa en un sistema ortogonal mediante un eje vertical llamado luminosidad (L^*), que indica claridad u oscuridad, y un plano horizontal conformado por los ejes a^* y b^* . El eje a^* representa la variación rojo-verde, siendo positivo para el primero ($+a^*$) y negativo para el segundo ($-a^*$). El eje b^* representa la variación amarillo-azul, siendo positivo para el primero ($+b^*$) y negativo para el otro ($-b^*$) [9, 11]. Por otro lado, la saturación está asociada a qué tan vívido es un color y el tono (h^*) es el ángulo que indica si el color es rojo (0°), amarillo (90°), verde (180°) o azul (270°). El modelo se presenta en la Figura 1. Este sistema ha permitido, además de definir el color, realizar determinaciones sobre la elección de técnicas de limpieza en fachadas construidas con piedras [40] u observar la evolución del daño en el hormigón provocado por el fuego [41]. También, permitió definir niveles de correlación del color entre morteros y hormigones [7]. Para comparar diferencias de color entre distintas muestras, evaluar la similitud o realizar reproducciones del color, se calcula el parámetro diferencia de color total (ΔE^*). Este parámetro permite juzgar niveles de diferencias de color percibidas por el ojo humano y desde 1931 la CIE continuamente está perfeccionando este indicador para acercarse con mayor exactitud a la realidad [9, 39, 42]. (ver ecuación 3).

Por otro lado el brillo es una percepción visual como resultado de la evaluación de una superficie iluminada tal que cuanto más luz directa se refleja mayor percepción del brillo se obtiene. Y es

interesante comparar los valores de rugosidad, siendo estos un conjunto de parámetros que definen el perfil de una superficie limitada. El principal parámetro es la rugosidad media aritmética (R_a) y se mide en micrómetros (ver ecuación 4), ésta es proporcional al área encerrada entre la línea media y el perfil de la rugosidad y es un parámetro que ya lo calcula el equipo. La Figura 2 muestra la superficie encerrada (A) y la longitud de medición (L_m) a fin de interpretar el concepto R_a [43].



$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$h^* = \arctg \frac{b^*}{a^*} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Figura 1. Espacio CIELAB.

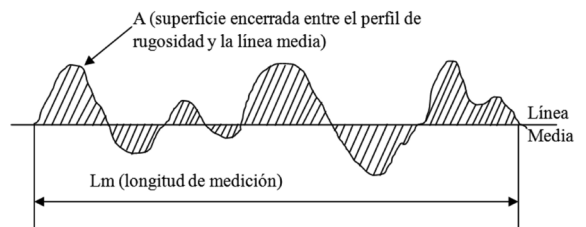


Figura 2. Perfil de rugosidad.

$$R_a = \frac{A}{L_m} \quad \text{Ecuación 4}$$

EXPERIENCIAS

Aplicación de la metodología en morteros coloreados para elaborar el atlas

Este apartado muestra el análisis de los resultados y el mecanismo de razonamiento para poder elaborar un Atlas y se lo ha ejemplificado desde el diseño de la mezcla hasta su fabricación. Para ello se realizan láminas que resumen los valores de resistencia mecánica, durabilidad y aspectos estéticos, según los pigmentos utilizados. Se elaboraron 10 morteros: uno control (c) con cemento gris G, caliza molida y tres grupos con cada uno de los pigmentos óxido de hierro de color rojo (r), amarillo (a) y negro (n), adicionados a razón de 3,5 y 7% del peso de cemento. Se empleó una relación caliza molida/cemento (f/c) en peso inicial igual a 0,80, y luego el contenido de pigmento se remplazaba por igual volumen de caliza molida por lo cual la relación f/c disminuía. La relación a/c fue de 0,50. El volumen de pasta fue de 56%.

Las propiedades físicas, la resistencia a compresión (f'c) y la composición química del cemento (G) y de la caliza molida (F) se detallan en la Tabla 1. La densidad del pigmento amarillo fue de 3,8 g/cm³, mientras que la de los pigmentos rojo o negro 4,75 g/cm³. Se utilizó una arena silícea natural de densidad 2,63 g/cm³, absorción de 0,5% y módulo de finura igual a 2,63. Se utilizó aditivo superfluidificante a base de policarboxilatos, igual a 0,30% en peso de cemento.

En estado fresco se estudió la fluidez a través de ensayos que miden el tiempo de pasaje en el embudo en V y el escurrimiento de los morteros.

No es aplicable aquí la norma IRAM 1622. En estado endurecido se estudiaron las propiedades físico-mecánicas (IRAM 1622) y durables (IRAM 1871). En lo referido a la evaluación de los aspectos estéticos de morteros y hormigones, y como se indicara en el punto Métodos y Técnicas, se realizaron mediciones de color, brillo y rugosidad.

Tabla 1. Composición química y propiedades físicas del cemento y de la caliza molida.

Composición química			Cemento	Caliza molida
			G	F
CaO	%		61,4	50,2
SiO ₂			21,7	9,2
Al ₂ O ₃			4,0	1,1
Fe ₂ O ₃			4,1	0,7
SO ₃			2,9	0,1
MgO			1,1	0,3
K ₂ O			0,9	0,4
Na ₂ O			0,2	0,1
PPC			3,3	37,8
f'c		1 d	(MPa)	-
	28 d	(MPa)	53,6	-
Densidad		(g/cm ³)	3,10	2,80
Sup. Blaine		(m ² /kg)	350	1037

Para estas evaluaciones se llenaron recipientes de plástico con cada serie de mortero. Los morteros se colaban sin compactación. Se analizaron las caras en contacto con el molde (m) y las caras expuestas al aire (e), estas últimas sin ningún agente desmoldante en el molde o algún alisado.

La Tabla 2 muestra las proporciones de materiales utilizados en los morteros. El mortero control se identifica como c y los morteros coloreados en función del color y porcentaje de pigmento.

Para analizar el efecto de la incorporación de distintos tipos y contenidos de pigmento en el estado fresco, se determinaron los valores de tiempo de pasaje (TP) medido en el embudo en V y los valores de diámetro final (DF) obtenidos con el cono para escurrimiento. El tiempo de pasaje se obtiene midiendo el tiempo que tarda el mortero en escapar del embudo luego de abrir una trampa, dicho ensayo se repite tres veces y se promedian los valores [7, 45]; y el diámetro final se obtiene llenando el cono con mortero [7, 45], luego se levanta y, cuando el mortero deja

Tabla 2. Proporciones de materiales en morteros con pigmentos r, a y n.

Mortero	f/c	p/c (%)	Agua	Cemento	Caliza Molida	Pigmento	Arena
			(kg/m ³)				
c	0,80	0	251	502	402	0	1165
r3	0,78	3			393	15	
r5	0,77	5			387	25	
r7	0,76	7			381	35	
a3	0,78	3			391	15	
a5	0,76	5			383	25	
a7	0,75	7			376	35	
n3	0,78	3			393	15	
n5	0,77	5			387	25	
n7	0,76	7			381	35	

de escurrir, se miden dos diámetros ortogonales. Estos parámetros dan una idea de la viscosidad y movilidad, respectivamente. El mortero sin pigmento (c) alcanzó parámetros iguales a 4,0 s y 318 mm. El uso de pigmento rojo (r) ocasionó variaciones mínimas de TP en el orden del 5% y los pigmentos amarillo (a) o negro (n) incrementos del 20%. El TP obtenido con el pigmento rojo se mantuvo en 4,0 s; con el amarillo aumentó de 4,4 a 5,3 s y con el pigmento negro de 5,4 a 6,5 s. En cuanto al escurrimiento, el incremento de pigmento rojo (r) no provocó cambios significativos (r3 sólo cambió un 2% respecto al mortero c y los pigmentos color amarillo (a) y negro (n) dieron disminuciones del 25% y 17%, respectivamente. Los aumentos de TP y las disminuciones de DF verificaron las modificaciones de la viscosidad y movilidad provocadas por incrementos de los pigmentos amarillo y negro. Esto no sucedió para contenidos menores de pigmentos a y n. Mientras el pigmento rojo tuvo un efecto similar al que provoca el filler, los pigmentos amarillo y negro, en especial para reemplazos del 5 ó 7%, provocaron cambios importantes. Esto sugiere la posibilidad de disminuir el contenido de filler calizo si es necesario mantener los parámetros de TP y DF del mortero c. Por otro lado, las determinaciones del peso unitario (PU) con los pigmentos rojo o amarillo

estuvieron comprendidas entre 2100 y 2150 kg/m³ mientras que con el pigmento negro disminuyó a valores entre 2050 y 2090 kg/m³. Esta disminución sugiere que con el uso de pigmento negro hubo un incremento del contenido de aire y se corresponde con los aumentos de TP. Los cambios en el contenido de aire conllevan modificaciones en el estado endurecido como pueden ser, en este caso, disminución de la resistencia y densidad, mayor absorción y sus consecuentes probabilidades de menor durabilidad. En cuanto a la resistencia a compresión varió entre 35 y 45 MPa, lo que puso en evidencia que tampoco puede desatenderse el efecto de distintos contenidos de pigmento sobre la resistencia. En el caso del pigmento rojo la resistencia disminuyó ligeramente y ocurrió lo contrario cuando aumentó el contenido de pigmento amarillo. En el primer caso no se detectaron diferencias en el peso unitario en estado fresco pero las modificaciones en los valores de succión capilar podrían indicar diferencias en el tamaño de poros. Por su parte la forma angulosa de las partículas del pigmento amarillo podría justificar un ligero aumento de la resistencia. Los morteros con pigmento negro fueron menos resistentes y se lo atribuyó a un claro incremento en el contenido de aire. Los resultados de resistencia a flexión son consistentes con los obtenidos en compresión y el

módulo de rotura fue en promedio 7,5 MPa. La densidad y la absorción fueron iguales a 1,8 g/cm³ y 10%, respectivamente.

En general no se apreciaron cambios significativos en los valores de succión capilar. La capacidad de succión aumentó pronunciadamente de 4405 a 5400 g/m² cuando se incrementó el pigmento rojo y no ocurrió lo mismo con el uso de pigmento amarillo o negro. Sin embargo la velocidad de succión capilar aumentó en todos los casos para los mayores contenidos de pigmento, lo que puede indicar nuevamente alguna diferencia en la distribución de poros.

En la Tabla 3 se detallan la luminosidad L*, la saturación C*, el tono h*, el brillo B y la rugosidad media aritmética Ra de los morteros. Se analizaron caras en contacto con los moldes (m) y caras expuestas al aire (e). Los desvíos estándar fueron mínimos y de similar magnitud en ambas caras. En este caso se utilizaron muestras cilíndricas (h:35mm; d:70mm) y una densidad de medición en ambas superficies igual a 0,068 medidas/cm².

El mortero c mostró menor valor de L* en la cara m (71.7) que el medido en la cara e. Cuando el contenido de pigmento rojo aumentó, L* disminuyó de 50,7 a 45,4, C* de 21,8 a 31,4 y h* varió entre 30° y 35°, en la cara m. Los valores de L*, C* y h*

en la cara m fueron similares a los registrados en la cara e. Con el uso de mayor contenido de pigmento amarillo, disminuyeron los valores de L* (68,6-59,4) conforme aumentó C* (25.9-37.1) y el tono varió entre ángulos de 81,1° y 73,2°. En la cara e de los morteros rojos o amarillos, L* y C* variaron de la misma forma que en la cara m, sin embargo el rango de variación fue menor y h* permaneció muy similar. Cuando se utilizó pigmento negro las variaciones de L* y C* fueron muy diferentes a las mencionadas anteriormente; mientras L* disminuyó, C* fue de magnitud constante e inferior a los valores medidos en los morteros con pigmento r y a. L* disminuyó de 54,2 a 49,6 en la cara m y manifestó un fuerte oscurecimiento de 44,9 a 37,2 en la cara e. Dicha disminución se atribuyó a la segregación de pigmento observada en el ensayo de escurrimiento de morteros, que dio lugar a una acumulación en la superficie en contacto con el aire. Esta elevada disminución da cuenta de que puede producirse una importante variación del color cuando se use pigmento negro según las diferentes caras de contacto, por lo que puede ser recomendable corroborar el color en estudios sobre morteros.

A su vez, los valores de brillo B mostraron un comportamiento aleatorio. Los valores medidos en las caras en contacto con el molde (m) y expuestas al aire (e) se encontraron con mayor repetición,

Tabla 3. Color, brillo y rugosidad en morteros con pigmentos r, a y n.

M	Cara en contacto con molde (m)					Cara expuesta al aire (e)				
	L*	C*	h*	B	Ra	L*	C*	h*	B (%)	Ra μ m)
c	71,7	4,1	79,6	6,27	1,15	74,4	5,1	79,1	8,82	0,51
r3	50,7	21,8	30,2	0,89	0,08	53,2	26,7	31,1	1,10	1,6
r5	45,8	31,4	35,0	0,85	1,54	49,0	28,0	31,4	1,72	3,42
r7	45,4	33,3	35,1	0,84	1,17	45,2	30,9	32,2	1,45	0,15
a3	68,6	25,9	81,1	7,11	0,74	69,2	32,2	79,1	22,12	0,70
a5	68,4	32,8	77,9	2,71	1,05	63,8	34,4	76,8	1,27	2,68
a7	59,4	37,1	73,2	0,82	1,57	62,4	33,7	74,5	2,32	3,43
n3	54,2	0,9	100,5	2,41	1,19	44,9	0,20	102,7	2,22	1,10
n5	57,2	1,2	244,0	1,44	1,33	40,8	0,40	249	3,62	1,64
n7	49,6	2,1	250,8	1,18	1,26	37,2	1,60	258,6	0,84	1,46

entre los límites marcados por 0,82 y 3,62 y algunos casos esporádicos desde 6,27 hasta 22,1. Es probable que los elevados valores de brillo en la cara expuesta al aire se deban a la acumulación de partículas en la superficie que aumenta la posibilidad de reflejar más luz, sin embargo es un suceso que no se repite en todos los casos. Por otro lado, era de esperar que el brillo obtenido en las superficies en contacto con el molde fueran más brillosas debido al carácter impermeable que tienen el plástico sin embargo sucedió lo contrario. Independientemente de la aleatoriedad registrada en el brillo, los resultados son consistentes con los obtenidos en la rugosidad (Ra) o sea que elevados valores de brillo (B) fueron consistentes con menores valores de Ra. Dicho de otra forma, esto significa que a mayor brillo corresponde menor rugosidad. Esta menor rugosidad está dada por la gran acumulación de partículas una al lado de la otra y consecuente disminución de la superficie encerrada entre el perfil de rugosidad y la línea media. Por último, es difícil con los datos obtenidos definir cuál es el parámetro B y Ra que caracterizan a las superficies analizadas. Quizá prescindir del agente desmoldante, sustancia utilizada para homogeneizar superficies, y del tratamiento sobre la cara expuesta, como ser un simple alisado, es causal de la heterogeneidad de las mezclas cementíceas desde el punto de vista estético.

Luego de este desarrollo experimental y análisis de los resultados se diagraman las Láminas 1 (rojo), Lámina 2 (amarillo) y Lámina 3 (negro) que son una alternativa de información sistematizada. Se presentan graficados los parámetros relacionados con el color: Saturación C^* y Luminosidad L^* con el incremento de pigmento (p/c) y luego se comparan los valores de diferencia de color total entre cada contenido de pigmento, esto para ambas caras estudiadas. Se grafica el Brillo B y la Rugosidad Ra también con el incremento de pigmento. Estas gráficas fueron realizadas para las caras en contacto con el molde (m) y expuestas al aire (e). En cada lámina se incluye una tabla con las propiedades en estado fresco o endurecido.

Como ejemplo, si resulta que es necesario llenar un elemento que debe reunir una apariencia superficial rojiza, observando en la lámina 1 podemos utilizar entre 5 y 7 % de pigmento rojo en peso del cemento ya que en estos márgenes la saturación no se ve modificada al igual que la luminosidad.

En la Tabla quedan indicadas las características principales en estado fresco y estado endurecido que se obtienen con morteros realizados con materiales bien conocidos. (ver Láminas 1).

CONSIDERACIONES FINALES

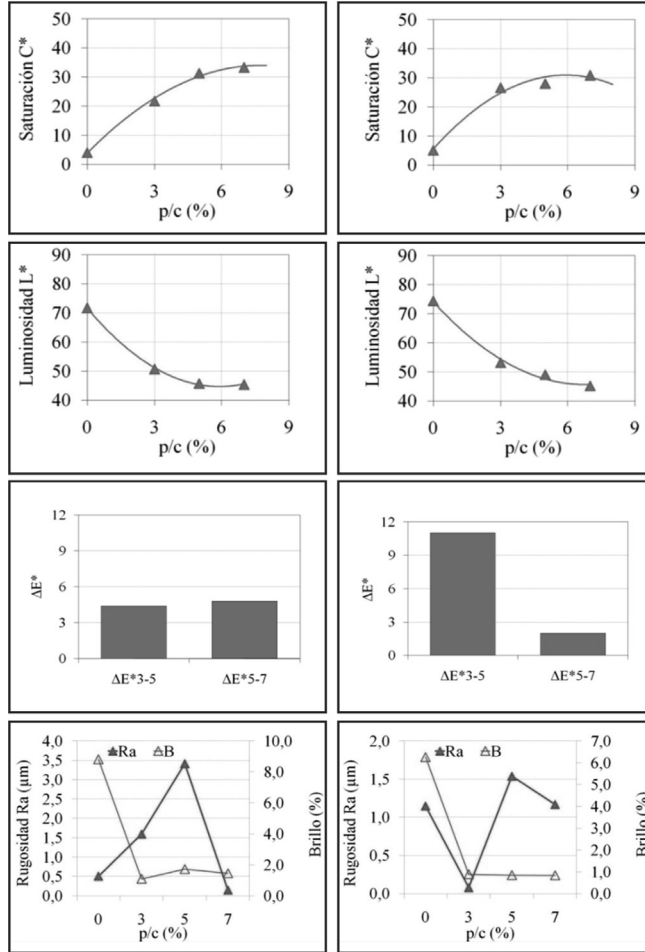
El Hormigón Arquitectónico es aquel que genera impacto visual debido a su apariencia estética. Dicha apariencia está valorada por su blancura o color, además de su textura. Para embellecer la superficie se prefieren dos materiales de construcción: el cemento blanco y los pigmentos óxidos de hierro. Además, son muy importantes las características de la superficie que estará en contacto con el hormigón ya que el color y la textura serán diferentes para la misma mezcla. A su vez, debe cumplir propiedades que permitan su transporte, colocación, compactación y durabilidad. Este trabajo presentó una metodología que permite abordar rápidamente lo expuesto. En primer lugar fija los parámetros de diseño que involucran al cemento y al pigmento, principales causantes del color; luego indica las técnicas para evaluar las propiedades en estado fresco o endurecido y profundiza sobre los aspectos estéticos. Aquí, el color, el brillo y la rugosidad protagonizan la apariencia de la superficie, que se verifica con inspecciones visuales. Por último, se elaboran las láminas que se incluirán en el Atlas.

La metodología propuesta fue ejemplificada con un grupo de morteros coloreados con 3, 5 y 7 % de pigmentos óxidos de hierro rojo, amarillo o negro. Los caracterizó una elevada fluidez y moderada viscosidad y resistencia a compresión entre 35 y 45 MPa, entre otras propiedades; como es de esperar, a medida que aumenta el contenido de pigmento

Lámina 1. Pigmento Rojo

Color	Pigmento/Cemento	Agua/Cemento	Caliza Molida/Cemento	Superfluidificante/cemento	Volúmen de Pasta
Rojo	p/c (%)	a/c	f/c	Sp/c (%)	(%)
	3, 5, 7	0,50	0,80, 0,78, 0,77, 0,76	0,30	56

Cara en contacto con el molde (m)

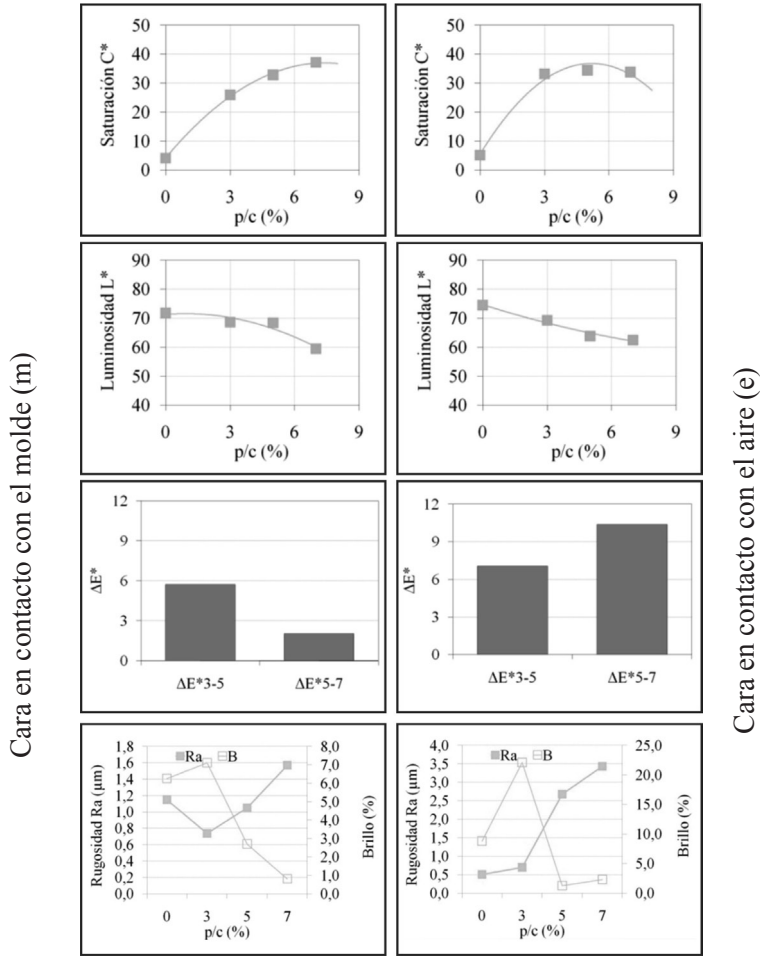


Cara en contacto con el aire (e)

Morteros	Estado Fresco			Estado Endurecido					
	FT	SF	PU	Resist. Compresión	Módulo de Rotura	Dsss	Abs	C	S
	(s)	(mm)	(kg/m ³)						
c	4,0	318	2073	40,9	7,7	1,83	9,5	4405	5,48
r3	3,8	325	2110	44,6	8,4	1,80	9,6	4096	5,02
r5	4,0	320	2127	42,1	8,0	1,83	9,9	5072	5,88
r7	4,0	313	2114	37,7	7,3	1,84	9,7	5386	5,82

Lámina 2. Pigmento Amarillo

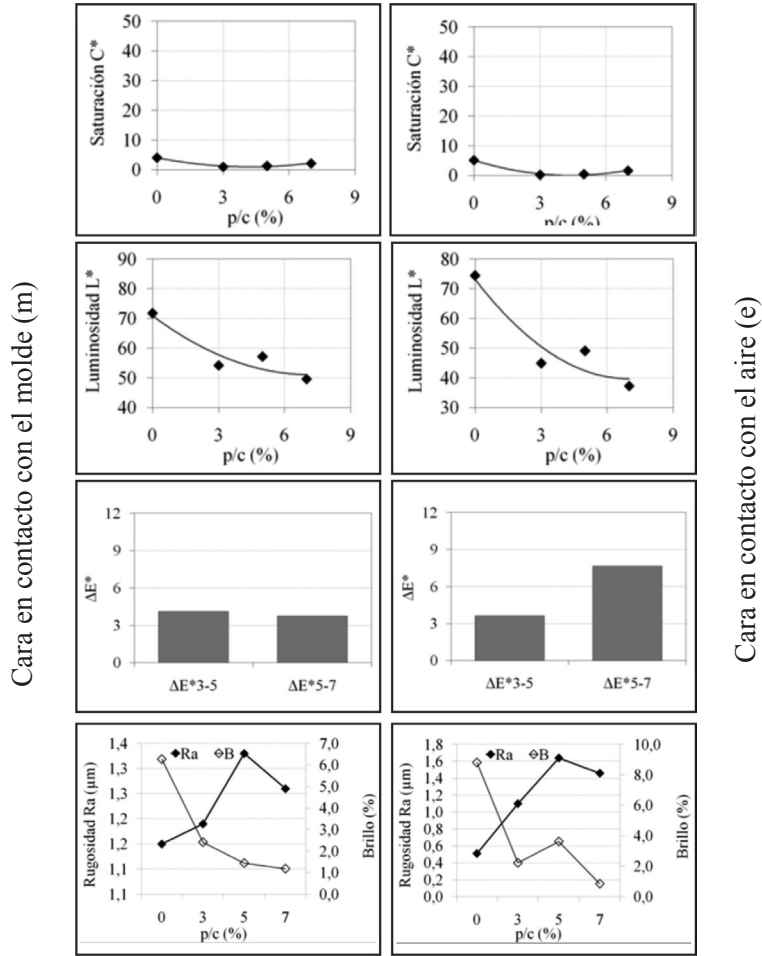
Color	Pigmento/ Cemento	Agua/ Cemento	Caliza Molida/Cemento	Superfluidificante/ cemento	Volúmen de Pasta
Amarillo	p/c (%)	a/c	f/c	Sp/c (%)	(%)
	3, 5, 7	0,50	0,80, 0,78, 0,77, 0,75	0,30	56



Morteros	Estado Fresco			Estado Endurecido					
	FT	SF	PU	Resist. Compresión	Módulo de Rotura	Dsss	Abs	C	S
	(s)	(mm)	(kg/m ³)	(MPa)	(MPa)	(g/cm ³)	(%)	(g/m ²)	(g/m ² /s ^{1/2})
c	4,0	318	2073	40,9	7.7	1,83	9,5	4405	5,48
r3	4,4	315	2096	35,5	7.6	1,85	10,0	4605	5,17
r5	4,5	291	2127	37,4	7.7	1,85	9,9	4847	5,03
r7	5,3	265	2131	40,4	7.7	1,86	9,8	4787	5,62

Lámina 3. Pigmento Negro

Color	Pigmento/ Cemento	Agua/ Cemento	Caliza Molida/Cemento	Superfluidificante/ cemento	Volúmen de Pasta
Negro	p/c (%)	c/a	f/c	Sp/c (%)	(%)
	3, 5, 7	0,50	0,80, 0,78, 0,77, 0,75	0,30	56



56

Morteros	Estado Fresco			Estado Endurecido					
	FT	SF	PU	Resist. Compresión	Módulo de Rotura	Dsss	Abs	C	S
	(s)	(mm)	(kg/m ³)						
c	4.0	318	2073	40.9	7.7	1.83	9.5	4405	5.48
r3	5.4	320	2039	38.4	7.3	1.89	9.8	4515	5.15
r5	5.6	292	2062	39.3	7.1	1.88	9.8	4628	5.17
r7	6.5	265	2080	39.7	7.2	1.87	9.6	4421	5.13

rojo o amarillo la saturación se incrementa y la luminosidad disminuye. Con el incremento de pigmento negro sólo disminuye la luminosidad. El parámetro diferencia de color total permite juzgar el nivel de variación del color que existe entre dos contenidos diferentes de pigmento, y sigue siendo muy útil para decidir sobre el contenido óptimo de pigmento.

Por último, el brillo y la rugosidad presentaron resultados muy aleatorios para afirmar el tipo de influencia que tienen los moldes y tratamientos sobre la terminación superficial.

AGRADECIMIENTOS

A las autoridades del Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT), Ing. Luis Traversa e Ing.

Ángel Di Maio que permiten desarrollar en dicha institución el plan de Beca Postdoctoral. A CONICET que otorgó la Beca y también al Dr. Romagnoli por facilitar equipamiento del Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología de Pinturas (CIDEPINT).

Los resultados presentados fueron posibles a la desinteresada colaboración del personal del LEMIT y del CIDEPINT.

Algunos de los resultados aquí presentados se corresponden con los datos publicados en el capítulo 4 “Diseño del Hormigón Autocompactante Coloreado” de mi trabajo de Tesis Doctoral dirigido por Dr. Raúl Zerbino y Co-dirigido por Ing. Ángel Oshiro, a quienes también les agradezco por la dedicación en esa labor.

REFERENCIAS

- 1.- Humberto B, Pereira M. Concreto: Forma, Textura e Cor. En Concreto Ensino, Pesquisa e Realizações. Brasil: IBRACON; 2005:1413-1451.
- 2.- Benítez A, Bálsamo H. Hormigones arquitectónicos: blanco y coloreado. En Hormigones Especiales. La Plata, Argentina: Autoeditor; 2004: 309-330.
- 3.- Püttbach E. Pigments for the Colouring of Concrete-Questions of Quality, BFT/Concrete Precasting Plant and Technology. 1992; 10, en www.BFT-online.info.
- 4.- Bennett D F H. Innovations in Concrete. London: Thomas Telford; 2002.
- 5.- Bennett D F H. The Art of precast concrete, colour texture expression Birkhäuser – Publishers for Architecture. Basel, Switzerland: Birkhauser Verlag AG; 2005.
- 6.- Expertunforum Sichtbeton. Sichtbeton-Architektur pur. 2007: 64 p.
- 7.- López A. “Diseño y Caracterización del Hormigón Autocompactante Coloreado”. Tesis doctoral. Universidad Nacional de La Plata. 2012. 189 p.
- 8.- Lozano R D. El color y su medición. Bs As: Américalee S.R.L; 1978.
- 9.- CIE 15. Technical Report draft. Colorimetry. 3 Edition. 82 p.
- 10.- Hunter R S. The Measurement of Appearance. New York: John Wiley & Sons; 1975

- 11.- Lozano R D. A new approach to appearance characterization. *Color Res Appl* 2006;31:164-167.
- 12.- Ostwald, citado por Caivano J L. Armonías del color. *GAC Revista* 2004;7,19, abril: 1-21.
- 13.- Munsell Book of Color. Neighboring Hues Edition. Matte Finish Collection, 1970: 48.
- 14.- Villalobos Domínguez C, Villalobos J. Atlas de los colores. Bs As: El Ateneo; 1947.
- 15.- NCS – the international language of colour for specification, communication and control of colour in design, architecture, education, research, marketing and manufacturing: 42.
- 16.- CIB REPORT NO 24 “Tolerances on Blemishes of Concrete”, Report Prepared By Cib Working Commission W29 Concrete Surface Finishings, 1977: 14.
- 17.- Freimann T., “Sichtbetonbauwerke, Besonderheiten für Planung und Ausführung nach aktuellem Regelwerk”. Gerorg-Simon-Ohm Hochschule Nürnberg. 18p.
- 18.- Schulz J., Basic principles of exposed concrete evaluation. *CPI-Concrete Plant International*, 2006; 5, October: 140-144.
- 19.- Lemaire G, Escadeillas G, Ringot E. Evaluating concrete surfaces using an image analysis process. *Const Build Mat* 2005; 19, 8: 604-611.
- 20.- Betonflächen und Schalungshaut. Kommentar zur DIN 18217 von Jürgen Schmidt-Morsbach von Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften. 1985.
- 21.- Tobes, J.M., “Hormigones Autocompactantes simples y reforzados con fibras: diseño, caracterización y aplicaciones. Tesis doctoral. Universidad Nacional de La Plata. 2009. 262p.
- 22.- ASTM D 185 Test Methods for Coarse Particles in Pigments, Pastes, and Paints.
- 23.- ASTM D 153 Standard Test Methods for Specific Gravity of Pigments
- 24.- ASTM D 280 Test Methods for Hygroscopic Moisture (and Other Matter Volatile Under the Test Conditions) in Pigments.
- 25.- Cornell R M, Schwertmann U. Introduction. En *Industrial Inorganic Pigments*, editado por G. Buxbaum y G. Pfaff. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA. 2006.
- 26.- IRAM 1504: 1986. Cemento pórtland. Análisis químico.
- 27.- IRAM 1624: 2005. Cemento. Método de ensayo para la determinación de la densidad.
- 28.- IRAM 1512: 1994. Agregado fino natural para hormigón de cemento portland.

- 29.- IRAM 1533: 2002. Agregados gruesos. Método de laboratorio para la determinación de la densidad relativa real, de la densidad relativa aparente y de la absorción de agua.
- 30.- IRAM 1520: 2002. Agregados finos. Métodos de laboratorio para la determinación de la densidad relativa real, de la densidad relativa aparente y de la absorción de agua.
- 31.- IRAM 1647: 1994. Agregados para hormigón de cemento portland. Métodos de ensayo.
- 32.- EN 12878: 2005. Pigments for colouring of building materials based on cement and/or lime -Specification and methods of test.
- 33.- C ASTM 1437: 2007. Standard test method for flow hydraulic cement mortar. IRAM 1622: 2002. Cemento portland. Determinación de resistencias mecánicas.
- 34.- Reglamento CIRSOC 201. Reglamento de estructuras de hormigón. INTI. Julio 2005.
- 35.- IRAM 1602-1/1602-2: 1988. Hormigón fresco. Contenido unitario de aire. Método de presión.
- 36.- IRAM 1604: 2003. Hormigón. Método de ensayo para determinar la exudación.
- 37.- IRAM 1536:1978. Hormigón fresco de cemento pórtland. Método de ensayo de la consistencia utilizando el tronco de cono.
- 38.- IRAM 1546: 1992 Hormigón de cemento pórtland. Método de ensayo de compresión.
- 39.- Melgosa M M, Huertas R, Relative significance of the terms in the CIEDE2000 and CIE94 color-difference formulas. Optical Society of America 2004; 21,12: 1-7.
- 40.- Fort R F, Mingarro M C, López J, Rodríguez B. Chromatic parameters as Performance Indicator for Stones Cleaning Techniques. Color Res and Appl 2000; 25: 442-446.
- 41.- Annerel E., Taerwe L., Methods to quantify the colour development of concrete exposed to fire. Const Build Mater. 2011; 25: 3989-3997.
- 42.- Sharma G, Wu W, Dalal N. Color-Difference Formula: Implementation Notes, Supplementary Test Data, and Mathematical Observations CIE. Color Res Appl 2000;30: 21-30.
- 43.- Manuel Hommel Tester T1000 E.
- 44.- IRAM 1871. Hormigón. Método para la determinación de la capacidad y velocidad de succión capilar de agua para hormigón endurecido.
- 45.- Okamura, H. y Ouchi, M. Self-compacting Concrete. Journal of Advanced Concrete Technology, 2003; 1, 1: 5-15.

MORTEROS ELABORADOS CON AGREGADO FINO RECICLADO CON DIFERENTES CONDICIONES DE HUMEDAD

MORTARS MADE WITH RECYCLED FINE AGGREGATE IN DIFFERENT STATE OF MOISTURE

M.E. Sosa¹, C.J. Zega², Á.A. Di Maio³

1.- CIC - LEMIT. ingmesosa@gmail.com

2.- Investigador Adjunto CONICET-LEMIT.

3.- Investigador Independiente CONICET-LEMIT. hormigones@lemit.gov.ar

RESUMEN

La escasez de arenas naturales aptas para la elaboración de hormigones es una problemática que se presenta habitualmente en la provincia de Buenos Aires poniendo de manifiesto la necesidad de utilizar arenas de trituración. Como agravante a esta situación, en dicha provincia rige la Ley 14126 que prohíbe la apertura de nuevas canteras y establece el cese de explotación de las existentes en el partido de Tandil. Frente a estos hechos, la utilización de agregados reciclados provenientes de la trituración de hormigones que culminaron su vida en servicio se presenta como una alternativa sustentable y económica. Los agregados reciclados presentan como característica distintiva, frente a los agregados naturales, que pueden estar constituidos por agregado natural y mortero en proporciones variables. Como consecuencia de este hecho, poseen mayor absorción y menor densidad, siendo su textura superficial más porosa. En este trabajo se estudia en estado fresco fluidez, evaluada al finalizar el mezclado y a los 20 minutos de culminado el mismo y aire ocluido en estado endurecido densidad, absorción de agua y resistencia a compresión, de morteros de diferentes relaciones agua/cemento (0,40, 0,50 y 0,60) elaborados con distintos porcentajes (20 y 40% en volumen) de agregado fino reciclado (AFR) proveniente de la trituración de hormigones de desecho. El AFR fue empleado en dos condiciones de humedad. Los resultados obtenidos en los morteros con AFR son comparados con los determinados en morteros elaborados con arena de trituración granítica (AG) en idénticos porcentajes. De los resultados obtenidos surge que los morteros elaborados con AFR poseen mayor consistencia y absorción y menor densidad, presentando similares niveles resistentes, independientemente del contenido de humedad del AFR.

Palabras clave: *agregado fino reciclado, arena de trituración, absorción, resistencia.*

ABSTRACT

The scarcity of natural sands, suitable for the production of concrete, is a usual problem in the Buenos Aires province, highlighting the need for use of crushing sand. Exacerbating this situation, the provincial law 14126 prohibits the opening of new quarries and establishes the cessation of operation for those existing in the zone of Tandil. In these circumstances, the use of recycled aggregates from crushing concretes which completed their service life is presented as a sustainable economic alternative. Recycled aggregates have as a distinctive feature compared to natural aggregates, the possibility of being constituted by natural aggregate and mortar in varying proportions. As a consequence, they have higher absorption and lower density, and its surface texture is more porous. In this work fluidity is studied in fresh state, evaluated at the end of mixing and 20 minutes after mixing completion, and entrained air, and in hardened state density, water absorption and compressive strength of mortars of different water / cement ratios (0.40 0.50 and 0.60) prepared with different percentages (20 and 40% by volume) of recycled fine aggregates (RFA) from the waste concrete crushing. The RFA was applied under two different moisture conditions. The results obtained in mortars with RFA are compared with those determined in mortars made with granitic sand grinding (GSG) in identical percentages. From the results obtained it is possible to conclude that the mortars made with RFA possess more consistency and absorption and lower density, presenting similar resistant levels, independently of the moisture content of the RFA.

Keyword: *recycled fine aggregate, crushing sand, absorption, strength.*

INTRODUCCIÓN

62

La escasez de arenas naturales aptas para la elaboración de hormigones es una problemática que comparten varios países a nivel mundial. [Cabrera, et al; 2011] En este contexto es habitual incorporar arenas de trituración (AT) para cumplimentar con los requisitos granulométricos establecidos en los reglamentos.

Por otra parte, la necesidad de un tratamiento más integral de los residuos de construcción y demolición, evitando la masificación de vertederos y contribuyendo a la disminución de materias primas, hicieron que la utilización de éstos como agregados para la elaboración de hormigones sea una realidad en países con políticas ambientales claras y eficientes.

En particular, la utilización de agregados gruesos reciclados (AGR) provenientes de la trituración de hormigones que culminaron su vida en servicio ha sido abordada desde diferentes enfoques durante las últimas décadas, concluyendo en general que es posible la utilización del AGR en distintos

porcentajes, sin detrimento de las características mecánicas y durables de los hormigones con ellos elaborados [Hansen; 1983, Zega; 2010]. Lo cual ha posibilitado que en distintos países se dictaran normativas y/o recomendaciones para el uso de este residuo.

La utilización del AFR fue en un principio descartada, por considerar que su mayor absorción puede traer aparejado una merma en la trabajabilidad, mayor contracción y creep, y menor durabilidad del hormigón [Hansen; 1986]. Sin embargo, dado que durante la producción del AGR se genera de un 20 a 50% de AFR [Martins, et al; 2013], cuyo control y disposición es más complejo, son diversos los estudios que se están llevando a cabo para evaluar su viabilidad [Zega, et al; 2010, Dominguez y Mantegna; 2012, Ulsen, et al; 2013]. En ellos se puede encontrar que los AFR presentan partículas que pueden estar compuestas de mortero y agregado natural en proporciones variables, presentando forma irregular, textura superficial rugosa, menor densidad y mayor

absorción de agua, pérdida por ataque con sulfatos frente a las arenas naturales de trituración.

Respecto al empleo del AFR en morteros y hormigones, en la bibliografía existente resulta contradictoria su influencia, pudiendo encontrarse que la utilización en distintos porcentajes no produce modificaciones significativas en la resistencia del hormigón y el módulo de elasticidad, ni pone en peligro las características durables del mismo [Dhir, et al; 1999, Evangelista y de Brito; 2004, Sosa, et al; 2012, Zega y Di Maio; 2011]. Otros autores por su parte, encontraron que la resistencia, módulo de elasticidad, contracción y distintas propiedades durables se ven comprometidas seriamente al utilizar AFR, aún en porcentajes menores al 30% [Masood, et al; 2002, de Brito et al; 2005].

El objetivo de este trabajo es evaluar las modificaciones que pudieran ocurrir en diferentes propiedades en el estado fresco y endurecido de morteros debido al empleo de AFR en distintas condiciones de humedad. Para ello se evalúa la fluidez a través del ensayo de extendido en estado fresco y el contenido de aire teórico, y en estado endurecido densidad, absorción y resistencia a compresión, comparándose los resultados con los obtenidos en idénticos morteros elaborados con AG.

EXPERIENCIAS

Materiales y mezclas

Se seleccionó un agregado fino reciclado (AFR) proveniente de la trituración de hormigones de desecho y una arena de trituración granítica (AG). Previa determinación de las propiedades, se procedió a la observación visual y mediante lupa binocular de los agregados de trituración (Figura 1), en donde se puede observar que ambas arenas presentan forma angular y textura superficial rugosa, siendo el AFR mucho más poroso que el agregado granítico

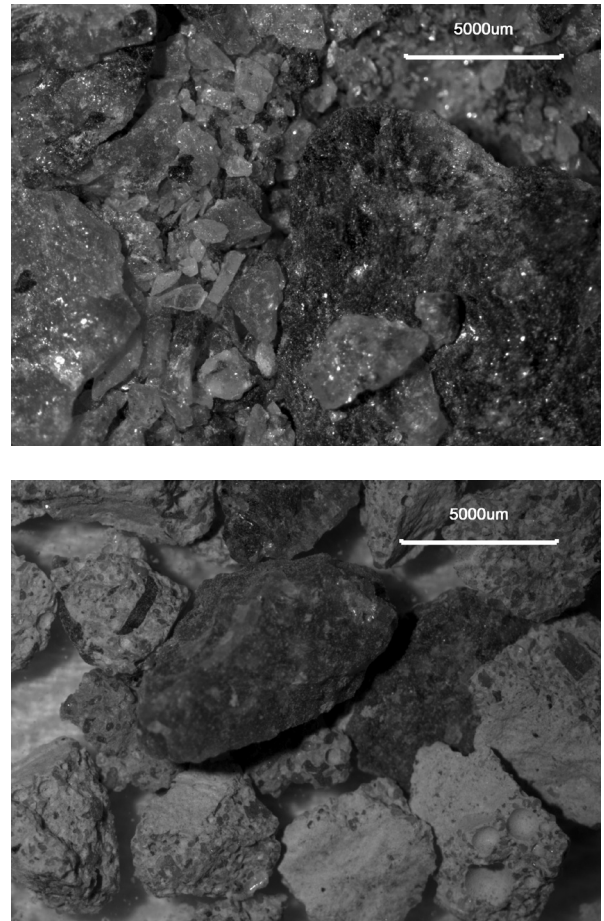


Figura 1. Imágenes tomadas mediante lupa binocular. (Arriba AG; Abajo. AFR)

Se elaboraron mezclas de arena silícea de río con 20 y 40% en peso de AFR a las cuales se le determinó granulometría (IRAM 1505), densidad y absorción de agua (IRAM 1520), material que pasa el tamiz 75 µm (IRAM 1540) y durabilidad por ataque con sulfato de sodio (IRAM 1525). Los resultados obtenidos se compararon con los determinados en mezclas elaboradas de manera análoga con 20 y 40% de la AG. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 1, y las curvas granulométricas de cada combinación junto con los límites establecidos en el CIRSOC 201-2005, en la Figura 2.

Para la elaboración de los morteros se utilizó cemento Portland compuesto y aditivos

Tabla 1. Propiedades de los agregados.

Agregado	Módulo de finura	Pasa tamiz 75 µm (%)	Densidad relativa	Absorción (%)	Pérdida por ataque con sulfato (%)
AG 20	1,68	0,55	2,67	0,20	2,43
AG 40	2,20	0,77	2,69	0,25	2,30
AFR 20	1,81	1,66	2,61	1,68	4,87
AFR 40	2,22	2,19	2,58	1,95	7,33

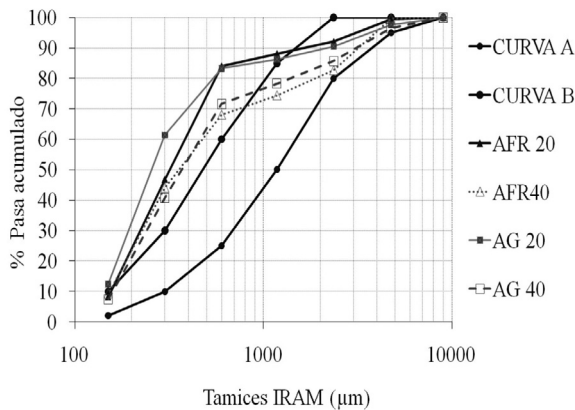


Figura 2. Granulometrías de los agregados.

plastificante y superplastificante. Los AFR se incorporaron en dos condiciones de humedad, secos y con el 50% del agua de absorción, puesto que es aproximadamente el porcentaje que los mismos absorben a 10 min.

En la Tabla 2 se presentan las dosificaciones de los morteros elaborados. La nomenclatura corresponde a la relación agua/cemento (a/c) utilizada (4, 5 y 6 para 0,40, 0,50 y 0,60 respectivamente) seguida

de la letra G o R, según el tipo de agregado de trituración, finalizando con el porcentaje de reemplazo utilizado (20 o 40%). En las figuras, los morteros en los cuales se incorporó el agua de absorción se indican con la letra A (ej.: M4 RA40).

Se evaluó en estado fresco, la fluidez inicial, al concluir el mezclado, y a los 20 minutos de finalizado el mismo, a fin de establecer la influencia del estado de humedad de los agregados. Se moldearon probetas de 4x4x16 cm, las cuales fueron curadas en agua con cal hasta la edad de ensayo. En estado endurecido se evaluó densidad y absorción de agua, y resistencia a compresión, siendo cada valor informado, el promedio de al menos 3 determinaciones.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados de extendido se presentan en la Figura 3. Puede observarse que los morteros con AFR presentan menor extendido que los elaborados con AG, aún cuando se incorpora el agua de absorción, lo que puede atribuirse a la

Tabla 2. Proporción de los materiales (Kg/m³).

Materiales	M4 N20	M4 N40	M5 N20	M5 N40	M6 N20	M6 N40	M4 R20	M4 R40	M5 R20	M5 R40	M6 R20	M6 R40
Agua	263	263	263	263	263	263	263	263	263	263	263	263
Cemento	663	663	528	528	437	437	663	663	528	528	437	437
Arena de río	1111	834	1203	903	1258	949	1111	834	1203	903	1258	949
AG	289	578	313	623	337	660	---	---	---	---	---	---
AFR	---	---	---	---	---	---	245	490	266	531	286	560
Plastificante	3,3	3,3	2,9	2,9	2,6	2,6	3,3	3,3	2,9	2,9	2,6	2,6
Superplastificante	2,0	2,0	1,6	1,6	1,3	1,3	2,0	2,0	1,6	1,6	1,3	1,3

mayor rugosidad superficial que poseen los AFR frente a la AG utilizada. También es evidente que al incorporar el agua de absorción los morteros con AFR y AG presentan un comportamiento similar, por cuanto los que poseen 40% de AT, ya sea natural o reciclada, presentan para una misma relación a/c mayor extendido, hecho que podría atribuirse a un mayor módulo de finura de la granulometría resultante (ver Figura 1). En

El contenido de aire evaluado en forma teórica se presenta en la Figura 5. De ella surge que los morteros elaborados con AFR contienen más aire que los elaborados con AG. También se observa que los morteros en los que no se incorporo el agua de absorción, al igual que los elaborados con el agregado AG, presentan para el 40% de reemplazo un contenido de aire significativamente menor que al utilizar 20% de arena de trituración, mientras

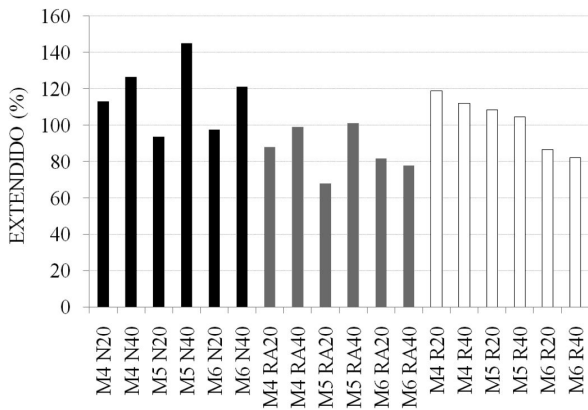


Figura 3. Extendido.

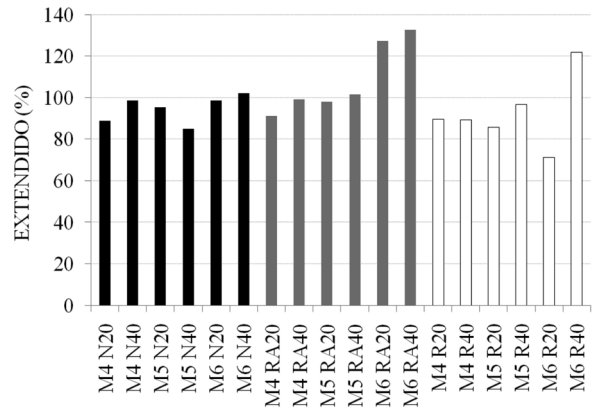


Figura 4. Extendido a 20 minutos del mezclado.

los morteros con AFR en los que no se incorporó el agua de absorción, en las tres relaciones a/c evaluadas los morteros con 20% presentan un extendido mayor en comparación a los que tienen 40% de AFR, hecho que puede atribuirse a la mayor absorción del agregado.

En la Figura 4 se presenta el extendido de los morteros a los 20 minutos de finalizado el mezclado, respecto del medido inicialmente. Se observa que los morteros con AFR en los que no se le incorporó el agua de absorción presentan una pérdida significativa de la fluidez, con excepción de los morteros M6R40. Este comportamiento puede atribuirse a la elevada absorción que presentan los AFR, que se manifiesta en absorción del agua de la pasta disminuyendo su fluidez. En los morteros elaborados con AG y AFR en los que se incorporó el agua de absorción, la fluidez resultó del mismo orden que la inicial, incluso para la relación a/c 0,60 la misma se incrementa en un 25%.

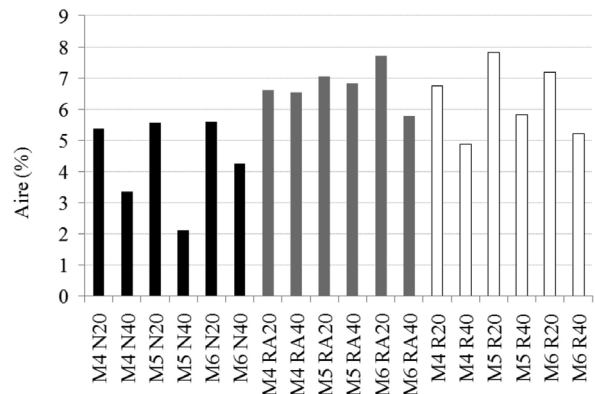


Figura 5. Aire ocluido.

que al incorporar el agua de absorción este comportamiento no es tan evidente. Este hecho podría deberse al menor contenido de partículas entre los tamices IRAM N°30 y 100, las cuales son las responsables de la inclusión de aire. [Bascoy, 1992].

La densidad de los morteros se presenta en la

Figura 6. En ella es evidente que al comparar una misma relación a/c y un mismo porcentaje de arena de trituración, los morteros elaborados con AFR poseen menor densidad que sus correspondientes con AG, siendo la densidad para los morteros elaborados con AFR, en ambas condiciones de humedad, del mismo orden de magnitud. Por otra parte, los morteros elaborados con 40% de AFR poseen menor densidad en comparación con los que tienen 20%, lo cual puede ser atribuido a la menor densidad que presenta el AFR respecto de la arena silícea utilizada.

Los resultados obtenidos al evaluar la absorción de agua de cada uno de los morteros en estudio, se presentan en la Figura 7. Puede observarse que los morteros con AFR presentan para todos los casos mayor absorción que los elaborados con AG. Al comparar los morteros con AFR a los

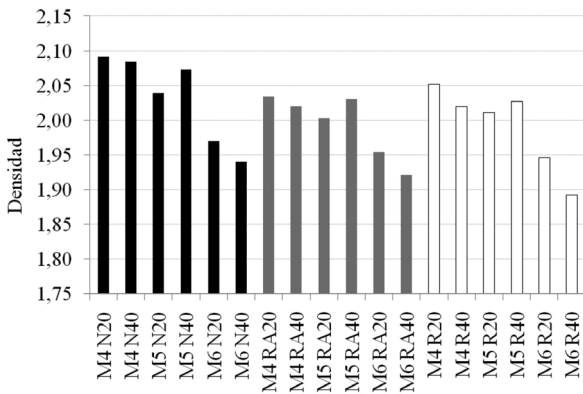


Figura 6. Densidad de los morteros.

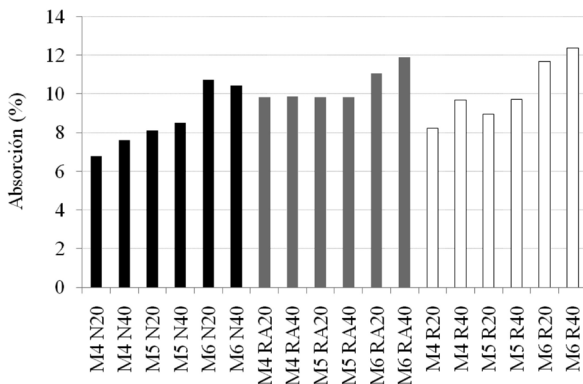


Figura 7. Absorción de agua de los morteros.

que se adicionó el agua de absorción respecto a los que no, se observa que la absorción resulta algo superior en los primeros, con excepción de la razón a/c 0,60. Lo expuesto podría atribuirse a una posible disminución de la relación a/c efectiva producto de la absorción del AFR.

En la Figura 8 se presentan los resultados de la resistencia a compresión a 7 días. Al comparar los morteros con AFR respecto de los elaborados con AG, puede observarse que los mismos presentan resistencias del orden del 5 al 10% menor que los morteros con AG, para una misma relación a/c y

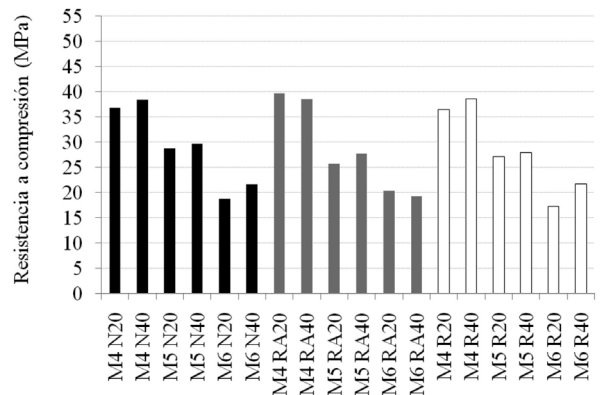


Figura 8. Resistencia a compresión a 7 días.

porcentaje de incorporación de AT. Por otro lado, no se observa una tendencia definida respecto del porcentaje de utilización de AFR, siendo la resistencia a compresión similar para ambos porcentajes de incorporación (20 y 40%), como así tampoco respecto al estado de humedad de los AFR.

En la Figura 9 se presentan los resultados obtenidos al evaluar la resistencia a compresión a 28 días. En las misma puede observarse que la resistencia de los morteros con AFR son mayores que las obtenidas en los morteros con AG, especialmente para la relación a/c 0,40 donde el incremento es de aproximadamente el 15%. Este hecho puede atribuirse a una mejora en la calidad de la interface pasta-agregado como consecuencia de la mayor absorción por parte de los AFR, a pesar de haberse

incorporado parte del agua de absorción. Al igual que a la edad de 7 días, no se observan diferencias significativas en la resistencia al comparar los porcentajes de utilización para los morteros con AG y con AFR en los que se incorporó el agua de absorción, mientras que sí la hubo para los morteros en los que ésta no fue considerada, siendo este incremento del orden del 8, 16 y 24% para las a/c 0,40, 0,50 y 0,60 respectivamente, para los morteros con 40% respecto de los que contienen 20%. Este hecho refuerza la hipótesis de una mejora en la interface pasta-agregado.

En la Figura 10 se presenta el incremento en porcentaje de la resistencia a 28 días, respecto de la obtenida a 7 días de edad. Puede observarse que en ambos estados de humedad el incremento en la resistencia es mayor para los morteros con AFR, y

en los porcentajes de 40%, respecto de los de 20%, lo cual podría deberse a una mejora en la interfaz mortero agregado producto de la posible absorción de los mismos, lo cual disminuiría la relación agua-cemento en la cercanía de estos, hecho reforzado por los mayores incrementos en los morteros en los que no se incorporó el agua de absorción.

CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos al evaluar distintas propiedades en estado fresco y endurecido de morteros elaborados con 20 y 40% de arena de trituración granítica (AG) y agregado fino reciclado (AFR) en dos condiciones de humedad (secos y con el 50% del agua de absorción a 24 h) puede concluirse que:

- Los morteros con AFR poseen menor fluidez que los elaborados con AG, producto de su textura superficial más rugosa. A su vez los morteros con AFR y AG, a los cuales se les incorporó el agua de absorción, presentan mayor fluidez cuando el porcentaje de reemplazo fue de 40% respecto del 20%. Este comportamiento fue contrario al observado en los morteros con AFR en el que el agregado se utilizó seco. También para estos últimos morteros se observó una pérdida de fluidez a los 20 minutos de finalizado el mezclado, hechos que se atribuyen a la absorción del AFR.

- Los morteros con AFR poseen mayor cantidad de aire ocluido que sus correspondientes patrones. Respecto al porcentaje de aire incorporado pudo observarse que al utilizar 40% de arena de trituración, ya sea natural o reciclada, se obtuvo una importante reducción del contenido de aire, respecto al utilizar 20%, debido a la menor cantidad de partículas entre los tamices N°30 y 100.

- Respecto de la densidad y la absorción de agua, se observó una disminución de la densidad en los morteros con AFR, respecto de los elaborados con AG, debido a la mayor porosidad de los agregados reciclados. Este mismo hecho es responsable de la mayor absorción que presentan los morteros

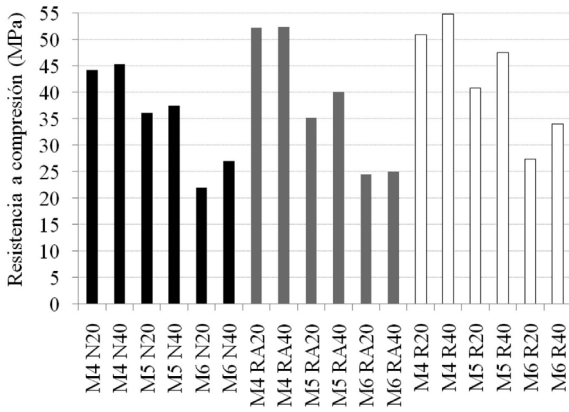


Figura 9. Resistencia a compresión a 28 días.

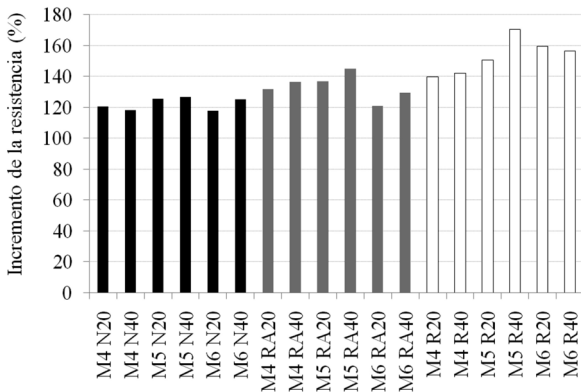


Figura 10. Incremento de la resistencia.

elaborados con AFR, lo cual también se ve reflejado al comparar los morteros con y sin agua de absorción, presentando estos últimos menor absorción.

- La resistencia a compresión a 7 días es entre el 5 y 10% menor en los morteros con AFR, respecto de los elaborados con AG, no existiendo una tendencia definida respecto del porcentaje de utilización de la arena de trituración, sea ésta natural o reciclada. A 28 días se observa una resistencia entre el 8 y

24% superior en los morteros con AFR, lo que se atribuye a una mejora de la interface pasta-agregado producto de la mayor absorción que los mismos poseen.

- Los morteros con AFR tuvieron una evolución de resistencia mayor que los elaborados con la arena de trituración granítica. Hecho atribuido a la mejora en la interfaz producto de la absorción de estos agregados.

REFERENCIAS

Bascoy, D. (1992). "Tecnología del hormigón fresco". Ed. AATH.

Cabrera, O. A.; Traversa, L.P. y Ortega, N.F. (2011). "Estado fresco de morteros y hormigones con arenas de machaqueo". *Materiales de Construcción*. 61, (303), pp. 401-416.

de Brito, J.; Pereira, A. S. y Correia, J. R. (2005). "Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates." *Cement and Concrete Composites*, 27 (4), pp. 429-433.

Dhir, R. K.; Limbachiya, M. C. y Leelawat, T. (1999). "Suitability of recycled concrete aggregate for use in BS 5328 Designated mixes." *Proceedings of the ICE - Structures and Buildings*, 134 (3), pp. 257-274.

Dominguez, J. F. y Mantegna, D.H. (2012). "Uso a gran escala de hormigón reciclado". 19^o Reunion técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. pp.463-470.

Evangelista, L. R. y De Brito, J. (2004). "Criteria for the use of fine recycled concrete aggregates in concrete production." *Proceedings of the International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building Structures*, Barcelona.

Hansen, T. C. y Narud, H. (1983). "Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregates." *Concrete International - Design and Construction*, 5 (1), pp. 79-83.

Hansen, T. C. (1986). "Recycled aggregate and recycled aggregate concrete. Second state-of-the-art. Report developments." *Materials and Structures*, 19 (3), pp.1845-1985.

Martins, I.; Müller, A.; Di Maio, A.; Forth, J.; Kropp, J.; Angulo, S y John, V. (2013). "Use of Fine Fraction". *Progress of Recycling in the Built Environmental. RILEM State of the Art-Report*. pp. 195-227.

Masood, A.; Ahmad, T.; Arif, M. y Madhi, F. (2002). "Waste management strategies for concrete." *Environmental Engineering Policy*, 3 (1-2), 15-18.

Sosa, M.E.; Zaga, C.J.; Di Maio, A.A. y Peralta, J.P. (2012). "Evaluación de morteros con agregado fino reciclado en reemplazo de arena natural de trituración". 19° Reunión técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. pp.415-422.

Ulsen, C.; Kahn, H; Hawlitschek, E.A.; Angulo, S.C. y John, V. (2013). "Production of Recycled sand from construction and demolition waste". Construction and Building Materials. 40. pp. 1168-1173.

Zega, C.J. (2010). "Propiedades físico-mecánicas y durables de hormigones reciclados". Tesis doctoral. Facultad de Ingeniera Universidad Nacional de La Plata. 158p.

Zega, C.J.; Sosa, M.A. y Di Maio, A.A. (2010). "Propiedades de los agregados finos reciclados procedentes de hormigones elaborados con diferentes tipos de agregados gruesos naturales". Memorias 18° Reunión técnica. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. pp 33-38.

Zega, C.J. y Di Maio, A.A. (2011). "Comportamiento de hormigones elaborados con agregados finos reciclados" 16° Reunión técnica de La Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. pp. 47-54.