

# LA RAZÓN AGUA CEMENTO Y LAS ADICIONES EN LA CARBONATACIÓN ACELERADA DE MORTEROS

F. Iloro LEMIT, Av. 52 e/ 121 y 122, La Plata, Argentina. patrimonio@lemit.gov.ar,

N. Ortega U.N.S.-Dto. Ingeniería. Av. Alem 1253, Bahía Blanca, Argentina.  
nfortega@criba.edu.ar

J. D. Sota UTN GIICMA Salta 277 Concordia, Argentina. jdsota@gmail.com

## Resumen

Hacia los años 20, en la ciudad de Concordia. Para la durabilidad del hormigón armado la carbonatación es uno de los procesos causales de la patología más crítica, la corrosión de sus armaduras, disminuyendo la alcalinidad ( $\text{pH} < 9$ ) despasivando así a las barras de acero del refuerzo. La carbonatación se origina cuando el  $\text{CO}_2$  atmosférico ingresa a la masa del hormigón a través de los poros interconectados con el exterior y en presencia de humedad, transforma al hidróxido de calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) presente en carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ). La formación del  $\text{Ca(OH)}_2$  formado en la hidratación del cemento depende principalmente del calcio ( $\text{CaO}$ ) aportado por el mismo. En este Trabajo se evalúa la incidencia de la relación a/c en un cemento sin adiciones, la influencia de las adiciones minerales para una razón a/mc y la edad en la cinética del proceso de carbonatación en morteros. Las experiencias se realizaron en morteros elaborados con cemento normal (sin adiciones) y con adiciones minerales (cenizas volantes, puzolanas naturales, escorias de alto horno y filler calcáreo), en reemplazo del cemento. Los ensayos, a fin de acelerar el proceso de evaluación, se realizaron en una cámara de carbonatación acelerada, donde se mantuvieron constantes la humedad, la temperatura y la concentración de  $\text{CO}_2$  (40.000 ppm).

**Palabras Clave:** Carbonatación, Adiciones minerales, Edad, A/ml, Morteros

## Abstract

For durability of concrete carbonation is one of the causes of the disease processes most critical, corrosion of reinforcement, reducing the alkalinity ( $\text{pH} < 9$ ) despasivando well to steel reinforcement bars. Carbonation occurs when atmospheric  $\text{CO}_2$  enters the mass of concrete through the pores interconnected with the exterior and in the presence of moisture, transforms to calcium hydroxide ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) present in calcium carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ). The formation of  $\text{Ca(OH)}_2$  formed on cement hydration depends primarily of calcium ( $\text{CaO}$ ) supplied by it. This paper assesses the impact of the ratio a/c in a cement without additions, the influence of mineral admixtures for a reason/mc and age on the kinetics of the carbonation process in mortars. The experiments were performed on mortars made with ordinary cement (no additions) and mineral admixtures (fly ash, natural pozzolans, blast furnace slag and limestone filler), replacing cement. The tests, in order to accelerate the process of evaluation, performed in an accelerated carbonation chamber, where the humidity is kept constant, the temperature and the concentration of  $\text{CO}_2$  (40.000 ppm).

**Keywords:** carbonation, mineral admixtures, Age, A / ml, Mortars

## INTRODUCCIÓN

profundidades en cortos periodos de tiempo, se emplea en laboratorio un método acelerado de carbonatación. El método acelerado consiste elevar el  $\text{CO}_2$  a concentraciones muy superiores a la existente en la atmósfera. La concentración promedio de dióxido de carbono en la atmósfera es de aproximadamente 0,0035 % en volumen, por lo cual para poder alcanzar una cierta profundidad en un breve periodo de tiempo se debe incrementar considerablemente la concentración de  $\text{CO}_2$  en un espacio confinado, como por ejemplo al 4 % en volumen, 100 veces mayor a la natural.

Investigaciones realizadas con el método de carbonatación acelerada han indicado que por más que se eleve la concentración de  $\text{CO}_2$ , si la humedad relativa se mantiene dentro del rango 50-70 %, no se evidencia un incremento lineal del perfil de carbonatación. Pero cuando la humedad varía a valores menores de 50 % y/o mayores a 70% y se mantiene constante la concentración de  $\text{CO}_2$ , los perfiles de carbonatación pueden resultar inferiores.

Se ha demostrado que la profundidad de

carbonatación en el concreto, para una semana de exposición al 4% de  $\text{CO}_2$  es muy similar a la profundidad de carbonatación para un año de exposición en ambiente natural [12].

Las experiencias de carbonatación acelerada se realizaron en una cámara diseñada y montada en el LEMIT de acuerdo a lineamientos generales especificados en la bibliografía [11] [13]. La cámara desarrollada consiste en un gabinete de acero inoxidable con dos puertas frontales con paños de vidrios (Figura 1). La cámara genera temperatura mediante un sistema de calefacción con resistencias eléctricas, en un rango que va desde 0 ° C a 80 ° C. La humedad es lograda generando vapor de agua, mediante calentamiento por resistencias eléctricas blindadas, pudiéndose programar el valor de exposición deseado, los porcentajes mínimos y máximos y el diferencial de encendido y corte del sistema. Además, posee un equipo de refrigeración para mantener dentro del rango máximo a la temperatura y a la humedad relativa, el mismo se ajusta de acuerdo a la temperatura de trabajo. La cámara posee un programador y control digital de lectura continua de la temperatura y la humedad existente en su interior (Figura 2).



**Figura 1.** Vista de la cámara de carbonatación acelerada.



**Figura 2.** Detalle del programador y registro continuo digital de la temperatura y humedad relativa del interior de la cámara.

La corriente de aire con CO<sub>2</sub> resulta inyectando aire proveniente de un compresor y una corriente de CO<sub>2</sub> procedente de una batería de tubos recargables con el mencionado gas. Las presiones de ambas corrientes son controladas por manómetros. La presión de trabajo fue la correspondiente al aire atmosférico. La concentración de CO<sub>2</sub> fue obtenida y mantenida empleando un sensor de CO<sub>2</sub> marca VAISALA modelo 221, regulando los flujómetros colocados a la salida de cada corriente, un flujómetro de 5 l/m para el CO<sub>2</sub> y otro de 15 l/m para la corriente de aire. La cámara en su interior tiene un circulador de aire para lograr una atmósfera homogénea.

## DESARROLLO EXPERIMENTAL

### Materiales y mezclas

Para las experiencias se elaboraron cinco clases de morteros, siguiendo los lineamientos de la Norma IRAM 1622 respecto a las condiciones de mezclado, compactación y curado. Se moldearon prismas de 4 x 4 x 16 cm..

Los morteros se realizaron con arena natural con una granulometría y en proporciones según Norma IRAM 1633, un cemento portland normal (CPN) y adiciones minerales como reemplazo. Se realizaron tres morteros con CPN con distinta razón a/c mientras que para los morteros con reemplazo de adiciones se mantuvo constante la razón agua/material ligante (0,50) y la cantidad de arena, mientras que el contenido de cemento vario en función del porcentaje de adiciones incorporado. Se obtuvieron siete clases de morteros, uno con razón a/cml 0,50 con cemento portland normal

(MCN50) definido como mortero patrón, dos con CPN y razón a/ml 0,40 (MCN40) y 0,60 (MCN60) y cuatro con cemento y adiciones, con reemplazos en peso por 30 % de ceniza volante (MCC) y puzolana (MCP), por 20 % de filler (MCF) y por 60 % de escoria (MCE). En la Tablas 1 se presentan las dosificaciones, mientras que en la "Tabla 3", los análisis físicos y químicos del cemento y las adiciones empleadas.

La incorporación de una adición mineral al cemento portland modifica las propiedades mecánicas de los morteros por una efecto de dilución, pero que tiende a ser compensado por el efecto filler y, posteriormente, por la actividad puzolánica cuando la adición es capaz de desarrollarla [14] [15].

Luego del curado a la edad de 90 días se determinó la resistencia a compresión (f'c) según la Norma IRAM 1622. Complementariamente se determinaron la absorción en inmersión de agua a 24 hs, la densidad saturada superficie seca, según Norma IRAM 1533, y la porosidad total como la relación entre el volumen de agua absorbido durante 24 hs y el volumen de la muestra.

## RESULTADOS

### Características físico mecánicas

En la Tabla 2 se informan los valores obtenidos de la resistencia a compresión, la absorción en inmersión de agua a 24 hs, la densidad saturada superficie seca. En la Figura 3 se muestran los valores de la porosidad.

Componentes (grs)	Mortero						
	MCN40	MCN50	MCN60	MCC	MCP	MCF	MCE
CPN	562,5	450	375	315	315	360	180
ceniza volante	--	--	--	135	--	--	--
puzolana natural	--	--	--	--	135	--	--
filler calcáreo	--	--	--	--	--	90	--
escoria de alto horno	--	--	--	--	--	--	270
arena	1350						
agua	225						
a/(c+ad.)	0,40	0,50	0,60	0,50			

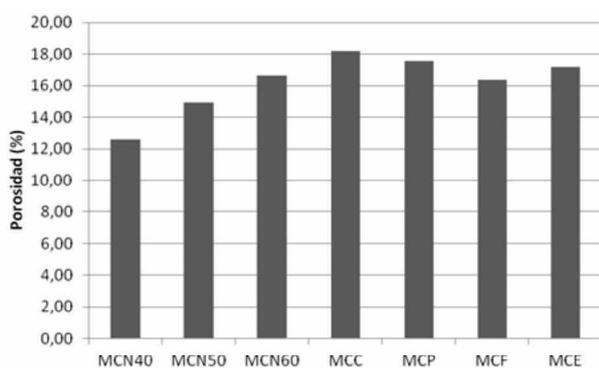
**Tabla 1:** Proporciones de los materiales.

	CPN	F	E	P	CV
<b>Propiedades físicas</b>					
Ret. Tamiz 75 $\mu\text{m}$ (%)	12.4	34.6	14.6	2.9	5.0
Ret. Tamiz 45 $\mu\text{m}$ (%)	--	40.8	34.0	11.0	7.0
Sup. esp. Blaine ( $\text{m}^2/\text{Kg}$ )	293	434	260	427	285
<b>Composición química</b>					
Pérdida por calcinación (%)	1.40	34.6	--	2.40	1.70
$\text{SO}_3$ (%)	2.40	0.16	2.0	--	0.54
$\text{MgO}$ (%)	2.30	0.39	4.0	0.44	2.01
$\text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)	2.40	1.3	1.6	3.64	2.40
$\text{SiO}_2$ (%)	23.40	9.8	37.1	75.86	63.01
$\text{Al}_2\text{O}_3$ (%)	2.7	1.82	12.3	10.3	24.48
$\text{CaO}$ (%)	64.9	--	41.4	5.81	3.52
$\text{CO}_3\text{Ca}$ (%)	--	47.1	--	--	--
$\text{Na}_2\text{O}$ (%)	0.60	--	0.37	1.42	1.89
$\text{K}_2\text{O}$ (%)	0.80	0.36	0.73	--	0.41

**Tabla 2:** Propiedades físicas y análisis químico del cemento y las adiciones.

MCN40	MCN50	MCN60	MCC	MCP	MCF	MCE
<b>Resistencia a compresión (MPa) (90 días)</b>						
52,0	47,1	41,8	46,8	49,7	38,1	44,2
<b>Densidad saturada superficie seca</b>						
2,15	2,11	2,12	2,07	2,05	2,1	2,08
<b>Absorción de agua a 24 hs (%)</b>						
5,52	6,61	7,27	8,07	7,87	7,21	7,63

**Tabla 3:** Propiedades fisico-mecánicas.



**Figura 3.** Valores de porosidad a la edad de 90 días.

### Profundidad de carbonatación

Para las pruebas de carbonatación acelerada, luego de cumplidos la edad de curado y con el fin de representar las condiciones reales de exposición, las probetas fueron colocadas inmediatamente en la cámara de carbonatación, sin efectuar el acondicionamiento previo en ambiente de laboratorio, según la bibliografía 90 o 100 días en ambiente de laboratorio. Antes de la colocación, en la cámara, se seccionaron cubos de  $4 \times 4 \times 4 \text{cm}$ . Previo a la inyección del  $\text{CO}_2$  se realizó un acondicionamiento de los especímenes para equilibrar higrométricamente los morteros respecto a la humedad de la cámara, para lo cual se realizaron pesadas hasta obtener una variación

del peso de 0,1 gr. Alcanzado el equilibrio higrométrico, se procedió a inyectar la mezcla de aire con CO<sub>2</sub>. El tiempo de exposición dentro de la cámara fue de 7 días.

Finalizado el periodo de carbonatación se seccionó cada espécimen a la mitad aplicando una fuerza diametral, luego se limpiaron las superficies mediante sopleteo con aire a presión, por último, se rociaron con fenolftaleína al 1 %. El indicador de fenolftaleína permite diferenciar por colorimetría tres zonas del valor del pH, cuando es inferior a 8, la disolución se torna incolora, entre 8 y 9,5, adquiere una tonalidad rosa suave y cuando es mayor de 9,5, adquiere un color rojo púrpura intenso. Luego de transcurrido unos minutos se toman las profundidades con un calibre, realizándose 4 lecturas por lado de las mitades obtenidas, los valores informados corresponden al promedio de las 32 lecturas en cada espécimen. En la Tabla 4 se informan las profundidades de carbonatación promedio (L) y la desviación estándar (s).

#### Volumen de material carbonatable

La cantidad de CO<sub>2</sub> absorbida por los morteros depende de la cantidad de material carbonatable (reserva alcalina) existente en el mortero, definida por el contenido unitario de cemento, la razón agua/cemento y las características químicas de la adición empleada.

La cantidad de CO<sub>2</sub> absorbida esta definida por la cantidad material carbonatable por unidad de

volumen, determinada como el porcentaje total de CaO contenido en el cemento, estimado 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 C-S-H, puede transformarse en carbonato cálcico, lo cual significa que el 75% de todo el CaO presente en el cemento original puede carbonatarse.

Cuando se emplean adiciones se puede reemplazar el término de contenido unitario de cemento por el de material ligante [17], el cual está conformado por el contenido de cemento (CUC) y el contenido de la adición (CUAde), Ec. 3:

$$M_{CO_2} \text{ abs.} = 0,75 [(CUC \cdot CaO) + (CUAde \cdot CaOA)] \quad \text{Ec. (3)}$$

donde:

CUC: Contenido de cemento, en Kg/m<sup>3</sup>

CaO: Contenido de CaO del cemento, en porcentaje

CUAde: Contenido unitario de adición, en Kg/m<sup>3</sup>

CaOA: Contenido de CaO de la adición, en porcentaje

MCO<sub>2</sub> y MCaO: Peso molecular del CO<sub>2</sub> y del CaO

En los morteros donde se ha reemplazado parte del cemento por las adiciones, se verifica que el porcentaje de material carbonatable por unidad de volumen es menor al del mortero patrón que presenta el máximo valor 172,1 Kg/m<sup>3</sup>, siendo los morteros con cenizas volantes y puzolanas los que poseen menor contenido de material carbonatable del orden de 123,26 y 125,08 Kg/m<sup>3</sup>, respectivamente, Tabla 5.

Profundidad (mm)	MCN40	MCN50	MCN60	MCC	MCP	MCF	MCE
L	--	0,9	3,0	3,9	3,6	4,5	3,1
s	--	0,09	0,11	0,10	0,10	0,12	0,10

**Tabla 4:** Profundidades de carbonatación y desviación estándar.

MCN40	MCN50	MCN60	MCC	MCP	MCF	MCE
<b>Profundidad de carbonatación (mm)</b>						
--	0,9	3,0	3,9	3,6	4,7	3,1
<b>Volumen de material carbonatable (Kg/m<sup>3</sup>)</b>						
215,13	172,1	143,42	123,26	125,08	137,68	134,71

**Tabla 5:** Profundidad de carbonatación y volumen de material carbonatable.

Relacionando las profundidades de carbonatación con el material carbonatable calculado con la Ec. 3., se observa una vinculación directa entre ambos parámetros, ya que las mayores profundidades se manifiestan en los morteros con menor contenido de material carbonatable, a igual concentración de cantidad de CO<sub>2</sub> presente en el ambiente de exposición.

## DISCUSION DE LOS RESULTADOS

Los morteros ejecutados con el CPN y distintas razones de a/ml presentan niveles resistentes diferenciales, a menor razón a/ml mayor resistencia. Los morteros con reemplazo de adiciones alcanzan valores de resistencia a compresión similar a mortero patrón excepto el mortero con filler calcáreo que presenta menor valor.

En cuanto a la absorción de agua en los morteros con CPN únicamente, la razón a/ml ha originado morteros mas compactos que otros, mayor compacidad se observa en los de menor razón a/ml, efecto puesto de manifiesto en los valores de absorción, mientras que en los morteros adicionados se observan valores similares al mortero CPN60.

La porosidad total se ve influenciada en los morteros con CPN por la razón a/ml, menor razón menor porosidad. Los valores determinados para los morteros con adiciones se corresponden con el del mortero CPN60.

En cuanto a las profundidades de carbonatación se verifica que el mortero CPN40 es el que no presenta profundidad mientras que el mortero patrón la menor que las demás series. La profundidad esta influenciada por la razón a/ml en los morteros con CPN debido a la densidad que han desarrollado, la compacidad de la estructura dificulta la difusión del CO<sub>2</sub>. En los morteros con adiciones la profundidad alcanzada es superior a la CPN60 a pesar de tener similar porosidad.

Si se analiza la profundidad de carbonatación respecto al volumen de material carbonatable en cuanto al fijación de CO<sub>2</sub>, en todas las series se evidencia su significancia, dado que a pesar de existir morteros con valores resistentes y porosidades totales similares. El mortero

patrón CPN40 es el que mayor volumen de material carbonatable y menor profundidad de carbonatación presenta.

## CONSIDERACIONES FINALES

Del análisis de los resultados obtenidos sobre morteros con razones de a/ml distintas y con reemplazo parcial de adiciones a la edad 90 días, se verifica que las resistencias a compresión se incrementan con la disminución de la razón a/ml y los morteros con adición presentan valores similares a los alcanzados por el mortero patrón.

Con respecto a la porosidad, característica vinculada directamente con los procesos de carbonatación, se han obtenido valores que varían con la razón a/ml en morteros con cemento normal y son similares en los morteros con adiciones siendo algo mayores a la del mortero patrón. La disminución de la porosidad de los morteros con CPN se debe al incremento de los productos de hidratación que originan una matriz más compacta y densa. Mientras que en todos los casos de los morteros con adición no existe una diferencia tan marcada, debido quizás a los contenidos de acciones de reemplazo.

Surge de estas experiencias que la porosidad total no pone de manifiesto si el efecto de las adiciones ha variado la porosidad capilar o efectiva que es la que participa en la difusión de líquidos y gases en la matriz del mortero u hormigón, dado que se los niveles de resistencia a compresión se han incrementado con la edad de los morteros.

El volumen de material carbonatable estimando que solamente el 75% del total de CaO que incorpora el cemento y las adiciones es el que se carbonata, es la variable de mayor significancia, dado que el mortero CPN40 presenta el mayor volumen, es el que menor profundidad ha presentado entre las series y también ha disminuido la profundidad con la edad. Todas las series con reemplazo de adiciones han presentado mayores profundidades en concordancia con el volumen de material carbonatable, siendo el mortero con filler la que presentó profundidad a pesar de contener un volumen de material carbonatable intermedio.

Como conclusión final de las experiencias realizadas puede plantearse que se pueden alcanzar

comportamientos físico mecánicos similares entre morteros con adiciones como reemplazo y sin reemplazo, pero uno comportamiento diferencial de durabilidad. La porosidad total no pone de manifiesto el efecto real de las adiciones respecto a la densidad y tortuosidad de los poros que intervienen en el proceso de difusión, siendo la variable masa crítica el volumen de material carbonatable, para lo cual deberá evaluarse cuáles son los porcentajes de reemplazo adecuados para la durabilidad y/o el empleo de aditivos reductores de agua para disminuir la razón a/c efectiva.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Ing. Luis P. Traversa por sus aportes y colaboración en el desarrollo de este trabajo.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] A.A. Di Maio, J.D. Sota, L.P. Traversa 1999. Patología de estructuras de hormigón. Análisis de algunos casos más relevantes ocurridos en la Argentina en los últimos años. III Congreso Iberoamericano de Patología de la Construcción y V Congreso Iberoamericano de Control de Calidad. La Habana, Cuba.
- [2] L.P. Traversa: Evaluación y diagnóstico de Puentes de Hormigón Armado ubicados en ambientes rurales y marinos. 2006. 16° Reunión Técnica AATH, Mendoza, Argentina.
- [3] Pihlajavaara S.E. 1968. "Some results of the effect of carbonation on the porosity and pore size distribution of cement paste". *Materials and Structures*, 1(6), p.p. 521-527.
- [4] Bonavetti V.L., Rahhal V. F., Irassar E. F. 2002. "Evolución de la hidratación en cementos con adiciones". *Materiales de Construcción*. Vol. 52. (268), p.p 57-63.
- [5] Ingram K., Daugherty K. 1992. "Limestone Additions to Portland Cement: Uptake, Chemistry and Effects". *Proc. 9th International Congress of the Chemistry of Cement*. New Delhi, India. Vol. II, pp. 181 - 186.
- [6] Barker A., Matthews J. 1994. "Concrete Durability Specification by Water/Cement or Compressive Strength for European Cement Types" *Durability of Concrete*. Third International Conference, Detroit. SP 145 (62), pp 1135 - 1159.
- [7] Bonavetti V.L. 1998. "Cementos con filler calcáreo, mecanismo de interacción y su influencia sobre las propiedades resistentes". Tesis Magister.
- [8] López, M., Castro J. T., 2010. "Efecto de las puzolanas naturales en la porosidad y conectividad de poros del hormigón con el tiempo". *Revista Ingeniería de Construcción* Vol. 25 (3).
- [9] Molina Bas, O.I., Fuentes A., Terrades M., Gálvez Ruiz J. "La influencia de las propiedades del cemento portland en la difusión de agentes agresivos en hormigones con cenizas volantes". *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*. Vol. 10
- [10] UNE –EN 206:1. 2008. "Hormigón, especificaciones, prestaciones, producción y conformidad".
- [11] E.L. Moreno, G. Domínguez Lara, E.J. Cob Sarabia, F. Duarte Gómez. 2004. Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración. *Revista Ingeniería*. pag. 117-130. México.
- [12] J.M. Chi, R. Huang, C.C. Yang. 2002. Effects of carbonation on mechanical properties and durability of concrete using accelerated testing method. *Journal of Marine and Technology*, Vol. 10, No. 1, pp. 14-20.
- [13] D. Linares, M. Sánchez. 2003. Construcción, operación y puesta en funcionamiento de una cámara para carbonatación acelerada. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*. Vol. 26, N° 1, 34-44.
- [14] P.L. Valdez-Tamez, A. Durán-Herrera, G. Fajardo-San Miguel, J. Alvarado. 2009. Influencia de la carbonatación en morteros de cemento Portland y ceniza volante, *RIIT* Vol. X, No.1, 39-49, FI-UNAM.
- [15] V.L. Bonavetti, V.F. Rahhal. 2006. Interacción de adiciones minerales en pastas de cemento. *Revista de la Construcción*, Vol. 5, N° 2, pp. 33-41, Santiago de Chile.
- [16] Kjellsen K., Guimaraes M., Nilsson A. 2005. "The CO<sub>2</sub> Balance of Concrete in a Life Cycle perspective". *Nordic Innovation Centre*.
- [17] Iloro F. H., Sota J., Ortega N. 2012. "Influencia del tipo de cemento en el proceso de carbonatación acelerada de morteros". VIII CINPAR Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras. La Plata, Argentina.