



Carbonatación de Estructuras de Hormigón Armado en la Región Centro-Este Argentina: Influencia de la Contaminación Ambiental Urbana

Maximiliano D. Segovia, Adrián I. Yoris, Anabela Guilarducci, Carlos A. Defagot, Néstor O. Ulibarrie
CECOVI - Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda - Facultad Regional Santa Fe
Lavaise 610 (S3004EWB) Santa Fe – Argentina
Tel: +54 342 4601579 - 2390 - Fax: 4690348
mcarrasc@frsf.utn.edu.ar

RESUMEN - Se presenta el análisis de evaluaciones estructurales realizadas entre 1995 y 2005 por el CECOVI y de ensayos de exposición en ambientes con niveles de contaminación variados de hormigones de diferentes calidades, con aplicación de protecciones acrílicas y poliuretánicas.

A diferencia de otras zonas, la región centro-este argentina presenta reducida severidad, siendo la patología más probable la corrosión de armaduras por carbonatación del hormigón.

Las estaciones de exposición se encuentran en la ciudad de Santa Fe. Se miden concentración de contaminantes en el aire y semestralmente se determina la profundidad de carbonatación, contenido de cloruros y velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos en los hormigones.

Los resultados obtenidos indican que la profundidad de avance del frente de carbonatación se relaciona, con la calidad del hormigón, los niveles de contaminación del ambiente de exposición y las condiciones de humedecimiento, evidenciando la efectividad de los recubrimientos acrílicos y poliuretánicos como protecciones anticarbonatación.

Palabras claves: hormigón armado, carbonatación, corrosión, contaminación ambiental, durabilidad

Carbonation of Reinforced Concrete Structures in Centre – East Region of Argentina: Influence of Urban Environmental Pollution

ABSTRACT - This paper presents analysis of structural assessment performed between 1995 and 2005 by CECOVI and tests of exposition to environments with different levels of pollution for concretes with different qualities, with application of acrylic and polyurethaneic protections.

Unlike other zones, centre – east region of Argentina presents reduced severity, being concrete reinforced corrosion due to concrete carbonation the most probable pathology.

Sites of exhibition are located in the city of Santa Fe. Concentration of pollutants is measured in the air and depth of carbonation, content of chlorides and speed of ultrasonic pulses are determined on concrete.

The obtained results indicate that depth of carbonation correlates, with the quality of the concrete, the levels of environmental pollution and wetting conditions, demonstrating the efficiency of the acrylic and polyurethaneic paints as anticarbonation protections.

Keywords: reinforced concrete, carbonation, corrosion, environmental pollution, durability

INTRODUCCIÓN

Las estructuras de hormigón simple, armado o pretensado pueden sufrir a lo largo de su vida distintos tipos de patologías atribuidas a deficiencias en el proyecto, al empleo de materiales inadecuados, a fallas durante la ejecución y/o a inconvenientes durante el uso, incluyendo en este grupo a los vinculados con el mantenimiento o siniestros. El comportamiento en servicio del hormigón armado está vinculado a las características intrínsecas de los materiales que lo componen (hormigón y acero), a la interrelación entre los mismos y a los condicionamientos externos, en particular a la naturaleza y agresividad del medio circundante. La tipología estructural adoptada también tiene un rol de significativa importancia en su comportamiento al condicionar la vinculación con el ambiente.

En lo que respecta a la durabilidad de las estructuras, actualmente se conocen las principales causas que provocan la degradación del hormigón sin armar y los mecanismos de falla del mismo, a la vez que se dispone de tecnologías para disminuir o eliminar esos procesos con un grado aceptable de eficiencia.

Asimismo, existe una amplia bibliografía referente a experiencias de laboratorio y comportamientos in situ del hormigón en distintos ambientes (Traversa et al., 1999).

Para satisfacer los requerimientos estructurales y constructivos existe una amplia base teórica y práctica recopilada en códigos, reglamentos y manuales que permite administrar confiablemente los efectos de las variables puestas en juego. Sin embargo, dichos antecedentes no permiten cuantificar los efectos que el medio ambiente tendrá sobre las estructuras, ni la vida útil resultante. En última instancia, la durabilidad tiende a ser asegurada a través de directivas sobre los materiales y su utilización, y no por medio del control de las variables que gobiernan los fenómenos físicos involucrados en los mecanismos de degradación. El reglamento argentino (INTI – CIRSOC, 1982) vigente adopta un planteo prescriptivo que se apoya en la clasificación o tipificación de la agresividad del medio ambiente, requisitos para la dosificación de los hormigones, los niveles admisibles de sustancias agresivas que se pueden incorporar inicialmente en la mezcla, recubrimientos mínimos, fisuración admisible, detalles de armado y condiciones para la puesta en obra. Este escenario surge de los resultados de investigaciones tecnológicas y experiencias de obras en servicio, información que depende de las condiciones locales del medio y de los materiales con los cuales se realizaron las obras o las experiencias y, por lo tanto, su extrapolación a otros medios puede ser inadecuada y no permite calcular la vida en servicio (Giovambattista, 2001).

No obstante, en la mayoría de las obras pequeñas y medianas estas mínimas especificaciones no se aplican. Datos recopilados al azar en Argentina sobre 177 estructuras entre 1975 y 1990, muestran que las mayores causas de deterioro son asignables a los “materiales” y a los “aspectos constructivos” (Di Maio et al., 1995). En Brasil, se han obtenido para estructuras de hormigón armado en la región sudeste datos que indican que los aspectos constructivos (específicamente la etapa de ejecución) provocan la mayor cantidad de patologías (Lima Dórea and Ferreira e Silva, 1999). Contrariamente, recopilaciones de datos estadísticos efectuadas en países europeos asignan una mayor responsabilidad a la etapa de proyecto en la aparición de los deterioros (Husni and Galuppo, 1989).

Por otra parte, en lo que respecta a la frecuencia con que se presentan diversas patologías, puede encontrarse información en la bibliografía, tal como se muestran en la Fig. 1 a y b (Helene and Figuereido, 2003 y Calavera Ruiz, 1996). Sin embargo, aunque resulta interesante analizar las variaciones de una región a otra, no es posible efectuar una comparación directa de estos valores debido a la aplicación de diferentes criterios de clasificación.

Schiessl (Schiessl, 1996) sostiene que durante los últimos 25 años del siglo XX, las actividades de investigación se enfocaron hacia la optimización estructural, sin tomar en cuenta el efecto negativo de estas acciones sobre la robustez, la sensibilidad a las técnicas inadecuadas de ejecución y la durabilidad de las estructuras.

Causas de Deterioro	Argentina [%]	Brasil [%]	Europa [%]
Proyecto	19	18	40 a 45
Materiales	44	6	15 a 20
Constructivo	22	52	25 a 30
Uso	10	21	10
Otros	5	9	----

Tabla 1 - Causas de deterioro en estructuras de hormigón armado (*)

(*) (Di Maio et al., 1995), (Lima Dórea and Ferreira e Silva, 1999), (Husni and Galuppo, 1989)

Según este autor, estos desarrollos, sumados a la decreciente calificación de la mano de obra, provocaron reducciones drásticas en la vida en servicio de las estructuras y motivaron intensivas investigaciones a nivel mundial sobre durabilidad de las estructuras de hormigón armado que, aún hoy, no han tenido éxito en su transferencia al medio productivo.

Un criterio racional de diseño de estructuras de hormigón armado plantea que las mismas deben ser capaces de resistir las condiciones ambientales previstas, conservando su seguridad, estabilidad y aptitud en servicio durante un período de tiempo preestablecido en la etapa de diseño, pero las especificaciones prescriptivas no se ajustan a esta definición, ya que no permiten optimizar la inversión inicial y los costos de mantenimiento (Giovambattista, 2001).

En el hormigón armado el proceso de corrosión de las barras de acero del hormigón se genera por la formación de celdas electroquímicas en las cuales el metal que se está corroyendo funciona como un electrodo

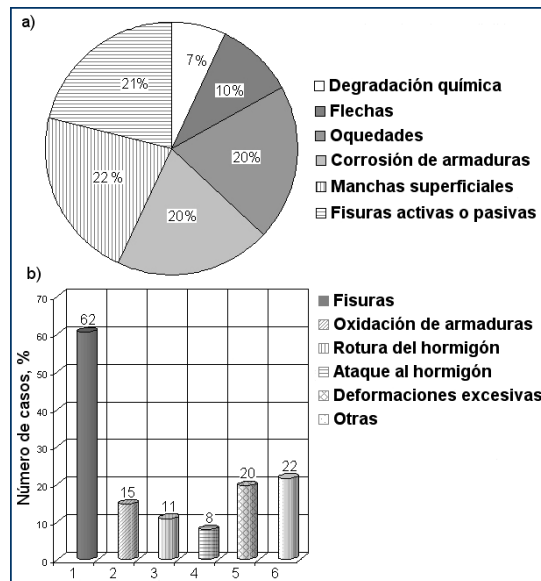


Fig. 1: Ocurrencia de patologías a) según Helene and Figueredo, 2003; b) según Calavera Ruiz, 1996.

mixto sobre el cual tienen lugar reacciones catódicas y anódicas (Traversa, 2001 y Page, 1988). La presencia de hormigón en torno a las barras de las armaduras, cumple la función de generar un medio envolvente protector sobre las mismas favoreciendo la estabilidad de una capa de óxido protectora (capa pasiva). Sin embargo, esta capacidad protectora disminuye paulatinamente debido a la carbonatación del hormigón que va produciendo una reducción del pH de este medio, llevándolo de 12,5 (valor que define un medio fuertemente alcalino) a valores inferiores a 9. La carbonatación es un proceso progresivo que avanza desde la superficie expuesta del hormigón hacia el interior, a una velocidad que es tanto menor cuanto mejor sea la calidad del hormigón de recubrimiento (evaluado desde el punto de vista de su permeabilidad al aire y de la reserva alcalina que posea) (Traversa, 2001; Metha and Monteiro, 1993; Neville, 1981 y Mindess and Young, 1981). Este fenómeno de degradación constituye una de las principales causas de deterioro de las estructuras de hormigón armado en la región centro-este de nuestro país (Carrasco et al. 2006).

Las atmósferas en las cuales se emplazan las estructuras pueden ser clasificadas como rurales, urbanas, marinas e industriales, pero la mayoría deben ser consideradas mixtas debido a que no existen líneas claras de división y además, porque la agresividad de las mismas es función de la temperatura así como de la presencia y contenidos de contaminantes (Traversa, 2008). Los ambientes de las regiones pampeana y mesopotámica argentinas se caracterizan por la ausencia de agresivos químicos al hormigón armado en el aire, con excepción del CO₂ de la atmósfera, que promueve los procesos de carbonatación, tales como los previstos en clases de exposición tipo A2 y A3 dadas por el Proyecto de Reglamento CIRSOC (INTI – CIRSOC, 2002). El ambiente designado como A2 corresponde a interiores de edificios expuestos al aire con humedad relativa mayor o igual a 65 % o a condensaciones, a exteriores ex-puestos a precipitación media anual menor a 1000 mm o elementos enterrados en suelos húmedos o sumergidos. El ambiente A3 corresponde a exteriores expuestos a precipitación media anual mayor o igual a 1000 mm y con temperatura media mensual mayor o igual a 25 °C durante más de 6 meses.

Algunas experiencias muestran diferencias significativas entre los espesores de hormigones carbonatados medidos en ambientes con diferente cantidad de CO₂ y humedad ambiente. En general las atmósferas urbanas se encuentran libres de contaminantes con un ligero incremento en el contenido de CO₂, originado por la combustión del parque automotor (Al-Khaiat and Haque, 1997).

El reglamento CIRSOC vigente (INTI – CIRSOC, 1982) y el proyecto de reglamento (INTI – CIRSOC, 2002), establecen para las condiciones de exposición de la zona, espesores de recubrimientos de hormigón para las armaduras entre 15 y 25 mm y entre 20 y 35 mm, respectivamente. El espesor de recubrimiento cobra importancia ya que los procesos de difusión del CO₂ son función de la raíz cuadrada del tiempo de penetración (Traversa, 2008).

Paralelamente, se proponen como alternativas de protección de las estructuras la aplicación de pinturas o

barnices capaces de formar una película semiflexible y continua que actúa como barrera de baja permeabilidad a gases, al agua y al vapor de agua (Helene and Figueredo, 2003). En este sentido se recomienda la utilización de resinas acrílicas al solvente y al agua, caucho clorado, estireno-acrílicas y poliuretánicas.

En este marco, este trabajo presenta resultados obtenidos de la participación activa del CECOVI en el diagnóstico de las causas y deterioros que presentaban distintas estructuras de hormigón construidas en Argentina y de la evaluación del avance de la carbonatación en hormigones de diferentes calidades sobre los que se han aplicado diversas películas protectoras y que han sido sometidos a ambientes con niveles de contaminación variados dentro de la ciudad de Santa Fe a fin de analizar la influencia de los contaminantes y la aplicación de las películas protectoras.

MATERIALES Y METODOLOGÍA

El trabajo realizado consta de dos aspectos principales: el primero correspondiente al análisis estadístico de los resultados de evaluaciones de estructuras de hormigón armado y el segundo correspondiente al estudio del avance del frente de carbonatación en hormigones expuestos en ambientes urbanos.

Estructuras de hormigón armado evaluadas

Se analizan datos obtenidos en 84 evaluaciones estructurales realizadas por el Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI) entre los años 1995 y 2005. Tal como se muestra en la Fig. 2, las estructuras evaluadas se encuentran ubicadas principalmente en la provincia de Santa Fe, si bien existen algunos casos particulares correspondientes a las provincias de Buenos Aires y Entre Ríos, comprendidas en las regiones pampeana y mesopotámica argentinas (región centro-este).

Todas las estructuras analizadas se encuentran en ambientes que pueden clasificarse como rurales o urbanos que se caracterizan por la ausencia de agresivos químicos al hormigón armado, con excepción del CO₂ de la atmósfera que promueve los procesos de carbonatación. Así, si consideramos la clasificación de exposición dada por el Proyecto de Reglamento CIRSOC (INTI – CIRSOC, 2002), se puede indicar que las estructuras evaluadas se encuentran en ambientes tipo A2 y A3. En la Fig. 3 se presenta una distribución de estas clases de exposición en la República Argentina

Las construcciones evaluadas corresponden a diferentes tipos, tales como edificios en altura, tanques de reserva de agua potable, natatorios y chimeneas, entre otras, con edades de hasta 70 años. Debe mencionarse que la información vertida en el presente trabajo no corresponde a un relevamiento programado de estructuras (Traversa et al., 1999 y Traversa and Di Maio, 1995) sino exclusivamente al análisis de las causas de patologías de evaluaciones solicitadas por instituciones u organismos públicos o por particulares.

Metodología de evaluación de estructuras de hormigón armado

Las estructuras fueron evaluadas siguiendo los lineamientos especificados por DURAR (Red DURAR, 1997). Si bien no se han aplicado la totalidad de las técnicas que propone este manual en cada uno de los casos estudiados, se considera que para establecer el grado de deterioro de una estructura de hormigón armado es necesario efectuar una inspección in situ a la estructura y determinar, entre otras características: resistencia mecánica mediante ensayo a compresión de testigos calados, densidad aparente y porosidad, contenido de sustancias deletéreas (cloruros, sulfatos, agregados reactivos, etc.), contenido unitario de cemento, homogeneidad mediante ensayos no destructivos (como ultrasonido y esclerometría), ubicación, cantidad y abertura de fisuras, pruebas de carga y monitoreo de deformaciones en el tiempo. En lo que respecta a estructuras afectadas por corrosión de armaduras, resulta relevante analizar: detección magnética de armaduras, profundidad de frente de carbonatación, densidad de corriente y potenciales de corrosión (Andrade et al., 1986), resistividad del hormigón (Millard et al. 1989), diámetro efectivo de armaduras y tipo de acero utilizado y espesores de recubrimiento.

Exposición de probetas en ambientes urbanos

Para poder evaluar el fenómeno de la carbonatación se planeó la exposición de probetas de hormigón en diferentes puntos de la ciudad de Santa Fe, la medición de contaminantes y la determinación de parámetros de caracterización del hormigón.

El análisis de contaminantes fue realizado por el Grupo de Estudio Sobre la Energía – GESE de la UTN –

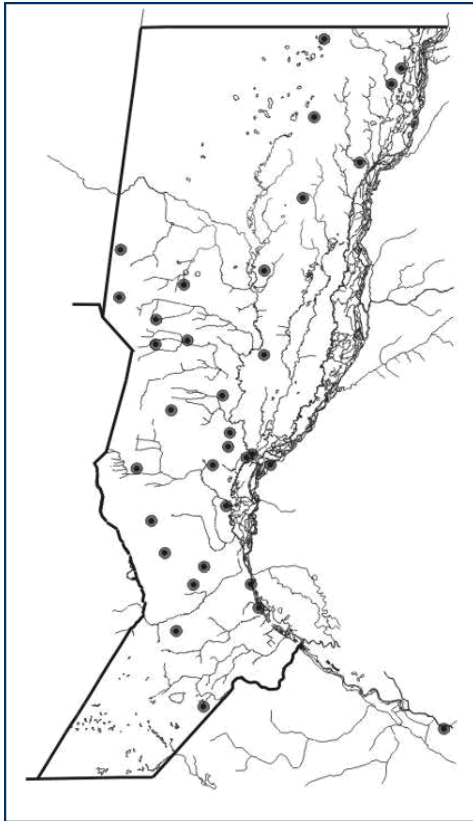


Fig. 2: Ubicación de las estructuras evaluadas

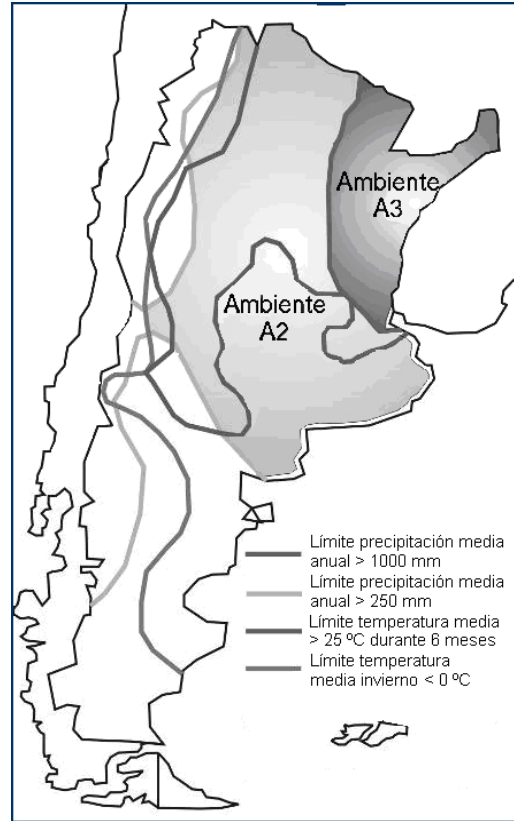


Fig. 3: Ambientes A2 y A3, donde la carbonatación es el proceso de degradación predominante

Facultad Regional Santa Fe, determinando concentraciones de monóxido de carbono (CO), ozono troposférico (O₃), material particulado (PM₁₀, en suspensión menor a 10 micrómetros), dióxido de azufre (SO₂), hidrocarburos no metano HCNM, y dióxido de nitrógeno (NO₂), con una periodicidad de 15 días.

En base a mediciones históricas, se seleccionaron siete emplazamientos para las muestras, que presentaban valores extremos de contaminación (Fig. 5). En tres de estas estaciones se dispusieron probetas protegidas de la acción de lluvias. Estas estaciones de exposición se ubican en el micro-centro, macrocentro y áreas periféricas de la ciudad de Santa Fe, respectivamente.



Fig. 5: Plano de la ciudad de Santa Fe con la localización de las estaciones

Las probetas expuestas se confeccionaron con 2 hormigones diferentes, donde se varió la relación a/c y el contenido de cemento (Tabla 2). Para la caracterización de los hormigones se realizaron determinaciones de absorción (ASTM C642) a 7, 28 y 90 días, capacidad y velocidad de succión capilar (IRAM 1871) a 28 y 90 días, densidad, y resistencia a compresión (IRAM 1546) a 7, 28 y 90 días.

Tipo de Hormigón		A	B
Relación a/c		0,45	0,65
Cantidades (kg) para 1 m ³ de H ^o	Cemento	431	276
	Arena	613	775
	Piedra	1178	1178
	Agua	194	179
Asentamiento (cm)		7.5	5.5
Resistencia a la Compresión (MPa)	7 días	30,0	16,4
	28 días	38,4	23,3
	90 días	40,3	26,0
Absorción Total (%)	7 días	5.3	5.7
	28 días	5.1	5.9
	90 días	5.7	6.4
Capacidad de succión Capilar (g/m ²)	28 días	1864,2	4510,4
	90 días	1615,3	4246,1
Velocidad de Succión Capilar, S (m/s ^{1/2})	28 días	2.2	6,8
	90 días	1,7	5,2
Densidad seca (kg/m ³)		2304	2260

Tabla 2. Dosificaciones utilizadas

Sobre un grupo de probetas se aplicaron pinturas de protección, consistentes en una laca poliuretánica de un componente y una pintura acrílica.

A fin de detectar la influencia del medio de exposición sobre las propiedades del hormigón, se determinó la profundidad del frente de carbonatación (aplicando sobre una rodaja recién cortada una solución alcohólica de fenolftaleína), el contenido de cloruros totales (IRAM 1857) y la velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos (IRAM 1683). Las mediciones se realizaron cada 6 meses, durante un período de 2 años.

Se registraron los datos de temperatura, humedad relativa ambiente y precipitaciones a fin de caracterizar el medio ambiente al cual se exponen las probetas. Estos datos (Fig. 6) fueron suministrados por el Instituto Nacional del Agua (INA).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de evaluaciones estructurales

A partir de la información recabada en los estudios de campo y los correspondientes ensayos de laboratorio efectuados con muestras de hormigón extraídas de las estructuras inspeccionadas fue posible determinar los factores que desencadenaron el proceso de deterioro, las propiedades durables del hormigón, el grado de deterioro existente en la estructura, y la predicción de la vida residual, así como, establecer las bases para seleccionar un esquema de reparación eficiente y de prolongada durabilidad.

De las 84 estructuras evaluadas, debe indicarse que 39 de ellas fueron inspeccionadas durante su construcción o dentro del primer año de construidas debido a deficiencias en el control de la resistencia potencial del hormigón o la exigencia de pruebas de carga para su habilitación. En el primer caso, las evaluaciones fueron motivadas por la inexistencia de ensayos de control del hormigón durante el proceso constructivo y permitieron detectar una importante dispersión de la resistencia a compresión respecto de los

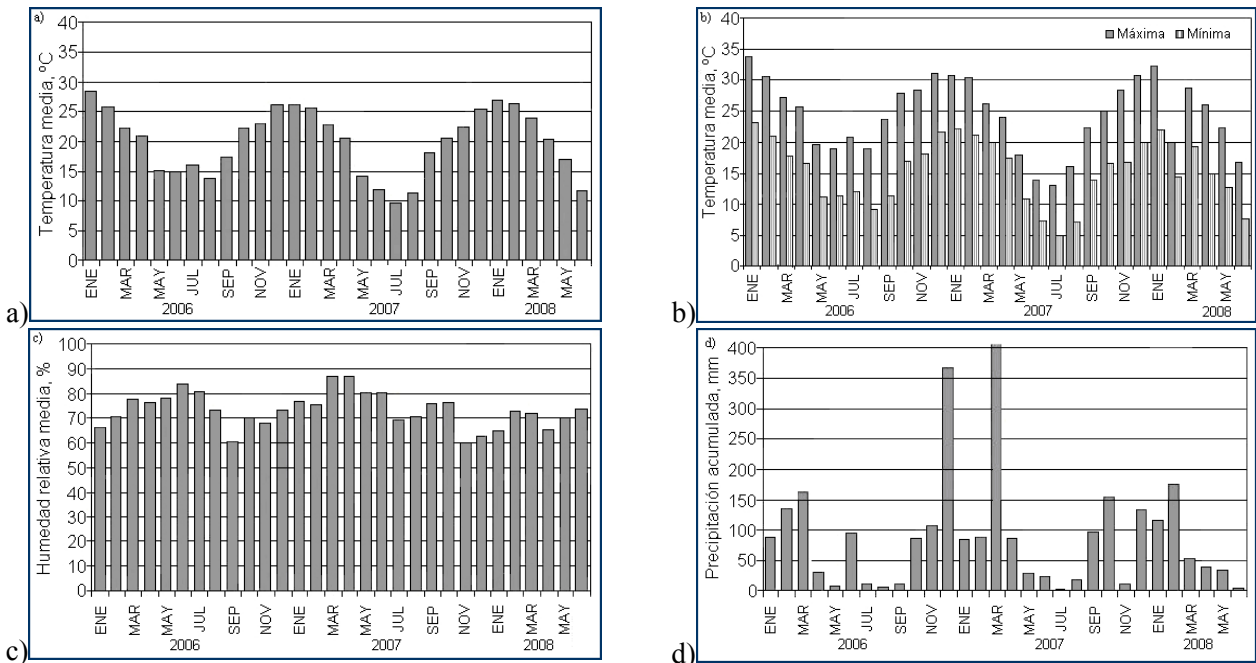


Fig. 6: Datos meteorológicos mensuales para Santa Fe entre 2006 y 2008. a) Temp. media; b) Temp. máx. y mín. media; c) humedad relativa media; d) precipitaciones acumuladas.

valores especificados en el diseño, tanto en exceso como en defecto. En lo que respecta a las pruebas de carga realizadas, en todos los casos los resultados fueron satisfactorios.

Entre las 45 estructuras restantes, se observa que el 76 % de ellas corresponden a construcciones de menos de 30 años (Fig. 7), contrariamente a lo que se esperaría si se considera que en los últimos 25 años se ha producido una incorporación masiva de nuevas herramientas tecnológicas (aditivos, adiciones, líquidos formadores de membranas de curado, equipos para la elaboración del hormigón, etc. (Traversa et al., 1999)).

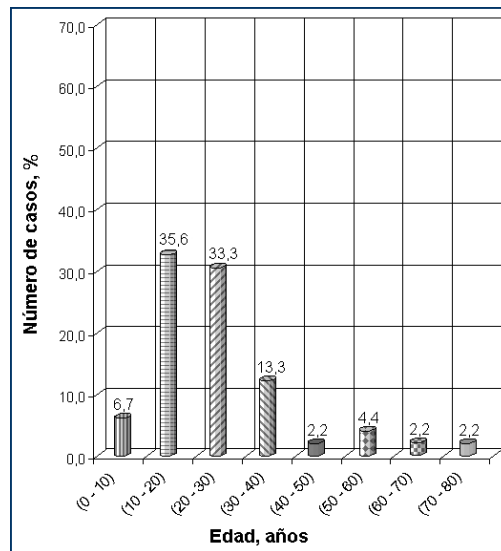


Fig. 7: Distribución de edades de la estructuras evaluadas

Entre las 71 estructuras evaluadas que presentaron patologías (no se consideran 13 estructuras evaluadas para habilitación), el inconveniente más frecuente corresponde a la falta de documentación de obra o controles poco eficaces (Fig. 8). En estos casos se verificó el desconocimiento del tipo de hormigón utilizado, de los refuerzos de acero existentes, así como la inexistencia de ensayos de control de calidad del hormigón durante el proceso constructivo. Seguidamente, se detecta un 28,2 % afectado por corrosión de armaduras. Este

porcentaje resulta levemente superior a los presentados por Helene (Helene and Figueredo, 2003) y Calavera Ruiz (Calavera, 1996) que resultan de 15 y 20 %, respectivamente.

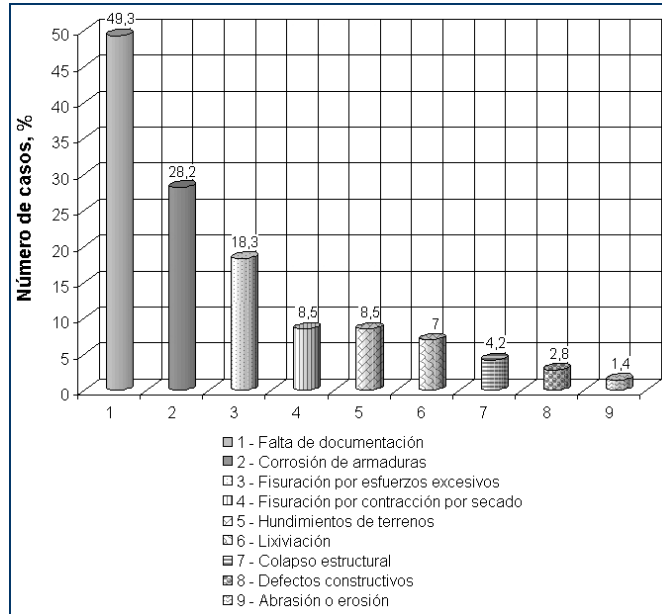


Fig. 8: Ocurrencia de patologías en las estructuras evaluadas

Se puede observar en la Fig. 9 que un 10 % de las estructuras afectadas por corrosión se debieron a la presencia de contenidos importantes de iones cloruros en el hormigón endurecido cuya incorporación se debió principalmente a la función de estas estructuras (natatorios, tanques), otro 35 % a la despasivación de las armaduras de acero por efecto de la carbonatación y el 55 % restante, debido a la carbonatación y presencia de humedad excesiva en el hormigón.

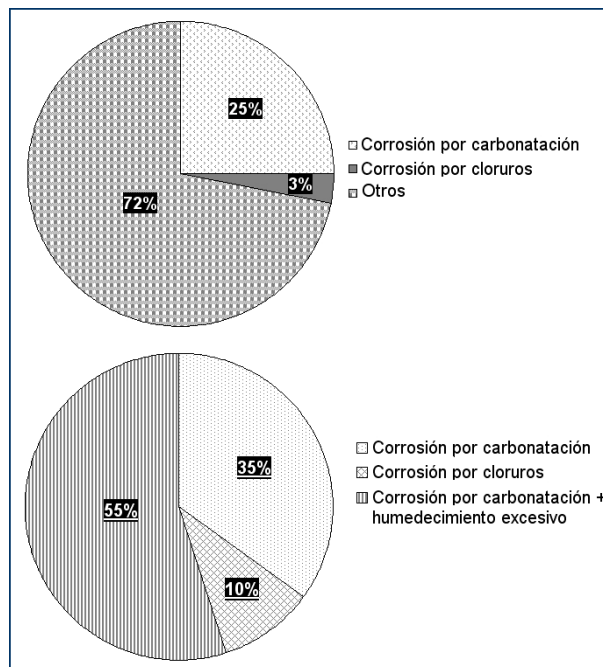


Fig. 9: Afectación por corrosión en las estructuras evaluadas

Estas observaciones resultan coincidentes con las vertidas por otros autores (Traversa, 2001) que indican que, si bien en ambientes rurales o urbanos las estructuras no deberían verse gravemente afectadas por corrosión, la existencia de recubrimientos escasos o diseños estructurales inadecuados que no permiten el

drenaje rápido del agua de lluvia, conducen a procesos incipientes de corrosión (Traversa et al., 1999).

Los espesores de recubrimientos detectados en las evaluaciones (Fig. 10a) resultan muy variables entre las diferentes obras y entre elementos estructurales de una misma obra. Si se comparan los valores medidos con los recomendados por la reglamentación se puede apreciar que sólo en el 23% de las estructuras evaluadas estos espesores han sido respetados, dejando a los restantes casos en una condición riesgosa frente al avance del frente de carbonatación. Adicionalmente, en la Fig. 10b, se observa que en la mayoría de los casos analizados, el espesor de hormigón carbonatado ha superado al espesor de recubrimiento de las armaduras. Situaciones similares han sido observadas por otros investigadores (Cabrera et al., 1997) en zonas ambientales de mayor agresividad, detectando fallas de colocación y compactación del hormigón y recubrimientos insuficientes que dejan las barras prácticamente en contacto con la atmósfera.

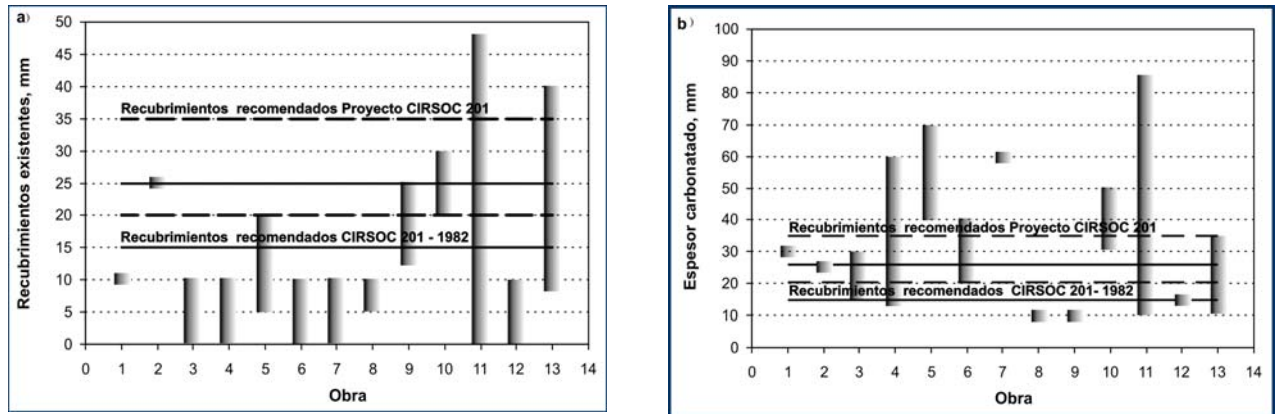


Fig. 10: Variación de parámetros medidos en las estructuras afectadas por corrosión a) Recubrimientos; b) Espesores carbonatados

En lo que respecta a la ejecución deficiente de las estructuras, estas situaciones deben ser atribuidas a fallas en el control durante la etapa de ejecución, resultando incapaz de garantizar la calidad del hormigón y los recubrimientos mínimos que deben tener las armaduras en los diversos ambientes de exposición. Para las obras pequeñas la situación no ha sufrido importantes cambios en los últimos años a pesar de los avances tecnológicos existentes. La problemática continúa siendo el empleo de dosificaciones empíricas y el control de calidad, cuando se carece de infraestructura de elaboración y control o cuando los profesionales que participan no aplican los conocimientos actualizados (Cabrera, 1992).

En nuestro medio, sólo en las obras de gran magnitud o de importancia especial por la agresividad del medioambiente o la concepción estructural, por la participación estatal o por el alto costo de las mismas se considera justificada la realización de estudios completos. En las obras pequeñas, los profesionales a cargo se conforman con conocer pocas o casi ninguna de las características del hormigón fresco y endurecido, más allá de la resistencia a compresión (Giovambattista et al., 1981).

Las causas de patologías atribuidas a uso y mantenimiento y concepción general o diseño, tienen una relación particular con la presencia de agua en contacto con las estructuras evaluadas. En estas estructuras el estancamiento de agua sobre los elementos de hormigón armado, fue un factor determinante en su durabilidad, tal como lo demuestran los porcentajes de estructuras afectadas por corrosión por carbonatación y humedecimiento excesivo (Fig. 9) (Di Maio et al., 1995), debido a que se produjeron modificaciones significativas del microclima de exposición, activando los procesos corrosivos.

Análisis de la exposición de probetas en ambientes urbanos

De acuerdo a los resultados del análisis estadístico de evaluaciones estructurales, se identificó a la corrosión por carbonatación como la patología más recurrente en la región centro-este argentina. A fin de analizar la evolución del proceso de carbonatación del hormigón, en diferentes microclimas constituidos por diferentes niveles de concentraciones de contaminantes en ambientes urbanos, se recurrió a la exposición de hormigones de diferentes calidades.

Las concentraciones de contaminantes se estudiaron mediante pruebas no paramétricas como el test de Mann Whitney (Montgomery and Runger, 1996), a fin de determinar diferencias significativas entre las

condiciones de exposición. En la Tabla 3 se resumen los valores promedio de contaminantes determinados durante el período de exposición, evidenciando que las estaciones comprendidas en el grupo B presentan los mayores niveles de contaminación.

Grupo	Estación	Concentraciones promedio de contaminantes (mg/m ³)					
		CO	HC	NO ₂	O ₃	PM ₁₀	SO ₂
A	1	0.87	0.12	0.05	0.07	0.01	0.0
	3	0.38	0.03	0.07	0.10	0.01	0.0
	7	0.64	0.05	0.07	0.06	0.01	0.0
B	2	1.56	0.30	0.04	0.07	0.01	0.01
	4	1.19	0.14	0.05	0.08	0.01	0.0
C	5	0.07	0.0	0.08	0.07	0.02	0.0
	6	0.25	0.15	0.06	0.07	0.02	0.0

Tabla 3. Concentraciones promedio de contaminantes

Para las probetas expuestas en cada estación y en distintas condiciones de protección se registraron los valores de avance del frente de carbonatación y de velocidad del pulso ultrasónico (Tabla 4).

Puede observarse en todos los ambientes de exposición, que independientemente de las concentraciones de contaminantes presentes, las pinturas aplicadas se comportaron como un efectivo recubrimiento anticarbonatación.

Para los hormigones protegidos mediante estos recubrimientos, se registraron avances nulos del frente de carbonatación. Solamente luego de 24 meses de exposición, en algunas probetas elaboradas con el hormigón de razón a/c más elevada ($a/c = 0.65$) y protegidas con la pintura de base poliuretánica se evidenciaron penetraciones puntuales cercanas a los poros de mayores dimensiones. Este comportamiento resulta coherente con las recomendaciones de aplicaciones vertidas por algunos autores (Helene and Figueredo, 2003) que indican que requieren un sustrato de aplicación homogéneo y liso con aberturas o poros de dimensión no mayor a 0.1 mm.

El contenido de cloruros totales en los hormigones no superó en ninguno de los casos el 0.7 % referido a la masa de cemento en el hormigón. Este resultado confirma la reducida incidencia encontrada en las evaluaciones in situ de afectaciones relacionadas a la corrosión de armaduras por cloruros, aún en los emplazamientos urbanos correspondientes a los mayores niveles de contaminación.

En las Fig. 11a) y 11b) se observa la evolución de la profundidad del frente de carbonatación y de la velocidad de pulsos ultrasónicos para los hormigones expuestos durante 24 meses, respectivamente. El avance de la carbonatación resulta más rápido en los hormigones tipo B ($a/c=0.65$) que en los hormigones de tipo A ($a/c=0.45$), debido a que aumenta el volumen de poros capilares y, por lo tanto, la permeabilidad al agua y a los gases del material. Para ambos tipos de hormigones se observa que la penetración del frente de carbonatación tiende a incrementarse levemente en las probetas que se encuentran protegidas del humedecimiento por acción de las precipitaciones. Estas observaciones resultan coincidentes con experiencias (Al-

Estaciones		Protección	Pintura	Hormigón	Penetración del frente de carbonatación (mm)				Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)					
					Tiempo de exposición (meses)				Tiempo de exposición (meses)					
					6	12	18	24	6	12	18	24		
Grupo A	Estación 1	Sin protección	---	A	0	1	3	----	4466	4231	4517	----		
			---	B	3	6	7	----	4133	4111	4150	----		
			Acri	A	0	0	0	----	4343	4270	4139	----		
			Acri	B	0	0	0	----	4251	4222	4325	----		
			Pol	A	0	0	0	----	4491	4358	4407	----		
	Estación 3	Sin protección	---	A	0	1	2	2	4129	4389	4322	4301		
			---	B	4	6	8	8	4223	4182	3568	4175		
			Acri	A	0	0	0	0	4373	4359	4320	4160		
			Acri	B	0	0	0	0	4208	4186	4277	4167		
			Pol	A	0	0	0	0	4302	4265	4297	4080		
		Con protección	---	A	0	2	3	3	4274	4339	4391	4217		
			---	B	4	7	7	8	4146	4049	4018	3925		
			Acri	A	0	0	0	0	4243	4283	4157	4088		
			Acri	B	0	0	0	0	4060	4096	4120	4053		
			Pol	A	0	0	0	0	4029	4055	4128	3990		
Grupo B	Estación 2	Sin protección	---	A	0	1	2	3	4354	4330	4394	4330		
			---	B	4	7	8	9	4027	4071	4051	4071		
			Acri	A	0	0	0	0	4426	4349	4342	4349		
			Acri	B	0	0	0	0	4204	4076	4179	4076		
			Pol	A	0	0	0	0	4350	4334	4420	4334		
	Estación 4	Sin protección	---	A	1	2	2	3	4222	4397	4406	4383		
			---	B	4	5	6	8	4128	4197	4218	4254		
			Acri	A	0	0	0	0	4360	4493	4671	4356		
			Acri	B	0	0	0	0	4076	4240	4538	4257		
			Pol	A	0	0	0	0	4399	4318	4480	4378		
		Grupo C	Estación 5	Sin protección	---	A	0	1	1	1	4271	4363	4328	4223
					---	B	4	6	6	8	4048	4074	4050	3993
					Acri	A	0	0	0	0	4350	4404	4350	4201
					Acri	B	0	0	0	0	4160	4105	4160	4138
					Pol	A	0	0	0	0	4329	4413	4329	4264
Estación 6	Sin protección		---	A	0	1	1	3	4369	4406	4280	4231		
			---	B	4	5	7	8	4028	4095	4188	4000		
			Acri	A	0	0	0	0	4352	4300	4366	4062		
			Acri	B	0	0	0	0	4079	4167	4120	4161		
			Pol	A	0	0	0	0	4373	4286	4373	4159		
	Con protección	---	A	1	2	2	3	4402	4404	4396	4044			
		---	B	4	6	8	9	3984	4036	4171	3954			
		Acri	A	0	0	0	0	4331	4318	4333	4139			
		Acri	B	0	0	0	0	4078	4105	4192	3981			
		Pol	A	0	0	0	0	4401	4302	4370	4087			
Pol	B	0	0	0	1	4194	4254	4239	4099					

Tabla 4. Mediciones realizadas sobre las probetas

Khaiat and Haque, 1997) en las que se ha verificado diferencias significativas entre los espesores carbonatados medidos en hormigones ubicados en el interior y exterior de las estructuras, debido a la modificación del contenido de CO_2 de la atmósfera de contacto y presencia de humedad. Para que se produzca la reacción de carbonatación, es necesaria la presencia de agua, siendo la situación preferencial una humedad comprendida entre 50 y 60 %. Cuando el hormigón tiene sus poros capilares saturados o cuando la red se encuentra total-mente seca, el CO_2 no puede ingresar (Traversa, 2008). Se observa en la Fig. 6c que la humedad relativa ambiente de la ciudad de Santa Fe resulta cercana a este nivel óptimo para el progreso del fenómeno de la carbonatación.

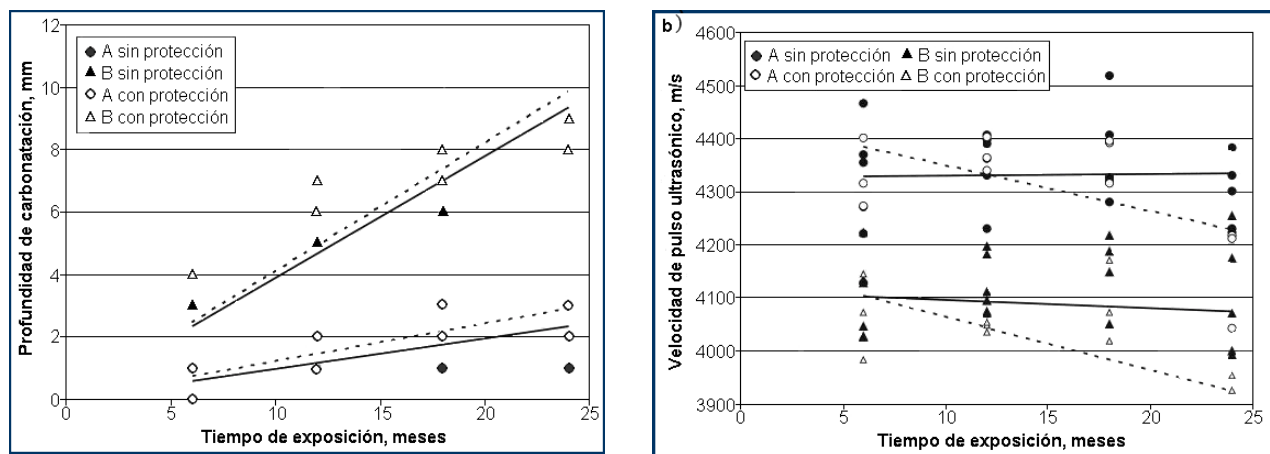


Fig. 11: a) Variación de la profundidad de carbonatación. B) Variación de la velocidad de pulsos ultrasónicos

Puede apreciarse que para los hormigones de menor calidad (tipo B, $a/c=0.65$) el frente de carbonatación consume en un período de sólo 2 años el espesor de recubrimiento de armaduras exigido por el reglamento vigente (INTI – CIRSOC, 1982). Esta situación resulta coherente con los resultados obtenidos en las evaluaciones estructurales, que indican reducciones significativas de la vida útil prevista para las estructuras.

La evolución de la velocidad de pulsos ultra-sónicos muestra que los hormigones (Fig. 11b) no han modificado significativamente sus características (las curvas se mantienen aprox. planas), no obstante, para las probetas que se encuentran protegidas del humedecimiento por acción de las precipitaciones se evidencia una reducción de este parámetro, que confirma un proceso de reducción del contenido de humedad del hormigón hasta alcanzar el equilibrio con el ambiente.

En las Fig. 12a) a 12d) se aprecia el incremento de la profundidad del frente de carbonatación para los hormigones ubicados en los distintos ambientes de exposición. Puede observarse que para el Grupo B, que corresponde a la exposición a mayores niveles de contaminantes, la penetración resulta mayor y más veloz. Para el Grupo C, que valores de penetración resultan los más reducidos. Este comportamiento se ve justificado por las características de los diferentes sectores urbanos: el Grupo B corresponde al microcentro urbano con una densidad de edificaciones y de circulación auto-motor elevada y una escasa presencia de áreas verdes o que propicien un buen nivel de ventilación; el Grupo A se encuentra en una situación intermedia; el Grupo C corresponde a sectores de mediana a reducida circulación automotor, gran presencia de áreas verdes y excelente nivel de ventilación.

De acuerdo a estas mediciones, puede indicarse que a pesar de encontrarse la totalidad de las muestras en un ambiente caracterizado como A2 según el proyecto de reglamento (INTI – CIRSOC, 2002), el proceso de carbonatación evoluciona a velocidades diferentes de acuerdo a las características del microclima en el cual se encuentra expuesto el hormigón. Esta situación debería alertar a los diseñadores respecto de la necesidad de adoptar diferentes medidas de protección acordes a los niveles de contaminantes derivados de la densidad de actividades urbanas, especialmente de la densidad de circulación automotor.

CONCLUSIONES

En este trabajo se analizaron resultados obtenidos en evaluaciones realizadas en la región centro-este argentina y en la exposición a ambientes urbanos con diferentes niveles de contaminación. En este marco,

para el conjunto de estructuras evaluadas durante el período 1995 a 2005 y para los materiales empleados en las experiencias, los resultados obtenidos indican que:

a) Los conocimientos tecnológicos desarrollados en los últimos años, vinculados con el comportamiento del hormigón frente a distintos medios agresivos, no se aplican adecuadamente en obra. Más aún, se detecta la persistencia de metodologías inapropiadas de construcción y deficiencias sistemáticas en el registro y conservación de datos correspondientes al período de ejecución.

b) En estructuras ubicadas en ambientes rurales y urbanos (agresividad moderada), se detectan, a edades de 10 a 30 años, procesos incipientes de corrosión de sus armaduras, debidos a la existencia de espesores de recubrimiento nulos o mínimos y carbonatados. En estos ambientes, la exposición de hormigones a microclimas con elevada concentración de CO debido a las actividades antropogénicas produce un incremento significativo en la velocidad de avance del frente de carbonatación, por lo cual debería ser tenido en cuenta al definir las condiciones de exposición de las estructuras.

c) El avance del frente de carbonatación tiende a ser más rápido en hormigones protegidos del humedecimiento periódico por lluvias. No obstante, el humedecimiento prolongado de las estructuras activa y acelera los procesos de corrosión en hormigones carbonatados, provocando importantes pérdidas de sección de acero de refuerzo, fisuras y desprendimientos de hormigón. Estas situaciones están motivadas, principalmente, en diseños inadecuados, falta de mantenimiento o permanencia de las estructuras sin revestimientos o cerramientos previstos originalmente.

d) La aplicación de pinturas acrílicas y poliuretánicas resultan efectivas como barreras anticarbonatación, no obstante, se requieren evaluaciones más prolongadas a fin de determinar la durabilidad de los mismos.

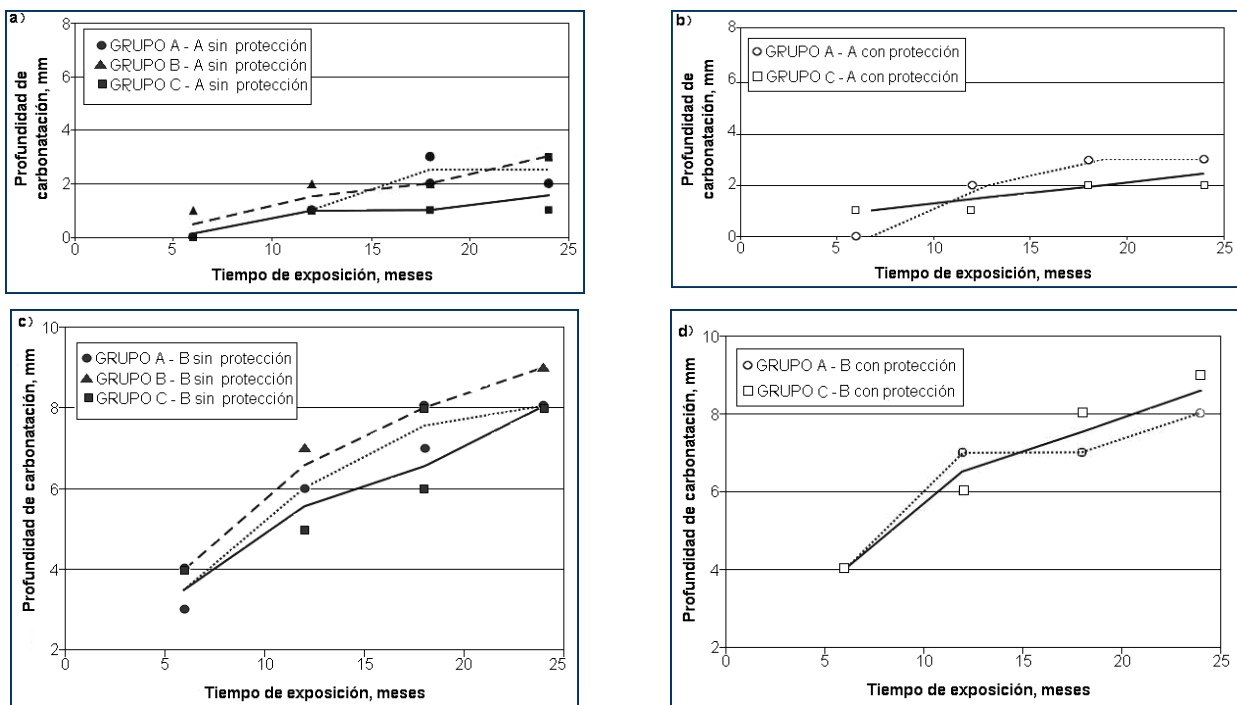


Fig. 12. Profundidad de carbonatación para cada grupo de exposición

AGRADECIMIENTOS

La concreción de este trabajo fue posible al apoyo recibido del Instituto Nacional del Agua, del Grupo de Estudio Sobre la Energía (GESE), a la empresa SIKA Argentina y a Relastic S.R.L..

REFERENCIAS

Traversa L., Giovambattista A., Di Maio A., Eperjesi L., “Comportamiento en servicio de estructuras de hormigón armado de edades diferenciadas: Análisis comparativo de estructuras construidas en la Pcia. de Buenos Aires, Argentina”, en Memoria de V Congreso Iberoamericano de Patología de las Construcciones y VII Congreso de Control de Calidad (CONPAT 99), Montevideo, Uruguay, 16 a 21 de octubre 1999, 617-622, (1999).

INTI – CIRSOC, “Reglamento CIRSOC 201, Proyecto, cálculo y ejecución de estructuras de hormigón armado y pretensado”, Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles, Argentina, (1982).

A. Giovambattista, “El diseño por durabilidad de las estructuras de hormigón y los reglamentos de seguridad: soluciones actuales y en desarrollo”, “Durabilidad del Hormigón Estructural”, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Argentina, 259-306, (2001).

A. Di Maio, L. Traversa, J. Sota, “Análisis de algunos de los casos más relevantes ocurridos en la Argentina en los últimos años”, en Memoria de III Congreso Iberoamericano de Patología de las Construcciones y V Congreso de Control de Calidad (CONPAT 95), La Habana, Cuba, 17 al 20 de octubre, (1995).

Lima Dórea S. C., Ferreira e Silva L., “Estudo sobre índices de patologías das construções – paralelo entre a situação mundial e a brasileira”, en Memoria de V Congreso Iberoamericano de Patología de las Construcciones y VII Congreso de Control de Calidad (CONPAT 99), Montevideo, Uruguay, 16 a 21 de octubre 1999, 610-616, (1999).

R. Husni, J. Galuppo, “Patología de las estructuras y los materiales”, Ed. UBA, Argentina, (1989).
P. Helene, F. P. Figueiredo, “Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón. Reparación, refuerzo y protección”, CYTED, Brasil, 25, (2003).

J. Calavera, “Patología de Estructuras de hormigón armado y pretensado, Tomo I”, INTEMAC, España, 25, (1996).

Schiessl P., “Durability of reinforced concrete structures”, *Construction and Building Materials*, 10, 5, 289-292, (1996).

L. Traversa, “Corrosión de armaduras en atmósferas rurales, urbanas, marinas e industriales”, “Durabilidad del Hormigón Estructural”, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Argentina, 217-257, (2001).

C.L. Page, “Basic Principles of Corrosion”, “RILEM Rep. Corrosion of steel in concrete”, P.Schiessl, USA, 3-21, (1988).

P. Metha, P.J. Monteiro, “Concrete structure, properties and materials”, Prentice Hall, USA, 163, (1993).

S. Mindess, J. Young, “Concrete”, Prentice. Hall, Inc., USA, 558-559, (1981).

A. Neville, “Tecnología del concreto I”, Editorial Limusa, México, (1981).

R.F.M. Bakker, “Initiation Period”, “RILEM Report Corrosion of steel in concrete”, P.Schiessl, USA, 22-55, (1988).

Carrasco M.F., Defagot C.A., Segovia M.D., Paez de la Torre J.M., Guillarducci A., Quirós F., “Análisis estadístico de patologías de las estructuras de hormigón”, en Memorias de 16º Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Mendoza, Argentina, 8 a 10 de noviembre de 2006; tomo, 331-338, (2006).

L. Traversa, “Conferencia: Corrosión de armaduras en atmósferas rurales, urbanas, marinas e industriales”, en Memorias de Jornada Técnica “Corrosión en estructuras de hormigón armado”, La Plata, Argentina, 4 de julio 2008, (2008).

INTI – CIRSOC, “Reglamento CIRSOC 201, Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón (en proceso de aprobación)”, Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles, Argentina, (2002).

Al-Khaiat H., Haque M. N., “Carbonation of some coastal concrete structures in Kuwait”, *ACI Materials Journal*, 94, 6, (1997).

Traversa L., Di Maio A., “Comportamiento de estructuras de hormigón armado construidas en distintos ambientes de la Pcia. de Bs. As.”, en Memorias de 12º Reunión Técnica de la Asoc. Argentina de Tecnología del Hormigón, La Plata, Argentina, 7 a 9 de julio 1995, 415-425, (1995).

Red DURAR, “Manual de Inspección, evaluación y diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado”, CYTED, Brasil, (1997).

Andrade C., Castelo Y., Alonso M. C., González J. A., “The determination of the corrosion rate in steel embeded in concrete by the polarization resistance and A. C. impedance”, “ASTM STP 906”, ASTM, USA (1986).

Millard S. G., Harrison J. A., Eduards A. J., “Measurement of the electrical resistivity of reinforced concrete structures for the assessment of corrosion risk”, *Br. J. of Nondestructive Testing*, 31, 616, (1989).

Traversa L., Di Maio A., Eperjesi L., Pavlicevic R., “Relevamiento de puentes carreteros ubicados en ambientes rurales de la provincia de Buenos Aires”, *Revista Hormigón*, 34, 31-43, (1999).

O. A. Cabrera, M. A. González, V. F. Rahhal, “Aspectos característicos de las patologías de estructuras civiles de la costa atlántica argentina”, en Memorias de IV Congreso Iberoamericano de Patología de las Construcciones y VI Congreso de Control de Calidad (CONPAT 99), Porto Alegre, Brasil, 21 a 24 de octubre de 1997, 427-434, (1997).

Cabrera O., “Hormigón empleado en pequeñas obras”, *Revista Hormigón*, 21, 41-49, (1992).

Giovambattista A., Batic O., Traversa L., “Durabilidad de hormigones de cemento portland”, *Revista Hormigón*, 5, 5-20, (1981).

D. C. Montgomery, G. C. Runger, “Probabilidad y Estadística aplicadas a la Ingeniería”, Mc Graw Hill, México, 787, (1996).