

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	----
	Pol	B	0	0	0	----	4245	4089	4288	----		
	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
	Pol	B	0	0	0	1	4132	4229	4197	4095		
	Estación 7	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	
Pol	B	0	0	0	0	4024	4138	4183	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
	Pol	B	0	0	0	4	3979	4238	4305	4238		
	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	
Pol	B	0	0	0	0	4210	4240	4256	4229			
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
		Pol	B	0	0	0	0	4090	4211	4090	3980	
		Con protección	---	A	1	1	2	2	4317	4365	4317	4212
			---	B	4	7	7	9	4074	4054	4074	3684
			Acri	A	0	0	0	0	4360	4306	4360	4264
			Acri	B	0	0	0	0	4049	4226	4049	4033
	Pol		A	0	0	0	0	4444	4397	4444	4152	
	Pol	B	0	0	0	1	4112	4231	4112	3971		
	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	
Pol		B	0	0	0	0	4415	4443	4385	4204		
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.

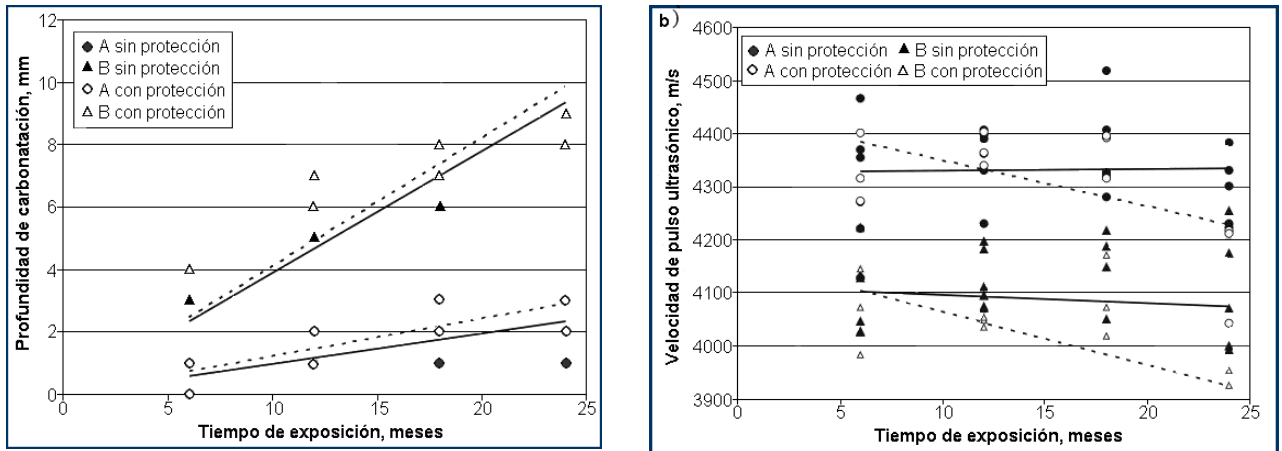


Fig. 11: a) Variación de la profundidad de carbonatación. B) Variación de la velocidad de pulsos ultrasónicos

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.

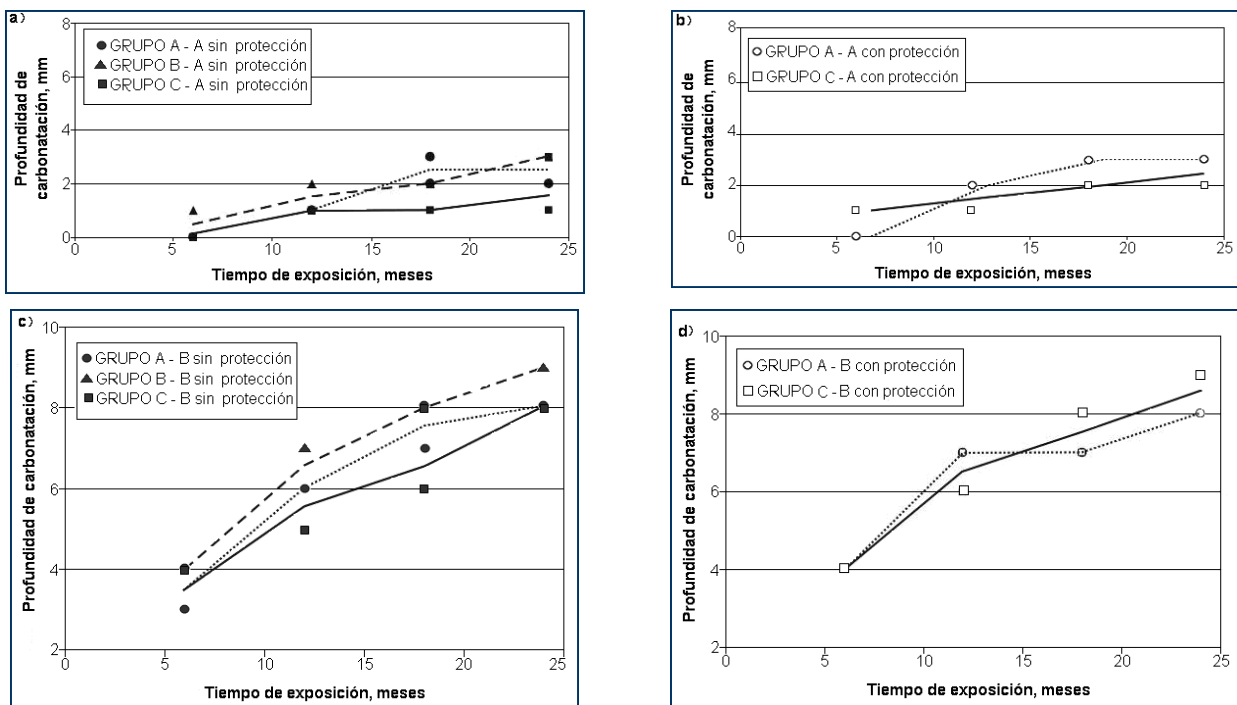


Fig. 12. Profundidad de carbonatación para cada grupo de exposición

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).