

Comportamiento de hormigones expuestos a condiciones naturales de alta agresividad química

Angel Oshiro

Profesor Titular de la Universidad Tecnológica Nacional
– Facultad Regional Córdoba;
Director do Grupo de Investigación en Tecnología de los
Materiales y Calidad
Córdoba - República Argentina
aoshiro@scdt.frc.utn.edu.ar

Carlos Baronetto

Profesor Titular de la Universidad Tecnológica Nacional
– Facultad Regional Córdoba;
Grupo de Investigación en Tecnología de los Materiales y
Calidad.
Córdoba - República Argentina
cbaronetto@civil.frc.utn.edu.ar

Claudia Beltramone

Profesora Adjunta de la Universidad Tecnológica Nacional
– Facultad Regional Córdoba;
Grupo de Investigación en Tecnología de los Materiales y
Calidad.
Córdoba - República Argentina
cbeltramone@ciudad.com.ar

María Positieri

Profesora Titular de la Universidad Tecnológica Nacional
– Facultad Regional Córdoba;
Grupo de Investigación en Tecnología
de los Materiales y Calidad.
Córdoba - República Argentina
mpositieri@yahoo.com.ar

Cuando se considera el hormigón en estado endurecido, un aspecto muy importante es la durabilidad del hormigón, la que puede depender del ambiente al que se expone o de causas internas del hormigón mismo. Este trabajo iniciado en el año 1976 por los ingenieros argentinos Oshiro y Rocha, centra su atención en el primer aspecto, presentando los resultados de la exposición de hormigones que estuvieron durante más de 20 años en un ambiente agresivo con elevado contenido de sulfatos y cloruros, geográficamente ubicado en Las Salinas Grandes, provincia de Córdoba, en el centro de la República Argentina. Los resultados difunden la experiencia de un caso real como un aporte para el medio científico y técnico, que permita tomar conciencia de las decisiones a tomar cuando el hormigón es expuesto a medios agresivos; permiten confirmar el deterioro químico progresivo de la pasta de cemento, en menor magnitud en hormigones con cemento puzolánico y la ventaja del empleo de bajas relaciones agua cemento y aditivo incorporador de aire en las principales propiedades del hormigón, controladas durante 20 años.

Palabras-clave: Carbonatación. Cloruros.
Condiciones de exposición. Durabilidad. Sulfatos.



1 Introducción

El hormigón debe soportar las condiciones para las que ha sido diseñado sin deterioro y durante un período de varios años, conformando lo que se entiende por vida útil. Se dice que un hormigón así, es durable. Sin embargo es creciente el número de estructuras de hormigón que presentan deterioro precoz. En principio esas estructuras deberían durar, sin costos inesperados ni excesivos de mantenimiento preventivo, en el orden de 50 años, pero se encuentran estructuras deterioradas con edades de 10 a 20 años y a veces menos. Esto implica costos económicos y sociales asociados a esas manifestaciones patológicas que son extremadamente elevados, justificando la realización de estudios experimentales y la profundización de las investigaciones.

La resistencia del hormigón a los procesos destructivos iniciados por reacciones químicas involucra generalmente las interacciones entre agentes agresivos presentes en el medio externo, por ejemplo suelos y agua, y los constituyentes de la pasta de cemento.

En una pasta de cemento bien hidratada, la fase sólida, que es compuesta principalmente de hidratos de calcio relativamente insolubles, se encuentran en estado de equilibrio estable con un fluido en los poros que tiene un alto pH. Teóricamente cualquier medio con pH menor que 10 puede ser calificado como agresivo, porque la reducción de la alcalinidad del fluido de los poros llevaría al final a una desestabilización de los productos cementíceos de hidratación (GOMÁ, 1979).

Hay que destacar que las reacciones químicas se manifiestan a través de efectos físicos nocivos tales como el aumento de la porosidad y la permeabilidad, disminución en la resistencia, fisuración y delaminación. En realidad, los procesos físicos y químicos de deterioro actúan al mismo

tiempo y pueden hasta potenciarse mutuamente, interrelacionándose entre sí y mostrando claramente la complejidad de los problemas de durabilidad del hormigón en la práctica.

La relación que existe entre la porosidad y la durabilidad se refleja en prácticamente todos los reglamentos y códigos en el ámbito internacional. En ellos se indica que para obtener una adecuada durabilidad frente a distintas condiciones de exposición, es condición necesaria pero no suficiente que la relación agua cemento del hormigón sea menor que cierto valor indicativo. Podría decirse entonces que la porosidad es un parámetro condicionante de primer orden para asegurar la durabilidad del hormigón (FERNÁNDEZ LUCO, 2001). El concepto de porosidad del hormigón está relacionado con una red de poros, canales y capilares, no siempre comunicados entre sí, que permiten que el hormigón presente permeabilidad a los líquidos y a los gases (ANDRADE, 1992; KUMAR; BHATTACHARJEE, 2002).

Buenfeld (2000) destaca, en un resumen, los casos más relevantes de transferencia de fluidos en el hormigón relacionados con la exposición del hormigón. El caso más interesante de mecanismo compuesto o acoplado es el de “efecto mecha”, que ocurre cuando una cara del hormigón está siempre saturada y la otra cara está al aire, sufriendo un proceso de secado por evaporación. El transporte se realiza por un efecto combinado de penetración de agua bajo presión, absorción capilar y vaporización del agua en los poros del hormigón.

Según Neville (1997) lo que determina cuál es el mecanismo de transporte dominante en el hormigón es la configuración de poros (tipo y distribución del tamaño de los poros o microfisuras) y el porcentaje en que están llenos con agua, junto con las microfisuras en la matriz de la pasta de cemento hidratada y la interface pasta-agregado (FIB BULLETINS, 1999). Fernández Luco (2001) destaca que es evidente que dos materiales con

idéntica porosidad pero con distinta conectividad entre los poros se comportarán en forma diferente en lo que respecta a impedir el ingreso de agentes agresivos, siendo el material con poros interconectados más susceptible.

Muchos investigadores como Garboczi (1990), Helene (1993), Frey et al. (1994), MacDonald et al. (1995), Neville (1997), Jones et al. (1997), Ollivier (1998), Fernandez Luco (2001), Irassar (2001), señalan que tanto la difusividad, determinada por las leyes de Fick y la permeabilidad, medida por la Ley de Darcy, no representan la realidad, ya que se considera a los poros de la materia analizada como poros continuos, lo que no sucede en el hormigón.

Neville (1997) distingue tres mecanismos de entrada y circulación de fluidos a través del hormigón: la penetración de agua bajo presión, la succión capilar y la difusión. Además de estos tres mecanismos, el FIB BULLETINS (1999) cita la migración, que es el efecto de un campo eléctrico que puede ser oriundo de la deflagración de pilas de corrosión electroquímicas o de una diferencia de potencial generada por una fuente externa (HELENE, 1993).

La complejidad del tema y la necesidad de estudios experimentales fue lo que motivó a los ingenieros Rocha y Oshiro a iniciar en el año 1976 un trabajo de investigación referido al ataque químico del hormigón, entendiendo como tal a los procesos de degradación causados por agentes agresivos en el ambiente externo a la estructura que se transportan en solución a su interior y reaccionan con algún constituyente de la pasta de cemento, según lo definido por Irassar (2000).

2 Objetivo

El objetivo de este trabajo es presentar los resultados de una investigación desarrollada du-

rante más de veinte años para estudiar el comportamiento de distintos tipos de hormigones frente a un medio de alta agresividad química.

3 Metodología

En este trabajo se simula en una estación experimental la acción de la agresión en estructuras de hormigón de fundación y emergentes, en este caso probetas cilíndricas de 15 x 30 centímetros (cm), cuando están en contacto de con el suelo y agua con elevado contenido de sulfatos y cloruros.

El plan de trabajo se inició con la caracterización del medio agresivo, realizando los autores el análisis químico del agua y del suelo de contacto, tomando muestras a nivel superficial y profundo. Se caracterizaron los materiales componentes de los hormigones a investigar y se dosificaron considerando una baja relación agua/cemento siguiendo las recomendaciones de la época para hormigones durables. Se elaboraron los hormigones según las reglas del buen arte y se moldearon y curaron probetas cilíndricas de 15 x 30 cm., con y sin armadura. Luego de 28 días de curado en cámara húmeda se trasladaron las probetas al medio agresivo natural, definiéndose dos condiciones de exposición; en una de ellas las probetas fueron enterradas para su estudio en condiciones similares a las fundaciones de una estructura; en la otra condición de exposición las probetas se expusieron en la superficie del terreno para simular estructuras emergentes del nivel natural del terreno. A los efectos de realizar una comparación, se mantuvieron probetas patrones en el ambiente de laboratorio, como referencia. Para la realización de los ensayos previstos en el plan de trabajo se retiraron periódicamente muestras, procediendo también a su observación visual.

La estación experimental estaba ubicada en una zona aislada, sin medios de seguridad; debi-



do al tiempo prolongado de exposición, por efecto del vandalismo y grado de deterioro de las probetas, sólo fue posible realizar el seguimiento en forma periódica de algunas variables hasta los cinco años. Las variables controladas durante cinco años fueron la resistencia a la compresión, la resistencia a la tracción por compresión diametral, el módulo de elasticidad estático y por último como observación visual, la forma de ataque superficial en las probetas.

Luego de transcurridos cinco años y como consecuencia de la depredación sufrida, se decidió interrumpir el estudio sistemático. Transcurridos veinte años, en una segunda etapa, con las muestras rescatadas se completó el estudio decidiendo realizar algunos ensayos de acuerdo al estado que presentaban las probetas remanentes. Se determinó la absorción (ASTM C642), la densidad, la velocidad de propagación de la onda por ultrasonido y la profundidad de carbonatación.

4 Caracterización del medio agresivo

La zona en estudio está ubicada en la República Argentina, en la provincia de Córdoba, al Norte-Noreste de la Región de las Sierras Pampeanas, ubicadas al centro oeste del país; esta región incluye porciones de siete provincias argentinas. Es una zona eminentemente mediterránea con la presencia de masas evaporíticas en forma de salinas y/o sales, régimen cíclico de inundación y secado, que origina una estratificación superficial de sales de algunos centímetros de espesor. Estas particularidades condicionan un ambiente en que la ejecución y mantenimiento de elementos de hormigón simple, armado o pretensado requieren exigencias especiales.

Las características de esta zona que comprende un tramo de la cuenca de las Salinas Grandes

(remanente de un lago de mucha mayor extensión que la actual, existente en el Pleistoceno) son las de una planicie ubicada a unos 395 m sobre el nivel del mar con clima continental, árido, alternando subtropical con estación seca; la latitud le asegura una fuerte radiación anual, con humedades relativas del 30 al 80%.

Se producen variaciones bruscas de temperatura y apreciable amplitud térmica entre el día y la noche. Las temperaturas máximas en verano superan los 40°C. En relación a las precipitaciones las mismas muestran extrema irregularidad de un año a otro, abarcando la estación cálida noviembre/marzo, período donde se agudiza la evaporación. El promedio anual de lluvia caída no supera los 220 milímetros (mm). Los vientos más frecuentes son del Este, Noreste y Sudoeste, siendo su fuerza mayor en el verano, con períodos reiterados de calma.

La hidrografía tiene características propias de zonas áridas permitiendo la infiltración rápida, con aguas subterráneas poco profundas y salinizadas; la concentración de sales crece desde la periferia al centro de las salinas; el suelo es muy fino, constituido por limos fluviales y terrestres. Se presentan con variable intensidad distintos factores de degradación tales como la acción eólica e hídrica, además de la salinización. Tienen concentraciones salinas elevadas, ya sea por baja permeabilidad del suelo o la presencia de capas freáticas a poca profundidad. La vegetación muestra especies carnosas con y sin hojas, que a veces desaparecen dejando la superficie desnuda.

Para evaluar la severidad potencial de la exposición del hormigón se efectuó un muestreo del suelo a nivel superficial y a distintas profundidades, realizándose un análisis químico para determinar el contenido de sustancias agresivas. Los resultados se presentan en la Tabla 1 mostrando que desde la superficie y hasta la profundidad estudiada la presencia de sulfatos solubles (expres-

sada en porcentaje) puede clasificarse según el Reglamento Argentino CIRSOC 201, Capítulo 2, Tabla 2.4 como “grado de ataque fuerte”.

Tabla 1: Análisis químico de suelos de contacto

Muestra	Profundidad [m]	Sulfatos solubles en agua $\text{SO}_4^{=}$ [%]	Cloruros Cl^- [%]
1	0	1,7	6,07
2	0,30	1,6	5,99
3	1,10	0,26	1,76
4	1,20	0,38	5,89
5	1,40	0,31	2,54

Fuente: Rocha; Oshiro.

La presencia del agua es un factor determinante cuando se encuentra en contacto con las estructuras de hormigón, por lo que se realizó un análisis químico cuyos resultados se presentan parcialmente en la Tabla 2. La concentración de sulfatos permite determinar que el grado de ataque es “fuerte” según el Reglamento CIRSOC 201, ya que indica que “si el agua contiene una única sustancia agresiva, ella determina el grado de ataque”.

Tabla 2: Análisis químico (parcial) de agua de contacto

Determinación	Concentración
Sulfatos $\text{SO}_4^{=}$ [mg/l]	1.352
Cloruros Cl^- [mg/l]	10.650
pH	9,40

Fuente: Rocha; Oshiro.

Las distintas concepciones de bibliografía consultada coinciden en que para las concentraciones de sulfatos encontradas el ataque es fuerte o severo; una síntesis se presenta en los párrafos siguientes:

- según el Reglamento Argentino CIRSOC 201, el grado de ataque de los sulfatos se clasificó “fuerte” ;

- según el ACI 201 la severidad de la exposición se clasificó como “Clase 3”;
- según el Manual de la Red Rehabilitar la exposición se clasifica como “severa” para porcentajes de sulfatos de 0,2 a 2,0 contenidos en el suelo y entre 1.500 y 10.000 partes por millón en el agua.

Sin embargo la caracterización del ataque químico es compleja por la variedad y concentración de las sustancias presentes, por las variaciones propias de la estación climática tales como el viento, la temperatura y también por la movilidad del agua. Estas consideraciones exigirán del profesional que deba tomar decisiones a la hora de trabajar con hormigones expuestos a condiciones de agresividad extremas del conocimiento del material, de las condiciones de exposición y de la consulta de los reglamentos vigentes para lograr estructuras con la vida útil esperada.

5 Materiales componentes y dosificación de los hormigones

5.1 Áridos finos y gruesos

Los agregados pétreos cumplen con los límites fijados para juzgar su aptitud desde el punto de vista físico, químico y petrográfico.

El agregado fino se conformó por una mezcla de dos arenas naturales a los efectos de obtener una curva granulométrica continua y dentro de las curvas límites establecidas, cuyas características fueron un módulo de finura de 2, 80 y una densidad relativa de 2,65 kg/dm^3 .

El agregado grueso fue una grava natural de tamaño máximo 38 mm, siendo su densidad relativa de 2, 62 kg/dm^3 .



5.2 Cementos

Los cementos utilizados fueron un cemento Pórtland normal, un cemento Puzolánico de procedencia de la provincia de Córdoba y un cemento Puzolánico procedente de la provincia de Mendoza que cumplía con ser también de alta resistencia a los sulfatos (ARS).

Los resultados de análisis físicos y químicos se presentan en la Tabla 3, cumpliendo con las normas nacionales IRAM vigentes a la época:

- IRAM 1503/73: Cemento portland normal
- IRAM 1651/71: Cemento portland puzolánico
- IRAM 1669/70: Cemento portland altamente resistente a los sulfatos

Tabla 3: Análisis físicos y químicos de los cementos de la época

DETERMINACIONES	Unidad	TIPO DE CEMENTO		
		Puzolánico ARS (Mendoza)	Puzolánico (Córdoba)	Normal
SiO ₂ (sílice)	%	19,21	19,04	20,48
Fe ₂ O ₃ (óxido de hierro)	%	4,26	2,75	3,18
Al ₂ O ₃ (óxido de aluminio)	%	4,13	5,36	6,36
Oca (óxido de calcio)	%	49,35	52,92	59,83
OMg (óxido de magnesio)	%	1,15	2,92	3,19
SO ₃ (sulfato)	%	1,72	1,89	2,57
ONa ₂ (óxido sodio)	%	0,50	0,53	0,60
OK ₂ (óxido potasio)	%	0,42	0,80	0,97
Álcalis totales	%	0,77	1,06	1,24
Residuo insoluble	%	21,50	12,26	1,16
Pérdida por calcinación	%	1,22	2,44	1,54
Superficie esp. (Blaine)	cm ² /gr	3945	3346	3607
Residuo tamiz 74 micras	%	1,6	6,62	11,1
Expansión en autoclave	%	0,03	0,24	0,48
Tiempo Inicial Fraguado	h:min	2:05	2:10	1:15
Tiempo Final Fraguado	h:min	3:30	3:00	2:25
Resistencia a Flexión (7 días)	kg/cm ²	53	48	56
Resistencia a Flexión (28 días)	kg/cm ²	62	62	66
Resistencia a Compresión (7 días)	kg/cm ²	276	260	346
Resistencia a Compresión (28 días)	kg/cm ²	366	384	420

Fuente: Rocha; Oshiro.

5.3 Aditivo

Se utilizó un aditivo incorporador de aire, de uso normal en el mercado.

5.4 Dosificaciones

Las dosificaciones se realizaron por un método racional; se elaboraron cinco series de hormigones con relaciones agua/cemento variables entre 0,38 y 0,48 y un aditivo incorporador de aire en dos series. Las dosificaciones que se presentan en la Tabla 4 muestran contenidos de cemento adecuados y bajas relaciones agua/cemento.

6 Condiciones de exposición

Se mantuvieron probetas de referencia (patrón) en ambiente de laboratorio y se definieron dos condiciones de exposición en el ambiente agresivo natural con el objetivo de simular las condiciones a las que se exponen las estructuras de hormigón:

- Enterradas: Probetas enterradas para su estudio en condiciones similares a las fundaciones, según se indica en la Figura 1;
- Expuestas: Probetas expuestas en la superficie del terreno para simular estructuras emergentes, según se indica en la Figura 2.

7 Resultados y discusión

7.1 A los cinco años

La resistencia a compresión es la propiedad que se utiliza como parámetro de referencia para evaluar las propiedades del hormigón en estado endurecido; así cuando se estudia el comportamiento del hormigón frente a agentes agresivos también permite estimar la durabilidad del material.

Tabla 4: Dosificaciones

Serie	a/c	Agua [kg]	Cemento		Agregado Fino [kg]	Agregado Grueso [kg]	Aditivo Inc. Aire [%]
			[kg]	Tipo			
I	0,45	178	425	Normal	792	1044	—
II	0,40	170	425	Puzolánico	665	1075	6
III	0,38	200	444	Puzolánico ARS	668	1098	—
IV	0,48	200	378	Puzolánico ARS	675	1099	4,5
V	0,40	170	425	Normal	655	1075	6

Fuente: Oshiro; Beltramone; Positieri.

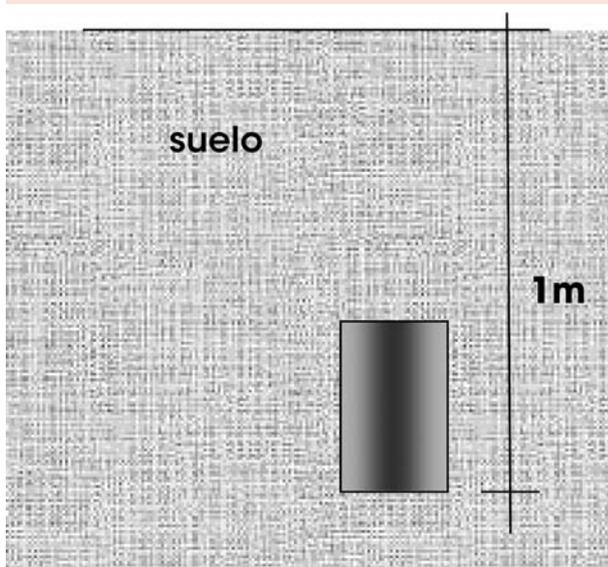


Figura 1: Probeta enterrada

Fuente: Oshiro; Baronetto; Beltramone; Positieri.

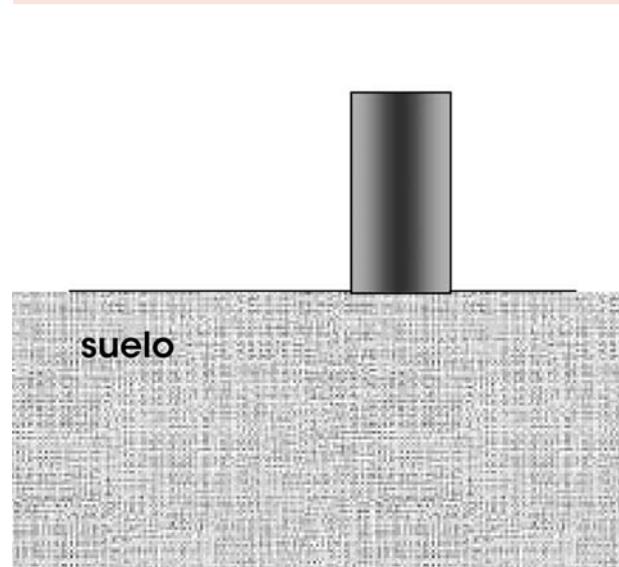


Figura 2: Probeta expuesta en la superficie

Fuente: Oshiro; Baronetto; Beltramone; Positieri.

En la Tabla 5 se presentan resultados de resistencia a compresión de probetas de referencia y expuestas durante cinco años al medio agresivo natural; las probetas se ensayaron a edades de 28, 180 y 360 días y a 2, 3, 4 y 5 años.

El desarrollo de la resistencia a compresión durante los cinco años de exposición para cada serie de las probetas de referencia, expuestas y enterradas se presenta en el Gráfico 1 en el que se verifica que luego de aproximadamente tres años de exposición se manifiesta una estabilización o pérdida de resistencia en las probetas expuestas y enterradas para todas las series.

Este comportamiento se destaca aún más en Gráfico 2 para las probetas expuestas y patrones de las cinco series, con excepción de la serie IV (expuesta), en la que a los cinco años se manifiesta una ganancia de resistencia a compresión.

Otra determinación realizada es la resistencia a tracción del hormigón; si bien no es un parámetro tan significativo como la resistencia a compresión debido a que en una estructura de hormigón armado quien absorbe estos esfuerzos es la armadura de acero, es una propiedad más que permite conocer el comportamiento del material.

En la Tabla 6 se presentan resultados de resistencia a tracción por compresión diametral,



Tabla 5: Resistencia a compresión [MPa]

Resistencia a compresión								
Serie	Condiciones de exposición	Edad [días]			Edad [años]			
		28	180	360	2	3	4	5
I	Referencia	25.4	29.9	31.0	34.2	40.7	42.0	41.5
	Expuestas	c	26.9	30.7	37.8	41.5	40.8	38.4
	Enterradas	—	31.0	34.1	32.8	34.5	34.0	34.2
II	Referencia	21.5	28.0	27.4	28.0	33.7	37.1	37.5
	Expuestas	—	21.5	23.3	26.1	29.8	30.6	31.8
	Enterradas	—	23.0	24.9	28.0	31.7	32.1	33.5
III	Referencia	33.1	38.3	38.5	39.3	41.8	40.5	42.1
	Expuestas	—	38.0	39.0	39.5	44.8	43.1	41.0
	Enterradas	—	37.5	39.0	42.0	48.0	43.0	43.8
IV	Referencia	18.4	21.7	24.5	26.9	33.4	36.5	41.8
	Expuestas	—	24.0	25.8	27.3	32.1	33.4	38.0
	Enterradas	—	25.2	26.0	29.1	38.9	44.8	41.5
V	Referencia	27.2	28.5	27.1	28.5	29.2	29.9	30.8
	Expuestas	—	26.0	28.9	28.2	29.0	28.7	30.1
	Enterradas	—	26.8	28.1	28.5	28.8	28.1	29.0

Fuente: Oshiro; Baronetto; Beltramone; Positieri.

siguiendo el método brasileiro, de probetas de referencia y expuestas durante cinco años al medio agresivo natural; las probetas se ensayaron a edades de 28, 180 y 360 días y a 2, 3, 4 y 5 años.

En el Gráfico 3 se presentan los valores obtenidos para la resistencia a la tracción; se verifica un fenómeno similar al encontrado en relación a la resistencia a la compresión, confirmando la disminución de su crecimiento a partir del tercer año en las probetas expuestas o enterradas, lo que se destaca en Gráfico 4.

En lo que se refiere al estudio del módulo de elasticidad del hormigón está relacionado con la capacidad de deformación de las estructuras ante las sollicitaciones previstas durante su vida útil. El módulo de elasticidad puede estar afectado por el tipo de curado, la naturaleza del agregado, las adiciones minerales usadas, los aditivos, el tipo de material cementicio, el tamaño de las probetas, la edad del ensayo, entre los más significativos.

La principal dificultad de la medición del módulo de elasticidad es la determinación simultánea de la carga aplicada y la deformación específica generada por esa carga. Las determinaciones en forma separada de cargas y deformaciones son fáciles en sí mismas, pero se complican cuando hay que definir la curva tensión-deformación para obtener el resultado del módulo de elasticidad de acuerdo a las normas aplicadas.

En la Tabla 7 se presentan resultados de módulo de elasticidad estático de probetas de referencia y expuestas durante cinco años al medio agresivo natural; las probetas se ensayaron a edades de 28, 180 y 360 días y a 2, 3, 4 y 5 años.

Como se indica en el Gráfico 5 los resultados del ensayo de módulo de elasticidad acompañan al comportamiento del hormigón a compresión y tracción, con la dispersión producida por las dificultades que se presenta a la hora de realizar las mediciones de las variables involucradas. En el Gráfico 6 se destaca el comportamiento de las

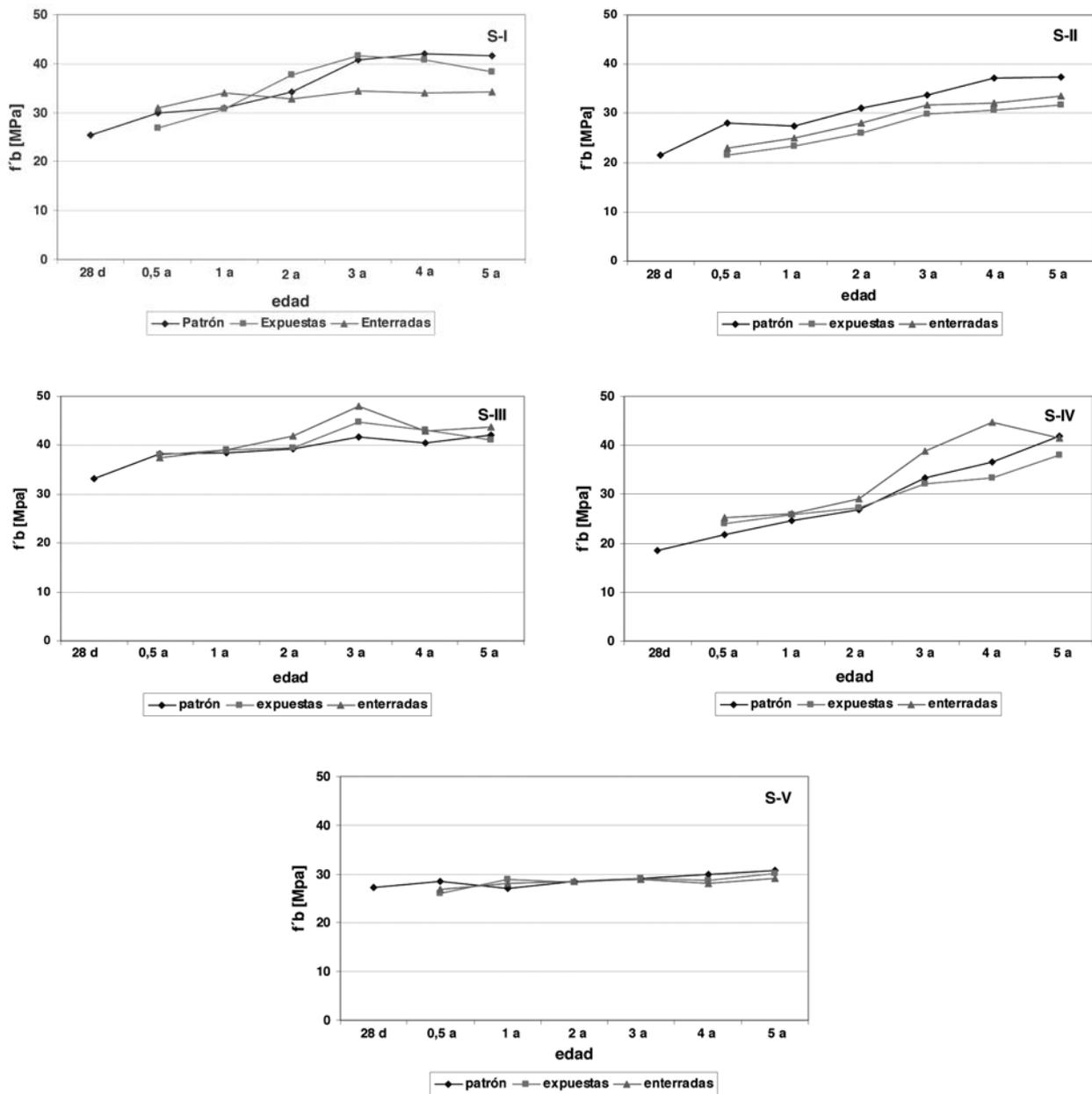


Gráfico 1: Desenvolvimento de resistência a compressão em probetas de referência, expuestas y enterradas

Fuente: Oshiro; Baronetto; Beltramone; Positieri.

probetas expuestas con respecto a la valoración del módulo de elasticidad.

La observación visual permitió definir la forma de ataque en las probetas expuestas a los cinco años. Luego de ensayar las probetas a tracción por compresión diametral se midió la profundidad del ataque presentándose la información en la Tabla 8.

Para adoptar una metodología de recolección de los datos se definieron zonas de ataque superficial según la Figura 3. La altura del ataque, indicada como “a” estaba en el orden de los 6 a 10 cm, con textura rugosa y pérdida de material. La zona de la base, “b”, presentaba una profundidad de ataque de 2 a 4 cm y el es-

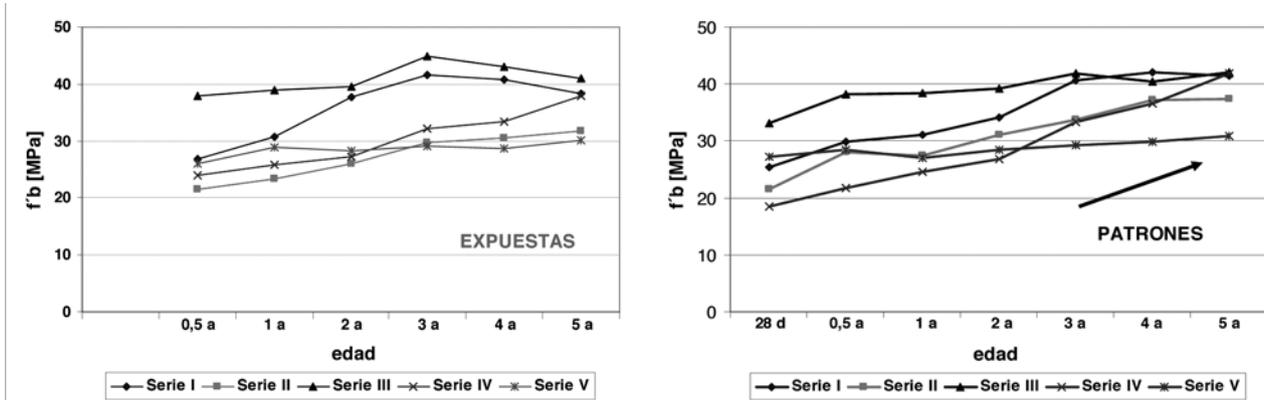


Gráfico 2: Desarrollo de resistencia a compresión en probetas expuestas y patrones

Fuente: Oshiro; Baronetto; Beltramone; Positieri.

Tabla 6: Resistencia a tracción por compresión diametral

Resistencia a tracción por compresión diametral [MPa]								
Serie	Condiciones de exposición	Edad [días]			Edad [años]			
		28	180	360	2	3	4	5
I	Referencia	3.0	2.8	3.1	3.3	3.5	3.7	3.5
	Expuestas	-	2.2	2.8	3.0	2.8	2.6	1.8
	Enterradas	-	2.4	2.1	2.6	2.8	2.9	2.6
II	Referencia	2.8	2.5	2.0	2.3	2.4	2.6	2.9
	Expuestas	-	2.4	2.3	2.1	2.6	2.4	2.0
	Enterradas	-	2.6	2.4	2.2	2.4	2.4	3.0
III	Referencia	3.6	3.5	3.2	3.1	3.7	3.5	3.6
	Expuestas	-	3.0	3.4	2.9	2.6	2.4	2.6
	Enterradas	-	3.2	2.9	3.0	3.4	3.1	3.5
IV	Referencia	2.2	2.0	2.3	2.6	2.5	2.9	2.8
	Expuestas	-	2.0	2.1	2.7	2.6	2.4	2.6
	Enterradas	-	2.2	2.7	2.7	2.8	2.8	2.5
V	Referencia	1.8	2.0	2.4	2.6	3.2	3.1	3.0
	Expuestas	-	2.8	2.5	2.9	3.0	2.5	1.5
	Enterradas	-	2.1	2.1	2.0	2.2	1.8	1.8

Fuente: Oshiro; Baronetto; Beltramone; Positieri.

pesor del ataque en la cara lateral, “c”, fue de 1 a 3 cm.

Los resultados obtenidos de la observación visual muestran que los hormigones de la serie IV sufrieron menor ataque superficial; fueron aquellos confeccionados con cemento puzolánico (ARS) y aditivo incorporador de aire, aún con alta relación

a/c. Similar comportamiento presentaron los hormigones de la serie II con cemento puzolánico y aditivo incorporador de aire en una dosis del 6%. Los hormigones de la serie III con cemento puzolánico, ARS, sin aire incorporado y con una muy baja relación a/c, presentan una profundidad de ataque levemente menor que los anteriores.

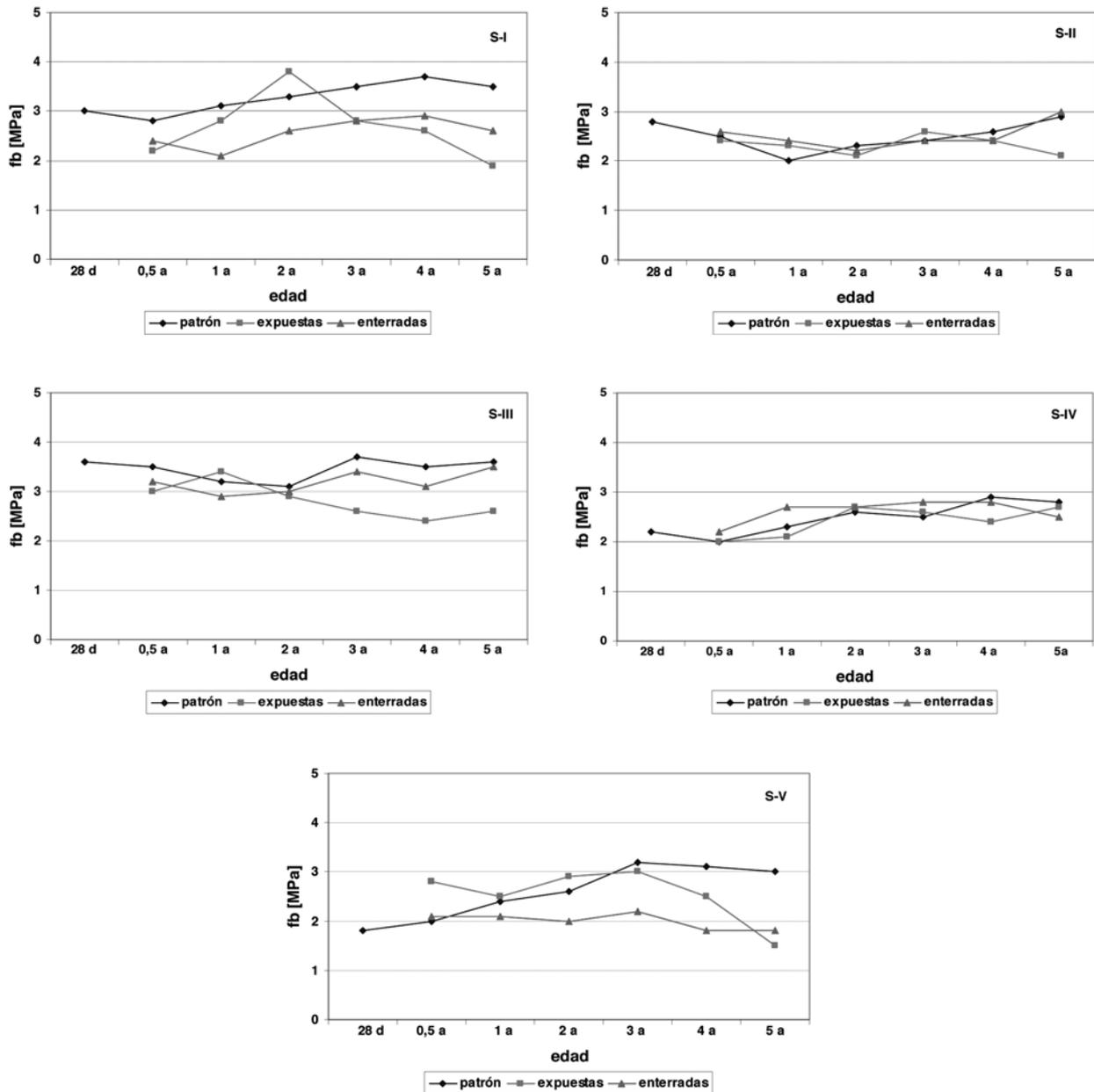


Gráfico 3: Desenvolvimento de resistência a tração em probetas de referência, expuestas y enterradas

Fuente: Oshiro; Baronetto; Beltramone; Positieri.

7.2 A los 20 años

Los resultados obtenidos luego de 5 años de exposición permitieron establecer recomendaciones y brindaron información útil para aplicar en la época. La falta de mantenimiento de la estación experimental motivó la pérdida de muestras y el vandalismo produjo

daños irreparables. A pesar de ello, luego de transcurridos los 20 años de exposición de las muestras remanentes, los autores consideraron que la recolección de las muestras y su estudio, aunque fuera con las limitaciones propias, podrían realizar un aporte significativo al estudio del tema.

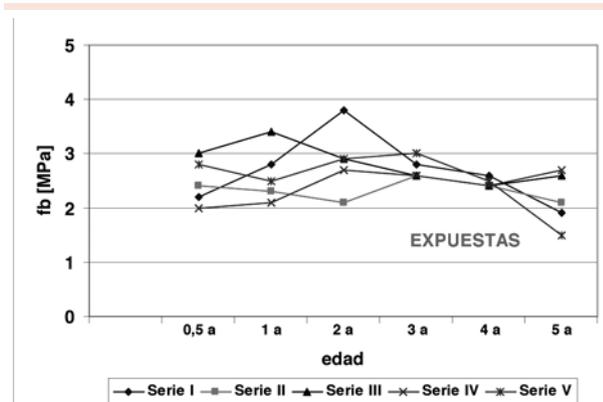


Gráfico 4: Desarrollo de resistencia a tracción en probetas expuestas

Fuente: Oshiro; Baronetto; Beltramone; Positieri.

Las muestras se trasladaron al ambiente de laboratorio, presentando el aspecto que se muestra en la Figura 4, con avanzado estado de deterioro.

Se identificaron y se estableció una segunda etapa experimental, con la realización de ensayos que permitieran profundizar el estudio del comportamiento del hormigón.

La determinación de la absorción de agua por inmersión fue realizada siguiendo el proce-

dimiento de ensayo del método establecido en la norma ASTM C642. La absorción no sólo es un indicador de la resistencia del hormigón, también es un parámetro fundamental en el estudio de la durabilidad del hormigón.

En cuanto a la determinación de la profundidad de carbonatación fue realizada con una solución de fenoftaleína que evidencia la diferencia de pH entre el hormigón no carbonatado y el frente de carbonatación; la carbonatación cobra importancia si la estructura de hormigón está armada, ya que cuando la reacción alcanza la armadura, ocurre la despasivación de la misma como consecuencia de la disminución del pH, existiendo posibilidades de corrosión.

Los resultados obtenidos a los 20 años se presentan en la Tabla 9, destacándose la serie I elaborada con cemento normal que presenta la menor profundidad de carbonatación. Las series II, III y V presentan profundidades similares destacándose la serie IV en la que el frente de carbonatación ha avanzado más rápidamente.

Tabla 7: Módulo de elasticidad estático (ASTM C369)

Módulo de elasticidad estático [GPa]								
Serie	Condiciones de exposición	Edad [días]			Edad [días]			
		28	180	360	2	3	4	5
I	Referencia	18.6	21.9	24.7	25.8	30.5	30.7	31.1
	Expuestas	-	20.0	24.5	26.1	34.0	31.1	31.0
	Enterradas	-	24.1	26.3	29.0	31.5	30.0	30.7
II	Referencia	16.0	18.7	21.5	24.0	27.5	29.0	31.5
	Expuestas	-	19.3	21.0	21.5	22.0	24.9	28.3
	Enterradas	-	19.0	22.1	24.9	26.6	25.3	28.7
III	Referencia	24.0	27.8	28.3	30.5	24.5	35.5	37.1
	Expuestas	-	29.1	29.8	30.5	31.0	33.8	38.0
	Enterradas	-	30.3	31.5	32.8	34.0	35.9	32.8
IV	Referencia	16.0	19.0	19.8	19.8	24.0	33.8	35.1
	Expuestas	-	19.5	19.9	21.0	23.5	25.7	26.8
	Enterradas	-	21.5	24.9	29.1	27.0	32.9	38.7
V	Referencia	20.5	23.8	24.0	24.9	28.5	31.0	32.6
	Expuestas	-	24.3	23.8	28.9	30.0	31.5	31.0
	Enterradas	-	21.5	24.8	28.1	27.0	28.3	30.2

Fuente: Oshiro; Baronetto; Beltramone; Positieri.

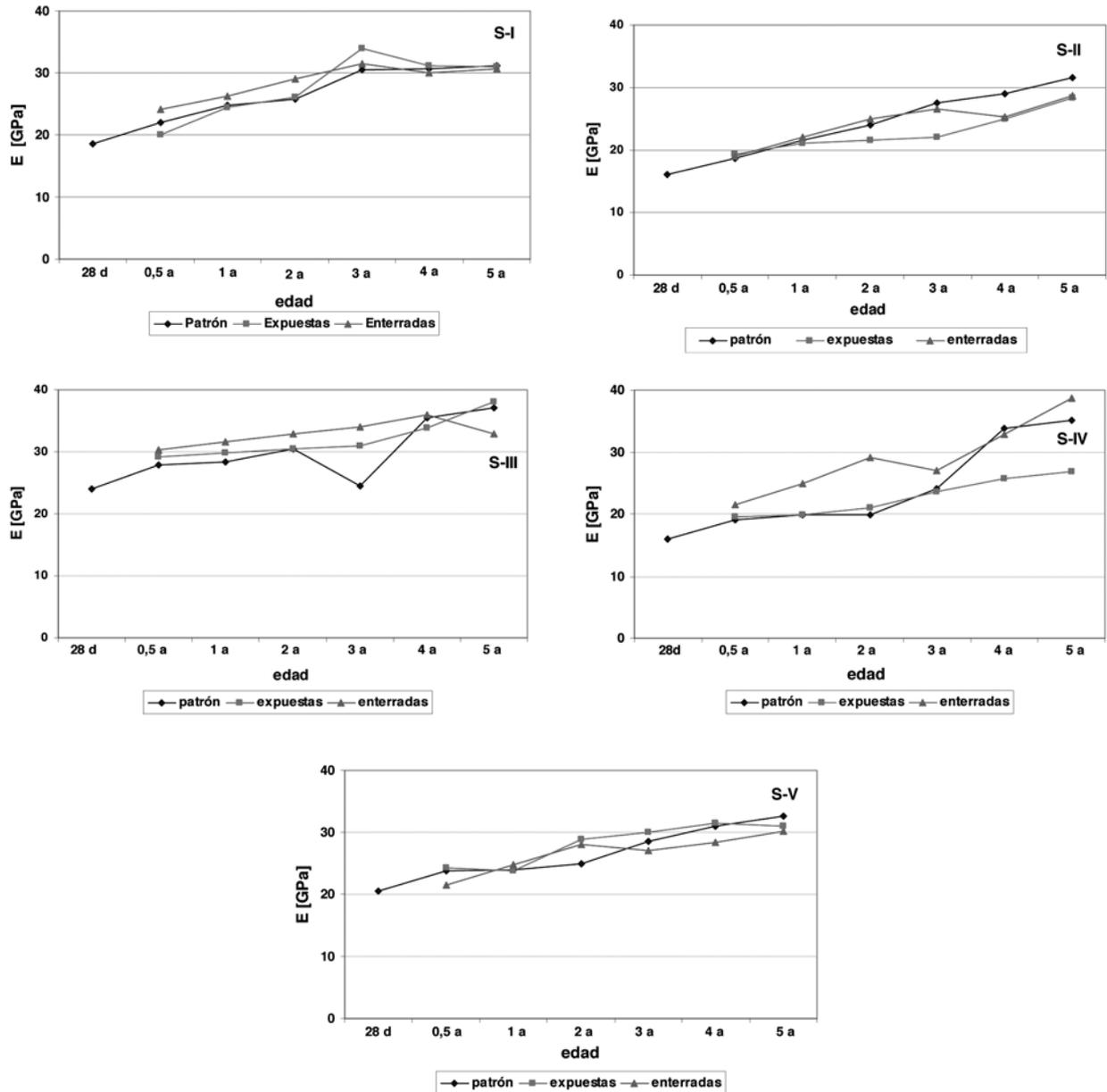


Gráfico 5: Módulo de elasticidad estático en probetas de referencia, expuestas y enterradas

Fuente: Oshiro; Baronetto; Beltramone; Positieri.

Es conveniente realizar la siguiente consideración: ¿es más beneficioso disminuir la relación agua/cemento o la incorporación intencional de aire? Estos resultados permiten afirmar que la relación agua/cemento es el parámetro de primer orden para lograr un mejor comportamiento frente a la carbonatación.

En coincidencia con la bibliografía y según Pazini, Helene y Andrade (1993) los resultados indican que para las series II, III, IV y V a mayor a/c mayor carbonatación, salvo en la serie I que contiene cemento Portland normal ya que cuando los cementos son sin adiciones tienen un mayor contenido de OCa (óxido de calcio) y alcalinos

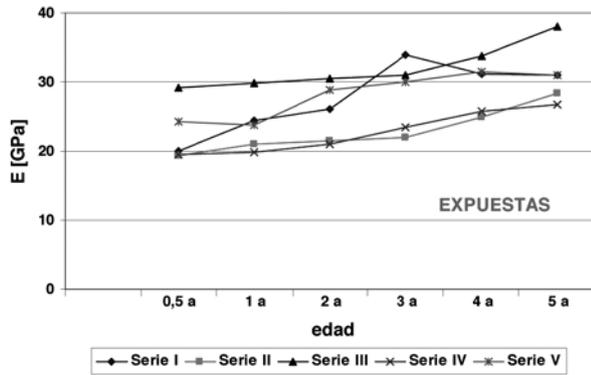


Gráfico 6: Módulo de elasticidad estático en probetas expuestas

Fuente: Oshiro; Baronetto; Beltramone; Positieri.

Tabla 8: profundidad de las zonas de ataque de las probetas expuestas

Serie	Zona de ataque	Profundidad [cm]
I	a	10
	b	4
	c	3
II	a	10
	b	2
	c	1
III	a	6
	b	3
	c	2
IV	a	6
	b	2
	c	1
V	a	10
	b	4
	c	3

Fuente: Oshiro; Baronetto; Beltramone; Positieri.

(sodio y potasio) que son los materiales susceptibles de carbonatarse.

8 Conclusiones finales

- Comparando la profundidad de carbonatación de la series III y IV se deduce que es más beneficioso disminuir la relación a/c, que la incorporación intencional de aire.

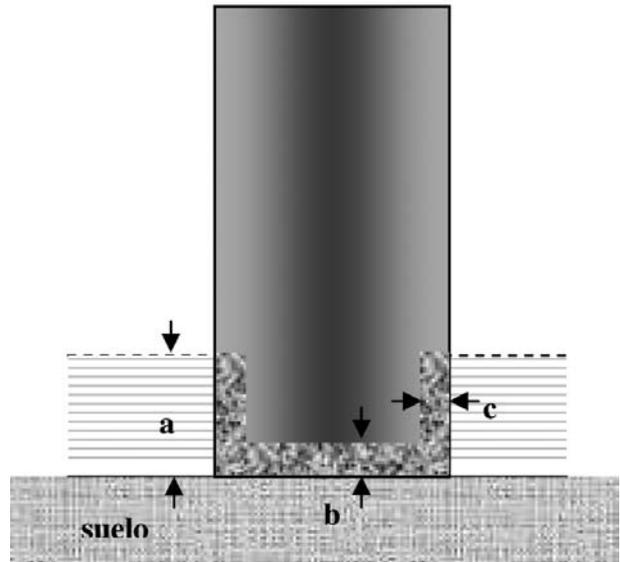


Figura 3: Definición de las zonas de ataque superficial de las probetas expuestas.

Fuente: Oshiro; Baronetto; Beltramone; Positieri.



Figura 4: Muestras preparadas para ser ensayadas en la segunda etapa de la investigación

Fuente: Oshiro; Baronetto; Beltramone; Positieri.

Tabla 9: Resultados de ensayos a los 20 años de exposición

Serie	Carbonatación [mm]	Velocidad ultrasónica [m/s]	Absorción [%]	Densidad [kg/m ³]
I	5	3304	5,3	2409
II	9	3426	2,8	2381
III	7	---	2,2	2432
IV	15	3387	2,6	2430
V	9	3667	3,5	2389

Fuente: Oshiro, A.; Baronetto, C.; Beltramone, C.; Positieri, M.

- Considerando que el espesor de recubrimiento de las armaduras fue de 30 mm, se ha observado que si bien el frente de carbonatación es menor, las mismas presentan oxidaciones importantes; que pueden atribuirse al complejo fenómeno de la carbonatación en combinación con los cloruros presentes en el medio contaminante.
- Las series elaboradas con cementos sin adiciones, tienen un mejor comportamiento frente a la carbonatación, como se manifiestan en publicaciones varias.
- Los valores de absorción son congruentes con la relaciones agua/cemento utilizadas y la presencia del aire incorporado.
- Como contribución final, a nadie escapa que el fenómeno de durabilidad en los hormigones, ya sea de carácter físico, químico o electroquímico, bajo fenómenos internos y externos es un tema realmente complejo; en los últimos años los reglamentos y recomendaciones comienzan a considerarlo y resulta imprescindible hacerlo para lograr el diseño de hormigones que cumplan su vida útil en condiciones aceptables.

Cuando se inició esta investigación era escasa la información experimental explícita, no así los conceptos teóricos fundamentales. En virtud al tiempo transcurrido, las mediciones y análisis de resultados realizados, creemos que el principal aporte de este trabajo es la cuantificación de fenómenos involucrados en la durabilidad de estos hormigones, bajo la influencia del ambiente natural en donde estuvieron expuestos.

Behavior of concrete exposed to environment conditions of high chemical deterioration

When considering the concrete in hardened state, an important aspect is his durability that depends on the environment exposition or internal causes of the concrete itself. This

work, initialized in 1976 by Oshiro and Rocha Argentinean engineers, focus its attention on the first aspect, presenting results from the concrete exposition for more than twenty years in a hostile environment with high sulfate and chloride contents, situated in “Las Salinas Grandes”, Province of Córdoba, in the center of the Argentine Republic. The concrete was elaborated with normal weight aggregate, using normal Portland cement, being highly resistant to sulfates and an air additive incorporator. Some test specimens were modeled with shield simulating a reinforced concrete structure and others without shields. The conditions of expositions varied; some test specimens were deposited on the surface as an emergent structure, and others were buried as foundations. The results spread the experience of a real case, as a contribution for the scientific and technician environment to take decisions when dealing with exposed concrete; it is confirmed the chemical deterioration of the concrete past, and advantages when using low water-concrete and air incorporator relations in the main concrete properties, twenty years time controlled.

Key words: Carbonation. Chlorides. Environment exposition. Sulphates.

Referencias

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *Guide to Durable Concrete*. ACI 201.2R-92, 1992.

ANDRADE, C. *Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras*. São Paulo: Pini, 1992.

BARRERA, H.; PEREZ, H.; SANDOVAL, R. *La carbonatación en edificios de Santiago*. Jornadas Chilenas del Hormigón, 15. Disponible en: <www.seconstruye.com/jh/>. Acceso en: 2003.

BICZOCK, I. *Corrosión y protección del hormigón*. Urmo: Ediciones Bilbao, 1972.

CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE LOS REGLAMENTOS NACIONALES DE SEGURIDAD DE OBRAS CIVILES. 1982. Reglamento CIRSOC 201. Proyecto, cálculo y ejecución de estructuras de hormigón armado. INTI Editor. Buenos Aires.



IRASSAR, E. F. *Ataque químico al hormigón*. En durabilidad del hormigón estructural. La Plata, Provincia de Buenos Aires: Autoeditor, 2001.

KUMAR, R.; BHATTACHARJEE, B. Porosity, pore size distribution and in situ strength of concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 33, p.155-164, 2002.

MORENO, E.; DOMÍNGUEZ, G.; COB, E.; DUARTE, F. Efecto de la relación agua-cemento en la velocidad de carbonatación del concreto, utilizando una cámara de aceleración, *Revista Ingeniería*, v. 8, p. 117-130, 2002.

FERNÁNDEZ LUCO, L. *La durabilidad del hormigón*: su relación con la estructura de poros y los mecanismos de transporte de fluidos. En durabilidad del hormigón estructural. La Plata, Provincia de Buenos Aires: Autoeditor, 2001.

FIGUEIREDO, P. E.; HELENE, P.; ANDRADE, C. Fatores determinantes da iniciação e programação da corrosão de armadura do concreto. *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP*, San Pablo, 1993.

GOMÁ, F. *El cemento Pórtland y otros aglomerantes*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, 1979. p.174-196.

HELENE, P. *Corrosão en armaduras para concreto armado*. San Pablo, Brasil: Pini, 1986.

_____.; PEREIRA F. Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón. Reparación, refuerzo y protección. *Red Rehabilitar-CYTED*, 2003.

MEHTA, P. K. *Durability – Critical Issues for the future*. Concrete International, 19, 1997.

OSHIRO, A.; BELTRAMONE, C.; POSITIERI, M. *Durabilidad del hormigón. Estudio y seguimiento a nivel regional*. Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, 8. Villa Carlos Paz, Córdoba, Argentina, 1987.

ROCHA, C.; OSHIRO, A. LAT - Centro-Norte: hormigones sujetos a la acción agresiva de Las Salinas, *Revista ÚNICA*, v. 36, p. 32-51, 1984.

Recebido em 26 set. 2007 / aprovado em 25 jun. 2008

Para referenciar este texto

OSHIRO, A. Comportamiento de hormigones expuestos a condiciones naturales de alta agresividad química. *Exacta*, São Paulo, v. 6, n. 1, p. 93-108, jan./jun. 2008.