



12-14 de Noviembre del 2012
Facultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa

EFFECTO DEL CURADO INTERNO EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y QUÍMICO DE CONCRETOS DE ALTO DESEMPEÑO EXPUESTOS A AMBIENTE INDUSTRIAL

J.M. Mendoza-Rangel¹, E.U. De los Santos¹, A. Durán-Herrera¹, D.P. Bentz².

1 Universidad Autónoma de Nuevo León, UANL, Facultad de Ingeniería Civil, Av. Universidad S/N Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza Nuevo León, C.P. 66451, México

2 National Institute of Standards and Technology (NIST), 100 Bureau Drive Stop 8615, Gaithersburg, MD 20899-8615 USA

RESUMEN

El concreto reforzado es el material de mayor uso para la construcción de infraestructura en el mundo, esto debido a su facilidad para adquirir formas preconcebidas y altas resistencias a la compresión. Los Concretos de Alto Desempeño (CAD) han incrementado su uso en la actualidad debido a que sus prestaciones se adecuan a cada proyecto en particular. Los CAD tienen buenas prestaciones y durabilidad cuando se elaboran de manera adecuada, pero debido a las bajas relaciones a/mc (<0.40) utilizadas, se pueden tener algunos defectos como las contracciones. En el presente trabajo se evalúa la efectividad del curado interno como sustitución de agregado ligero para evitar la contracción autógena en Concretos de Alto Desempeño expuestos a un ambiente industrial. Hasta los 180 días de exposición, los resultados muestran una tendencia favorable en el comportamiento mecánico y químico de los especímenes, aunque se requiere de más mediciones para corroborar dicha tendencia.

Palabras claves: Durabilidad, concreto, curado interno, ambiente industrial

ABSTRACT

Reinforced concrete is the material most commonly used for the construction of infrastructure in the world, this is due to its ease of acquisition preconceived forms and high compressive strengths. The High Performance Concrete (HPC) has increased their use today because its performance fit each particular project. The HPC has good performance and durability when properly prepared, but due to low w/b ratios (<0.40) used, it may have some defects like contractions. In this work we evaluate the effectiveness of internal curing as lightweight aggregate replacement to prevent autogenous shrinkage in HPC exposed to an industrial environment. Up to 180 days of exposure, the results show a favorable trend in the mechanical and chemical properties of the specimens, but more measurements are needed to corroborate this trend.

Key words: Durability, concrete, internal curing, industrial environment

INTRODUCCIÓN

En estudios realizados por el INEGI¹, a principio del siglo 21, la zona metropolitana de Monterrey (ZMM) se encuentra en tercer lugar nacional dentro de las ciudades más desarrolladas y pobladas del país y en cuanto a economía, en conjunto las tres ciudades principales del país (D.F., Guadalajara y Monterrey) aportaban el 40.4% del PIB nacional.

La ZMM se caracteriza por su desarrollo en el ámbito industrial, social, económico e infraestructura. Su principal ingreso es la industria, al contar con empresas de gran prestigio. Pero su desarrollo industrial y su alta población, ocasiona que se tengan problemas de contaminación ambiental. Los altos contenidos de dióxido y monóxido de carbono en el ambiente, son generados no solo por la industria, sino también por transporte público y privado.

En cuanto al clima, Monterrey cuenta con una temperatura promedio de 23°C que suele llegar a los 40°C en verano y a menos 0°C en invierno. La humedad promedio, es de 62% (humedad óptima para el deterioro del concreto reforzado). La ZMM está compuesta por los municipios de: Apodaca, García, General Escobedo, Guadalupe, Juárez, Monterrey, San Nicolás de los Garza, San Pedro garza García y Santa Catarina¹.

Para la investigación llevada a cabo en este trabajo, se expusieron especímenes de concreto con y sin refuerzo en un ambiente industrial en una fábrica del municipio de García. La empresa en que se colocaron los especímenes lleva a cabo procesos (producción de cloruro de sodio y cloruro de calcio) que crean un ambiente agresivo y dañino para el concreto, ya que provocan corrosión por picadura que reduce la sección del refuerzo. Éste ambiente nos permite evaluar en circunstancias cercanas a la realidad la durabilidad de Concretos de Alto Desempeño utilizando un agente de curado interno para evitar la contracción autógena.

En la Figura 1 se muestra algunos daños provocados por la presencia de agentes agresivos en elementos de concreto reforzado dentro de la planta; en la Figura 1 (a) se aprecia la parte inferior de una losa donde se puede observar el acero de refuerzo, que aparentemente ya había sido reparado por medio de parche y en la Figura 1 (b) se aprecia el daño en una viga anexa a la zona donde se exponen los especímenes.



Figura 1. (a) Daño por corrosión en losa en el interior de la fábrica; (b) Daño por corrosión en trabe en zona anexa a la de exposición de especímenes

Concretos de Alto Desempeño (CAD)

Un concreto de alto desempeño (CAD) se caracteriza por tener particularidades especiales que normalmente van enfocadas a mejorar el uso del mismo en el ambiente específico en donde se utilice. Pierre C. Aïtcin² describe algunas características de los CAD, enfatizando que un concreto de alto desempeño no solo es de alta resistencia, sino que tiene otras características especiales como la relación a/mc menor a 0.40. Los CAD tienen buenas prestaciones y durabilidad cuando se elaboran de manera adecuada, pero debido a las bajas relaciones a/mc (<0.40) utilizadas, se pueden tener algunos defectos como contracciones.

Las contracciones o retracciones en el concreto son un problema reciente en los CAD, las cuales se presentan como grietas en los elementos estructurales a edades tempranas. Hay distintos tipos de retracción: por secado, plástica, química y la autógena. Para este trabajo la retracción autógena es la de nuestro interés y se lleva a cabo en un concreto hidratándose como en un sistema cerrado sin ningún intercambio con el exterior y es una consecuencia de la retracción química. Sin importar la relación a/mc, la retracción química que ocurre durante la hidratación del cemento, esta es restringida por la estructura de la pasta y el esqueleto de agregado lo que genera una porosidad muy fina².

Curado interno

El problema del curado fue reconocido en 1991 por Philleo, quien sugirió la incorporación de agregado fino de peso ligero dentro de la mezcla de concreto para proveer una fuente de curado interno y brindar el agua necesaria para reemplazar la consumida por la retracción química durante el curado del concreto³.

El uso de agregados de distinto tamaño y la efectividad en el curado interno también se ha estudiado⁴, las investigaciones respecto a esta variable han demostrado las mayores ventajas en el uso de agregado fino, debido a que la distribución sobre la pasta es más homogénea y se puede obtener un mayor volumen de pasta con agua disponible del agregado ligero, aunque se observó un mejor efecto sobre el agregado de mayor tamaño, argumentando que puede deberse a su mayor factor de eficiencia (η), este factor se refiere a la capacidad del agregado para liberar el agua absorbida.

Algunos autores han llevado a cabo también investigaciones en especímenes de gran tamaño (200x200x1000 mm) reforzados, concluyendo que de no controlarse la retracción autógena, se pueden presentar contracciones realmente importantes dentro de periodos de 24 horas llevando a una falla rápida bajo retracción restringida.

Además de que un 20% de la arena total brinda suficiente agua de curado interno para hidratar el cemento con el fin de eliminar la retracción autógena y mantener la relación esfuerzo/resistencia por debajo del 50%. El contenido óptimo, de acuerdo a esta investigación, es un 25% en sustitución, cabe mencionar que el agua suministrada por curado interno fue corregida del agua de la mezcla⁵.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Materiales

Cemento. El cemento utilizado es un Cemento Portland Ordinario 40 (CPO 40) de una marca disponible en la región, cumple con la norma NMX C 414⁶, con una composición del 90 al 95% de clínker y yeso, marcando el resto como componentes minoritarios. De acuerdo a su clase resistente CPO 40 tiene una resistencia a la compresión mínima de 40 N/mm² a los 28 días.

Ceniza volante. La ceniza volante utilizada en esta investigación es de tipo F de acuerdo a la norma ASTM C 618⁷. Donde se describe como: “Ceniza normalmente producida de la quema de antracita o carbón bituminoso”. La composición de la ceniza volante se evaluó por medio de un análisis de fluorescencia de rayos X, obteniendo como suma de los óxidos de aluminio, silicio y hierro de 93.8%.

Agregados. El agregado grueso utilizado fue de tipo calizo, con un tamaño máximo de partícula de 19 mm (3/4”), extraídos en la región, su composición es principalmente carbonato de calcio, de tono gris claro. En este trabajo se utilizaron dos tipos de agregado fino, uno de tipo calizo al igual que el agregado grueso y un agregado fino del tipo pumicita que se utilizó como agregado ligero en sustitución como vehículo para el curado interno, debido a su alta capacidad de absorción. En la Tabla 1 se muestran las propiedades de los agregados.

Tabla 1. Características físicas de los agregados

Agregado	Peso volumétrico (kg/m ³)	Densidad (%)	Absorción (%)
Grueso	1543.3	2.66	0.63
F. Caliza	1596.7	2.63	2.25
F. pumicita	849.36	1.57	33

Acero. En la elaboración de las probetas para las pruebas electroquímicas, se utilizó acero grado 42, cuyas especificaciones cumplen la norma NMX-C-407-ONNCCE.

Aditivos. El Glenium 3030 NS es un aditivo reductor de alto rango (HRWR), a base de éter de carboxilato. El Masterlife SRA 20 es un aditivo reductor de retracción (SRA). Algunos datos proporcionados son la dosificación que va de 1.0 a 2.5% de cementante, además de un posible incremento de la velocidad de sangrado (10% más), retraso en el tiempo de fraguado dependiente de la dosificación y la temperatura.

Mezclas

Mezcla de referencia. La mezcla de referencia se elaboró solo con cemento portland agregados (grueso, fino), agua y aditivo reductor de agua, identificada como R.

Sustitución de agregado ligero. Las mezclas con agregado ligero son cuatro, en estas mezclas se hizo una sustitución del 20%~ en volumen de agregado fino de peso normal.

Aditivo reductor de retracción. Para la adición del aditivo reductor de retracción se utilizaron dos métodos diferentes. El primero fue utilizarlo como una adición al momento del mezclado del concreto, adicionando la cantidad máxima recomendada por el fabricante (2.5% del material cementante denominado). El segundo método fue utilizarlo como agente de curado interno, por medio del agregado ligero, utilizando una solución de 50:50 agua: aditivo reductor de retracción, en la cual se colocó el agregado ligero para saturarlo durante 24 horas.

Ceniza volante. La ceniza volante se utilizó en sustitución de cemento en peso, utilizando un 20% de sustitución, el objetivo de utilizar la CV es para observar el efecto que tiene en las propiedades del concreto con agregado ligero y uso de ARR.

La Tabla 2 muestra un resumen de las mezclas de concreto utilizadas en este trabajo.

Tabla 2. Resumen de mezclas

Id. Mezcla	IC	SRA	Solución SRA:Agua	FA
R				
IC	X			
SRA		X		
IC-SRA	X	X		
V	X		X	
FA				X
FA-V	X		X	X

IC: Sustitución de agregado normal por agregado ligero

SRA: Aditivo reductor de retracción en la dosificación máxima recomendada por el fabricante

V: Saturación del agregado ligero en la solución 50:50

CV: Sustitución de CPO por ceniza volante.

Resistencia a compresión

En este proyecto, la resistencia nos da idea de cómo se ve afectadas las distintas mezclas por la adición del SRA, sustitución de agregado y sustitución de CPO 40 por CV en proporciones definidas, la norma utilizada en este procedimiento es la ASTM C-39⁸. Esta prueba se llevó a cabo en una máquina marca ELE International modelo ADR auto 2000.

Análisis químicos

Perfiles de cloruros. Para esta prueba se cortaron rodajas de los especímenes ya expuestos en el ambiente a las edades de 14, 28, 90, 150 y 180 días de exposición, a 3, 11, 19 y 27 mm de profundidad (Figura 2). La titulación de cloruros se realizó por medio de la adición de nitrato de plata $AgNO_3$ y se midió a través de un titulador marca Metro Ohm compuesto de un dosificador modelo 848 Titrino plus y un cambiador de muestras 869 Compac Sample Changer.

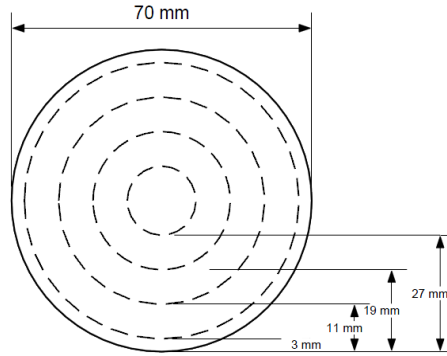


Figura 22. Esquema de extracción de polvos para perfiles de cloruros

Pruebas electroquímicas.

Potenciales de corrosión (E_{corr}). La prueba potenciales de corrosión se realizó utilizando la norma ASTM C 876⁹.

RESULTADOS

Propiedades en estado fresco

Las propiedades en estado fresco se obtuvieron inmediatamente después del mezclado, con la finalidad de observar como varían de acuerdo al uso de pumicita. La Tabla 3 muestra las propiedades obtenidas de estas pruebas.

Tabla 3. Propiedades en estado fresco de mezclas de concreto

Mezcla	Revenimiento (cm)	Contenido de aire (%)	Peso volumétrico (kg/m ³)
R	13.5	2.75	2399
IC	13.0	2.25	2308
SRA	14.0	2.25	2410
IC-SRA	14.5	2.25	2305
V	16.5	2.5	2298
FA	16	2.5	2351
FA-V	21	2.5	2252

En cuanto al revenimiento, se puede observar que el uso del curado interno (IC) no genera un aumento significativo del mismo, aunque se debe tener especial cuidado ya que si el agregado es muy suave, puede romperse por la interacción con los agregados de mayor densidad, por lo que se decidió adicionar el agregado ligero en la etapa de reposo del mezclado. De romperse el agregado, puede haber una desorción del agua retenida, modificando la relación a/mc.

Se puede observar que en las mezclas con ceniza volante se tiene un aumento en el revenimiento en comparación con las demás mezclas, esto puede deberse a que la sustitución de la CV se hizo en peso, y esta CV sustituida tiene mayor volumen y un tamaño de partícula mayor, que disminuye el área superficial, aumenta el volumen de cementante y trae como consecuencia un mayor revenimiento.

Propiedades en estado endurecido

Resistencia a compresión. En la Tabla 4, se puede observar que la mezcla con mayor resistencia a la compresión a los 28 días es la Referencia (R), con valores similares a IC cuya resistencia fue menor pero se tiene casi el total de ella a la misma edad. Esto se puede observar de mejor manera en la Tabla 5, donde se muestra el porcentaje de resistencia obtenida con respecto a los 90 días, en la última columna se presenta el porcentaje de cada resistencia a lo 90 días de cada mezcla con respecto a la de referencia. No se toma en cuenta la de 180 días, ya que ésta varía por muy poco y no resulta significativa.

Tabla 4. Resistencia a compresión (kg/cm²)

Mezcla	Edad (Días)			
	14	28	90	180
R	432.533	540.333	535.100	548.900
IC	354.500	500.067	506.200	515.167
SRA	370.900	467.567	491.567	509.433
IC-SRA	390.467	445.800	482.900	484.333
V	384.733	433.133	475.800	481.800
FA	343.100	398.867	476.467	485.667
FA-V	314.583	353.400	437.433	442.833

Tabla 5. Relaciones de porcentajes de resistencia

Mezcla	% vs f'c 90 días			% vs R	Reducción de resistencia (%)
	14	28	90		
R	80.8	101.0	100	100.0	
IC	70.0	98.8	100	94.6	5.4
SRA	75.5	95.1	100	91.9	8.1
IC-SRA	80.9	92.3	100	90.2	9.8
V	80.9	91.0	100	88.9	11.1
FA	72.0	83.7	100	89.0	11
FA-V	71.9	80.8	100	81.7	18.3

De 14 a 28 días se retiraron los especímenes del curado, y en la mezcla IC se ve que sigue aumentando considerablemente su resistencia por lo que puede indicar el efecto positivo del curado interno.

Monitoreo ambiental

En la figura 3, se muestra el comportamiento de cada uno de los parámetros ambientales como la humedad relativa y la temperatura, que se discutirán a continuación.

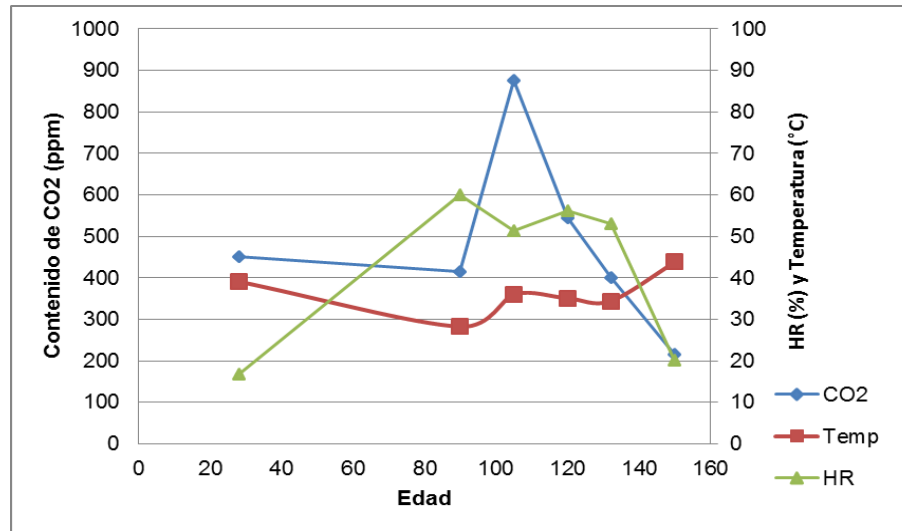


Figura 3. Monitoreo ambiental

La exposición de las muestras se inicio el día 23 de diciembre de 2011, y la primera medición se hizo a los 28 días. La temperatura dentro de la planta en invierno no es tan baja como en el ambiente, debido al calor que libera la maquinaria y equipo que funciona en la planta.

La humedad relativa también se ve influenciada por el ambiente. Especialmente a los 90 días se observa un pico máximo que coincide con una temperatura por debajo de los 30 grados y en días posteriores se observa un descenso de la humedad acompañado de un aumento de temperatura alcanzando hasta los 44°C a la edad de 150 días.

Perfiles de cloruros

En la figura 4 se muestran la concentración de cloruros por profundidad, y como cambia con respecto al tipo de mezcla. Se puede advertir que a 3 mm de profundidad las mezclas que presentan los valores más altos de concentración de cloruros son IC y FA-V. Dado que 3 mm está muy cercano a la superficie del espécimen, para el caso de IC de 28 a 150 días de exposición la porosidad del agregado ligero que para este periodo (principalmente a 150 días) ya ha hecho su función de proveer de agua a la solución, pudo promover los espacios para que los cloruros ingresaran con mayor facilidad que en las otras mezclas, a 14 días muestra una menor concentración de cloruros, que puede deberse a que en ese periodo el agregado ligero aún estaba relativamente saturado no permitiendo con la misma facilidad la difusión del agente agresivo.

A 11 mm de profundidad, a 28 días de exposición la mezcla IC muestra una mayor concentración de cloruros, debido a que a esta profundidad el agregado ligero liberó más agua dejando los poros semisaturados permitiendo el ingreso de los iones hacia adentro de la muestra, sin embargo se puede observar que el uso del aditivo reductor de la retracción ayuda al curado interno disminuyendo considerablemente la concentración de cloruros, teniendo un valor muy similar al de la mezcla SRA.

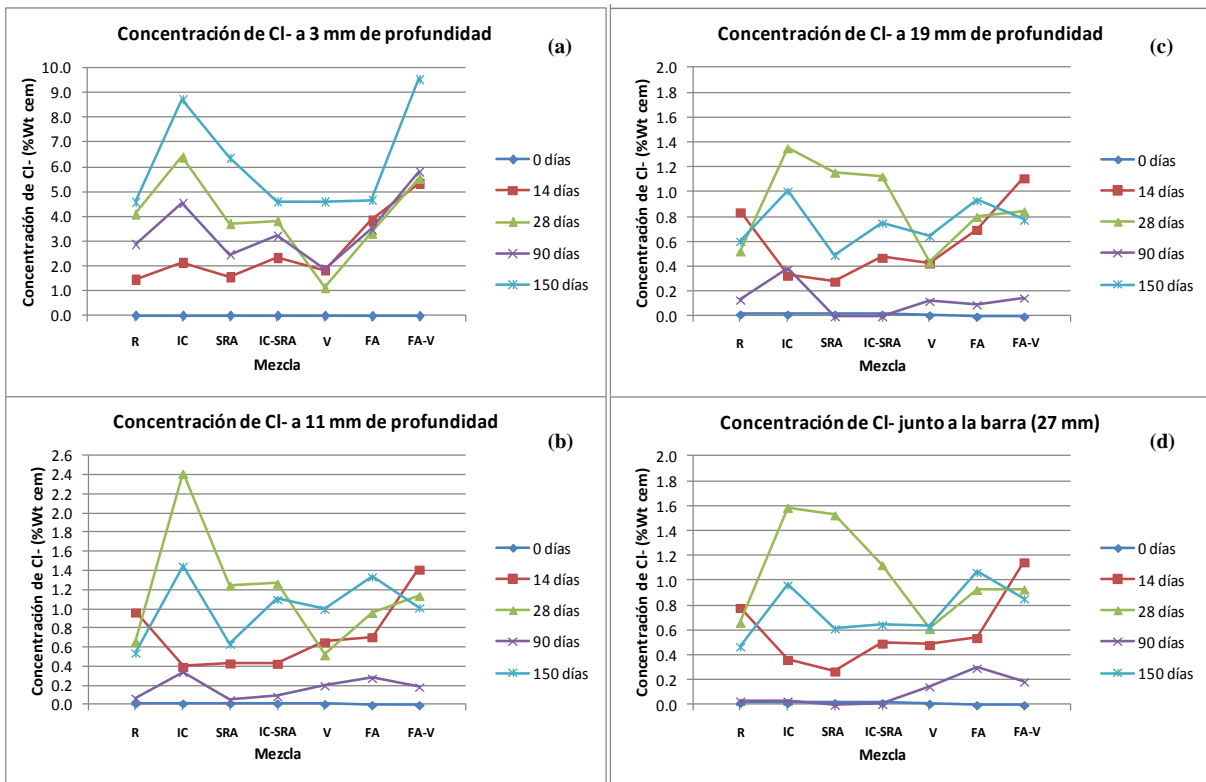


Figura 4.- Concentración de cloruros a diferentes profundidades: (a) 3 mm, (b) 11 mm, (c) 19 mm, (d) 27 mm.

Lo anterior nos lleva a pensar en la fuerte influencia del medio ambiente de exposición al interior de la planta, que incluye a la humedad relativa, la temperatura y a los productos finales de la empresa como el cloruro de calcio. Un ejemplo claro de esta influencia lo podemos observar en la figura 4, a 90 días de exposición en todas las profundidades, la concentración de cloruros es más baja en todas las mezclas que a 28 días de exposición, cuando se esperaría lo contrario, ya que a mayor tiempo de exposición, mayor cantidad de cloruros se depositan y se difunden.

Una explicación a este fenómeno puede estar en la humedad relativa. Si se observa la Figura 3, se tiene un periodo de más de un mes en el cual el valor de dicha humedad relativa oscila entre el 50 y 60 % entre los 78 y 90 días, valores que normalmente favorecen la difusión, pues los poros del concreto se encuentran semisaturados. Esto si está sucediendo, pero en sentido contrario, ya que pasa de concentraciones altas de 27 mm (al centro de la probeta) a concentraciones más bajas a 19 y 11 mm de profundidad para luego subir nuevamente a 3 mm. La pregunta es, ¿Porqué este comportamiento?

Haciendo un análisis a las probetas, durante este periodo de 90 días, hubo un acumulamiento de cloruro de calcio en la superficie del concreto de las muestras, tal y como se puede ver en las Figura 5. El cloruro de calcio es un compuesto con propiedades higroscópicas, que puede absorber agua tanto del ambiente como del propio concreto, pudiéndose arrastrar con ella a los cloruros que se encuentran dentro del concreto, lo que explica la alta concentración del agente agresivo cercana a la superficie. En la Figura 6 se muestran probetas en las que se observa la humedad en la superficie que bien puede venir del interior del concreto.

Posteriormente, a 150 días hay una recuperación de los cloruros que coincide con un periodo de humedad relativa entre 45 y 60%, que también es favorable para la difusión, pero ahora después de acumular una cantidad importante de cloruros en la superficie, estos vuelven a entrar lo que se refleja en los perfiles. Aunque esto sucede para todas las mezclas, las que mejor comportamiento tuvieron fueron a 19 y 27 mm (cercano a la barra de acero) fueron SRA y V, una vez más debido a la densificación del poro por el aumento en la viscosidad.



Figura 5. Probetas en exposición en ambiente industrial, cubiertas con cloruro de calcio.



Figura 6. Probetas en exposición en ambiente industrial, mostrando humedad en la superficie del concreto.

De este análisis se puede concluir que tanto el medio ambiente como el cloruro de calcio que forma parte del proceso de manufactura de la planta, son un factor muy importante que influye en gran manera al comportamiento de los cloruros dentro de las probetas, aunque algunas mezclas se comportan mejor que otras debido a la acción química y física de los ingredientes de cada una de ellas.

CONCLUSIONES

1. En general, todas las mezclas mostraron un comportamiento paralelo a lo largo del tiempo de experimentación lo que indica que las adiciones cementantes, el uso de aditivos reductores de retracción, o el uso de agregado ligero en sustitución de 20% en volumen como se hizo en este trabajo no genera variaciones importantes.
2. Solo el sustituir agregado ligero tiene una reducción del 6% de resistencia a 180 días y una reducción de peso de 4% aproximadamente en estado fresco que puede compensar la disminución de resistencia con una disminución en el diseño de elementos estructurales.
3. El uso del curado interno demostró seguir ganando resistencia a edades de 180 días a una velocidad lenta mientras que la de referencia a partir de los 90 días se mantuvo prácticamente constante, por lo que se espera que al menos en la mezcla IC se pueda disminuir la diferencia de resistencia con respecto a R a mayores edades o hasta igualarse.
4. En general se pueden observar micro ciclos ambientales que generan un efecto sobre el concreto y los perfiles de cloruros, ya que a los 90 días se presentó un aumento de HR y disminución del contenido de cloruros, aunque hay que enfatizar que no todas las mezclas responden con la misma intensidad a estos cambios ambientales. La mezcla con mayor

susceptibilidad en este caso es IC cuyos incrementos y disminuciones de concentración de cloruros fueron más bruscos.

5. De esta manera se ve como el ambiente juega un papel importante en el comportamiento de los concretos de alto desempeño, por lo que las conclusiones aquí expuestas son válidas para ambientes industriales similares y el uso de estos concretos en algún otro ambiente requiere de previa investigación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo parcial a este trabajo a los proyectos CONACYT Ciencia Básica 155363, PROMEP 103.5/11/4330 y PAICYT 2010.

REFERENCIAS

1. INEGI, “Estadísticas del medio ambiente de la Zona Metropolitana de Monterrey”, Monterrey, N.L. (2001).
2. P. C. Aïtcin, “High performance concrete. Modern concrete technology 5”. Modern concrete technology 5. E & FN Spon, (1998).
3. R. Philleo, “Concrete science and reality”, Materials science of concrete II . [ed.] J. P. Skafny y S. Mindess.: American Ceramic Society, (1991), pp. 1-8.
4. S. Zhutovsky, K. Kovler, y A. Bentur, “Efficiency of lightweight aggregates for internal curing of high performance concretes to eliminate autogenous shrinkage”, Rilem, (2002). Vol. 35, pp. 97-101.
5. D. Cusson, y T. Hoogeveen, “Preventing autogenous shrinkage of high performance concrete structures by internal curing”, [ed.] Konsta-Gdoutos : Springer, (2006). pp. 83-89.
6. ONNNCE. C-414 “Industria de la construcción - Cementos hidráulicos - Especificaciones y métodos de prueba”, Distrito Federal, México.
7. ASTM C-618, “Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete”, ASTM International, (2004).
8. ASTM C-39, “Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens”, ASTM International, (2004).
9. ASTM C-876. “Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete”, ASTM International, (2004).