

REACCIÓN ALCALI-SÍLICE EN HORMIGONES CON FIBRAS

Giaccio, Graciela¹, Torrijos, María Celeste², Milanese, Carlos³ y Zerbino, Raúl²

¹ CIC. LEMIT - Facultad de Ingeniería UNLP, ² CONICET. LEMIT - Facultad de Ingeniería UNLP, ³ Cementos Avellaneda SA. LEMIT-CIC. 52 e/ 121 y 122. La Plata, 0221-4831142, zerbino@ing.unlp.edu.ar

RESUMEN

La reacción álcali-sílice (RAS) reviste interés en Argentina considerando la gran variedad de agregados potencialmente reactivos. Pocos estudios tratan sobre la contribución potencial de las fibras para mitigar el proceso de degradación y sobre si la RAS modifica la capacidad residual del hormigón. Este trabajo discute los efectos del uso de fibras en el desarrollo de la RAS, en base al estudio de bloques de hormigón expuestos al aire libre durante cuatro años. Comprende tres hormigones elaborados con agregado grueso reactivo y adición de álcalis, uno sin fibras, otro con 40 kg/m³ de fibras de acero y el tercero con 3 kg/m³ de macrofibras sintéticas, más un cuarto hormigón de referencia sin adición de fibras ni de álcalis. Se analizan las expansiones, la permeabilidad y el desarrollo de fisuras. Si bien las fibras no inhibieron la RAS atenuaron las expansiones y el cuadro de fisuración.

Palabras claves: Hormigón con fibras, reacción álcali-sílice, fisuración.

INTRODUCCIÓN

El estudio de la reacción álcali-sílice (RAS) tiene gran interés en todo el mundo, ocupa el segundo lugar entre las patologías de estructuras de hormigón después de la corrosión de armaduras. Como es sabido, participan en la RAS algunos elementos de la solución de poro del hormigón (principalmente OH⁻, Na⁺, K⁺, Ca²⁺) y ciertos materiales silíceos (ópalo, calcedonia, cuarzo tensionado) y vidrio volcánico presentes en algunos agregados. Bajo condiciones propicias de humedad y temperatura, los productos de reacción (geles silíceos) pueden absorber agua y causar expansiones y fisuras. Las expansiones pueden promover problemas operativos ante el desplazamiento de elementos estructurales. Asimismo, la aparición de fisuras favorece el inicio de otros mecanismos de deterioro que afectan al comportamiento mecánico del hormigón [1-2].

Es sabido que la resistencia a tracción y el módulo de elasticidad son los parámetros más alterados por la RAS [3-4] mientras que la resistencia a compresión se modifica en menor grado. El mecanismo de falla en flexión se ve afectado por la RAS y las diferencias entre el patrón de fisuras del hormigón sano y del dañado se reflejan en las curvas carga – flecha en donde el hormigón dañado muestra una mayor no linealidad antes del pico y una rama de ablandamiento más gradual producto del crecimiento y ramificación de las fisuras. En compresión, aún en casos donde no se perciben disminuciones de resistencia, la presencia de fisuras internas también se refleja en la forma de las curvas tensión - deformación.

Sin embargo, si bien las propiedades mecánicas del hormigón disminuyen con la RAS, no es fácil asociar dichos cambios con un nivel de expansión ya que varían conforme los materiales y mecanismos involucrados, la mineralogía de la roca, el tamaño del agregado y la cinética de la reacción [4].

Aunque se ha analizado la influencia de las armaduras de acero en estructuras afectadas por RAS [5-7] son contados los estudios sobre Hormigón Reforzado con Fibras (HRF) que permitan valorar la contribución potencial de diferentes fibras para mitigar el proceso de degradación [8-10]. Además, la mayoría de los trabajos adoptaron condiciones aceleradas muy agresivas para promover la RAS, así como el uso de agregados reactivos artificiales. En un trabajo previo [11] se encontró que las fibras pueden reducir la expansión y el número y el ancho de las fisuras, siendo las macrofibras de acero, para igual volumen, más eficientes que las sintéticas. Se encontró que la tensión de fisuración en flexión disminuyó al aumentar la expansión por RAS y que, por el contrario los HRF conservaron su capacidad residual original a pesar de la severidad del daño.

En Argentina existe una gran variedad de agregados potencialmente reactivos y a lo largo de más de 50 años se ha detectado un número significativo de estructuras en servicio afectadas por RAS [1-2]. La búsqueda de un método de ensayo universal capaz de valorar la RAS y reproducir el comportamiento del hormigón en servicio es objeto de muchas investigaciones. La necesidad de obtener resultados en tiempos acordes con los cronogramas de proyecto, conduce al uso de métodos acelerados que reducen la fiabilidad de los mismos (morteros, probetas de pequeño volumen, alta temperatura, alta alcalinidad). Ante esto, interesa analizar la respuesta del hormigón a mayor escala (bloques) para validar los métodos de laboratorio y evaluar las estrategias de mitigación de la RAS [12-14]. El uso de bloques permite reproducir de mejor forma los efectos de la fluctuación de la temperatura ambiente y de la lixiviación que las probetas de laboratorio.

En este trabajo se analiza el efecto de las fibras en el desarrollo de la RAS y sus manifestaciones sobre bloques colocados al aire libre, expuestos a las variaciones climáticas durante 4 años. Se analizan las expansiones y el desarrollo de fisuras sobre cuatro bloques de hormigón con agregados potencialmente reactivos, tres con alto contenido de álcalis (sin fibras, con fibras de acero, con macrofibras poliméricas) y el cuarto bloque de hormigón simple que sólo contenía los álcalis aportados por el cemento.

EXPERIENCIAS

Para analizar el desarrollo de la RAS bajo las condiciones ambientales de la región, y a una escala más real, se colocaron al aire libre cuatro bloques de hormigón. Los hormigones se elaboraron con proporciones similares (a/c 0,42; contenido de cemento 380 kg/m^3) incorporando en cada caso diferentes contenidos de álcalis y tipos de fibras. Se utilizaron CPN ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ 0,73 %), arena silíceo natural (módulo de finura 2,07) y piedra partida granítica de 19 mm de tamaño máximo. Para promover la RAS se incorporó como parte del agregado grueso (40 %) una arenisca cuarcítica altamente reactiva que posee granos de cuarzo tensionado rodeados por una matriz constituida principalmente por calcedonia y ópalo. La expansión a las 52 semanas (IRAM 1700), con 100% de agregado reactivo, fue igual a 0,065%; cuando se usó sólo 40% de agregado reactivo la expansión creció a 0,142% mostrando que este agregado tiene efecto de pesimum. Para lograr una adecuada trabajabilidad se utilizó un reductor de agua de alto rango. Se seleccionaron dos tipos de fibras: S (de acero de bajo carbono, longitud = 50 mm, diámetro = 1 mm) y M (macrofibras sintéticas en base a olefinas modificadas, longitud = 60 mm, diámetro = 0,62 mm, resistencia a tracción 640 MPa, módulo de elasticidad 10 GPa).



Figura 1: Vista de los bloques de hormigón y esquema de las mediciones de deformación.

Se prepararon dos hormigones sin fibras (B1 y B2) y dos HRF incorporando 40 kg/m^3 de fibras de acero (B2S) y 3 kg/m^3 de macrofibras sintéticas (B2M). Para propiciar la RAS, en tres hormigones (B2, B2S, B2M) se añadió NaOH en el agua de mezclado para alcanzar un contenido total de álcalis igual a 4 kg/m^3 . En B1 no se añadieron álcalis, resultando el contenido de álcalis total $2,8 \text{ kg/m}^3$ (suministrados por el cemento). Los hormigones tuvieron un asentamiento de $80 \pm 10 \text{ mm}$ y un contenido de aire de $4,2 \pm 1 \%$.

Se moldearon bloques de $0,70 \times 0,40 \times 0,40 \text{ m}$ que fueron cuidadosamente compactados; se curaron cubiertos con paños húmedos durante 7 días y luego fueron ubicados en el exterior. Sobre sus caras laterales y sobre la cara superior se fijaron puntos de acero inoxidable para medir los cambios de longitud en distintas direcciones mediante un comparador de láminas paralelas. Las mediciones se realizaron todos los meses del año evitando leer después de días lluviosos. La Figura 1 presenta una vista de los bloques y el esquema de medición de las deformaciones en horizontal (H1-H3) y vertical (V1-V5).

Periódicamente se examinaron las caras laterales de los bloques y se realizó el relevamiento de fisuras. Para ello se cubrió cada cara con un film transparente marcando las fisuras visibles para luego, mediante un software medir su longitud y orientación [11]. Además mediante una lupa se midió el ancho máximo de fisura. El daño de los bloques también fue evaluado a través del coeficiente de permeabilidad al aire (kT) [15].

Para caracterizar el hormigón se moldearon prismas de $75 \times 105 \times 430 \text{ mm}$ y cilindros de $100 \times 200 \text{ mm}$ que fueron compactados por vibración externa; a las 24 h se cubrieron con un paño de algodón, se colocaron en bolsas de plástico con 5 ml de agua y se almacenaron en cámara húmeda ($T: 20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, $HR > 95 \%$) hasta la edad de ensayo. Se determinaron la resistencia a compresión (f'_c) y el módulo de elasticidad (E) a los 28 días. Para considerar la evolución de las propiedades mecánicas en el tiempo y el efecto de la RAS, se realizaron ensayos de flexión a 28 días y 1 año conforme la norma EN 14651. Los ensayos se realizaron sobre probetas entalladas con control de la apertura de fisura (CMOD), utilizando un extensómetro tipo clip y se determinaron la tensión de primer pico (f_L) y las tensiones residuales para CMOD de 0,5 y 2,5 mm (f_{R1} y f_{R3}).

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Caracterización del hormigón

La Tabla 1 presenta las principales propiedades de los hormigones. Se observa que a 28 días todos ellos superaron los 30 MPa de resistencia a compresión. Considerando los cambios en resistencia a flexión entre 28 días y un año se verifica la degradación del hormigón en las mezclas con alto contenido de álcalis (B2, B2S, B2M) principalmente un decrecimiento en la tensión de primer pico (f_L).

Tabla 1: Propiedades del hormigón.

Hormigón	Álcalis (kg/m ³)	Tipo de fibras	Asent (mm)	f'c (MPa)	E (GPa)	f _l 28 (MPa)	f _{R1} 28 (MPa)	f _{R3} 28 (MPa)	f _l 365 (MPa)	f _{R1} 365 (MPa)	f _{R3} 365 (MPa)
B1	2,8	-	90	34,2	44,3	5,5	1,0	0,1	5,2	1,2	0,2
B2	4,0	-	70	32,4	41,1	5,7	0,9	0,1	3,3	2,0	0,3
B2S	4,0	Acero	90	33,0	39,3	6,4	4,8	4,0	3,9	4,7	3,8
B2M	4,0	Polim	90	37,6	41,5	5,1	2,3	1,6	3,8	2,6	1,7

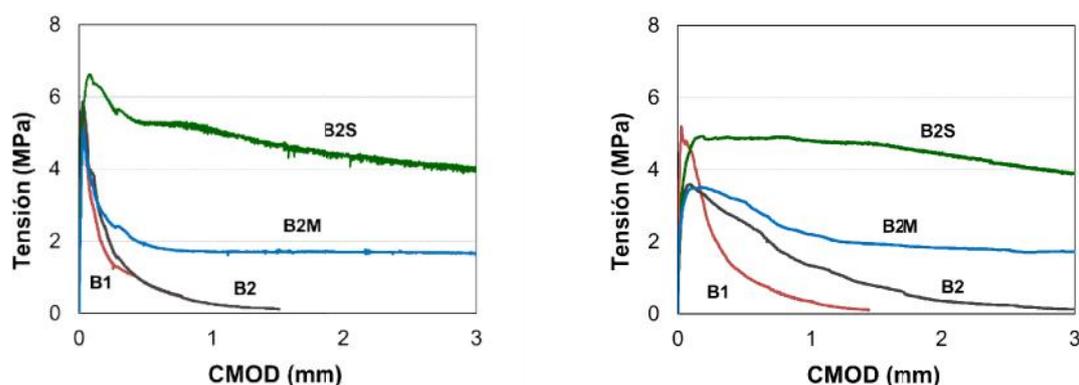


Figura 2: Curvas típicas tensión - CMOD en flexión a 28 y 365 días.

Las curvas tensión - CMOD en flexión a 28 días y un año se presentan en la Figura 2. El desarrollo de daño interno se refleja en la forma de las curvas [4, 11]. Comparando las curvas el hormigón B2 aparece como el más dañado ya que, a un año, muestra una gran disminución en la carga pico y un aumento significativo en la rama de ablandamiento, que es propio de un gran nivel de fisuración. Esto no ocurre en B1 donde tanto la carga máxima como el comportamiento post-pico son similares a ambas edades, lo que indica que no hubo daño significativo ni fisuración durante ese lapso. En los HRF, ambos con alto contenido de álcalis, existe daño ya que las tensiones de primera fisura decrecen; sin embargo la resistencia residual no se redujo significativamente. La Tabla 1 presenta las tensiones residuales f_{R1} y f_{R3} a 28 días y un año obtenidas a partir de las curvas de tensión vs CMOD.

Bloques de hormigón en condiciones de campo

En la Figura 3 se muestran, a modo de ejemplo, medidas de expansiones lineales individuales sobre una cara lateral de los bloques B1, B2 (uno de los más dañados) y B2S diferenciando las deformaciones verticales (V) y las horizontales (H). En B1, sin fisuras, las deformaciones son muy pequeñas así como la variabilidad de los resultados. En los bloques elaborados con los hormigones con mayor contenido de álcalis las expansiones y su variabilidad crecen significativamente; sin embargo, todas las medidas presentan la misma tendencia. Los mayores valores de expansión y variabilidad se registraron en B2, resultando menores en B2S. A partir de este comportamiento se puede inferir que la presencia de fibras conduce a algún control sobre las expansiones y también a una distribución más uniforme de las deformaciones. Esto coincide con lo observado en ensayos sobre probetas de mezclas similares [11] donde las expansiones lineales con fibras de acero se redujeron casi al 50 % con respecto a las del hormigón sin fibras. Cabe indicar que los hormigones con macrofibras poliméricas presentaron un comportamiento intermedio entre B2 y B2S.

La Figura 4 compara los valores promedio de las expansiones verticales (V) y horizontales (H) de todas las caras laterales. Las expansiones V son mayores que las H, lo que concuerda con otros autores [8].

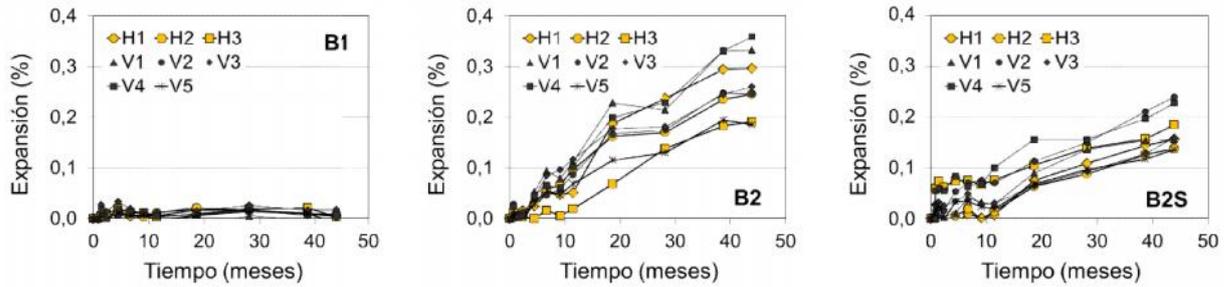


Figura 3: Ejemplos de medidas individuales de expansión lineal.

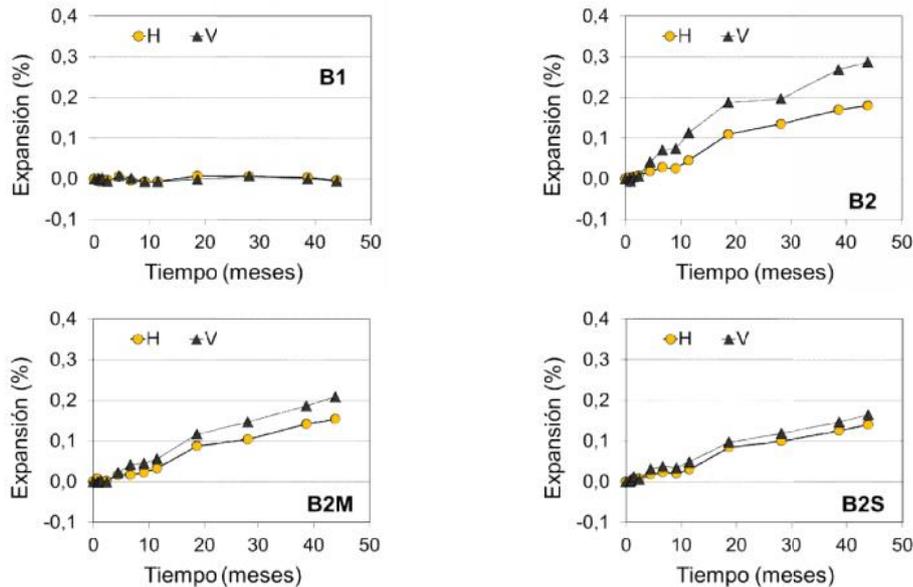


Figura 4: Medidas de expansión lineal promedio en diferentes direcciones.

Este comportamiento anisotrópico es coherente con la mayor fisuración horizontal, como se verá más adelante, y las mayores diferencias corresponden al hormigón más dañado (B2). Mientras en B1 no hay expansión, B2 presenta la máxima expansión, mientras que B2S y B2M muestran un comportamiento intermedio, siendo algo menor la expansión de B2S. Es de destacar que las deformaciones no se estabilizaron y aún continúan aumentando superados los 4 años.

En la Figura 5 se presenta la evolución en el tiempo de la densidad y del ancho de fisuras; cada valor es el promedio de las densidades sobre las cuatro caras laterales. Las fisuras comenzaron a ser visibles al cabo de 200 días. El hormigón B2 presentó la mayor densidad de fisuras desde el comienzo, incrementándose la diferencia con el paso del tiempo. Los hormigones con fibras (B2S y B2M) mostraron una densidad de fisuras similar a todas las edades.

A los 3 años la densidad de fisuras en B2S y B2M fue 50% menor que en B2. Los tres hormigones con alto álcalis mostraron un marcado incremento de la densidad de fisuras hasta el primer año y a partir de entonces el aumento fue menor en los HRF. El ancho de fisuras fue mayor en B2 (Figura 5b) y, a diferencia de la densidad de fisuras, creció continuamente con el tiempo; en los HRF el aumento fue más lento, principalmente después de dos años. En B1 no se detectaron fisuras y este comportamiento está de acuerdo con las expansiones medidas.

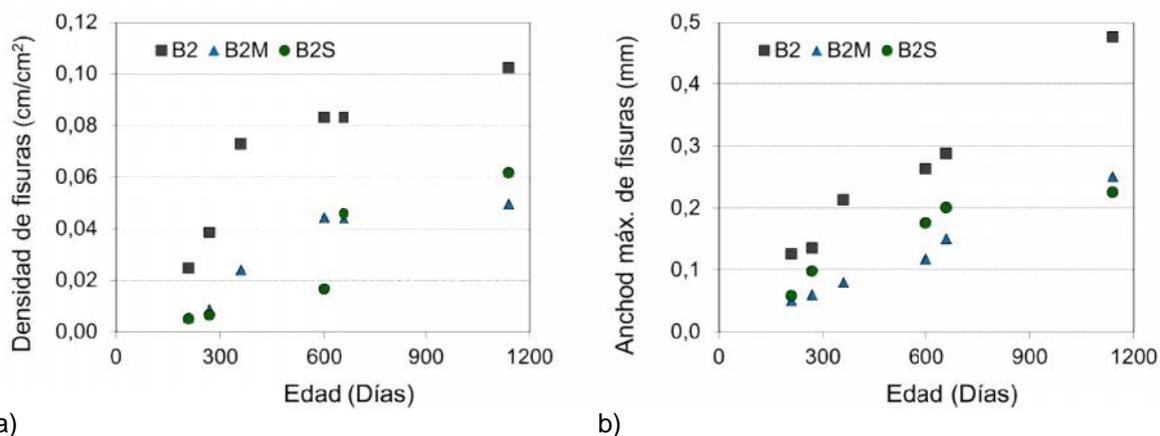


Figura 5: a. Relevamiento de la densidad de fisuras a lo largo del tiempo. b. Evolución del ancho máximo de fisura con el tiempo.

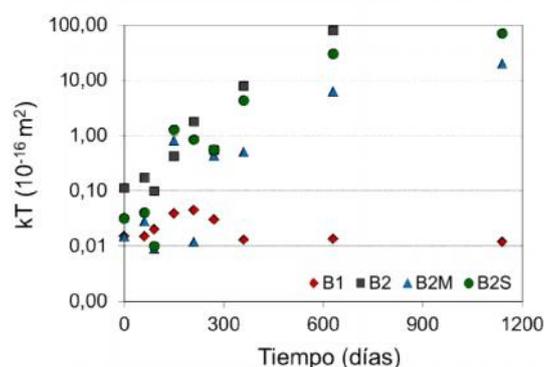


Figura 6: Evolución de la permeabilidad al aire con el tiempo.

Cabe comentar que se observó que las primeras fisuras nacían en los bordes verticales de los bloques y que durante el relevamiento en el primer año la mayor parte de las fisuras se orientaron horizontalmente; a medida que avanzó la reacción las fisuras se distribuyeron más aleatoriamente. Este comportamiento está de acuerdo con el hecho de que las expansiones verticales fueron mayores que las horizontales (Figura 4).

Como una forma de evidenciar el desarrollo de daño en los bloques se realizaron medidas de la permeabilidad al aire. La Figura 6 muestra la evolución de la permeabilidad en el tiempo. Según el equipo de Torrent [15] un coeficiente de permeabilidad por debajo de $0,01 \times 10^{-16} m^2$ indica un hormigón de muy buena calidad, si el coeficiente está entre $0,01-0,1 \times 10^{-16} m^2$ es bueno, entre $0,1-1 \times 10^{-16} m^2$ es normal, entre $1-10 \times 10^{-16} m^2$ es malo y un hormigón con un coeficiente mayor de $10 \times 10^{-16} m^2$ puede considerarse muy malo. Con la excepción del hormigón B1 que permaneció como bueno, los coeficientes crecieron a lo largo del tiempo; todos los hormigones con alto contenido de álcalis alcanzaron coeficientes de permeabilidad muy altos, y a los 2 años ya pueden ser considerados como malos o muy malos. Estas observaciones son concordantes con el relevamiento de fisuras (densidad, ancho máximo) pero es importante destacar que los cambios en la permeabilidad aparecieron antes (posible microfisuración) que las fisuras visibles.

DISCUSIÓN

El estudio de bloques de hormigón expuestos a condiciones ambientales típicas de la región permitió analizar el desarrollo de la RAS y sus efectos sobre las propiedades del hormigón en una escala más cercana a las aplicaciones. El contenido de álcalis y la

incorporación de fibras condujeron a diferentes niveles de expansión, patrón de fisuración y respuesta mecánica.

El nivel de fisuración y las deformaciones medidas en los bloques son consistentes. Las expansiones y el patrón de fisuras fueron similares en las diferentes caras de cada bloque y no se encontraron efectos de orientación o irradiación. En concordancia con otros autores [7] se encontró mayor deformación en la dirección de llenado (vertical), lo que explica la mayor orientación horizontal de las fisuras. Si bien la dispersión en las mediciones aumentó con el nivel de RAS, las tendencias fueron similares.

Como es bien sabido, la permeabilidad al aire está relacionada con el nivel de daño. Es muy interesante observar que incluso cuando no se observaban fisuras, se midieron aumentos en el coeficiente de permeabilidad. Los cambios anticipados en la permeabilidad hacen posible inferir que hubo una incipiente microfisuración. En el HRF dañado los coeficientes de permeabilidad (Figura 6) fueron más pequeños que en el hormigón sin fibras (B2), pero debe resaltarse que, después de 3 años, todos los hormigones pueden clasificarse como de mala o muy mala calidad conforme las categorías propuestas para el equipo.

La incorporación tanto de fibras de acero como de macrofibras sintéticas conduce a cierto control y distribución de deformaciones. Tanto las deformaciones máximas, el ancho máximo de fisura como la densidad de fisuras fueron menores que en el hormigón sin fibras (B2). Sin embargo, la reducción de la expansión debido a la incorporación de fibras no siempre es significativa [11]. No obstante, es importante resaltar que, si bien la incorporación de fibras no inhibió la RAS, la reducción significativa en la fisuración producida por la reacción puede adquirir importancia al considerar la posibilidad de daño extra ante el acceso de productos agresivos al hormigón.

Finalmente, se verificó que la capacidad post-pico (residual) del HRF dañado por RAS no se modifica significativamente, tanto los hormigones con fibras de acero como sintéticas conservaron su capacidad de carga post-pico original incluso ante un daño severo; esto se puede explicar en el hecho de que la adherencia fibra-matriz es menos afectada que la resistencia de la matriz [11,16] y muestra la fiabilidad en la capacidad residual de los HRF frente a ambientes agresivos.

CONCLUSIONES

Se estudió el comportamiento de bloques de hormigón simple y HRF afectados por RAS. Para promover el proceso deletéreo se incorporó como parte del agregado grueso una arenisca cuarcítica altamente reactiva y se elevó el contenido de álcalis. A partir del análisis de las expansiones, las propiedades mecánicas y el desarrollo y características de las fisuras, se puede concluir que:

- En los hormigones afectados por RAS las expansiones y fisuras fueron muy importantes y continuaron aumentando aún después de tres años, mientras que cuando no se agregaron álcalis las expansiones del hormigón fueron insignificantes y no se detectaron fisuras.
- Aunque la incorporación de fibras no inhibe la RAS brinda beneficios como la reducción en el grado de fisuración (cantidad y ancho de fisuras) y disminución de las expansiones. Las medidas de deformaciones y permeabilidad en los bloques fueron consistentes con el nivel de fisuración, y los cambios en la permeabilidad permitieron detectar microfisuras incipientes. Cabe destacar que, aunque se afecte la resistencia de la matriz, los HRF conservan su capacidad residual original incluso ante un daño severo por RAS.

AGRADECIMIENTOS

Al CONICET (PIP 112-201501-00861 Avances en hormigones reforzados con fibras) y la UNLP (PPID2016 Control de la fisuración en hormigones reforzados con fibras y 11/I188 Hormigones reforzados con fibras y su contribución al desarrollo sostenible) por la financiación para el desarrollo de los trabajos y la colaboración de Cementos Avellaneda, Cementos Artigas y Maccaferri por el suministro de materiales. Los autores agradecen especialmente la colaboración de M.E. Bossio, P. Bossio, A. Gerez y D. Falcone en el apoyo de trabajos experimentales.

REFERENCIAS

- [1] Batic O.R., Sota J.D. "Reacciones deletéreas internas", en Durabilidad del hormigón estructural (E.F. Irassar Ed), AATH, La Plata, (2001), 157-216.
- [2] Falcone D.D., Batic O.R. "Estudios y antecedentes sobre la reacción álcali - sílice (RAS) en el LEMIT", Anales del LEMIT Serie III, año 1 (2), La Plata, (2002), 61-80.
- [3] Pleau R., Bérubé M.A., Pigeon M., Fournier B., Raphaël S., "Mechanical behavior of concrete affected by ASR", in Proc. 8th Int. Conf. on AAR in Concrete (K. Okada et al Eds), Kyoto, (1989), 721-726.
- [4] Giaccio G., Zerbino R., Ponce J.M., Batic O.R., "Mechanical behavior of concretes damaged by alkali silica reaction", Cem. Concr. Res. 38 (2008), 993-1004.
- [5] Doran D.K., More J.F.A., "Appraisal of the structural effects of alkali-silica reaction", Proc. 8th Int. Conf. on AAR in Concrete (K. Okada et al Eds), Kyoto, (1989), 677-682.
- [6] Swamy R.N., Al-Asali M.M., "Engineering properties of concrete affected by alkali-silica reaction", ACI Mat J 85, (1988), 367-374
- [7] Smaoui N., Bérubé M.A., Fournier B., Bissonnette B., "Stresses induced by ASR in reinforced concrete incorporating various aggregates", Proc. 12th Int. Conf. on AAR in Concrete (M Tang and M Deng Eds), Beijing, (2004), 1191-1201.
- [8] Qian C., Guo H., Wang J., Yan A., "Influence of alkali-aggregate reaction on flexural properties of steel fiber reinforced concrete", Proc. 10th Int. Conf. on AAR in Concrete, Melbourne (A Shayan Ed), (1996), 474-481.
- [9] Haddad R.H., Smadi M.M., "Role of fibers in controlling unrestrained expansion and arresting cracking in Portland cement concrete undergoing alkali-silica reaction, Cem. Concr. Res. 34 (2004), 103-108.
- [10] Pires de Carvalho M.R., de Moraes Rego Fairbairn E., Dias Toledo Filho R., Chagas Cordeiro G., Hasparyk N.P., "Influence of steel fibers on the development of alkali-aggregate reaction", Cem Con Res 40 (2010), 598-604.
- [11] Giaccio G., Bossio M.E., Torrijos M.C., Zerbino R., "Contribution of fiber reinforcement in concrete affected by alkali-silica reaction", Cem Con Res. 67, (2015), 310-317.
- [12] Borchers I., Müller C., "7 years of field site tests to assess the reliability of different laboratory test methods for evaluating the alkali-reactivity potential of aggregates", Proc. 14th Int. Conf. on AAR in Concrete, Texas (T Drimalas et al. Eds), (2014), 10 p.
- [13] Ideker J.H., Drimalas T., Bentivegna A.F., Follard K.J., Fournier B., Thomas M.D.A., Hooton R.D., Rogers C.A., "The importance of outdoor exposure site testing", Proc. 14th Int. Conf. on AAR in Concrete, Texas (T Drimalas et al. Eds), (2014), 10 p.
- [14] Fournier B., Nkinamubanzi P.C., Lu D., Thomas M.D.A., Follard KJ, Ideker JH "Evaluating potential alkali-reactivity of concrete aggregates – How reliable are the current and new test methods?"; in Proc MA Bérubé Symposim on Alkali-Aggregate Reactivity in Concrete (B Fournier Ed), (2006), 21-44.
- [15] Torrent R., "A two chamber vacuum cell for measuring the coefficient of air permeability of the concrete cover on site", Mater. Struct. 25, (1992), 358-365.
- [16] Bossio M.E., Torrijos M.C., Zerbino R., Giaccio G., "Pull out behaviour of macro synthetic fibers: effects of fibre type, matrix strength and microcracking", Proc. of Bond in concrete 2012 Vol 2 (J W Cairns et al Eds), Brescia, (2012), 901-906.