

## Desarrollo de la fisuración por la reacción álcali sílice en bloques de hormigón simple y reforzados con distintos tipos de fibras

M. C. Torrijos<sup>a\*</sup>, G. Giaccio<sup>b</sup>, R. Zerbino<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica - Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, CP 1900, La Plata, Argentina. [mc.torrijos@conicet.gov.ar](mailto:mc.torrijos@conicet.gov.ar), [zerbino@ing.unlp.edu.ar](mailto:zerbino@ing.unlp.edu.ar)

<sup>b</sup>Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires - Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica - Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, CP 1900, La Plata, Argentina. [ggiaccio@ing.unlp.edu.ar](mailto:ggiaccio@ing.unlp.edu.ar)

Recibido: 15 de enero de 2023

Aceptado: 9 de febrero de 2023

### RESUMEN

La reacción álcali-sílice (RAS) despierta gran interés en todo el mundo, ya que ocupa el segundo lugar entre las patologías que afectan a las estructuras de hormigón después de la corrosión de armaduras. Su estudio en Argentina es de especial interés dada la gran cantidad de agregados potencialmente reactivos que se pueden encontrar. Este trabajo presenta un estudio de campo que analiza la evolución de las expansiones y el cuadro de fisuración en bloques de hormigón que permanecieron al aire libre durante ocho años. Comprende cinco hormigones, en tres de ellos se usó un 40 % de agregado grueso y en los dos restantes un 25 % de arena, potencialmente reactivos. Para estudiar la incidencia de las fibras en el desarrollo de la RAS, se incluyeron mezclas que incorporaron fibras de acero, macrofibras sintéticas y microfibras sintéticas.

**PALABRAS CLAVE:** Expansión, fisuración, reacción álcali-sílice, fibras

### ABSTRACT

The alkali-silica reaction (ASR) generates great interest worldwide, since it is the second among the pathologies that affect concrete structures after reinforcement corrosion. In Argentina its study is of special interest due to the large number of potentially reactive aggregates that can be found. This paper presents a field study that analyses the evolution of expansions and crack pattern in concrete blocks that remained outdoors for eight years. It comprises five concretes, in three of them 40 % of a potentially reactive coarse aggregate and in the remaining two 25 % of a potentially reactive sand were used. To study the incidence of fibres in the development of ASR, mixtures that incorporated steel fibres, synthetic microfibrs, and synthetic microfibrs were included.

**KEYWORDS:** Expansion, cracking, alkali-silica reaction, fibres

\*Autor de correspondencia

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC-BY-NC-SA 4.0).

Citar como: Torrijos, M. C., Giaccio, G., y Zerbino, R. (2023). Desarrollo de la fisuración por la reacción álcali sílice en bloques de hormigón simple y reforzados con distintos tipos de fibras. Revista Hormigón, 63, 14–22. <http://id.caicyt.gov.ar/ark:/s27189058/vazajrdmm>

## 1. Introducción

La reacción álcali-sílice (RAS) es una reacción entre los álcalis presentes en la solución de poros del hormigón y la sílice reactiva de ciertos agregados, esta reacción genera un gel que en presencia de agua es expansivo, pudiendo desarrollar fisuras en el hormigón. Las fisuras comienzan dentro de los agregados y luego se propagan en forma radial, manteniendo en un principio la interfaz agregado-mortero con un mínimo daño [1]. Existen varias formas de evitar o mitigar los efectos de la reacción, como cambiar el tipo de agregado, controlar la cantidad de álcalis en el cemento, usar adiciones, etc.

El hormigón puede encontrarse restringido por la presencia de armaduras, por cargas que afectarán el nivel de expansión y daño. En el caso del hormigón armado la restricción que ejercen las armaduras genera una transferencia de las expansiones desde las zonas confinadas hacia las menos restringidas. Zahedi et al. [2] evaluaron bloques con distintas configuraciones de confinamiento (mediante barras de refuerzo) y sin confinar, y observaron que cuanto mayor fue el grado de restricción menor resultó la tasa de expansión y el nivel de expansión a un determinado tiempo. Además, observaron que para un mismo nivel de expansión, el daño total (promedio del daño en las distintas direcciones) resultó igual para los especímenes confinados como para los que se podían expandir libremente. También observaron que en especímenes más pequeños las expansiones fueron mayores y crecieron más rápidamente. Allford [3] también observó que las expansiones en la dirección de las armaduras eran menores que en las direcciones libres, mientras que una diferencia de cuantía de 0,5 % a 1,5 % tuvo una mínima influencia en el nivel de restricción a las expansiones.

Aún en el caso que no haya restricciones a la expansión del hormigón, siempre hay una dirección preponderante de expansión que tiene que ver con los planos de debilidad perpendiculares al plano de llenado. Debajo

de los agregados quedan vacíos que además de ser zonas más débiles también actúan como reservorios de gel. Es por estas razones que las expansiones pueden ser mayores en la dirección de llenado que en la horizontal [4]. En cuanto al tamaño de los elementos pareciera que en los elementos más cortos las fisuras aparecen en el centro mientras que en los elementos más largos el cuadro de fisuración es más uniforme. A su vez, en los elementos de mayor tamaño el agua tarda más tiempo en alcanzar todas las zonas reactivas presentando una evolución de las expansiones más prolongada. Los ciclos de mojado y secado pueden elevar la concentración de álcalis cerca de la superficie debido a la evaporación, lo que podría promover la formación del gel, a su vez esta concentración de álcalis cerca de la superficie podría disminuir debido a la lixiviación, sobretodo en elementos con una mayor relación superficie-volumen [4].

La presencia de fisuras preexistentes o debido a la RAS también puede afectar el desarrollo de la misma. Por un lado las fisuras aparecen como una vía de escape del gel y según Yi y Ostertag [5] la restricción al crecimiento de las fisuras retrasa la formación del gel y reduce la velocidad de reacción, debido a que los productos de reacción no pueden salir del lugar de la reacción lo que se traduce en un aumento en la concentración de iones Si en el lugar. La incorporación de fibras en el hormigón disminuye la cantidad y el ancho de las fisuras. Varios estudios han mostrado que si bien las fibras no impidieron la reacción, redujeron las expansiones y por consiguiente, el daño. En un estudio realizado en un mortero con agregado fino reactivo encontraron que las microfibras de acero disminuyeron el ancho de fisuras [5], al evaluar hormigones las macrofibras resultaron ser más eficientes [6]. Otro estudio encontró que un refuerzo de fibras híbrido resultó muy apropiado para controlar los diferentes niveles de daño provocados por agregados con distinto nivel de reactividad [7].

Argentina tiene una gran tradición en el estudio de la RAS, se han presentado

valiosos estudios que incluyen métodos de ensayos [8-10], experiencias de obras [11-13], incidencia del daño en el comportamiento mecánico [14-15], la evolución de la reacción en hormigones bajo cargas de larga duración [16,17] así como soluciones tecnológicas para evitar o mitigar la RAS [11,18-19], entre otros. El grupo de investigación, en particular, ha estudiado el efecto de la incorporación de distintos tipos de fibras en el desarrollo de la RAS considerando tanto las expansiones como las propiedades mecánicas de hormigones afectados. En estudios sobre probetas de laboratorio se encontró que aunque la incorporación de fibras no inhibe la RAS brinda beneficios como la reducción en el grado de fisuración y disminución de las expansiones [20]. En cuanto a las propiedades mecánicas a medida que el daño aumenta la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad disminuyen, siendo el módulo el más afectado, sin que se verifiquen beneficios por la incorporación de fibras. En ensayos de flexión se demostró que aunque las tensiones de primer pico y máxima disminuyen al aumentar las expansiones, en hormigones reforzados con macrofibras dichas disminuciones son menores, y más importante es que, aún para grandes expansiones las tensiones residuales del hormigón con fibras prácticamente no se ven afectadas por efecto de la RAS [21]. Sumado a esto es de considerar que las fibras al afectar el espesor y crecimiento de las fisuras también pueden incidir en el acceso y movimientos de humedad en general en los elementos estructurales con sus consecuencias en la cinética de la RAS.

La mayoría de los estudios que se encuentran en la bibliografía evalúan la reacción a escala de laboratorio en probetas pequeñas y sin restricciones. Son menos los trabajos que estudian el desarrollo de la reacción en especímenes de mayor volumen [3,22]. En este trabajo se presenta la evolución de las expansiones por efecto de la RAS junto con el correspondiente cuadro de fisuración en bloques de hormigón expuestos a las condiciones ambientales de la ciudad de La

Plata (Argentina), que fueron elaborados con agregados gruesos y finos potencialmente reactivos. Entre las variables se incluye la incorporación de distintos tipos de fibras. La evaluación del desarrollo de la RAS en elementos a escala real es de interés considerando la gran influencia que poseen tanto el volumen de los elementos estructurales como las condiciones de exposición.

## 2. Materiales y mezclas

Se elaboraron cinco hormigones con proporciones similares (a/c 0,42; contenido de cemento 380 kg/m<sup>3</sup>) incorporando en cada caso diferentes contenidos de álcalis y tipos de fibras. Se utilizaron como materiales cemento CPN (Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> 0,73 %), arena silícea 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 o fino, una arenisca cuarcítica muy reactiva con granos de cuarzo tensionado rodeados por una matriz de calcedonia y ópalo principalmente. En los hormigones denominados G se reemplazó el 40 % del agregado grueso por la arenisca reactiva y se utilizó una arena natural silícea no reactiva como agregado fino. En los hormigones denominados F la arenisca reactiva fue triturada hasta un tamaño similar a una arena (módulo de finura 2) y se incorporó a razón de 25 % en reemplazo de la arena silícea no reactiva (módulo de finura 2,07), empleando como agregado grueso 100 % de la piedra partida granítica. Para favorecer la reacción e incrementar el nivel de daño a los hormigones se agregó NaOH en el agua de mezclado hasta completar 4 kg/m<sup>3</sup>. Los hormigones de la serie G comprenden uno denominado AG que incorporó 40 kg/m<sup>3</sup> de fibras de acero de tipo hooked-end (50 mm de longitud y 1 mm de diámetro), otro SG con 3 kg/m<sup>3</sup> de macrofibras sintéticas (60 mm de longitud y 0,62 mm de diámetro) y finalmente el grupo G corresponde a un hormigón simple. Los hormigones de la serie F comprenden dos

grupos, F sin fibras y mF al que se le incorporó 1 kg/m<sup>3</sup> de microfibras sintéticas multifilamento de 12 mm de largo.

En la Tabla 1 se resumen las variables consideradas en los cinco hormigones.

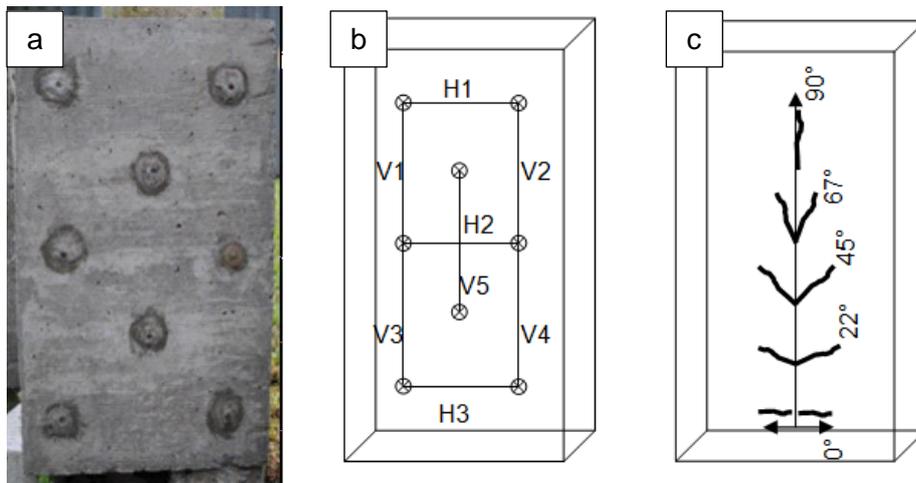
Bloques de 0,70 m × 0,40 m × 0,40 m fueron moldeados y cuidadosamente compactados; se curaron cubiertos con paños húmedos durante 7 días y luego fueron ubicados al aire libre en el exterior. Las condiciones ambientales típicas en la región de emplazamiento comprenden una temperatura media entre 5 °C y 25 °C y una precipitación anual acumulada de alrededor de 1000 mm. Junto con los bloques se moldearon cilindros y prismas para evaluar la respuesta mecánica de los hormigones, obteniendo una

resistencia a compresión, módulo de elasticidad y módulo de rotura promedio iguales a 35 MPa, 40 GPa y 5 MPa respectivamente [21].

En cuanto al seguimiento de las deformaciones, 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. La Fig. 1 presenta una vista de un bloque, el esquema de medición de las deformaciones en horizontal (H1-H3) y vertical (V1-V5) sobre cada cara y de las posibles orientaciones medidas de las fisuras.

**Tabla 1.** Hormigones evaluados.

Hormigón	Agregado reactivo (%)		Fibras (kg/m <sup>3</sup> )		
	Grueso	Fino	Acero	Macro-sintéticas	Micro-sintéticas
G	40				
AG	40		40		
SG	40			3	
F		25			
mF		25			1



**Figura 1.** a- Fotografía de un prototipo. b- Esquema de medición de las deformaciones en una cara. c- Esquema de las posibles orientaciones medidas de las fisuras.

Asimismo, se realizó un seguimiento periódico del cuadro de fisuración de cada una de las caras laterales de los prototipos. Para el registro de las fisuras se cubrió cada cara de los bloques con un film transparente marcando las fisuras visibles para luego, mediante un software medir su longitud y orientación [6]. En la Fig. 1c se pueden ver las distintas orientaciones de las fisuras que detecta el software (0°; 22,5°; 45°; 67,5° o 90°). Además, mediante una lupa con una precisión igual a 0,05 mm se midió el ancho máximo de fisura.

## 2. Resultados y discusión

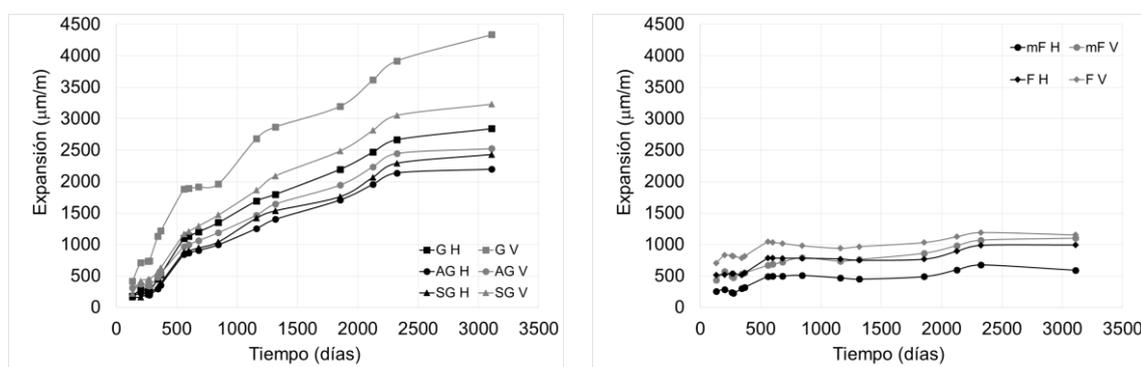
En las Fig. 2 se muestran las expansiones horizontales y verticales medidas en una cara de cada prototipo. Se puede observar que los hormigones con agregado fino reactivo reaccionaron primero dando lugar a mayores expansiones en las primeras edades, pero a partir del primer año se mantienen prácticamente constantes. Mientras que las expansiones en los hormigones G a partir del primer año comenzaron a crecer rápidamente. En todos los casos las expansiones siempre fueron mayores en la dirección vertical que en la horizontal, siendo esta diferencia mayor en el hormigón G sin fibras. Las mayores expansiones totales se midieron en el hormigón G, con un promedio en la última medición de 4700  $\mu\text{m/m}$ , seguido por el SG 2900  $\mu\text{m/m}$  y el AG 2400  $\mu\text{m/m}$ . En los

hormigones con agregado fino reactivo se midieron expansiones promedio del orden de 910  $\mu\text{m/m}$  en el mF y 1100  $\mu\text{m/m}$  en el F, al cabo de 8 años.

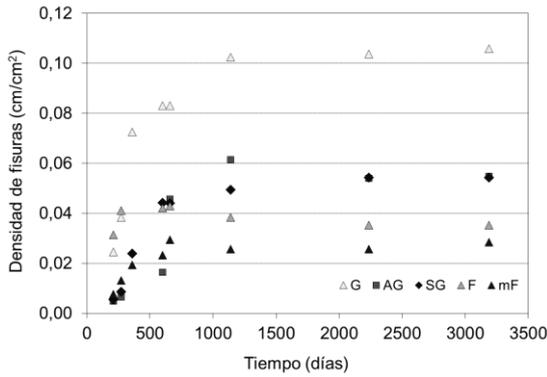
En las Figs. 3 y 4 se presentan los valores de la densidad y ancho máximo de fisuras de todos los elementos, cada valor corresponde al promedio de las cuatro caras.

Se observa en la Fig. 3 que el hormigón con agregado fino sin fibras presentó una mayor densidad de fisuras en los primeros relevamientos, lo que concuerda con las mayores expansiones medidas en las primeras edades, pero con el tiempo los hormigones con agregados gruesos mostraron un mayor nivel de daño. A partir de los 500 días todos los hormigones presentaron una desaceleración en el incremento de la densidad de fisuras, en menor medida el hormigón G, pero fundamentalmente en los hormigones con agregados finos donde prácticamente no hubo cambios en la densidad de fisuras y en los hormigones con agregado grueso potencialmente reactivo y fibras.

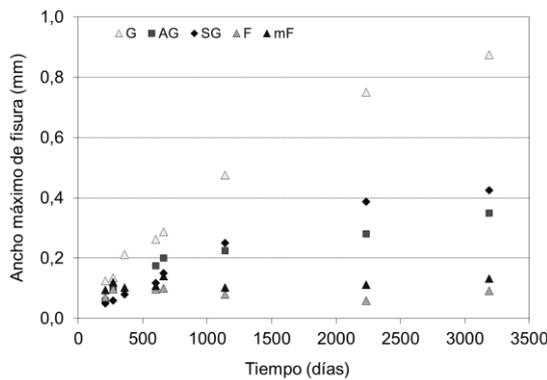
Por el contrario, en la Fig. 4 se observa que en todos los hormigones el ancho de fisura creció en forma sostenida en el tiempo, principalmente en los hormigones con agregados gruesos potencialmente reactivos. El hormigón G (agregado grueso potencialmente reactivo sin fibras) presentó el mayor ancho de fisura desde el primer



**Figura 2.** Expansiones horizontales (H) y verticales (V) medidas en hormigones con agregados gruesos (izquierda) y finos (derecha) potencialmente reactivos.



**Figura 3.** Densidad promedio de fisuras en función del tiempo.

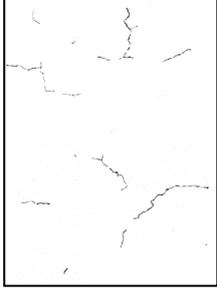
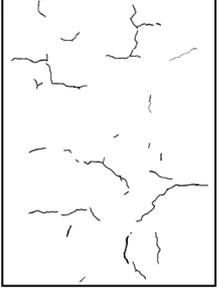
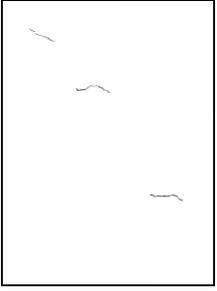
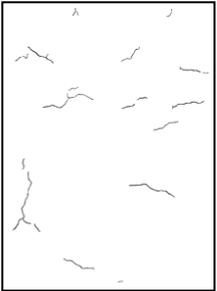
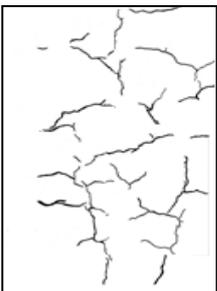
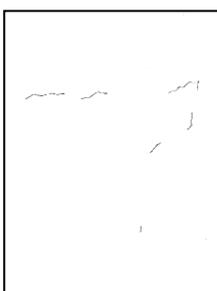
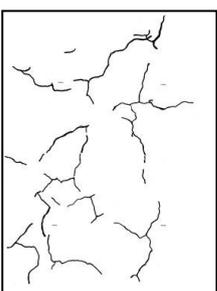


**Figura 4.** Ancho máximo de fisuras en función del tiempo.

relevamiento. Al cabo de 8 años el ancho máximo de fisura medido fue igual a 0,87 mm mientras que en el AG y el SG se midieron anchos iguales a 0,35 mm y 0,45 mm respectivamente. En el hormigón G el incremento en el ancho máximo de fisura promedio con el tiempo fue lineal, en los hormigones con fibras el incremento en el tiempo fue mucho menor, principalmente en el hormigón AG, las fibras de acero controlaron en mayor medida el crecimiento de las fisuras. En los hormigones con agregado fino potencialmente reactivo los anchos fueron mucho menores del orden de 0,01 mm.

En la Tabla 2 se presenta el primer relevamiento de fisuras realizado sobre una cara de los prototipos a los 4 meses de moldeados y el último relevamiento realizado a los 8 años sobre la misma cara. En todos los casos se observó que las fisuras se

**Tabla 2.** Cuadro de fisuración en una cara de cada bloque a 120 y a 3200 días.

Hormigón	120 días	3200 días
F		
mF		
G		
AG		
SG		

iniciaban en las aristas propagándose en forma horizontal (coincidente con las mayores expansiones en la dirección vertical) pero, como se desprende de la tabla, al cabo de los años y con la extensión del daño se fueron propagando en todas direcciones. Otros autores [4,23,24] también coinciden en que las expansiones son mayores en la dirección vertical, los planos de debilidad perpendiculares al llenado. El elemento elaborado con el hormigón mF no presentó nuevas fisuras a partir del segundo año.

En la Fig. 5 están representados los porcentajes de fisuras horizontales (fisuras con una orientación entre 0° y 22,5°) y verticales (fisuras con una orientación entre 67,5° y 90°) a 120 y a 3200 días. Se aprecia claramente que en la primera edad las diferencias entre las dos direcciones son grandes. En el primer relevamiento realizado a los 120 días los porcentajes de fisuras en la dirección horizontal variaron entre el 59 % y el 85 % del total de fisuras, mientras que las fisuras en la dirección vertical representaron entre un 4 % y un 31 %. Por el contrario, a 3200 días, las fisuras horizontales

representaron entre un 34 % a 54 % del total mientras que las verticales entre un 30 % a 39 %, aunque sigue habiendo una mayor proporción de fisuras horizontales (a excepción del hormigón AG), las diferencias son mucho menores. También es interesante destacar que si bien en todos los casos se presentó una distribución anisotrópica de las fisuras, existe una mayor anisotropía en los elementos elaborados con agregados gruesos potencialmente reactivos, debido probablemente a una mayor localización del gel expansivo.

Como ya fuera comentado los prototipos estuvieron durante 8 años a la intemperie, con lo cual no se observaron en su superficie poros o fisuras con gel.

En la Fig. 6 se muestran fotografías de las superficies fisuradas de los distintos hormigones. En la Fig. 6a se observa una fisura horizontal que comenzó en una de las aristas de los prismas, corresponde al hormigón AG, mientras que en la Fig. 6b aparece una fisura con ramificaciones en el hormigón G.

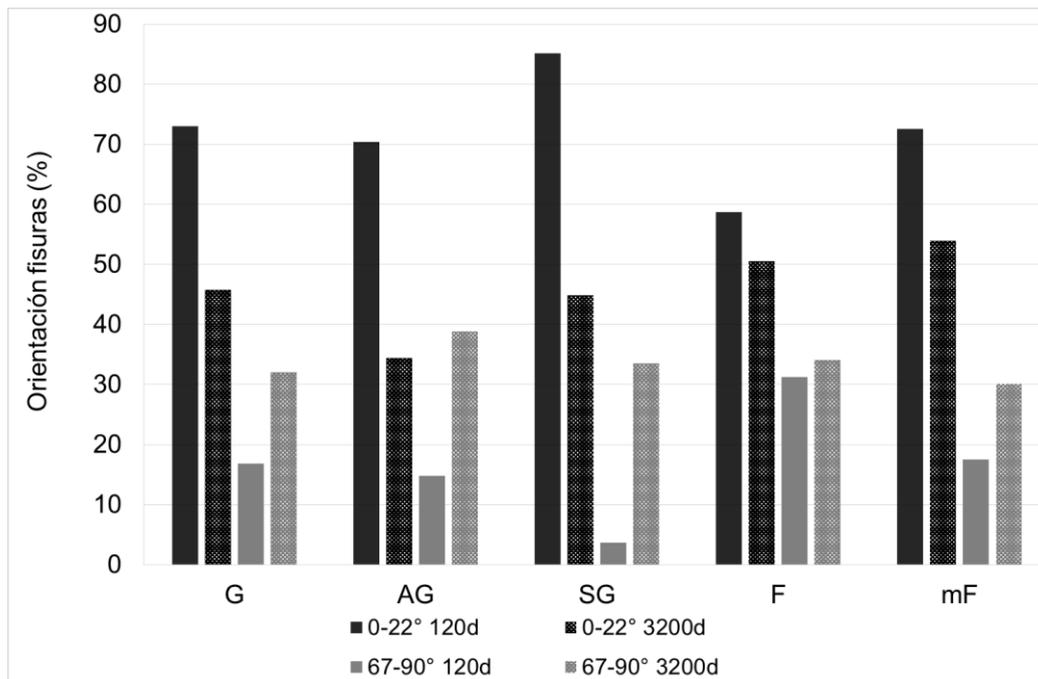


Figura 5. Orientación de fisuras a 120 y a 3200 días.

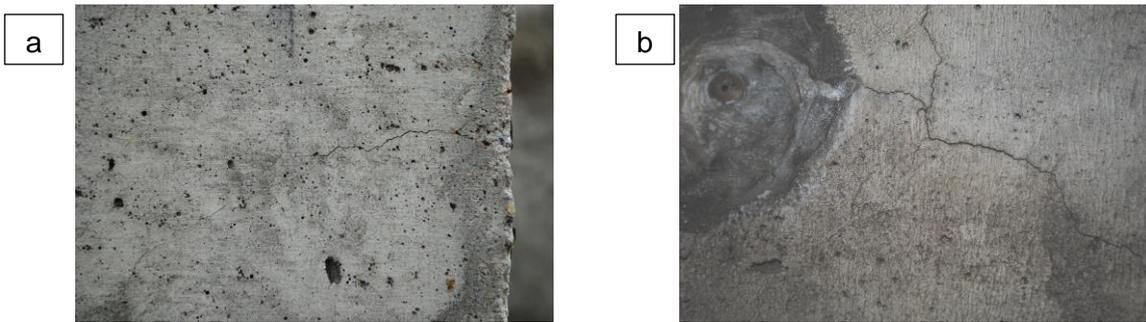


Figura 6. Vista de fisuras en la superficie del hormigón AG (a) y G (b).

### 3. Conclusiones

En este trabajo se presenta y analiza la evolución durante ocho años del cuadro de fisuración desarrollado por efecto de la RAS en bloques de hormigón; entre las variables se incluyen el tamaño del agregado potencialmente reactivo y la presencia de distintos tipos de fibras.

Se observó que:

- Las expansiones y la aparición de fisuras comenzaron antes en los hormigones con agregados potencialmente reactivos con menor tamaño de partículas (arena vs. agregado grueso) a pesar que el contenido de árido potencialmente reactivo fue menor.
- El hormigón con mayor cantidad y tamaño de fisuras al cabo de 8 años fue el que contenía 40 % de agregado grueso potencialmente reactivo y no estaba reforzado con fibras.
- La densidad de fisuras se estabilizó a partir del tercer año aproximadamente pero el ancho de fisura siguió creciendo, principalmente en el hormigón sin fibras.
- En todos los hormigones las fisuras comenzaron en la dirección horizontal, desde las aristas de los bloques y con el tiempo se fueron ramificando en distintas direcciones.

### Referencias

- [1] Zahedi, A., Trottier, C., Sanchez, L. F. M, y Noël, M. (2021). Microscopic assessment of ASR-affected concrete under confinement conditions. *Cement and Concrete Research*, 145, 106456. <https://doi.org/jzsc>
- [2] Zahedi, A., Trottier, C., Sanchez, L., y Noël, M. (2022). Evaluation of the induced mechanical deterioration of alkali-silica reaction affected concrete under distinct confinement conditions through the Stiffness Damage Test. *Cement and Concrete Composites*, 126, 104343. <https://doi.org/jzsd>
- [3] Allford, M. T. (2016). *Expansion behavior of reinforced concrete elements due to alkali-silica reaction* [Disertación de maestría, University of Texas at Austin]. Repositorio de la Universidad de Texas. [https://scholar.google.com.ar/scholar\\_url?url=https://repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/41645/ALLFORD-THESIS-2016.pdf%3Fsequence%3D1&hl=es&sa=X&ei=HRgGZJnJMIIn4yASksZPwDA&scisig=AAGBfmOrCfvPrUe8ovCkCQ7JlwpxilvL-g&oi=scholar](https://scholar.google.com.ar/scholar_url?url=https://repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/41645/ALLFORD-THESIS-2016.pdf%3Fsequence%3D1&hl=es&sa=X&ei=HRgGZJnJMIIn4yASksZPwDA&scisig=AAGBfmOrCfvPrUe8ovCkCQ7JlwpxilvL-g&oi=scholar)
- [4] Jones, A. E. K., y Clark, L. A. (1996). The effects of restraint on ASR expansion of reinforced concrete. *Magazine of Concrete Research*, 48 No. 174 1–13. <https://doi.org/b6pmfp>
- [5] Yi, C. K., y Ostertag, C. P. (2005). Mechanical approach in mitigating alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 35(1), 67–75. <https://doi.org/bmfh7p>
- [6] Giaccio, G., Bossio, M. E., Torrijos, M. C., y Zerbino, R. (2015). Contribution of fiber reinforcement in concrete affected by alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 67, 310–317. <https://doi.org/f6v7ss>
- [7] Jen, G., Hay, R., y Ostertag, C. P. (2019). Multi-scale evaluation of hybrid fiber restraint of alkali-silica reaction expansion in concrete. *Construction and Building Materials*, 211, 1117–1126. <https://doi.org/jzsf>

- [8] Batic, O. R., Falcone, D., Milanesi, C. A., y Violini, D. (2010). Evaluación de la reactividad de los agregados: avances en la aplicación de un método acelerado del prisma de hormigón. *Hormigón*, 48, 7–16.
- [9] Batic, O. R., y Milanesi, C. A. (1995). Consideraciones sobre el método de expansión de prismas de hormigón al estudio de la reactividad alcalina. En En AATH (Ed.), *XII Reunión Técnica AATH Dra. Haydée V. Armándola* (pp. 149–162). AATH.
- [10] Falcone, D., y Milanesi, C. A. (2018). Aplicación del método acelerado de la barra de mortero en el estudio de combinaciones de agregados. En E. F. Irassar, V. F. Rahhal, y L. P. Traversa (Eds.), *Memorias VII Congreso Internacional y 21a Reunión Técnica de la AATH* (pp. 397–404). AATH.
- [11] Milanesi, C. A., y Violini, D. (2008). Prevención de la RAS a través del control de los álcalis aportados por el cemento al hormigón: Aplicación del criterio canadiense en la construcción de la ruta nacional N°14. En V. Rahhal, y J. Sota (Eds.), *XVII Reunión Técnica Ing. José Fermín Colina* (pp. 265–272). AATH.
- [12] Locati, F., Priano, C., y Marfil S. (2020). Caracterización de productos de reacción en una estructura de hormigón armado afectada por la RAS, ubicada en el área costera de Bahía Blanca. En M. C. Torrijos, y C. Zega (Eds.), *Memorias IX Congreso Internacional y 23a Reunión Técnica de la AATH* (pp. 365–372). AATH.
- [13] Locati, F., Marfil, S., Maiza, P., y Giovambattista, A. (2020). Variación química de los productos de reacción y su relación con agregados pétreos de reacción lenta en una estructura de hormigón afectada por la RAS. En M. C. Torrijos, y C. Zega (Eds.), *Memorias IX Congreso Internacional y 23a Reunión Técnica de la AATH* (pp. 575–582). AATH.
- [14] Batic, O. R., Giaccio, G., y Zerbino, R. (2007). Comportamiento mecánico del hormigón afectado por la RAS. *Hormigón*, 44, 29–37.
- [15] Giaccio, G., Zerbino, R., Ponce, J. M., y Batic, O. R. (2008). Mechanical behavior of concretes damaged by alkali silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 38(7), 993–1004. <https://doi.org/dbf27x>
- [16] Giaccio, G., Torrijos, M. C., Tobes, J. M., Batic, O. R., y Zerbino, R. (2009). Development of alkali-silica reaction under compressive loading and its effects on concrete behavior. *ACI Materials Journal*, 106(3), 223–230. <https://doi.org/jzsj>
- [17] Zerbino, R., Torrijos, M. C., Giaccio, G., y Conforti, A. (2020). Effects of fibres on the flexural behaviour of sound and damaged RC beams. En P. Serna, A. Llano-Torre, J. R. Martí-Vargas, y J. Navarro-Gregori (Eds.), *Fibre Reinforced Concrete: Improvements and Innovations. RILEM-fib International Symposium on FRC (BEFIB)* (pp. 423–432). Springer.
- [18] Batic, O. R., Milanesi, C. A., y Sota, J. D. (2003). Evaluación de la eficiencia de las adiciones minerales activas en el control de la reacción álcali sílice en hormigones elaborados con agregados de reacción lenta o diferida. *Hormigón*, 40, 10–29.
- [19] Sota, J. D., Falcone, D., y Batic, O. R. (2004). Inhibición de la RAS en hormigones con agregados reactivos, utilizando adiciones minerales activas. *Hormigón*, 41, 15–23.
- [20] Giaccio, G., Torrijos, M. C., Milanesi, C., y Zerbino, R. (2018). Reacción álcali-sílice en hormigones con fibras. En V. L. Bonavetti (Ed.), *22ª Reunión Técnica AATH* (pp. 379–386). AATH.
- [21] Giaccio, G., Torrijos, M. C., Milanesi, C., y Zerbino, R. (2019). Alkali-silica reaction in plain and fibre concretes in field conditions. *Materials and Structures*, 52, 31. <https://doi.org/h9d3>
- [22] Hayes, N. W., Gui, Q., Abd-Elssamd, A., Le Pape, Y., Giorla, A. B., Le Pape, S., Giannini, E. R., y Ma, Z. J. (2018). Monitoring alkali-silica reaction significance in nuclear concrete structural members. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 16(4), 179–190. <https://doi.org/gmbjdk>
- [23] Multon, S., y Toutlemonde, F. (2006). Chemochemical assessment of beams damaged by alkali-silica reaction. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(4), 500–509. <https://doi.org/b7bkp9>
- [24] Larive, C., Laplaud, A., y Coussy, O. (2000). The role of water in alkali-silica reaction. En Bérubé, MA, Fournier, B and Durand, B (Eds.) *Proceedings of 11th International Conference on AAR* (pp 61–70). Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Béton.