

Efecto de los procesos de degradación sobre las propiedades residuales del hormigón reforzado con fibras

G. Giaccio^{a*}, M. C. Torrijos^b, R. Zerbino^b

^aComisión 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

^bConsejo 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, zerbino@ing.unlp.edu.ar

Recibido: 8 de agosto de 2022

Aceptado: 26 de agosto de 2022

RESUMEN

Se requiere el conocimiento del modo en que los procesos de daño modifican las propiedades del hormigón y la vinculación entre las mismas para interpretar los resultados que surgen de la evaluación del material en una estructura dañada. En este trabajo se aborda el caso del Hormigón Reforzado con Fibras (HRF). La incorporación de fibras otorga al material la capacidad de controlar las fisuras que se forman durante la aplicación de las cargas y de transferir esfuerzo a través de dichas fisuras, mejorando su tenacidad y otras propiedades como resistencia al impacto o a esfuerzos localizados. Los casos estudiados incluyen el daño por exposición a alta temperatura y la degradación en las propiedades que puede generar la reacción álcali-sílice. Este trabajo muestra que, incluso ante daños muy severos, el hormigón conserva capacidad resistente residual aun cuando la resistencia y rigidez se reduzcan significativamente, lo que reviste suma importancia considerando el funcionamiento de la estructura dañada.

PALABRAS CLAVE: Hormigón reforzado con fibras, procesos de daño, propiedades residuales, exposición a alta temperatura, reacción álcali-sílice

ABSTRACT

Knowledge of how damage processes modify concrete properties and the relationship between them is required to interpret the results that emerge from the evaluation of the material in a damaged structure. This paper deals with the case of Fiber Reinforced Concrete (FRC). The incorporation of fibers gives the material the ability to control the cracks that appear during loading and to transfer stresses through those cracks, improving its toughness and other properties such as impact resistance or localized stress. The cases studied include damage due to exposure to high temperature and the degradation of properties that can be generated by the alkali-silica reaction. This work shows that even with very severe damage, concrete still keeps residual strength capacity although the strength and stiffness are significantly reduced, which is of utmost importance considering the performance of the damaged structure.

KEYWORDS: Fiber reinforced concrete, damage processes, residual properties, high temperature exposure, alkali-silica reaction

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: Giaccio, G., Torrijos, M. C., y Zerbino, R. (2022). Efecto de los procesos de degradación sobre las propiedades residuales del hormigón reforzado con fibras. Revista Hormigón, 62, 40–56. <http://id.caicyt.gov.ar/ark:/s27189058/c2y6vnf59>

1. Introducción

1.1 Marco de referencia

Entre los avances en investigación y desarrollo en tecnología del hormigón se destacan los hormigones de altas prestaciones; mezclas en las cuales mediante la incorporación de materiales seleccionados, aditivos y adiciones minerales es posible garantizar no sólo mayores niveles de resistencia, sino otras propiedades que permiten la realización de nuevas estructuras o la reparación de estructuras existentes contribuyendo a su mayor durabilidad o la capacidad de sobrellevar mayores solicitaciones o incluso cargas extremas. Por ejemplo, un Hormigón Autocompactante incorpora mayor cantidad de finos y reductores de agua de última generación que permiten la obtención de una mezcla de notable fluidez sin riesgo de segregación que facilita el transporte y colocación en condiciones particulares como la realización de capas delgadas, el llenado de secciones estrechas o muy densamente armadas, de este modo se pueden eliminar defectos, mejorar la durabilidad y reducir costos tanto durante la construcción como para el mantenimiento. Otro ejemplo son las distintas variantes de compuestos a base de cemento portland de alta, muy alta y ultra alta resistencia, que brindan alternativas para construir elementos con secciones delgadas, para realizar refuerzos o, mediante una notable reducción de la porosidad, dar lugar a importantes incrementos en la vida en servicio [1].

Este trabajo aborda el caso del Hormigón Reforzado con Fibras (HRF), en el cual mediante la incorporación de fibras cortas se otorga al material la capacidad de controlar las fisuras que se forman durante la aplicación de las cargas, y al transferir esfuerzo a través de dichas fisuras, se mejoran muchas propiedades, básicamente su tenacidad, dando lugar a un material especialmente apto para muchas aplicaciones. Entre esas propiedades se consignan mejoras en resistencia al corte, al

impacto, a esfuerzos localizados, favoreciendo particularmente la transmisión de esfuerzos en elementos de alta redundancia estructural como losas sobre suelo, con ventajas para uso en hormigón proyectado, en premoldeados, en pavimentos y pisos industriales, plataformas off shore, obras hidráulicas, puentes y elementos expuestos al riesgo sísmico [2].

El HRF se conoce desde hace varias décadas, pero en este siglo han aparecido no solo nuevas fibras sino también, gracias al desarrollo de criterios de diseño estructural, nuevas aplicaciones que incluyen el uso combinado con barras de armadura en vigas, muros delgados, dovelas para recubrimiento de túneles, en la cuales las fibras contribuyen a sobrellevar esfuerzos de corte, de torsión, resultan especialmente adecuadas para zonas sometidas a esfuerzos localizados, permitiendo una reducción parcial e incluso total del refuerzo convencional [2]. Varios códigos y reglamentos, entre los que se destaca el *fib Model Code 2010* [3] ya incluyen criterios de diseño para HRF. Otra aplicación relevante del HRF es para la construcción de pisos y pavimentos donde permiten aumentar espaciamientos entre juntas y/o disminuir espesores con las consecuentes ventajas económicas y de prestacionales [4].

A partir de los recientes avances es de esperar un uso cada vez mayor del HRF, potenciado por la necesidad de adecuar estructuras existentes a nuevas o mayores solicitaciones (tráfico, viento, acciones sísmicas) como también atención a impactos y otras acciones extremas. Además, teniendo en cuenta que el ciclo de vida constituye un tema prioritario para la industria de la construcción desde el punto de vista de la sostenibilidad, se espera que el uso de HRF reduzca los costos de mantenimiento y brinde por ejemplo mayor durabilidad a estructuras de hormigón armado gracias a la reducción en el ancho de fisuras.

En un trabajo anterior se discutieron aspectos referidos al comportamiento residual de un hormigón dañado, tomando ejemplos los

casos de hormigones expuestos a alta temperatura y hormigones afectados por la reacción álcali-sílice (RAS) [5]. Entre las conclusiones se destaca que la generación de fisuras y otros defectos en la estructura del material afecta en diferente grado sus propiedades mecánicas (resistencia a compresión, resistencia a tracción, módulo de elasticidad, energía de fractura) o de transporte (permeabilidad, ascensión capilar), y este conocimiento resulta útil al momento de evaluar estructuras dañadas.

Muchos factores inciden en el cuadro de fisuración que se puede generar en un hormigón en el que se han desarrollado procesos de degradación, los mismos dependen por supuesto del proceso en cuestión, pero siempre dan lugar a modificaciones en la respuesta físico-mecánica del material. Frente a la exposición a altas temperaturas, además de la temperatura máxima alcanzada, inciden el tiempo de exposición, la velocidad de enfriamiento y la composición del hormigón, en particular el tipo de agregado. En muestras afectadas por la reacción álcali-sílice, además del contenido de álcalis, el tipo de agregado, la cinética de reacción y la aplicación de cargas, constituyen variables importantes. Por ello, no ha de sorprender que, por ejemplo, en algunas estructuras afectadas no se detecten grandes cambios en la resistencia a compresión, pero existan cambios significativos en la rigidez y permeabilidad.

El presente trabajo extiende la temática expuesta incorporando el caso del HRF, atendiendo en particular a valorar en qué medida sus propiedades específicas se modifican frente a los procesos de degradación indicados. Al respecto caben dos miradas, el uso de fibras para atenuar acciones agresivas o, lo más cercano a la práctica, considerar en qué medida este compuesto mantiene su capacidad postfisuración, que es su principal característica, ante eventuales e inesperadas acciones de degradación a las que se vean sometidas las estructuras. Cabe aclarar que si bien tanto en el trabajo anterior [5] como en el

presente no se aborda en forma específica la corrosión de las barras de acero, en lo que respecta a la afectación en las propiedades de la matriz con fibras (resistencia, permeabilidad, rigidez, entre otras), lo aquí expuesto puede extenderse a casos donde se incorporan fibras en forma combinada con armadura convencional en estructuras de hormigón armado o pretensado.

1.2 Hormigón reforzado con fibras

El Hormigón Reforzado con Fibras es un material de alto desempeño, donde la presencia de fibras dispersas en la matriz controla la propagación, ancho y el espaciamiento de las fisuras generadas por las cargas; de este modo las fibras incrementan la capacidad de transferencia de cargas en las secciones fisuradas mejorando el comportamiento en servicio.

El HRF resulta especialmente ventajoso para la construcción de elementos con alto grado de redundancia estructural como por ejemplo las losas sobre suelo, por tal motivo los pisos industriales y los pavimentos en general constituyen ejemplos típicos de aplicación, donde además el uso de esta tecnología permite aumentar el espaciamiento entre juntas con importantes ventajas técnicas y económicas. Otros campos de aplicación aparecen en premoldeados, obras hidráulicas y túneles, tanto en dovelas premoldeadas como segmentos colados in situ. En estos casos el uso de HRF resulta ventajoso, se incrementa la tenacidad gracias a su capacidad residual post-pico, el control de fisuración da lugar a un menor ancho de fisuras en estado límite de servicio mejorando la durabilidad, aumenta la resistencia al impacto, pueden aparecer beneficios en la producción al reducir total o parcialmente la armadura convencional, las fibras se distribuyen a lo largo de toda la sección de los elementos estructurales incluyendo la zona de recubrimiento la cual muchas veces resulta importante para mejorar la durabilidad, al disminuir las fisuras disminuye la permeabilidad en especial bajo tensiones [2].

Aunque la mayoría de la experiencia sobre HRF se relaciona con el uso de fibras de acero, se dispone en la actualidad de una amplia variedad de fibras, habiéndose desarrollado fibras poliméricas de diverso tipo, fibras de vidrio o incluso de vidrio recubierto con polímero. Además, las diversas fibras se diferencian no sólo en el tipo de material que constituye el filamento sino en su geometría y textura. De modo general se distinguen entre microfibras y macrofibras, en función de su diámetro y largo, siendo las últimas las que permiten transferir esfuerzos a través de la sección fisurada de un elemento de hormigón, lo que se conoce como capacidad residual.

El mecanismo de transferencia de esfuerzos depende de la adherencia entre las fibras y la matriz. Sin embargo, no es posible valorar las bondades de diferentes fibras analizándolas o ensayándolas en forma individual, sino que lo que se evalúa es la performance del compuesto, el HRF.

Existen varios métodos para valorar dicha capacidad residual, entre los que se destacan ensayos de flexión sobre prismas de hormigón. Los más reconocidos son el que establece la norma ASTM C1609 [6] o el que indica la norma EN 14651 [7]; pero básicamente más allá de la configuración de ensayo o dispositivos empelados, en ellos se determinan tensiones residuales calculando la tensión que es capaz de sobrellevar la sección nominal de una viga ante una determinada apertura de fisura. El *fib* Model Code 2010 [3] emplea estas tensiones

residuales para clasificar a los HRF y aunque el criterio de cálculo ha sido desarrollado a partir de la experiencia con fibras de acero, se ha observado que se pueden extender a macrofibras poliméricas o de vidrio.

2. Procesos de degradación y propiedades residuales del HRF

2.1 Adherencia de fibras en matrices dañadas

Dado que el mecanismo de falla en el HRF se relaciona estrechamente con la resistencia al arrancamiento de las fibras es de interés observar en qué medida la misma se modifica cuando la matriz ha sufrido procesos de degradación. En este apartado se muestran experiencias sobre esta cuestión que incluyen tanto fibras de acero como macrofibras sintéticas.

Se moldearon probetas que consisten en una fibra embebida hasta la mitad de su longitud dentro de un pequeño prisma de mortero. Luego de ser adecuadamente curadas, se realizaron ensayos de arrancamiento (pull-out), conforme se observa en la Fig. 1, sobre muestras de referencia y muestras gemelas luego de ser expuestas a diferentes procesos de degradación.

En un estudio se empleó como herramienta de daño la reacción álcalis-sílice, la misma fue provocada incorporando una fracción de arena potencialmente reactiva y un adecuado contenido de álcalis [8]. Para ponderar el desarrollo de la RAS se midieron expansiones

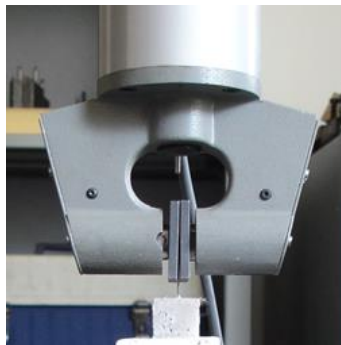


Figura 1. Fotografía de un ensayo de arrancamiento.

sobre prismas de 25 x 25 x 300 mm mantenidos en las mismas condiciones que las muestras de pull-out. Además, en paralelo con los ensayos de arrancamiento se realizaron ensayos de compresión sobre los morteros, como referencia de sus propiedades mecánicas.

En el estudio se compararon las respuestas al arrancamiento de cuatro fibras, una fibra de acero (A) de amplio uso tipo *hooked-end* y tres macrofibras sintéticas diferentes, identificadas como M1, M2 y M3. Cada una de estas fibras se incorporaron en cuatro morteros preparados con igual relación agua/cemento, dos morteros de referencia (C, Cm) y otros dos (D, Dm) donde se elevó el contenido de álcalis para provocar el daño. En los morteros Cm y Dm se incorporaron microfibras sintéticas con el fin de evaluar si el control en la microfisuración de la matriz incidía en la adherencia fibra-matriz. Los morteros D y Dm alcanzaron a los 35 días expansiones mayores al 0,06 % y la incorporación de microfibras sintéticas en la matriz no produjo mayores cambios sólo una pequeña reducción en la expansión del orden del 0,007 %. Como era de esperar en los morteros C y Cm las expansiones fueron mucho menores y no superaron el 0,006 %.

La Fig. 2a representa la resistencia al arrancamiento de las diferentes fibras y la Fig. 2b la resistencia a compresión de los morteros. Se puede observar que el daño generado por la RAS produjo un

decrecimiento significativo en la resistencia de la matriz, la resistencia a compresión se redujo de 53,1 MPa en el mortero C a 32,0 MPa en el mortero D; en el caso de los morteros con microfibras la variación fue de 51,9 (Cm) a 37,6 MPa (Dm), esto es algo menor en el mortero dañado. Sin embargo, las variaciones de adherencia fueron significativamente menores para las fibras poliméricas y especialmente para el caso de fibras de acero conformadas. El hecho de que la adherencia resulte menos afectada que la resistencia de la matriz podría dar lugar a que también la capacidad residual del HRF resulte menos afectada luego de un proceso de daño.

La Fig. 3 muestra fotografías de las probetas con fibras M1, M2 y S1 correspondientes a los morteros C y D luego del ensayo de arrancamiento, donde no se observan diferencias en el aspecto de las zonas de arrancamiento de los morteros

La menor sensibilidad de la adherencia con respecto a la resistencia a compresión en una matriz dañada también fue verificada a través de ensayos de arrancamiento realizados sobre muestras que fueron expuestas a alta temperatura [9].

En este estudio se emplearon probetas similares al caso anterior donde una fibra de acero tipo *hooked-end* se embebía en la matriz que luego sería dañada. Las probetas fueron progresivamente calentadas dentro de un horno hasta alcanzar temperaturas de

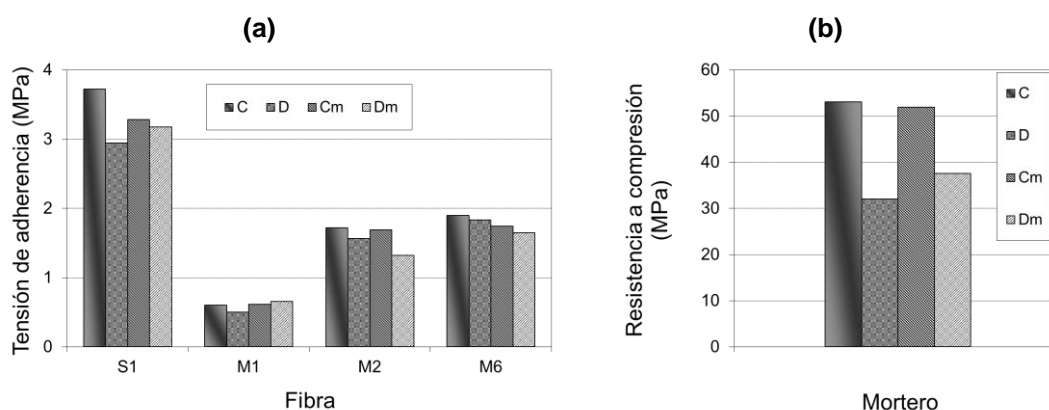


Figura 2. Efecto del daño por RAS sobre la tensión de adherencia (a) y la resistencia a compresión de los morteros (b).

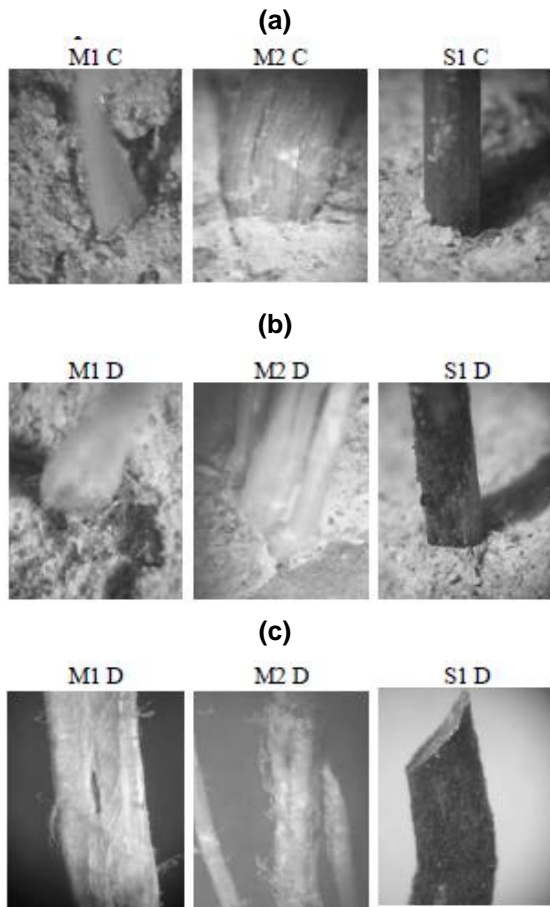


Figura 3. Aspecto de las probetas luego del ensayo de arrancamiento. Mortero control (a), mortero afectado por RAS (b) y detalle de la superficie de las fibras (c).

300 °C, 375 °C o 475 °C, se mantuvieron en esas condiciones durante 1 hora y luego se enfriaron lentamente. Como referencia, un grupo de probetas permaneció en el ambiente de laboratorio (20 °C).

La resistencia a compresión de la matriz en todos los casos disminuyó al ser expuesta a alta temperatura, y resultó igual a 63,7 MPa, 55,7 MPa, 54,4 MPa y 44,2 MPa para 20 °C, 300 °C, 375 °C y 475 °C respectivamente. A diferencia de este comportamiento no se observaron cambios en la adherencia hasta los 375 °C, y se verificó una reducción cercana al 20 % para 475 °C. Nuevamente la adherencia de las fibras resultó menos afectada que la resistencia de la matriz. La Fig. 4, presenta algunos resultados del ensayo.

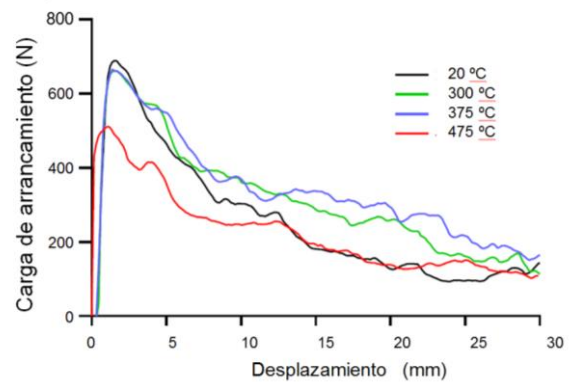


Figura 4. Efecto de la temperatura de exposición sobre la resistencia al arrancamiento de las fibras de acero.

Considerando que los cambios en la resistencia al arrancamiento se vinculan con el daño que se produce en la matriz y en alguna medida con los cambios que puedan experimentar las fibras, en forma complementaria se realizaron ensayos de tracción sobre las fibras expuestas a las mismas temperaturas; se observó que para temperaturas superiores a 400 °C la carga de rotura y la forma de las curvas tensión-deformación fueron afectadas. A modo de síntesis en la Fig. 5 se presenta la variación porcentual referida a la mezcla control de la resistencia a compresión de la matriz, la carga de arrancamiento y la resistencia a tracción de las fibras en función de la temperatura de exposición [10].

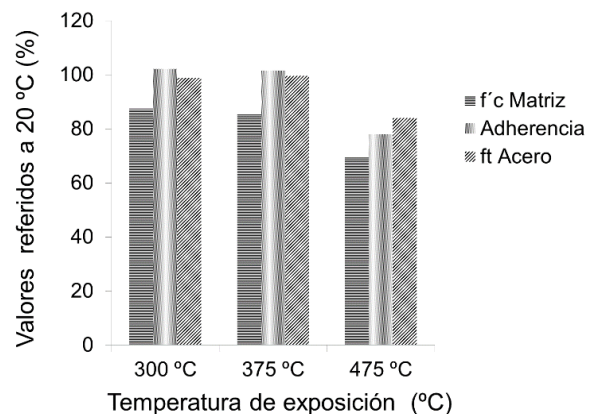


Figura 5. Efecto de la temperatura de exposición sobre la resistencia a compresión de la matriz, la carga de arrancamiento y la resistencia a tracción de las fibras.

Si bien en la práctica se utilizan fibras conformadas para mejorar la adherencia, también se incluyeron en el estudio las mismas fibras cortadas de modo de poner en evidencia el efecto del anclaje mecánico ante el daño. Se observó que en las fibras rectas el decrecimiento de adherencia se produjo a partir de temperaturas mucho menores que en las fibras con gancho, remarcando los beneficios del uso de fibras conformadas [10].

2.2 Capacidad residual de HRF afectados por procesos de daño

Considerando lo antes observado respecto a la menor sensibilidad que muestra la resistencia al arrancamiento, es interesante analizar la incidencia de diferentes procesos de daño en la respuesta del compuesto, esto es sobre las propiedades residuales del HRF. Se analizan a continuación tanto el caso de exposición a alta temperatura como el efecto del desarrollo de la RAS.

En el caso de HRF expuestos a alta temperatura estudios realizados indican que la presencia de fibras de acero mejora las propiedades mecánicas post-daño, en flexión el comportamiento postpico resulta menos afectado que la resistencia de primera fisura que corresponde a la resistencia del hormigón sin fibras. Al comparar un HRF y un hormigón convencional expuestos a alta temperatura la reducción en la resistencia a flexión es menor en el primero, igualmente en ambos hormigones el incremento de la temperatura provoca microfisuraciones que se reflejan en el hecho de que el módulo de elasticidad decrece en mayor medida que la resistencia a compresión. Algunos autores encontraron que los beneficios producidos por la incorporación de fibras de acero se mantienen incluso luego de que el hormigón es expuesto a temperaturas tan altas como 1000 °C, observando además menor porosidad y menor diámetro medio de poros en el HRF dañado en comparación con el hormigón simple [11].

En un estudio sobre el efecto de la exposición a alta temperatura de hormigones de alta

resistencia se incluyeron como variables el tipo y contenido de fibras y las condiciones de exposición [12,13]. Se moldearon muestras de hormigón simple (P) y tres HRF obtenidos incorporando a la misma mezcla 40 kg/m³ de fibras tipo *hooked-end* de acero convencional (40L) y, 80 kg/m³ y 40 kg/m³ de fibras de acero de alto carbono (80H, 40H). Se moldearon cilindros y prismas que fueron calentados progresivamente dentro de un horno con circulación de aire hasta alcanzar una temperatura máxima de 500 °C. Se estudiaron tres condiciones de exposición, muestras expuestas durante 1 hora a 500 °C, muestras expuestas 24 horas a 150 °C y muestras de referencia sin dañar (20 °C).

En un trabajo previo [5] se mostró que en hormigón simple las alteraciones en la estructura interna modifican el mecanismo de falla y se refleja en la forma de las curvas tensión–deformación bajo cargas de compresión. En el hormigón dañado las fisuras de matriz se propagan con mayor facilidad y crece el período de propagación inestable tanto más cuanto mayor es el daño interno. Considerando el caso del HRF, en la Fig. 6 se comparan las tensiones de iniciación (f_{init}) asociadas al inicio de fisuración de la matriz, la tensión crítica (f_{crit}) vinculada a la propagación inestable de fisuras y la resistencia a la compresión ($f'c$) para las mismas mezclas. Se observa que ante el daño por temperatura, el crecimiento y la propagación de fisuras comienzan antes, el período de propagación estable de fisuras se reduce (diferencia entre f_{init} y f_{crit}) y, aunque se

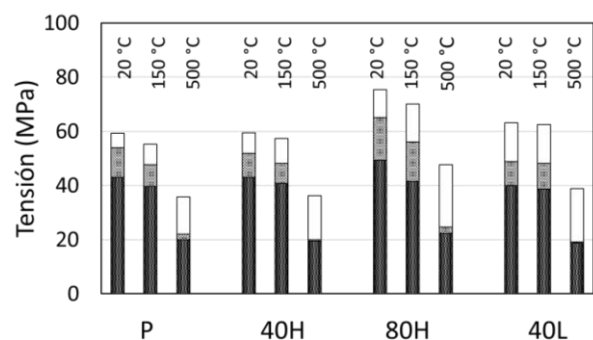


Figura 6. Tensiones de iniciación (f_{init}) y crítica (f_{crit}) y resistencia ($f'c$) bajo cargas de compresión.

extiende el período de crecimiento inestable de fisuras, la capacidad de controlar la propagación de estas disminuye.

En la Fig. 7 se presentan curvas tensión-flecha obtenidas de ensayos de flexión realizados sobre los hormigones anteriores. Cabe recordar que las fibras se incorporan principalmente para el control de fisuras bajo esfuerzos de tracción con la consecuente mejora en tenacidad. Como fue observado en el trabajo anterior sobre hormigón simple [5], la degradación de la matriz se tradujo en una disminución de las propiedades mecánicas del hormigón dañado, principalmente en el hormigón expuesto a 500 °C. Los HRF expuestos a 150 °C presentaron curvas carga-flecha similares a las del hormigón sano; la resistencia postfisuración se vio menos afectada que la resistencia de primera fisura y el hormigón simple sufrió una

reducción en la resistencia mayor. Al igual que en un hormigón simple la degradación de los HRF se manifestó en la no linealidad de la rama ascendente de las curvas en la condición de exposición más severa (500 °C). Aún para este nivel de exposición los HRF mantuvieron un postpico con endurecimiento siendo, para igual contenido de fibras, el HRF elaborado con fibras de acero de alto carbono, el que mejor mantuvo su capacidad residual (algunas diferencias se pueden atribuir a la cantidad de fibras, pues la fibra L tenía igual relación de aspecto geométrico pero mayor longitud). Cabe observar que mientras en el HRF 40L la capacidad postpico fue similar entre 20 °C, 150 °C y 500 °C, la degradación afectó en especial la carga de primera fisura. La capacidad que muestra el HRF de acero para conservar gran parte de su resistencia residual aun luego de expuesto

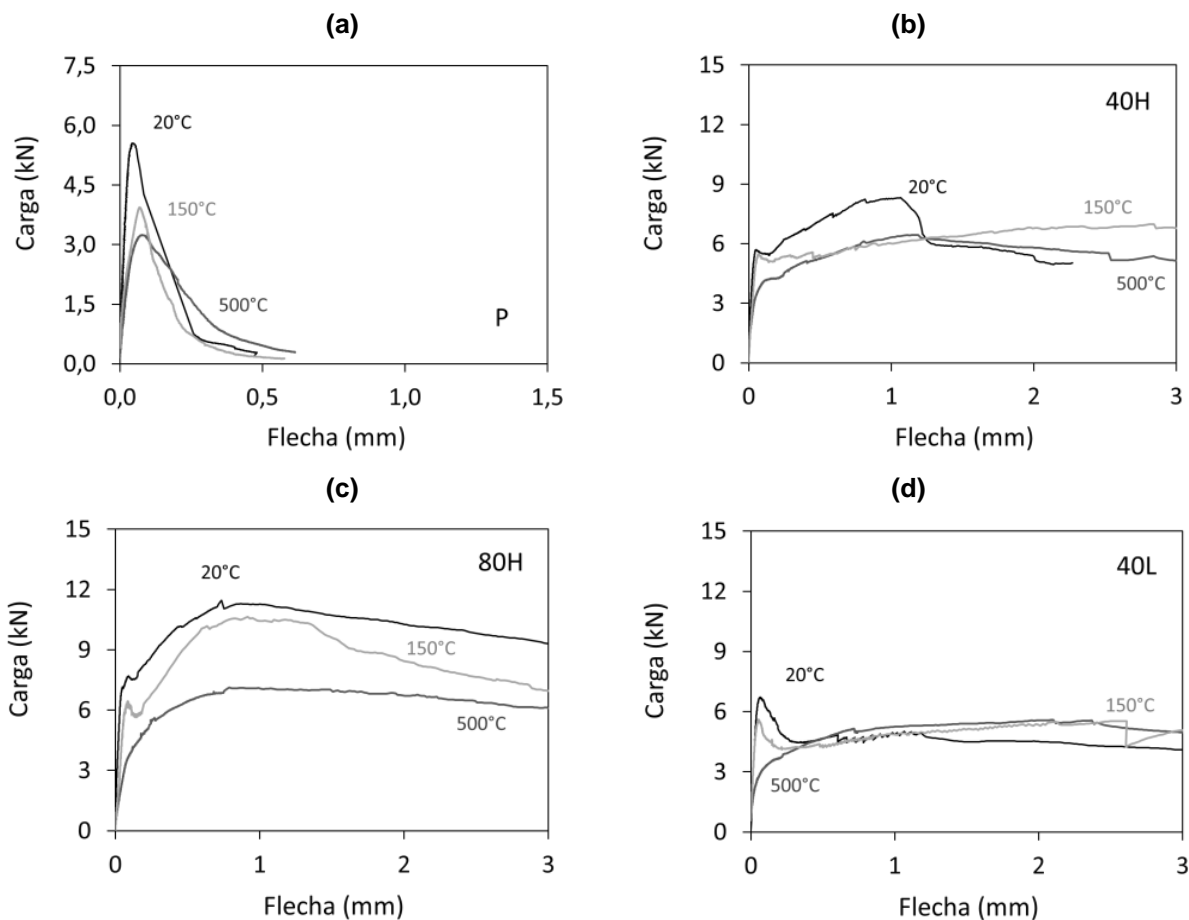


Figura 7. Curvas carga-flecha en hormigones de alta resistencia. P hormigón sin fibras (a), 40H (b) y 80H (c) la misma matriz con 40 u 80 kg/m^3 de fibras de acero con alto carbono y 40L (d) la misma matriz con 40 kg/m^3 de fibras de acero con bajo contenido de carbono.

a alta temperatura representa un aspecto importante desde el punto de vista del diseño y respuesta estructural del material.

La Velocidad de Pulso Ultrasónico (UPV) permite evaluar el nivel de daño, en hormigones dañados la UPV difiere mucho respecto a los valores habituales medidos en hormigón sano y no se puede emplear para estimar la resistencia a compresión [14]. En la Fig., 8 se representa la variación de la resistencia a compresión y del módulo de elasticidad en función de la velocidad de pulso ultrasónico para los mismos hormigones (P, 40H, 80H y 40L) presentados previamente, expuestos a 20 °C, 150 °C y 500 °C a los que se suman resultados sobre otros HRF expuestos a las mismas condiciones. Se aprecia que aún hormigones preparados con diferentes materiales, tipos y contenidos de fibras, y expuestos a diferentes grados de alteración muestran una muy buena correlación entre el módulo de elasticidad y la velocidad del pulso ultrasónico, no ocurre lo mismo con la resistencia a compresión.

En otro estudio se evaluó la respuesta residual del HRF cuando se utilizan fibras de vidrio y se compararon los resultados con un hormigón con fibras de acero. Una de las características particulares de las macrofibras de vidrio es que aun en bajas dosis pueden

incrementar los esfuerzos para los cuales se inicia la fisuración en la matriz (tensión de primera fisura) gracias a su excelente adherencia con la matriz cementícea. En cuanto a la capacidad postfisuración se incrementa para pequeñas aperturas de fisura, las correspondientes al estado de servicio, luego decrece significativamente [15], pero esto puede variar entre diversas macrofibras. En este estudio se elaboraron dos series de hormigones un hormigón de base S1 al que se incorporaron 10 kg/m³ de macrofibras de vidrio (V1) y un hormigón de base S2 al que se incorporaron 5 kg/m³ de las mismas macrofibras de vidrio (V2) o 40 kg/m³ de fibras de acero tipo *hooked-end* (A). Cada hormigón fue dividido en dos grupos, uno permaneció en ambiente de laboratorio y otro fue expuesto a una temperatura de 500 °C, las probetas dañadas se identifican incorporando la letra T (S1T, V1T, S2T, V2T, AT).

Como una forma de evaluar el daño en estos hormigones se midió el módulo de elasticidad dinámico (Ed) antes y después de la exposición a temperatura y se realizó un relevamiento del cuadro de fisuración visible sobre la superficie de los prismas. El módulo de elasticidad dinámico en los hormigones dañados sufrió una disminución ligeramente mayor en los hormigones sin fibras respecto a los hormigones con fibras, lo que implica un

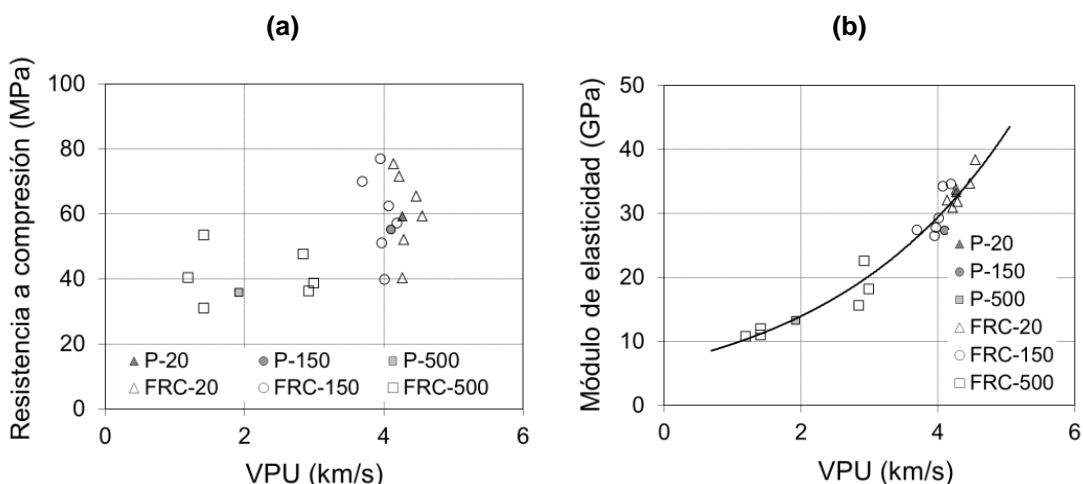


Figura 8. (a) Variación de la resistencia a compresión con la velocidad de pulso ultrasónico en hormigones simples y reforzados con fibras expuestos a alta temperatura. (b) Variación del módulo de elasticidad con la velocidad de pulso ultrasónico en hormigones simples y reforzados con fibras expuestos a alta temperatura.

menor daño. En cuanto al relevamiento de fisuras, el daño interno que sufrieron todos los hormigones, evidenciado en la disminución del E_d , no se apreció al observar las muestras. Tanto en el hormigón con macro fibras de vidrio como en el hormigón simple se observaron pocas fisuras muy pequeñas, con un leve incremento en la densidad de fisuras en este último. En el hormigón con fibras de acero no se observaron fisuras a simple vista sobre la superficie [15].

En el caso de los ensayos de compresión no se apreciaron mayores diferencias entre los HRF y los hormigones de base. Como ya fuera comentado, el módulo de elasticidad resulta más afectado que la resistencia ante el daño por temperatura, mientras la rigidez se redujo a aproximadamente un 55 %, la resistencia residual a compresión decayó a cerca del 75 %; en el caso de las fibras de acero esta disminución fue menor.

En todos los ensayos de flexión (realizados siguiendo los lineamientos de la norma EN 14651 [7]) se verificó una disminución en la tensión de primer pico (f_L) producto de la exposición a alta temperatura, lo que era esperable dado que esta tensión corresponde a la resistencia del hormigón simple. Como ya fuera comentado las fibras de vidrio poseen una gran adherencia con la matriz, esto se tradujo en el incremento de la f_L en los

hormigones S1 y V1, y se repitió, aunque en menor grado, al comparar los hormigones S2 y V2, dado que el contenido de fibras es menor. Sin embargo, cuando las probetas fueron dañadas por temperatura las f_L del grupo V1T fueron similares a las del grupo S1T. En el hormigón V2, con menor dosis de fibras, las diferencias con el hormigón simple en f_L resultaron menores y se mantuvieron luego de la exposición a alta temperatura. En la Fig. 9 se compara la parte inicial de las curvas tensión–CMOD de los hormigones S y V, y se indica el valor para el cual se define la tensión límite de proporcionalidad (línea roja en la figura) para este tamaño de probetas (75 x 105 x 430 mm). Se aprecia con claridad cómo luego de la exposición a alta temperatura se modifica la linealidad.

En la Fig. 10 se presentan curvas típicas tensión–CMOD de cada hormigón antes y después de la exposición a temperatura. En los hormigones sin fibras (S1 y S2) a medida que aumenta el daño la rama de ablandamiento se hace más extendida debido a una mayor ramificación de fisuras [5]. La f_{R3} disminuyó en los hormigones con 5 kg/m³ y con 10 kg/m³ de fibras de vidrio expuestos a temperatura, lo que se puede asociar con una degradación de las fibras y su adherencia. Sin embargo, al analizar la f_{R1} , cabe recordar que la principal contribución de las fibras de vidrio se produce a pequeñas aperturas de fisura,

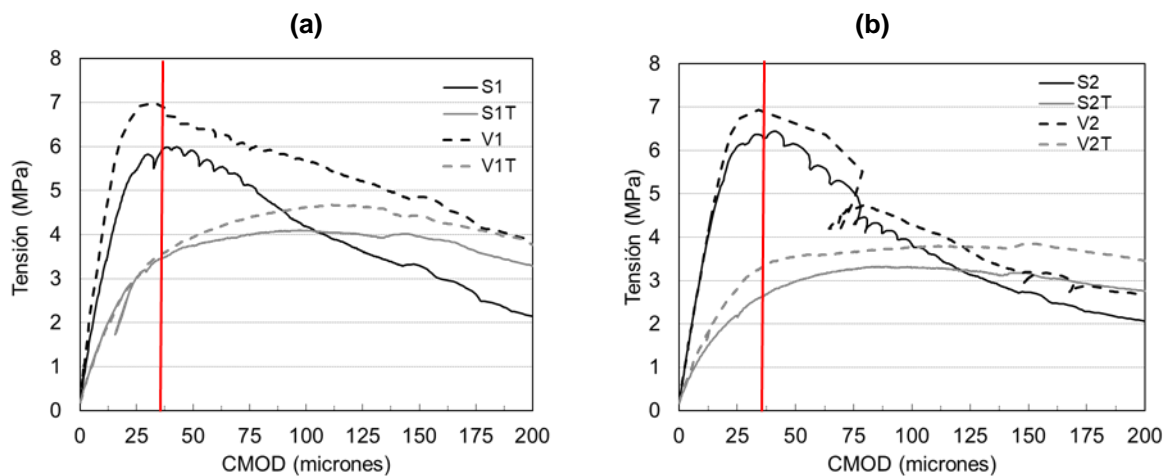


Figura 9. Curvas Tensión-CMOD de los hormigones S1 y V1 (a) y S2 y V2 (b).

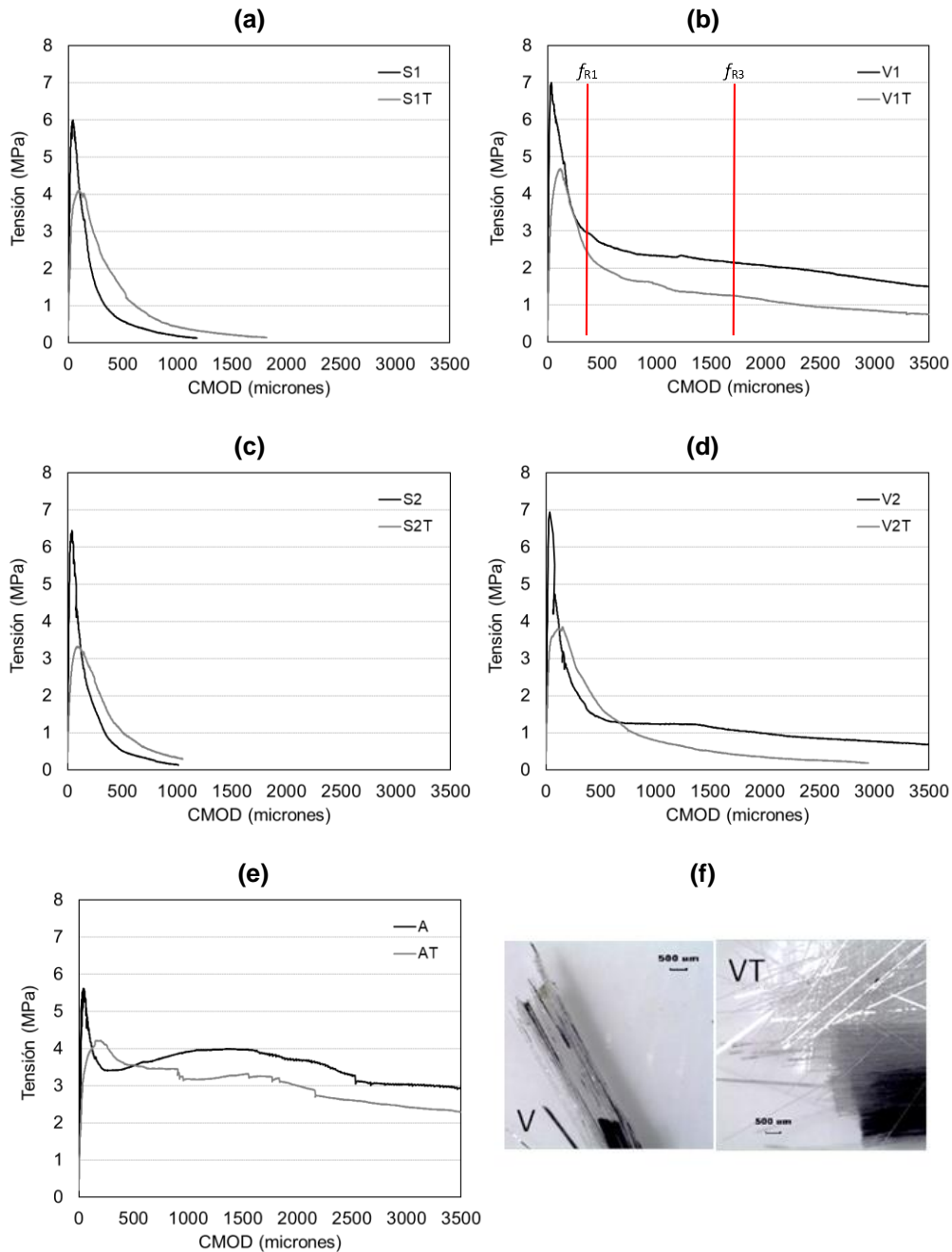


Figura 10. Curvas Tensión-CMOD de los hormigones S1 (a), V1 (b), S2 (c), V2 (d) y A (e), y fotografías de las fibras de vidrio (f) obtenidas de las superficies de fractura antes (V) y después de la exposición a temperatura (VT).

se observa que disminuye levemente en el hormigón con mayor dosis de fibras y no sufre modificaciones en el hormigón con la dosis menor (V2). En el hormigón con fibras de acero se verifica que la capacidad postpico se modifica ligeramente por efecto de la exposición a alta temperatura. En la misma

figura se muestran fotografías de fibras de vidrio extraídas de las superficies de fractura del hormigón luego del ensayo de flexión, se observa cierta separación de los filamentos de la fibra en la probeta expuesta a alta temperatura que puede asociarse a un proceso de degradación.

En síntesis, desde el punto de vista microestructural no aparecen mayores diferencias entre el HRF y el hormigón de base por exposición a alta temperatura. Sin embargo, si bien las temperaturas más elevadas pueden alterar ligeramente al acero o al vidrio y dañar la adherencia, sus efectos no son tan relevantes y el HRF, fundamentalmente con fibras de acero, conserva en gran medida su capacidad postfisuración. Las fibras siguen conservando la capacidad de controlar la propagación de las fisuras aun en una matriz con cierto grado de microfisuración.

Se considera a continuación el otro mecanismo de degradación estudiado, el daño inducido en la matriz por efecto del desarrollo de la RAS. En otro proyecto de investigación se planteó como punto de partida indagar que ocurriría si por razones no previstas, una estructura realizada con HRF resultara afectada por la RAS y, en tal sentido, de qué modo se afectaría la capacidad residual del HRF.

El programa experimental incluyó un hormigón de referencia (R) y dos HRF que incorporaron 40 kg/m^3 de fibras de acero tipo *hooked-end* (A: acero de bajo carbono, longitud = 50 mm, diámetro = 1 mm, resistencia a tracción mayor a 1100 MPa) y 3 kg/m^3 de macrofibras sintéticas (M) (en base a olefinas modificadas, longitud = 60 mm, diámetro = 0,62 mm, resistencia a tracción 640 MPa, módulo de elasticidad 10 GPa) [16,17]. Se empleó como parte del agregado grueso 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 [18]), con 100 % de agregado reactivo, fue igual a 0,065 % y cuando se usó 40 % de agregado reactivo la expansión creció a 0,142 %. Para propiciar la RAS, se añadió NaOH en el agua de mezclado para alcanzar un contenido total de álcalis igual a 4 kg/m^3 .

Como es habitual, el nivel de reacción se evaluó a través de mediciones de la expansión a lo largo del tiempo. La Fig. 11

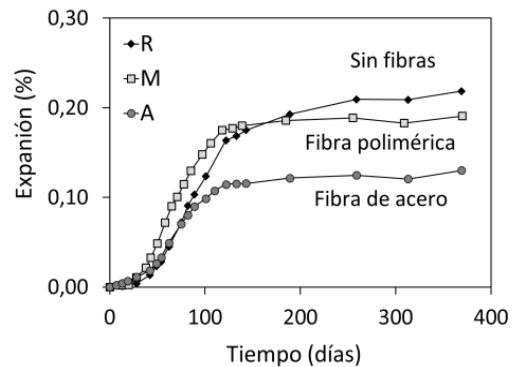


Figura 11. Expansiones lineales en hormigones producto de la RAS [17].

muestra la evolución de las expansiones durante un año; se aprecia una alta velocidad de reacción entre el segundo y quinto mes, alcanzando el HRF con fibras de acero (A) una expansión de 0,13 %, y los otros hormigones valores mayores, cercanos al 0,20 %.

Sobre los distintos hormigones se midieron la resistencia a compresión, el módulo de elasticidad y el comportamiento en flexión sobre prismas entallados siguiendo la norma EN 14651 [7]. Los ensayos se realizaron a la edad de 28 días, lo que sirvió como referencia de las propiedades del hormigón sano, y una vez alcanzado un importante nivel de expansión para determinar las propiedades mecánicas post-daño.

La Fig. 12 muestra las curvas tensión-CMOD obtenidas a 28 días y a 1 año de cada hormigón. Como era de esperar cada hormigón presenta una respuesta postpico diferente, de acuerdo con el tipo de fibra incorporada. El daño por RAS provocó una importante disminución de la tensión de primera fisura reflejo del daño del hormigón de base; también existieron diferencias en la respuesta postpico, las que también varían según la presencia y tipo de fibra. Al igual que lo visto en los hormigones dañados por temperatura la rama de ablandamiento del hormigón sin fibras (R) se hace más extendida a medida que aumenta el daño debido a una mayor ramificación de fisuras [5,19]. En los HRF la forma de las curvas tensión-CMOD resulta acorde al tipo de fibra

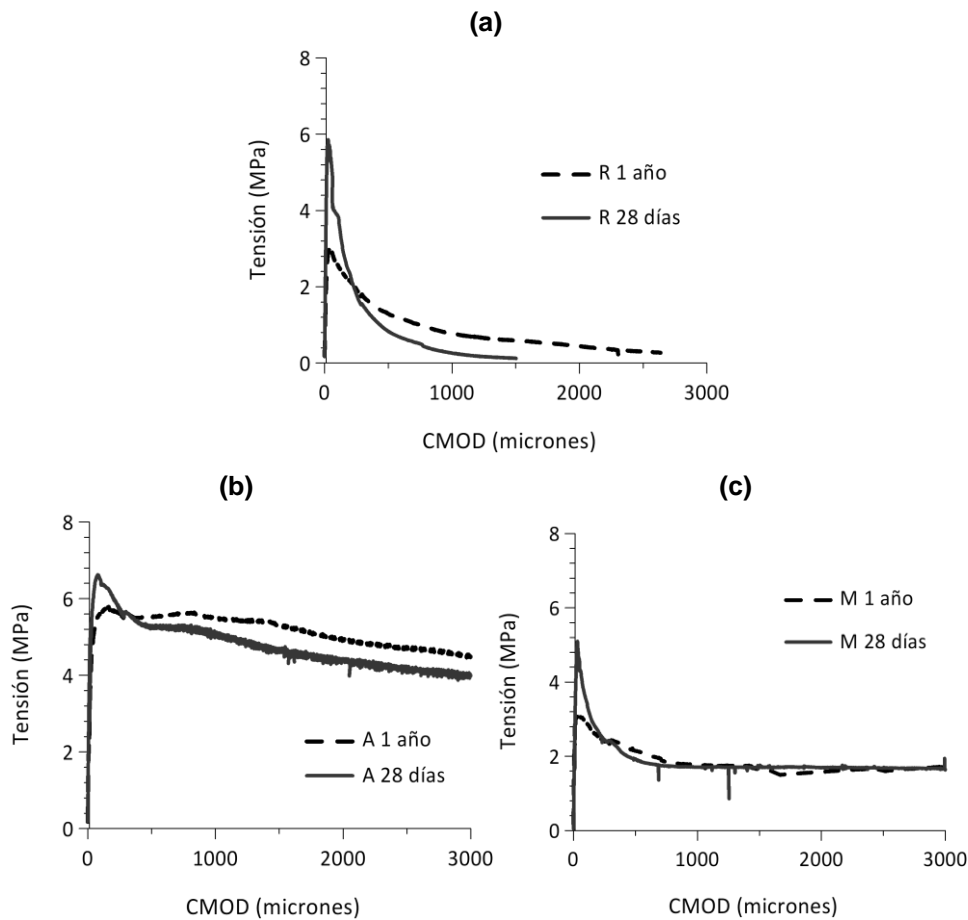


Figura 12. Curvas tensión-CMOD en flexión en hormigones R (a), A (b) y M (c) sin dañar a 28 días y los mismos hormigones luego del desarrollo de la RAS a la edad de un año.

empleada, en el HRF M luego del primer pico las cargas disminuyen y permanecen casi constantes hasta grandes deformaciones mientras que en el HRF A se produce un descenso gradual en la rama postpico con valores de las tensiones marcadamente superiores. Es importante destacar que, en ambos HRF, aunque la carga de primera fisura disminuye claramente en una matriz severamente dañada (1 año de edad), la capacidad postfisuración permanece casi inalterada.

Cabe agregar que sobre la superficie de dichos prismas se observó un cuadro de fisuras importante confirmando el nivel de daño. Previo a los ensayos de flexión se realizó un relevamiento del cuadro de fisuración que mostró que la incorporación de fibras condujo a una menor cantidad de fisuras como así también a una reducción del

ancho de estas. También se determinó el coeficiente de permeabilidad al aire, el cual presentó una tendencia similar, lo que muestra además un efecto positivo de la presencia de macrofibras en las propiedades de transporte. En la Tabla 1 se resumen las características del cuadro de fisuración generado por la RAS y los valores del coeficiente de permeabilidad al aire obtenidos a la edad de un año.

La Fig. 13 resume el efecto del daño por RAS sobre la respuesta de los hormigones estudiados. Se representa la variación de las características y propiedades físicas y mecánicas del hormigón en función de la expansión. Se observa que las fibras de acero (HRF A) redujeron la expansión y la densidad de fisuras y que, aunque los hormigones con fibras poliméricas (HRF M) y el hormigón control (R) alcanzaron expansiones similares,

Tabla 1. Características de las fisuras y coeficiente de permeabilidad al aire K_t [17].

Hormigón	K_t (10^{-16} m^2)	Ancho máximo (mm)	Ancho medio (mm)	Densidad (cm/cm^2)
R	2,41	0,50	0,15	0,19
A	1,03	0,10	0,06	0,10
M	1,24	0,10	0,06	0,11

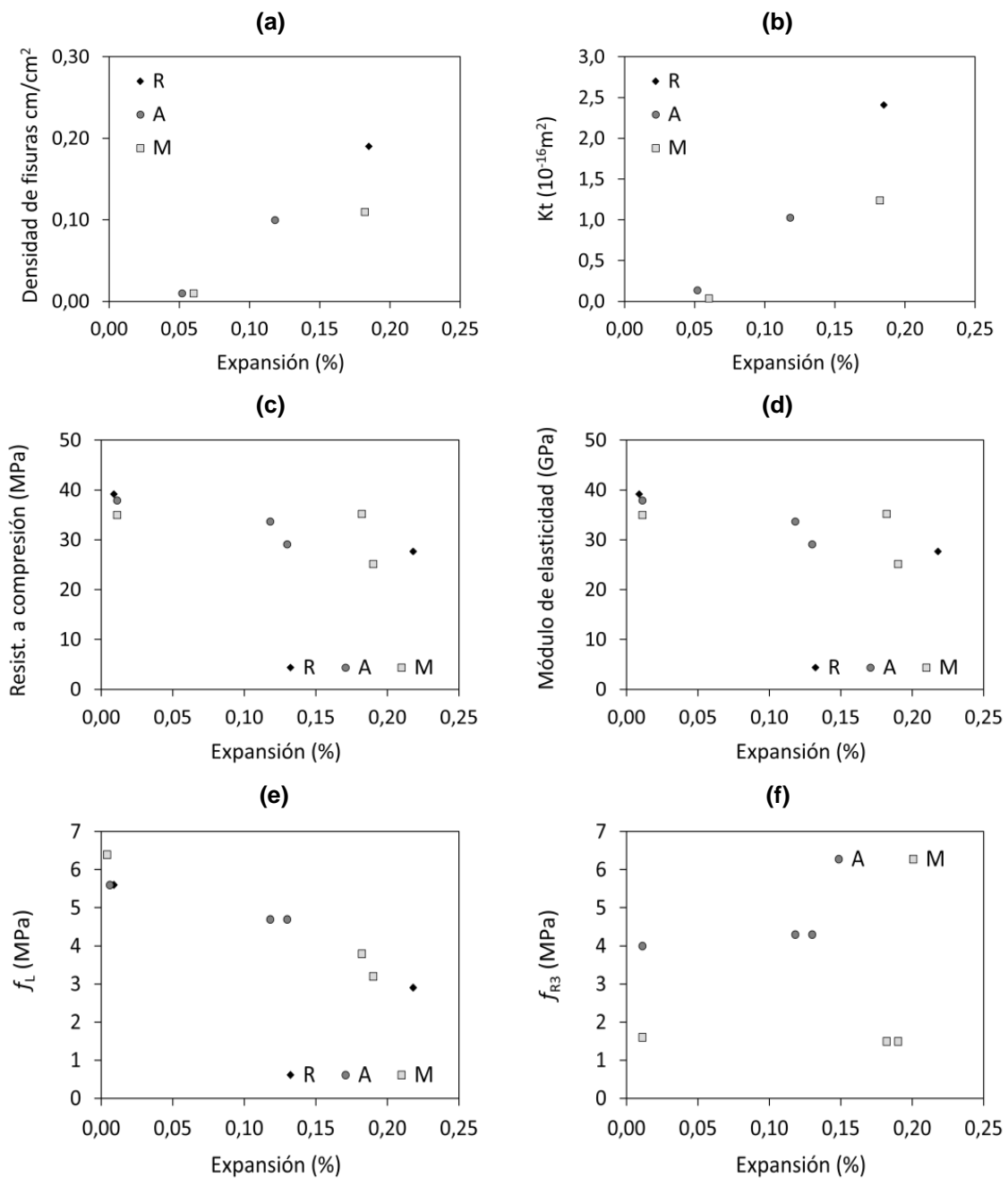


Figura 13. Relación entre propiedades mecánicas y las expansiones lineales [17]. Resultados de densidad de fisuras (a), K_t (b), resistencia a compresión (c), módulo de elasticidad (d), f_L (e) y f_{R3} (f).

el HRF M presentó menor densidad de fisuras. Al igual que en hormigón simple, en control (R) alcanzaron expansiones similares, el HRF M presentó menor densidad de fisuras. Al igual que en hormigón simple, en HRF la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad remanentes disminuyen por efecto de la RAS siendo mayores los cambios en el módulo de elasticidad [19,20]. La resistencia a flexión disminuyó con la expansión, pero las fibras, particularmente las de acero, provocaron que la capacidad postpico permaneciera casi constante, incluso para grandes expansiones. Esto se corresponde con lo antes indicado respecto a que se observaron menores cambios en la adherencia fibra-matriz que en la resistencia a compresión en morteros dañados por RAS.

En una segunda etapa con hormigones similares se realizó un estudio sobre bloques de hormigón 0,70 x 0,40 x 0,40 m que fueron ubicados en el exterior. Sobre las caras de los

bloques se midieron los cambios de longitud en distintas direcciones, se midió la permeabilidad al aire y periódicamente se realizó el relevamiento de fisuras determinando ancho y densidad de fisuras. Los coeficientes de permeabilidad evaluados hasta la edad de 2 años crecieron con el tiempo, y si bien resultaron menores en los HRF, los valores alcanzados fueron muy altos, en correspondencia con el nivel de fisuración medido. Resulta interesante marcar que en los bloques de hormigón la incorporación de fibras, si bien no evitó la fisuración, condujo a una menor densidad y ancho de fisuras como así también a una distribución más uniforme de las deformaciones [21]. A modo ilustrativo en la Fig. 14 se muestran las expansiones medidas en dirección vertical y horizontal en los diferentes bloques y la Fig. 15 la evolución de la fisuración a lo largo del tiempo con el desarrollo de la RAS.

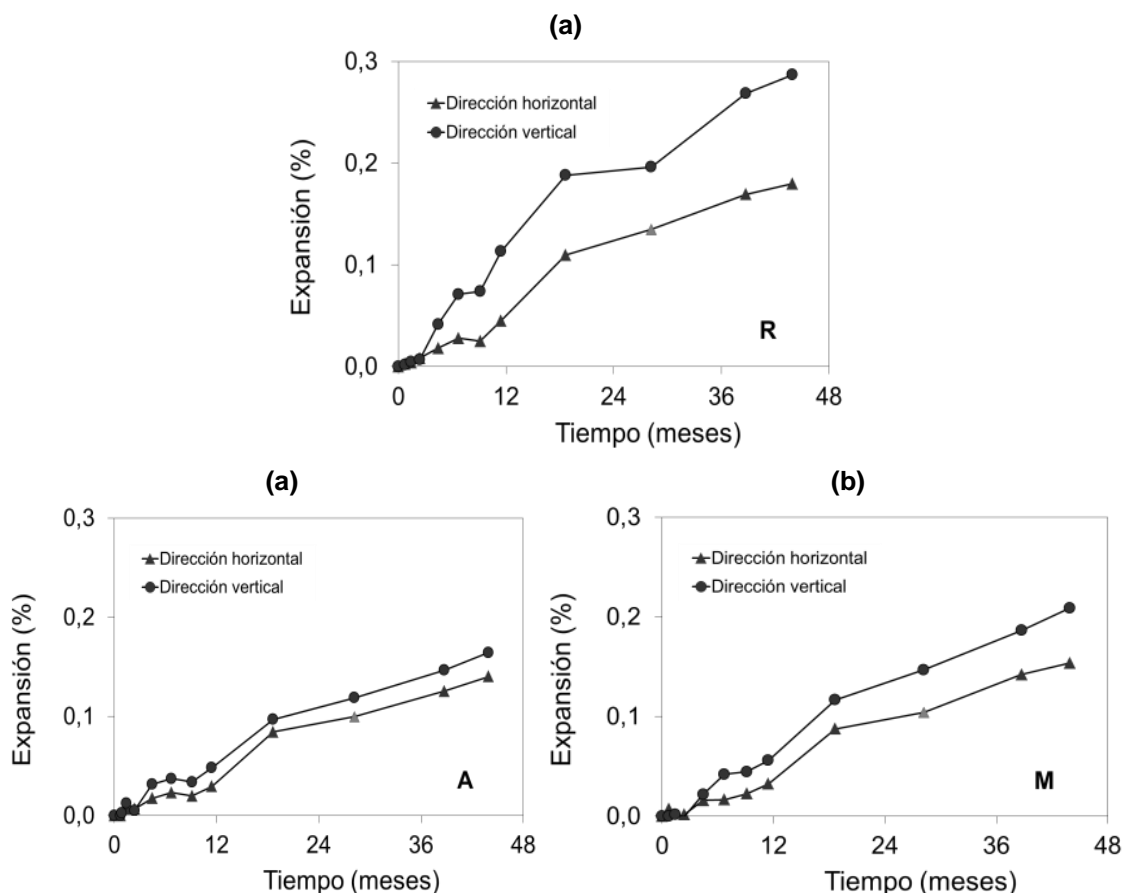


Figura 14. Variación de las expansiones en diferentes direcciones con la edad para hormigones R (a), A (b) y M (c). Adaptado de [21].

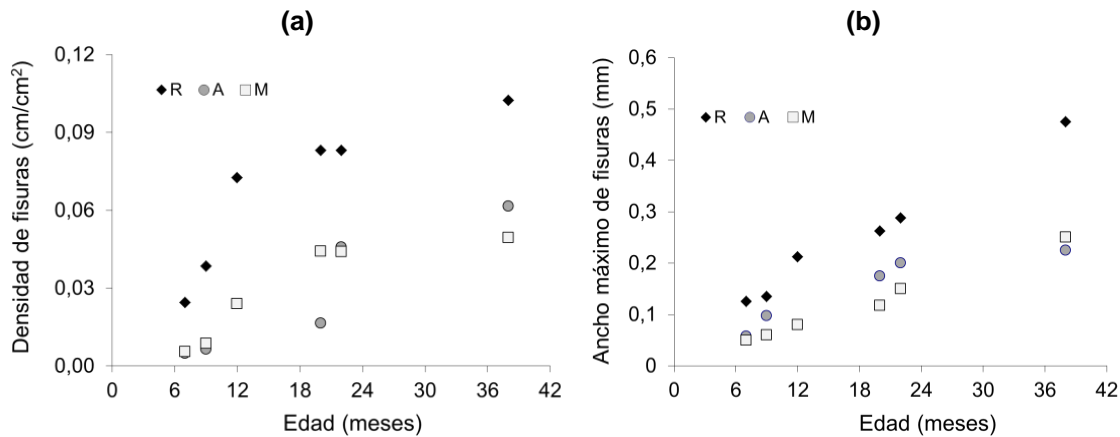


Figura 15. Crecimiento de la densidad (a) y ancho de fisuras (b) con la edad. R: hormigón sin fibras; A: HRF de acero; M: HRF poliméricas. Adaptado de [21].

Algunos autores consideran que aunque la incorporación de fibras no evite la RAS, su presencia puede contribuir a reducir en cierta medida la velocidad y el nivel de expansión, al limitar el ancho de fisuras [22,23].

Finalmente, y a modo de síntesis, es importante destacar que el uso de HRF genera un efecto positivo para extender la vida en servicio de las estructuras, ya que el material conserva su resistencia postpico y capacidad de control de fisuras, incluso ante inesperados y significativos procesos de daño.

3. Conclusiones

Los procesos de daño en el hormigón pueden afectar en diferente medida las distintas propiedades mecánicas del material, y este hecho no debe olvidarse al momento de realizar la evaluación de una estructura. En este trabajo se muestra cómo distintos procesos de daño pueden modificar las propiedades en el caso del HRF. En tal sentido se analizaron hormigones dañados por la RAS y por exposición a alta temperatura, considerando el uso de fibras de acero, poliméricas y de vidrio. Entre las conclusiones surge que:

- Al igual que en el HRF sano el HRF dañado presenta una respuesta post pico diferente, de acuerdo con el tipo de fibra incorporada.

- Cuando el HRF es expuesto a procesos que degradan al hormigón convencional, la resistencia a tracción, la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad se ven afectados en forma similar que el hormigón sin fibras.

- En los HRF el daño afecta en mayor medida la resistencia de la matriz que la adherencia fibra-matriz.

- Aunque la resistencia a tracción se reduzca significativamente con el daño, la capacidad de carga postpico del HRF no cambia demasiado y el material conserva cierta resistencia residual, incluso ante daños muy severos. Este comportamiento se vincula con la menor disminución en la adherencia fibra-matriz.

Referencias

- [1] Irassar, E. (Ed.). (2004). *Hormigones Especiales*. AATH.
- [2] Zerbino, R. (Ed). (2020). *Hormigón reforzado con fibras*. AATH.
- [3] Féd Int du Béton. (2013). *fib Model Code for Concrete Structures 2010*.
- [4] Pombo, R., y Zerbino, R. (2022). *Hormigón para pisos industriales* (1ra ed.). AATH.
- [5] Giaccio, G., Torrijos, M. C., y Zerbino, R. (2018-2019). Propiedades físicas y mecánicas del hormigón dañado y su significado en la caracterización del material en estructuras afectadas. *Revista Hormigón*, 58, 31–43.

- [6] American Society for Testing and Materials. (2010). *ASTM C1609/C1609M Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading)*.
- [7] European Standards. (2005). *EN 14651 Test method for metallic fibre concrete-Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOF), residual)*.
- [8] Bossio, M. E., Giaccio, G., Torrijos, M. C., y Zerbino, R. (2012). Evaluación de la resistencia al arrancamiento de macrofibras sintéticas. En J. D. Sota, N. F. Ortega, y J. M. Moro (Eds.), *V Congreso Internacional y 19ª Reunión Técnica "Ing. Oscar R. Batic" de la AATH* (487–494). AATH.
- [9] Ruano, G., Isla, F., Luccioni, B., Zerbino, R., y Giaccio, G. (2016). Influencia de altas temperaturas en el comportamiento mecánico del hormigón reforzado con fibras. En S. Giusti, M. Pucheta, y M. Storti (Eds.), *Mecánica Computacional XXXIV* (2463–2481). Asociación Argentina de Mecánica Computacional.
- [10] Ruano, G., Isla, F., Luccioni, B., Zerbino, R., y Giaccio, G. (2018). Steel fibers pull-out after exposure to high temperatures and its contribution to the residual mechanical behavior of high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 163, 571–585. <https://doi.org/h9dz>
- [11] Lau, A., y Anson, M. (2006). Effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, 36, 1698–1707. <https://doi.org/bh4f9s>
- [12] Giaccio, G., y Zerbino, R. (2002) The performance of fiber reinforcement in concretes exposed at high temperatures. En ACI (Ed.), *5th International Conference Innovation in design with emphasis on seismic, wind and environmental loading; quality control and innovation in materials/Hot weather concreting* (pp. 733–754). ACI International.
- [13] Giaccio, G., y Zerbino, R. (2005). Mechanical behaviour of thermally damaged high-strength steel fibre reinforced concrete. *Materials and Structures*, 38, 335–342. <https://doi.org/cfp6c6>
- [14] Di Maio, A., Giaccio, G., y Zerbino, R. (2002). Non-destructive tests in the evaluation of concrete exposed at high temperatures. *Cement, Concrete, and Aggregates*, 24(2), 58–67. <https://doi.org/frsc82>
- [15] Torrijos, M. C., Huechante, N., Giaccio, G., y Zerbino, R. (2018). Efecto de las macro fibras de vidrio en el control de la fisuración en hormigones dañados por temperatura. En V. L. Bonavetti (Ed.), *VIII Congreso Internacional - 22ª Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón* (425–432). AATH.
- [16] Zerbino, R., Giaccio, G., Bossio, M. E., Torrijos, M. C., y Milanese, C. A. (2014). Efecto de la incorporación de fibras sobre la respuesta de hormigones afectados por la reacción álcali – sílice. En J. D. Sota (Ed.), *VI Congreso Internacional y 20ª Reunión Técnica "Ing. Alberto S.C. Fava" de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón* (119–126). AATH.
- [17] 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>
- [18] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2013). *IRAM 1700 Agregados Métodos para la determinación del cambio de largo en prismas de hormigón, debido a la reacción álcali-agregado*.
- [19] 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>
- [20] Torrijos, M. C., Giaccio, G., y Zerbino, R. (2010). Internal cracking and transport properties in damaged concretes. *Materials and Structures*, 43(1), 109–131. <https://doi.org/dwx67>
- [21] Giaccio, G., Torrijos, M. C., Milanese, C., y Zerbino, R. (2019). Alkali-silica reaction in plain and fibre concretes in field conditions. *Materials and Structures*, 52(31), 1–15. <https://doi.org/h9d3>
- [22] Pires de Carvalho, M. R., de Moraes Rego, F. E., Dias Toledo, F. R., Chagas Cordeiro, G., y Hasparyk, N. P. (2010). Influence of steel fibers on the development of alkali-aggregate reaction. *Cement and Concrete Research*, 40(4), 598–604. <https://doi.org/ctf9z8>
- [23] Haddad, R. H., y Smadi, M. M. (2004). Role of fibers in controlling unrestrained expansion and arresting cracking in Portland cement concrete undergoing alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 34(1), 103–108. <https://doi.org/crmjc7>