

## EFFECTO DE LAS MACRO FIBRAS DE VIDRIO EN EL CONTROL DE LA FISURACIÓN EN HORMIGONES DAÑADOS POR TEMPERATURA

M.C. Torrijos<sup>1</sup>, N. Huechante<sup>2</sup>, G. Giaccio<sup>3</sup> y R. Zerbino<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CONICET-LEMIT-Facultad de Ingeniería UNLP, <sup>2</sup>Facultad de Ingeniería UNLP, <sup>3</sup>CIC-LEMIT-Facultad de Ingeniería UNLP, LEMIT-CIC. 52 e/ 121 y 122. La Plata, 0221-4831142, mc.torrijos@conicet.gov.ar

### RESUMEN

---

Es conocido el efecto de las fibras en el control de fisuras en hormigón, dando lugar a mejoras en propiedades mecánicas y durabilidad. Este trabajo estudia la incidencia de la incorporación de macrofibras de vidrio sobre las propiedades de hormigones expuestos a altas temperaturas (500 °C). Se comparan hormigones con 0.5 y 1 % de macrofibras de vidrio, con 0.5 % de fibras de acero y sin fibras. Como referencia se incluyen muestras de cada hormigón sin dañar. Para evaluar el nivel de deterioro en cada hormigón se analizó la variación del módulo de elasticidad dinámico y para evaluar el comportamiento mecánico residual se realizaron ensayos de flexión. Si bien el daño observado permite inferir cierta capacidad de las macrofibras de vidrio para mantener la capacidad post fisuración y controlar el deterioro por exposición a alta temperatura, los cambios en las propiedades mecánicas no difirieron mayormente de lo observado sobre el hormigón sin fibras.

**Palabras claves:** Hormigón reforzado con macro fibras de vidrio; altas temperatura; fisuras.

### INTRODUCCIÓN

Es conocido que las fibras contribuyen al control de la propagación de las fisuras en el hormigón, dando lugar a una mejora en sus propiedades mecánicas y una mayor durabilidad. En estructuras expuestas a alta temperatura es frecuente el uso de fibras poliméricas porque atenúan la degradación del hormigón y principalmente el desprendimiento violento de fragmentos del mismo. Al elevarse la temperatura las fibras poliméricas se funden dejando canales que ayudan a disipar la presión de vapor producida por el calor [1, 2]. Si bien en general para estos casos se incorporan microfibras también resultan efectivas las macrofibras poliméricas, sin embargo, al fundirse dichas fibras el HRF ya no posee capacidad residual.

En el caso de las fibras de acero, aunque no ocurre la atenuación de la presión por efecto de la desaparición de las fibras, resultan efectivas para limitar el proceso de estallido. Como ocurre en el hormigón sin fibras, la resistencia a tracción del HRF es más afectada que la resistencia a compresión, pero lo importante es que, aunque se degrade fuertemente la matriz, la capacidad residual del HRF no se altera en demasía [3-7].

Algunos de los beneficios de agregar fibras de acero al hormigón se mantienen luego de la exposición a temperaturas de hasta 1200°C [3]. Khaliq et al [1] encontraron que el uso de fibras híbridas (polipropileno y acero) es muy efectivo en el control del descascaramiento, ya que las fibras sintéticas aumentan la permeabilidad al fundirse y las de acero contribuyen a contrarrestar la presión de poros con el valor agregado que se conserva la capacidad residual. Recientemente Ruano et al [8] observaron que para el caso de hormigones de alta resistencia la resistencia al arrancamiento de fibras de acero disminuye con la temperatura. Al comparar como referencia fibras con y sin gancho, se verificó que el daño en la interfaz fibra-matriz perjudica la adherencia y la fricción; en las fibras con gancho la reducción en la resistencia al arrancamiento es menor debido a varios factores como la disminución de la resistencia a compresión de la matriz, la disminución de la resistencia del acero y el daño de la interfaz. No obstante, las pérdidas de adherencia fueron menores que la disminución de resistencia a tracción lo que justifica que se conserve en buena medida la capacidad residual [9].

Sobre el efecto de las macrofibras de vidrio no se dispone de mayores antecedentes. Una de las características particulares de las macrofibras de vidrio es que, a diferencia de las fibras poliméricas o de acero, aun a bajas dosis incrementan los esfuerzos para los cuales se inicia la fisuración en la matriz (tensión de primera fisura o límite de proporcionalidad) gracias a su excelente adherencia con la matriz cementícea. Otro aspecto distintivo, es que mientras mejora la capacidad postfisuración para pequeñas aperturas de fisura, esto es las correspondientes al estado de servicio, luego decrece significativamente la capacidad postfisuración [10], pero esto puede variar entre diversas macrofibras. Asimismo, y en lo que tiene que ver con la exposición a alta temperatura, se destaca que el vidrio tiene una excelente compatibilidad elástica con dicha matriz cementícea. Sin embargo, aunque es previsible que el vidrio de los filamentos no se altere significativamente ante la exposición a altas temperaturas, si puede hacerlo su adherencia, por lo cual quedan interrogantes acerca de si la mayor resistencia a la formación de la primera fisura dará lugar a beneficios frente a este caso de degradación en comparación al hormigón convencional y si no se alterará su capacidad postfisuración para pequeñas aperturas de fisuras. En este trabajo se presentan experiencias que exploran y analizan las propiedades de hormigones reforzados con macro fibras de vidrio luego de ser expuestos a alta-temperatura.

## **PROGRAMA EXPERIMENTAL**

### **Hormigones estudiados y proceso de exposición a alta temperatura**

Se elaboraron dos series de hormigones conforme se detalla en la Tabla 1. En una primera etapa se estudió un hormigón de base H50 al que se incorporaron 10 kg/m<sup>3</sup> de macrofibras de vidrio 36 mm de longitud y relación de aspecto 67; en una segunda etapa un hormigón H40 sin fibras y la misma matriz reforzada con 5 kg/m<sup>3</sup> de dichas macrofibras de vidrio o con 40 kg/m<sup>3</sup> de fibras de acero tipo hooked end, de 35 mm de longitud y 0,45 mm de diámetro. En todos los casos se emplearon piedra granítica triturada de 12 mm de tamaño máximo como agregado grueso y arena silícea natural.

Con cada hormigón se moldearon vigas de 75x105x430 mm y cilindros de 10x20 mm que, luego de 28 días de curado en cámara húmeda, permanecieron en ambiente de laboratorio (22 ± 5 °C, humedad relativa 70 ± 20 %) durante 3 meses. Luego, las probetas de cada hormigón fueron divididas en dos grupos, uno permaneció en ambiente de laboratorio y otro fue expuesto a alta temperatura. Para ello se empleó un horno eléctrico con control de temperatura, con una velocidad de 100 °C/hora hasta alcanzar una temperatura del horno de 500 °C que fue mantenida durante una hora; luego las probetas

se dejaron enfriar dentro del horno hasta el día siguiente. Estas probetas se identifican incorporando la letra T (S1T, V1T, S2T, V2T, AT).

### Evaluación de las propiedades

Como forma de caracterización del daño se midieron sobre los cilindros la longitud y el ancho máximo de fisuras visibles. El ancho máximo de fisura fue determinado en forma manual mediante una lupa con una precisión de 0,05 mm. Además las fisuras fueron delimitadas con la ayuda de una lupa y se calcaron en un papel transparente sin ninguna preparación previa de la muestra. El registro sobre dicho papel fue escaneado para obtener la imagen digital que luego fue procesada. Se utilizaron dos software de procesamiento de imágenes, mediante el primero se las acondicionó para poder ser fácilmente evaluadas con el segundo.

Sobre las vigas se midió el módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) antes y después de la exposición a alta temperatura; para ello se utilizó un equipo sónico con un rango de frecuencia que oscila entre 10 KHz y 100 KHz; el módulo se calcula a partir de la frecuencia de resonancia medida, las dimensiones y el peso de la probeta.

En cuanto a las propiedades mecánicas, los cilindros se ensayaron a compresión midiendo las deformaciones longitudinales mediante un LVDT para calcular el módulo de elasticidad. Sobre las vigas se realizó una entalladura de 17 mm y se ensayaron a flexión con carga centrada registrando la evolución de la apertura de fisura (CMOD) a través de un clip gage.

De este modo se pudieron valorar los efectos de la exposición a alta temperatura tanto sobre los HRF como sobre las mismas matrices sin fibras. Como resultados y siguiendo los lineamientos generales de la norma EN 14651 [11], se calcularon la tensión de primera fisura ( $f_L$ ), y las resistencias residuales  $f_{R1}$  y  $f_{R3}$ , correspondientes a aperturas de fisura iguales a 0,5 mm y 2,5 mm en el ensayo normalizado que utiliza prismas de 150 mm de altura. Cabe aclarar que, como en este caso los prismas eran 105 mm de altura, los valores de CMOD correspondientes al mismo giro resultan iguales a 0,035, 0,35 y 1,75 mm para  $f_L$ ,  $f_{R1}$  y  $f_{R3}$  respectivamente. La tensión de primera fisura ( $f_L$ ) se define como la máxima alcanzada por la probeta antes de una pequeña CMOD, la cual en el caso del hormigón sin fibras siempre coincide con la tensión máxima.

Como en el hormigón dañado suele ocurrir una prematura pérdida de linealidad en la curva carga – CMOD en flexión debida a la microfisuración, era previsible que la carga máxima se produjera para mayores CMOD a las cuales se calcula habitualmente  $f_L$  aún en el caso del hormigón sin fibras. Por tal motivo, además del valor de  $f_L$  se calculó una tensión máxima ( $f_M$ ) a partir de la máxima carga durante el ensayo completo. Dicha  $f_M$  representa la resistencia de la matriz en el caso del hormigón simple y por lo tanto debe coincidir con  $f_L$  en hormigones sanos. En el hormigón con fibras de acero (A)  $f_M$  puede producirse para CMOD muy diferentes si el HRF posee un postpico con endurecimiento. Una vez finalizados los ensayos de flexión se contaron las fibras en la superficie de fractura.

Tabla 1: Hormigones elaborados.

Tipo	Identificación	Fibras	
		Tipo	kg/m <sup>3</sup>
H50	S1	sin fibras	-
	V1	de vidrio	10
H40	S2	sin fibras	-
	V2	de vidrio	5
	A	de acero	40

**Tabla 2:** Relevamiento del daño: módulo de elasticidad dinámico y características de las fisuras visibles luego de la exposición a alta temperatura.

Hormigón	Ed (GPa)	%	Fisuras visibles	
			densidad (cm/cm <sup>2</sup> )	ancho máximo (mm)
S1	44,7		-	-
S1T	17,6	39	0,041	No medido
V1	44,5		-	-
V1T	20,1	45	0,040	No medido
S2	38,6		-	-
S2T	12,4	32	0,043	0,05
V2	38,5		-	-
V2T	13,7	36	0,038	<0,05
A	35,1		-	-
AT	12,6	36	-	-

Cabe aclarar que en HRF se denomina resistencia residual a la capacidad resistente que posee la sección nominal luego de la aparición de la primera fisura. A fin de evitar confusiones en lo que sigue se mencionará en términos de capacidad postfisuración y se reservará el término *residual* para referirse a las diversas propiedades del hormigón luego de ser sometido a alta temperatura.

## ANALISIS DE LOS RESULTADOS

### Relevamiento del daño por exposición a alta temperatura

En la Tabla 2 se presentan los resultados del módulo de elasticidad dinámico (Ed) obtenidos sobre los hormigones de referencia y sobre las muestras expuestas a alta temperatura. Si se consideran sus relaciones porcentuales se aprecia que en todos los casos resultan ligeramente mayores en el HRF que en el hormigón sin fibras lo que implica un menor daño. También se informan resultados del relevamiento de fisuras luego de la exposición a alta temperatura. El daño interno que sufrieron todos los hormigones evidenciado en la disminución del Ed no se aprecia 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.

### Propiedades mecánicas residuales

En la Tabla 3 se presentan los resultados de los ensayos mecánicos, se incluyen los valores promedio de la resistencia a compresión y del módulo de elasticidad estático y los parámetros calculados a partir de los ensayos de flexión: la tensión de primer pico ( $f_L$ ), la tensión máxima durante todo el ensayo ( $f_M$ ), las resistencias residuales  $f_{R1}$  y  $f_{R3}$ , y densidad de fibras calculada sobre la superficie de rotura. No se aprecian mayores diferencias entre los HRF y los hormigones de base en el caso de los ensayos de compresión. Como es conocido, el módulo de elasticidad resulta más afectado que la resistencia ante el daño por temperatura, mientras la rigidez se reduce a aproximadamente un 55 % la resistencia residual a compresión decae a cerca del 75 %; en el caso de las fibras de acero esta disminución es menor lo que se puede asociar a un mecanismo de endurecimiento (incremento de la capacidad de carga luego de iniciadas las fisuras) para este tipo y contenido de fibras, el cual fue observado en los ensayos de flexión.

Tabla 3: Propiedades mecánicas y densidad de fibras.

Hormigón		$f'_c$	E	$f_L$	$f_M$	$f_{R1}$	$f_{R3}$	Densidad
		(MPa)	(GPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(fibras/cm <sup>2</sup> )
S1	promedio	58,7	48,6	5,92	5,94	0,73	-	-
	máximo	62,1	52,0	6,04	6,04	0,81	-	-
	mínimo	55,2	45,3	5,77	5,77	0,58	-	-
S1T	promedio	42,0	26,7	3,75	4,13	1,60	-	-
	máximo	47,2	28,2	3,83	4,44	1,86	-	-
	mínimo	36,7	25,3	3,60	3,85	1,43	-	-
V1	promedio	53,2	50,2	7,04	7,04	2,38	1,71	0,58
	máximo	56,2	56,7	7,08	7,08	2,66	1,89	0,63
	mínimo	50,9	43,6	6,99	6,99	2,08	1,54	0,53
V1T	promedio	35,1	27,8	3,78	4,31	1,99	0,67	0,49
	máximo	38,7	35,8	3,97	4,67	2,15	0,94	1,01
	mínimo	28,1	23,8	3,47	4,00	1,83	0,43	0,43
S2	promedio	47,4	33,3	6,16	6,16	0,69	-	-
	máximo	48,9	33,4	6,45	6,45	1,04	-	-
	mínimo	45,8	33,3	5,79	5,79	0,51	-	-
S2T	promedio	35,9	18,0	2,99	3,26	1,19	-	-
	máximo	38,5	25,4	3,08	3,39	1,50	-	-
	mínimo	31,3	17,1	2,79	3,15	0,93	-	-
V2	promedio	48,3	29,5	6,50	6,50	1,12	0,60	0,34
	máximo	50,7	31,7	6,94	6,94	1,40	0,85	0,39
	mínimo	45,9	27,3	6,26	6,26	0,89	0,40	0,30
V2T	promedio	36,1	17	3,51	3,89	1,44	0,18	0,26
	máximo	41,8	18,9	3,82	4,04	1,68	0,26	0,33
	mínimo	32,4	15,6	3,29	3,76	1,21	0,10	0,12
A	promedio	41,2	27,5	6,04	6,04	3,85	3,50	0,69
	máximo	41,3	36,4	6,49	6,49	4,56	4,96	0,96
	mínimo	39,9	28,9	5,55	5,55	2,78	1,90	0,48
AT	promedio	38,4	16	3,63	5,25	4,52	3,38	0,74
	máximo	46,3	16,9	3,83	7,54	7,08	6,02	1,26
	mínimo	36,0	15,0	3,37	4,00	2,92	1,51	0,43

Más allá del hormigón analizado, en todos los ensayos de flexión se verificó una disminución en la tensión de primer pico ( $f_L$ ) producto de la exposición a alta temperatura, esta tensión corresponde a la fisuración del hormigón simple. Es interesante observar al comparar las muestras de referencia de los hormigones S1 y V1 que la incorporación de fibras de vidrio incrementa significativamente la  $f_L$  lo que se atribuye a una gran adherencia con la matriz. Esto se repite, aunque en menor grado, al comparar los hormigones S2 y V2, dado que el contenido de fibras es menor. Sin embargo, cuando las probetas son dañadas por temperatura las  $f_L$  del grupo V1T son similares a las del grupo S1T. En el hormigón V2, con menor dosis de fibras, las diferencias con el hormigón simple en  $f_L$  son menores y se mantienen luego de la exposición a alta temperatura.

En la Figura 1 se compara la parte inicial de las curvas tensión – CMOD de los hormigones S1 y V1, y se indica el valor para el cual se define la tensión límite de proporcionalidad para este tamaño de probetas.

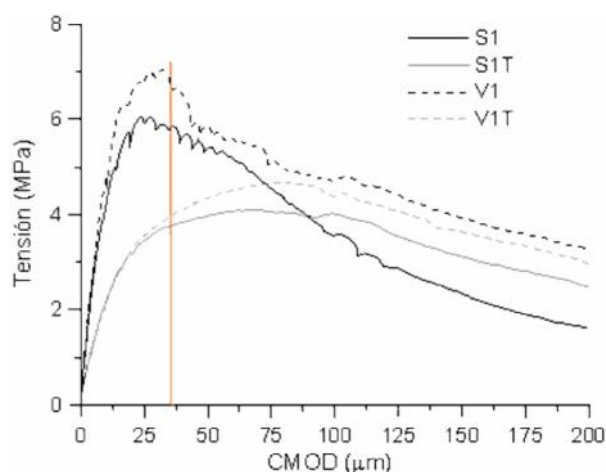


Figura 1: Curvas tensión-CMOD hormigones S1 y V1.

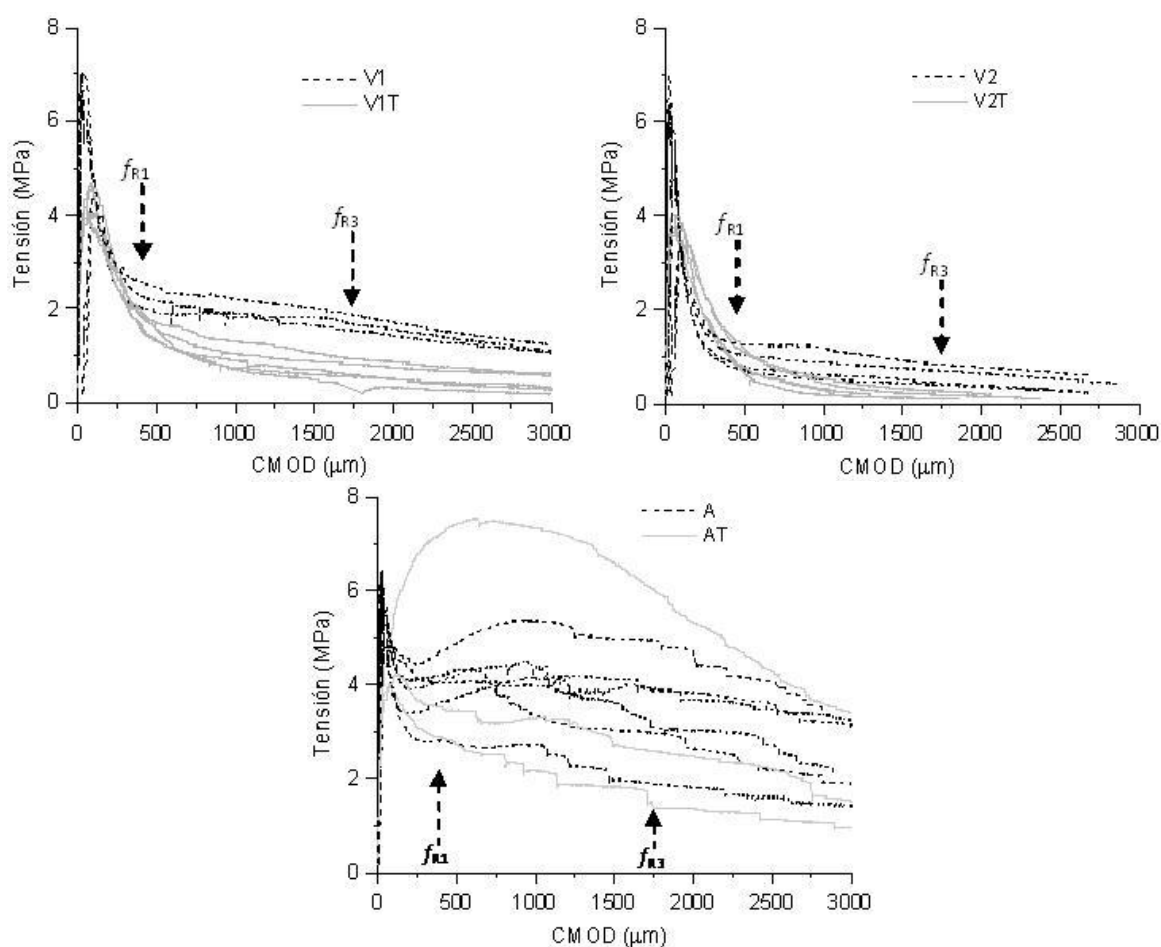


Figura 2: Curvas tensión-CMOD.

Se aprecia con claridad cómo luego de la exposición a alta temperatura se modifica la linealidad. Esto justifica por qué la carga de primera fisura no coincide con la carga máxima en el caso de las muestras de hormigón simple expuestas a alta temperatura.

La Figura 2 representa las curvas individuales tensión - CMOD obtenidas en los ensayos de flexión. Se aprecia que en el hormigón expuesto a alta temperatura la  $f_{R3}$  disminuyó tanto con 5 como con 10 kg/m<sup>3</sup> de fibras de vidrio, lo que se puede asociar con una degradación de las fibras y su adherencia.

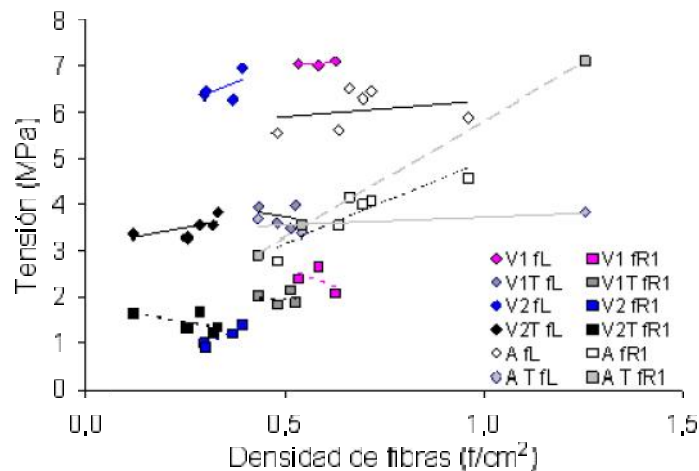


Sin embargo, cabe recordar que la principal contribución de las fibras de vidrio se produce a pequeñas aperturas de fisura. En este caso se observó que mientras  $f_{R1}$  disminuye levemente en el hormigón con mayor dosis de fibras, no sufre modificaciones en el hormigón la dosis menor (V2). En el hormigón con fibras de acero se verifica lo indicado en la literatura acerca de que la capacidad postpico se mantiene o solo se modifica ligeramente por efecto de la exposición a alta temperatura; también se observa, como es habitual, una alta variabilidad de la capacidad residual entre distintas probetas, la cual es producto de la cantidad de fibras en cada superficie de fractura, independientemente del daño.

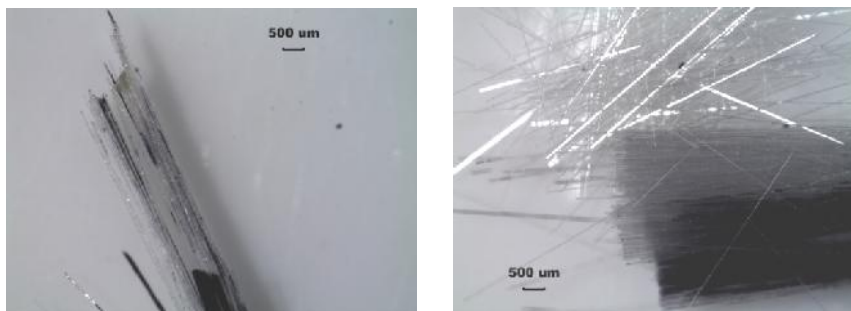
En la Figura 3 se aprecia la variación de los parámetros medidos en los ensayos de flexión en función de la densidad de fibras sobre la superficie de fractura. A medida que crece la densidad de fibras aumentan las tensiones residuales tanto en hormigones sanos como en aquellos expuestos a alta temperatura.

Comparando entre fibras de vidrio y de acero se verifica la menor variabilidad en el primer caso. También se observa que mientras se modifica la resistencia de primer pico, no existen grandes cambios en la capacidad residual entre hormigones sanos y dañados.

La Figura 4 muestra fotos 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.



**Figura 3:** Variación de las tensiones  $f_L$  y  $f_{R1}$  con la densidad de fibras.



**Figura 4:** Fibras de vidrio obtenidas de las superficies de fractura luego del ensayo de flexión: hormigón V1 (izq) y hormigón V1T (der).

## CONCLUSIONES

Para analizar potenciales aplicaciones de macrofibras de vidrio se compararon las propiedades residuales de hormigones expuestos a temperaturas de 500 °C con las obtenidas sobre hormigones sin fibras y HRF de acero. De los resultados surge que:

- El relevamiento de fisuras evidenció mayor daño en los HRF de vidrio y sin fibras que en HRF de acero.

- La afectación del módulo de elasticidad dinámico en HRF de vidrio no fue significativamente distinta a la que sufriera el HRF de acero y apenas menor que la observada sobre los hormigones sin fibras.

- Si bien el daño observado permite inferir cierta capacidad de las fibras de vidrio para mantener la capacidad post fisuración y controlar el deterioro provocado por exposición a alta temperatura, los cambios en las propiedades mecánicas no difirieron mayormente de lo observado en el hormigón sin fibras. Desde este punto de vista, y reiterando que si las fibras fueron incorporadas por otro motivo se conserva en buena medida la capacidad residual luego de la exposición a temperatura, no se vislumbra una contribución significativa de estas macrofibras en cuanto a la atenuación del daño provocado por la exposición a altas temperaturas en comparación al hormigón sin fibras.

Cabe indicar que es posible que, como ocurre con otras fibras, las macrofibras de vidrio resulten eficaces para controlar estallidos y desprendimientos que se suelen producir en casos de incendio, especialmente cuando el hormigón se encuentra saturado. Esta situación no fue analizada en las presentes experiencias.

## REFERENCIAS

- [1] Khaliq W., Kodur V., "Effectiveness of Polypropylene and Steel Fibers in Enhancing Fire Resistance of High-Strength Concrete Columns", *J Struct Eng*, 144 (3) (2018).
- [2] Abaeian R., Behbahani H.P., Moslem S.J., "Effects of high temperatures on mechanical behavior of high strength concrete reinforced with high performance synthetic macro polypropylene (HPP) fibres", *Con Build Mat* 165 (2018), 631-638.
- [3] Lau A., Anson M., "Effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete", *Cem Concr Res* 36 (2006) 1698-1707
- [4] Zheng W., Luo B., Wang Y., "Compressive and tensile properties of reactive powder concrete with steel fibres at elevated temperatures", *Constr Build Mat* 41 (2013) 844-851
- [5] Khaliq W., Kodur V., "Thermal and mechanical properties of fiber reinforced high performance self-consolidating concrete at elevated temperatures", *Cem Concr Res* 41 (2011) 1112-1122.
- [6] Fike R., Kodur V., "Enhancing the fire resistance of composite floor assemblies through the use of steel fiber reinforced concrete", *Eng Struct* 33 (2011) 2870-2878.
- [7] Giaccio G, Zerbino R., Mechanical behaviour of thermally damaged high-strength steel fibre reinforced concrete, *Mater and Struct* 38 (2005) 335-342.
- [8] Ruano G., Isla F., Luccioni B., Zerbino R., Giaccio G., "Steel fibers pull-out after exposure to high temperatures and its contribution to the residual mechanical behavior of high strength concrete", *Constr Build Mat* 163 (2018), 571-585.
- [9] Zerbino, R., Torrijos, M.C., Giaccio, G., "On the residual properties of damaged FRC", en *Fibre Concrete 2017*. IOP Conf. Series: Mater Science Eng 246 (2017) 012007
- [10] Zerbino R., Giaccio G., Barragán, B.E, Peyrú, E. "Hormigones reforzados con macrofibras de vidrio: comportamiento mecánico y aplicaciones" 20ª Reunión Técnica AATH, Concordia, Ed: J. Sota, 167-174.
- [11] EN 14651 'Precast concrete products - test method for metallic fibre concrete - Measuring the flexural tensile strength', European Standards (2005).