

CONTRIBUCIÓN DE LAS FIBRAS A LA RESISTENCIA AL CORTE EN ELEMENTOS DE HORMIGÓN ARMADO EN FLEXIÓN

G. Giaccio¹, R. Zerbino², M.C. Torrijos², A. Conforti³, E. Cuenca⁴

¹ CIC. LEMIT-CIC, Fac. de Ingeniería UNLP, La Plata, Argentina, ggiaccio@ing.unlp.edu.ar

² CONICET. LEMIT-CIC, Fac. de Ingeniería UNLP, La Plata, Argentina,

³ DICATAM, Universidad de Brescia, Italia; ⁴ DICA, Politécnico de Milán, Italia.

RESUMEN

La incorporación de fibras al hormigón mejora el comportamiento al corte permitiendo reemplazar parcial o totalmente el refuerzo transversal; en ocasiones el modo de falla puede variar de corte (frágil) a flexión (dúctil). Ante la escasa información acerca del comportamiento al corte de vigas de hormigón armado reforzadas con fibras afectadas por procesos de degradación, se inició un estudio incluyendo vigas dañadas por reacción álcalis-sílice y probetas sanas. Este trabajo presenta los primeros resultados sobre hormigones sin dañar que muestran la contribución de las fibras. Se fabricaron vigas con barras de acero convencionales como refuerzo principal de flexión, incorporando macrofibras de acero o poliméricas; y como referencia elementos similares sin fibras. Las vigas fueron cargadas hasta la falla por corte, registrando la respuesta carga-deformación y el patrón de fisuración. Vigas semejantes con agregados reactivos y contenidos elevados de álcalis para propiciar el daño, constituyen la segunda parte del proyecto.

Palabras claves: control de fisuración, hormigón armado, comportamiento de corte, macrofibras.

INTRODUCCIÓN

La incorporación de fibras al hormigón mejora el comportamiento al corte, permitiendo reemplazar parcial o totalmente el refuerzo transversal convencional. Las fibras, generan efectos de puenteo que conducen a una mayor resistencia al corte y, en algunos casos, el modo de falla se puede transformar de corte (modo frágil) a flexión (modo dúctil).

Muchos trabajos demuestran que el uso combinado de Hormigón Reforzado con Fibras (HRF) en vigas y elementos estructurales con armaduras convencionales para el refuerzo longitudinal favorecen el control de flechas [1, 2], el control de fisuras [3, 4], la resistencia al corte [5-10] y, en ocasiones, la capacidad de carga en flexión [11]. Ante esfuerzos de corte las fibras favorecen el mecanismo de entrecruzamiento mecánico que ejercen los agregados al mantener las fisuras más cerradas. El uso de HRF mejora el comportamiento al corte tanto en elementos de hormigón armado como pretensado. Varias publicaciones de los últimos 25 años confirman la efectividad de las fibras de acero como refuerzo de corte [5-10]. La literatura documenta muchos casos de aplicación de HRF de acero, pero también las macrofibras sintéticas demuestran ser alternativas competitivas [6]. Entre ellas las más utilizadas son las macrofibras de polipropileno, ampliamente disponibles en el mercado en la actualidad. El *fib* Model Code 2010 [12] brinda pautas precisas en cuanto a la valoración de la contribución de las fibras frente a esfuerzos de corte en diferentes tipos de elementos estructurales.

Las fibras pueden reemplazar parcial o totalmente los estribos incorporados para sobrellevar los esfuerzos de corte en diversos elementos de hormigón armado con particulares ventajas como la posibilidad de reducir la congestión del refuerzo en secciones críticas, como uniones de viga-columna en aplicaciones sísmicas. Otros beneficios son la reducción en el tiempo y los costos de construcción, especialmente significativos en regiones con elevados costos de mano de obra o incluso ante la escasez de mano de obra, comparados con lo que demanda el doblado y colocación de los estribos. Además, el HRF se puede incorporar en secciones delgadas o de forma irregular, como paneles arquitectónicos, donde puede ser muy difícil colocar estribos. Esto es esencial para la realización de muchos elementos estructurales secundarios en los que no se requiere un refuerzo convencional mínimo para el equilibrio.

Por lo expuesto, el uso combinado de fibras en hormigón armado convencional o en hormigón pretensado es particularmente interesante para sobrellevar esfuerzos de corte, ya que aumenta la resistencia a primera fisura y la resistencia última, reduce anchos de fisura, aporta al hormigón ductilidad en la zona de postfisuración y representa una alternativa viable en elementos estructurales donde es complicado colocar armadura transversal. Sin embargo, no existe mayor información en cómo continúan trabajando las fibras en el eventual caso que los elementos estructurales resulten objeto de daño por procesos de degradación.

Se inició un estudio experimental que tiene por objetivo valorar y comparar el efecto de las fibras frente a esfuerzos de corte en vigas de hormigón armado convencional y las mismas vigas luego de haber sufrido un proceso de degradación por reacción álcali-sílice. Este trabajo muestra la primera parte del estudio donde se aprecia la respuesta del hormigón sin dañar.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Vigas de hormigón armado

La Figura 1 detalla la geometría y configuración de carga adoptadas para el estudio. Se eligieron como elementos vigas de 150x100x900 mm que incluyen, para forzar la rotura por corte y evitar la rotura por flexión, dos barras de 12 mm de diámetro como armadura principal (el canto útil es de 125 mm y el porcentaje de armadura longitudinal igual a 1,8 %) que se anclan por soldadura a dos planchuelas de 20 mm de espesor en cada extremo. Las vigas fueron cargadas a flexión en 3 puntos sobre una luz de 800 mm. La relación entre la luz de corte y el canto útil de la viga era de 3,2 con el objetivo de provocar un fallo por cortante debido a una fisura de flexión-cortante.

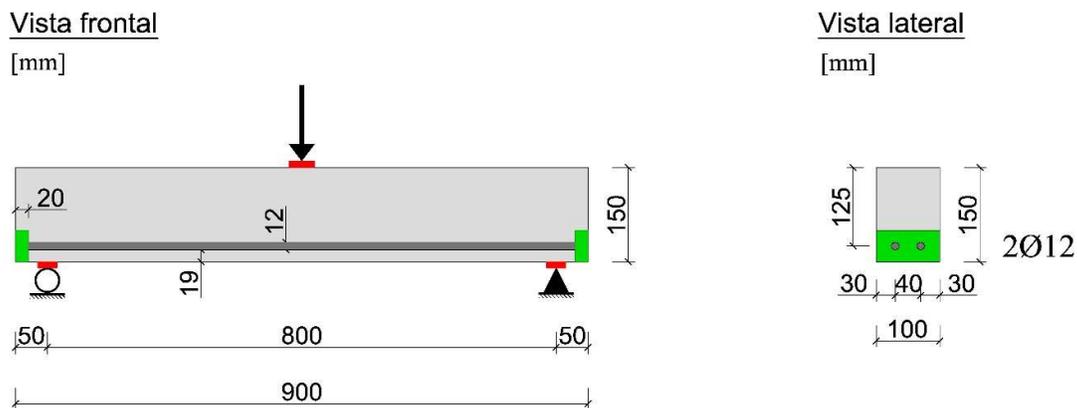


Figura 1: Descripción del ensayo y geometría de la viga.

Para el ensayo fueron instrumentadas con extensómetros tipo LVDT dispuestos a 45° sobre las 4 zonas de fisuración por corte, y otros sensores que medían la flecha central tomando como referencia un marco fijo a la altura del eje neutro en coincidencia con los apoyos (ver esquema en Figura 2).

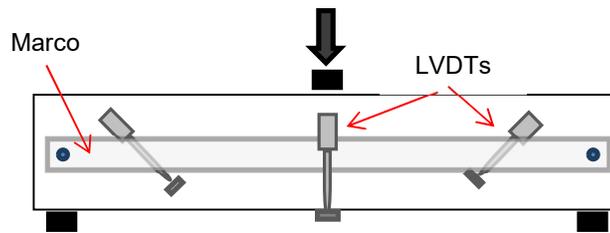


Figura 2: Esquema de la instrumentación de los ensayos.

Materiales y mezclas

Se seleccionaron cuatro tipos de hormigón, un hormigón de base sin fibras (RC) y tres HRF obtenidos incorporando 25 y 40 kg/m³ de fibras de acero (S25, S40) y 8 kg/m³ (P8) de macrofibras poliméricas al hormigón de base. En la primera serie, que es objeto de este trabajo, dicho hormigón de base fue elaborado con relación a/c 0,55; 300 kg/m³ de cemento CPN (Na₂O_{eq} 0,73 %), arena silíceo natural y piedra partida granítica de 19 mm de tamaño máximo. Las Tablas 1 y 2 muestran las fibras empleadas y los hormigones elaborados.

Con cada hormigón se moldearon tres vigas de hormigón armado conforme fue descrito en el apartado anterior, seis cilindros de 100x200 mm para evaluar la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad y tres prismas de 100x150x600 mm para caracterizar la respuesta en flexión según los lineamientos de la norma EN 14651 [13]

Todas las probetas fueron compactadas por vibrado externo y protegidas después del moldeo para evitar la evaporación del agua. Tanto las vigas de hormigón armado como el resto de las probetas se desmoldaron a las 24 horas, se cubrieron con un paño húmedo de algodón y se colocaron en bolsas plásticas para garantizar una humedad apropiada.

Tabla 1: Características de las fibras empleadas.

Nomenclatura de la fibra	Acero 50/1,00	Polipropileno 58/0,67
Forma	Hooked-end	Relieve continuo
Longitud, l (mm)	50	58
Diámetro, φ (mm)	1,00	0,67
Relación de aspecto, l/φ	50	86
Resistencia a tracción (MPa)	> 1100	> 640
Módulo de elasticidad (GPa)	210	6,8
Densidad (kg/m ³)	7850	910

Tabla 2: Serie 1: hormigones.

Serie	Tipo	Fibras		Asentamiento (mm)
		Contenido (kg/m ³)	Volumen (%)	
RC	-	0	0	70
S25	Acero 50/1.00	25	0,32	45
S40	Acero 50/1.00	40	0,51	55
P8	Polipropileno 58/0.67	8	0,88	20

RESULTADOS

Caracterización de los hormigones

Los ensayos se realizaron a la edad de 4 meses. La Figura 3 muestra curvas típicas tensión - apertura de fisura (CMOD) de los hormigones al momento de ensayar las vigas de hormigón armado. La Tabla 3 indica los valores promedio de la resistencia a compresión, del módulo de elasticidad, y de las tensiones de primer pico (f_L) y las tensiones residuales CMOD iguales a 0,5 y 2,5 mm (f_{R1} , f_{R3}). En lo que se refiere al corte, de acuerdo con lo indicado en el *fib* Model Code 2010 [12], f_{R3} es el parámetro más significativo, dado que el modo de falla por corte es un Estado Límite Último (E.L.U). Se observa que el valor máximo de f_{R3} fue alcanzado por el hormigón P8 y que el rango de valores estudiados varía entre 3,3 MPa y 4,5 MPa.

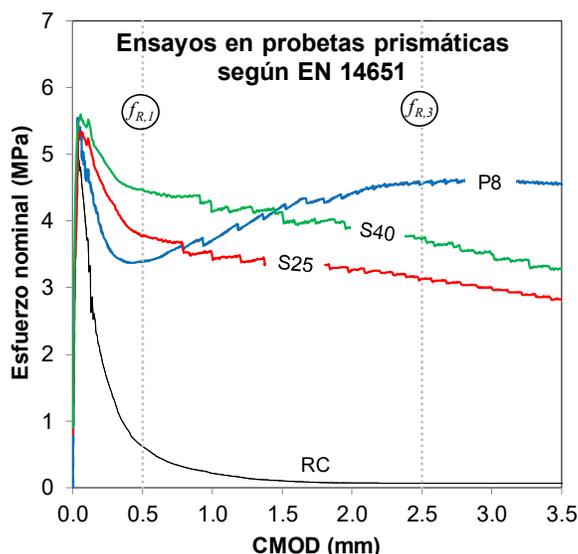


Figura 3: Resistencia residual a flexotracción de los hormigones (EN 14651).

Tabla 3: Propiedades mecánicas de los hormigones empleados (entre paréntesis COV)

Serie	f_c (MPa)	E (GPa)	f_L (MPa)	f_{R1} (MPa)	f_{R3} (MPa)
RC	50,6	36,2 (0,06)	5,04 (0,05)	-	-
S25	54,1	36,2 (0,01)	5,36 (0,03)	3,79 (0,25)	3,13 (0,36)
S40	50,3	39,0 (0,03)	5,60 (0,05)	4,46 (0,11)	3,74 (0,14)
P8	50,2	36,4 (0,12)	5,44 (0,06)	3,39 (0,14)	4,55 (0,35)

Respuesta de las vigas de hormigón armado en flexión

Todos los ensayos fueron llevados a cabo aplicando desplazamientos monótonamente crecientes hasta alcanzar la carga última. El desarrollo del mapa de fisuración fue analizado a distintos escalones de carga. La Figura 4 muestra una serie de vigas al finalizar los ensayos donde puede observarse tanto la disposición del ensayo e instrumentación como el aspecto de una típica fisura de corte.



Figura 4: Desarrollo de ensayos sobre vigas de hormigón armado.

En la Figura 5 se muestran las curvas carga-flecha en el centro de la viga (excluyendo el peso propio) obtenidas en los ensayos de vigas de hormigón armado de las series RC, S25, S40 y P8. La Tabla 4 muestra los resultados experimentales más relevantes: el modo de falla; la carga máxima (P_{max}) y la carga de fisuración por corte (V_u), expresada en valor absoluto y en términos relativos de la carga del hormigón RC ($V_u/V_{u,RC}$). Las nueve vigas ensayadas mostraron un fallo por corte. Se observa como la presencia de fibras aumentó notablemente la resistencia última de los elementos estructurales (entre 45 y 58 %). En particular, el incremento de la resistencia al corte resulta proporcional a la resistencia residual f_{R3} , parámetro que representa el Estado Límite Último (ver Tabla 3 y Figura 3). En efecto, el HRF P8, caracterizado por el máximo valor de f_{R3} , es el que alcanzó un mayor aumento de la resistencia al corte (58 %). Cabe resaltar que aún con bajos contenidos de fibras de acero (S25) se produjeron aumentos significativos en la resistencia al corte.

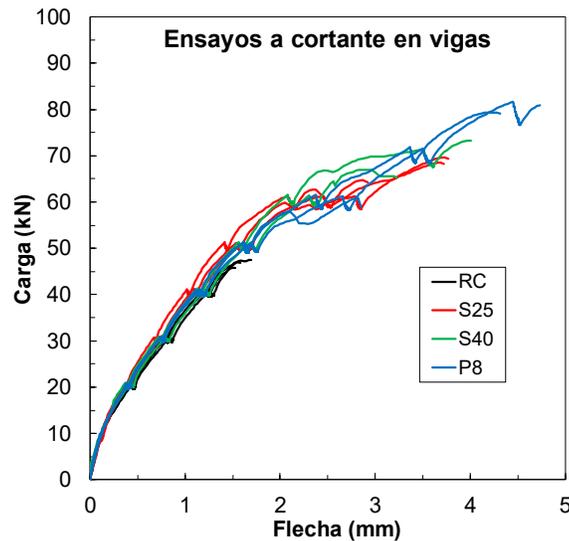


Figura 5: Curvas carga-flecha promedio en vigas de hormigón armado correspondientes a cada una de las mezclas.

Tabla 4: Resultados sobre vigas de hormigón armado (COV entre paréntesis).

Serie	Modo de falla	P_{max} (kN)	V_u (kN)	$V_u/V_{u,RC}$
RC	Corte	46,8 (0,02)	23,5	1,00
S25	Corte	67,6 (0,04)	34,0	1,45
S40	Corte	70,2 (0,06)	35,2	1,50
P8	Corte	74,0 (0,15)	37,1	1,58

Se destaca que todos los elementos reforzados con fibras registraron un aumento significativo de la rigidez post-fisurativa, debido a que la presencia de las fibras reduce el ancho de las fisuras y favorece la transmisión de esfuerzos residuales de tracción, ya sean flexión o de corte. Este aspecto resulta de gran importancia en el comportamiento en servicio del elemento estructural ya que, a una mayor rigidez le corresponde una menor deformación (para un mismo valor de carga). Además, la adición de fibras dio lugar, en todas las vigas, a una propagación y desarrollo estable de las fisuras de corte, evidenciando que los elementos con fibras muestran en general un comportamiento dúctil, caracterizado por una flecha máxima en el centro de la viga dos veces mayor respecto a la registrada por la viga fabricada con hormigón sin fibras. También se observa que, al aumentar la cantidad de fibras, mejora el control de las fisuras y, en particular, aumenta la capacidad de carga en forma notable, a pesar de que la fisura se desarrolle en forma significativa.

En todos los elementos reforzados con fibras, la aparición y el desarrollo de las fisuras de flexión y de corte fueron similares. Posterior al desarrollo de las fisuras de flexión en la porción central del elemento, se desarrollaron numerosas fisuras de flexión-corte (en la luz de corte). En las vigas de hormigón de referencia sin fibras, la falla se produjo junto con la aparición de la primera fisura de corte en uno de los dos lados de la viga. La Figura 6 muestra la imagen rebatida de la superficie de una viga del hormigón RC y otra del S40 con el detalle del cuadro de fisuración. Se ve claramente cómo el modo de falla se corresponde con lo esperado, es decir, un modo de falla por flexión-corte.

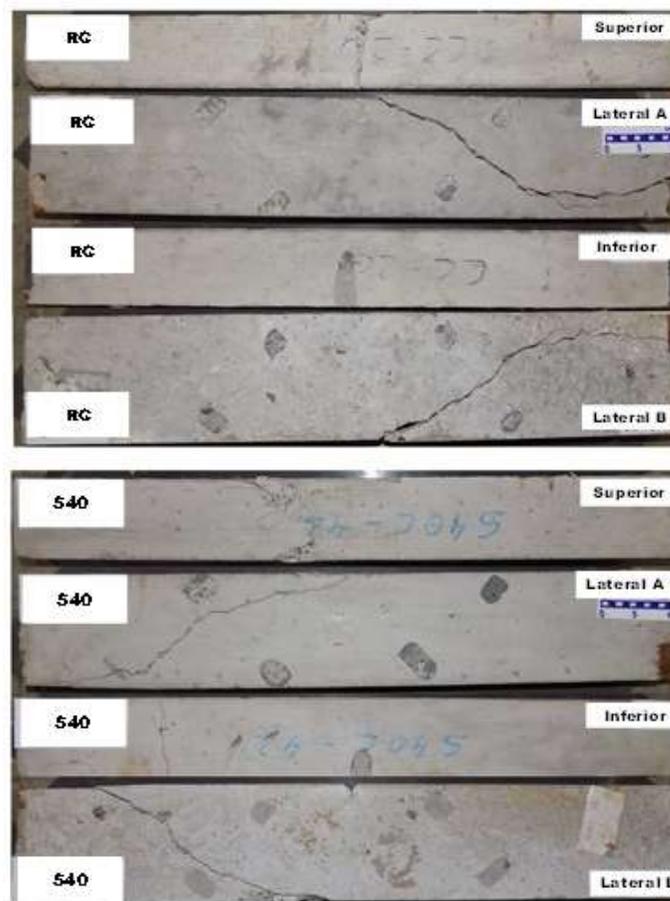


Figura 6: Imagen de la fisura de corte que generó el colapso de las vigas.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha analizado el comportamiento al corte de vigas de hormigón armado reforzado con fibras sin armadura transversal. Tras el análisis de los resultados obtenidos se desprenden las siguientes conclusiones:

- Las vigas 150x100x900 mm fueron ensayadas a tres puntos (biapoyadas con carga puntual centrada) con un vano de corte de 3,2 veces el canto útil garantizando un fallo con típicas fisuras de flexión-corte;
- La incorporación de fibras aumenta significativamente la resistencia a corte incluso con bajas cuantías de fibras;
- Las macrofibras, tanto las de acero como las de polipropileno, garantizaron una estabilización y control de la apertura de fisura de corte permitiendo un importante aumento de la capacidad portante.
- Los ensayos experimentales han confirmado que, la resistencia residual f_{R3} , es un parámetro fundamental para la determinación de la resistencia al corte. Esto se debe al hecho de que la falla por corte constituye un Estado Límite Último y que la apertura de fisura es significativa en el momento del colapso.

Es importante recalcar que, en línea con la filosofía del actual *fib* Model Code [12], los resultados sobre un HRF no se deben asimilar al tipo de material que constituye la fibra porque dentro de cada familia (de acero, poliméricas, de vidrio) existen variadas alternativas, que pueden diferir tanto en las dosis necesarias como en su eficiencia. Por tal motivo lo que se debe valorar es la performance del compuesto (el HRF) y dicha evaluación se puede realizar mediante diversos métodos de ensayos [14], siendo el propuesto por *fib* Model Code y utilizado en este trabajo el indicado en la norma EN 14651 [13] de flexión sobre vigas entalladas.

La segunda parte de este trabajo permitirá comparar los resultados aquí presentados con los obtenidos en vigas dañadas por reacción álcali-sílice (ASR). Esto permitirá establecer la incidencia de los efectos de la reacción álcali-sílice en la resistencia a cortante de elementos estructurales de hormigón reforzado con fibras.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a las empresas Cementos Avellaneda, MACCAFERRI, SIKA Argentina y BAUTEC por la colaboración en el suministro de materiales para el desarrollo del programa experimental. Asimismo, agradecer al personal del LEMIT-CIC en particular a los Ings. A. Rossetti, J. Vivas y al Sr. P. Bossio, y a la financiación de los proyectos CONICET PIP112-201501-00861 y UNLP 11/I244.

REFERENCIAS

- [1] Meda A, Minelli F, Plizzari GA, "Flexural behaviour of RC beams in fibre reinforced concrete", *Compos Part B*, 43(8), (2012), 2390-2937.
- [2] Amin A, Foster SJ, Kaufmann W, "Instantaneous deflection calculation for steel fibre reinforced concrete oneway members", *Eng Struc*, 131, (2017), 438-445
- [3] Abrishami HH, Mitchell D, "Influence of steel fibers on tension stiffening", *ACI Struc J*, 94, (1997), 769-773
- [4] Bischoff PH, "Tension stiffening and cracking of steel fiber-reinforced concrete", *J Mat Civ Eng*, 15(2), (2003), 174-182
- [5] Dinh HH, Parra-Montesinos GJ, Wight J, "Shear behaviour of steel fibre-reinforced concrete beams without stirrup reinforcement", *ACI Struc J*, 107, (2010), 597-606.
- [6] Cuenca E, Conforti A, Minelli F, Plizzari G, Navarro Gregori J, Serna P, "A material-performance-based database for FRC and RC elements under shear loading", *Mater Struct*, 51, (11), (2018).
- [7] Susetyo J, Gauvreau P, Vecchio FJ, "Effectiveness of steel fiber as minimum shear reinforcement", *ACI Structural Journal*, 108 (4), (2011), 488-496.

- [8] Swamy RN, Jones R, Chiam A, "Influence of steel fibres on the shear resistance of lightweight concrete T-beams", ACI Structural Journal, 90 (1), (1993), 103-114.
- [9] Choi K-K, Park H-G, Wight J, "Shear strength of steel fibre-reinforced concrete beams without web reinforcement", ACI Structural Journal, 104 (1), (2007), 12-22.
- [10] Padmarajaiah SK, Ramaswamy A, "Behavior of fiber-reinforced prestressed and reinforced high-strength concrete beams subjected to shear", ACI Structural Journal, 98 (5), (2001), 752-761.
- [11] Conforti A, Zerbino R, Plizzari GA, "Influence of steel, glass and polymer fibers on the cracking behavior of reinforced concrete beams under flexure", Struct Conc, 20(1), (2019), 133-143
- [12] *fib* Model Code 2010 - Final draft. fib CEB-FIP bulletin 65-66. Fédération Internationale du Béton, Switzerland, (2012).
- [13] EN 14651 Precast concrete products-test method for metallic fibre concrete—measuring the flexural tensile strength. European Standard, (2005).
- [14] Zerbino R, "Hormigón reforzado con fibras", AATH, Serie Hormigones Especiales, ISBN 978-987-47035-1-4, (2020), 344 p.