

Estudio experimental de la resistencia al corte de vigas de gran canto de hormigón reforzado con fibras

Experimental study of shear resistance of fiber reinforced concrete deep beams

Miqueas Denardi  Universidad Tecnológica Nacional, Concepción del Uruguay, Argentina. denardim@frcu.utn.edu.ar
(autor de contacto)

Viviana Rougier  Universidad Tecnológica Nacional, Concepción del Uruguay, Argentina.

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados de una campaña experimental en la que se evaluó la contribución en resistencia y ductilidad de las fibras de acero e híbridas en el comportamiento a corte de vigas de gran canto (VGC). Para ello, se ensayaron a flexión, VGC de hormigón armado con barras y estribos tradicionales de acero, y vigas de hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA) y de hormigón reforzado con fibras híbridas (HRFH) con una reducción del 33% del refuerzo de estribos verticales y sin estribos horizontales. Se observó que las VGC de hormigón con fibras híbridas alcanzaron cargas máximas de entre un 4 % y un 7% mayores a las de las vigas con armadura mínima reglamentaria a corte y mostraron una mayor resistencia residual post pico de cargas.

Palabras clave: Viga de gran canto; comportamiento a corte; hormigón reforzado con fibras; fibras híbridas; campaña experimental.

ABSTRACT

This work presents results of an experimental campaign in which the strength and ductility contribution of the steel and polypropylene fibers in shear behavior of DB was evaluated. DB with traditional steel bars and stirrups, and steel fiber reinforced concrete (SFRC) and hybrid fiber reinforced concrete (HRFH) beams with a 33% reduction in reinforcement were tested in flexion. with vertical stirrups and without horizontal stirrups. The DB of concrete with fibers reached maximum loads between 4% and 8% higher than the beams with minimum shear reinforcement and showed a higher residual strength after peak load.

Keywords: Deep Beams; shear behavior; fiber reinforced concrete; hybrid Fibers; experimental study.

Cómo citar este artículo/Citation: Miqueas Denardi, Viviana Rougier (2024). Estudio experimental de la resistencia al corte de vigas de gran canto de hormigón reforzado con fibras. Informes de la Construcción, 76 (576): 6531. <https://doi.org/10.3989/ic.6531>

Copyright: © 2024 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Recibido/Received: 09/06/2023
Aceptado/Accepted: 24/10/2024
Publicado on-line/Published on-line: 28/01/2025

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón es un material frágil, con una resistencia a la tracción considerablemente menor que a compresión. El uso de fibras como agregado a la masa de hormigón es una alternativa posible útil y económica al empleo de barras de acero en VGC. Numerosas investigaciones demuestran que su uso aumenta la tenacidad y la capacidad del hormigón a resistir esfuerzos de tracción y corte Lantsoght E. 2019 (1), Cuenca E. 2015 (2), Heek et al. 2017 (3), Singh et al. 2014 (4), ACI 544 1.R (5), Katzer J. 2006 (6). El uso de macrofibras de polipropileno en particular ha sido investigado por autores como Kotecha P. 2019 (7) y Ortiz F. 2018 (8), demostrando que al igual que las de acero, logran reemplazar en alguna proporción la armadura tradicional de acero a corte. Para los casos de vigas en los que se combina la armadura tradicional con macrofibras de polipropileno (PP), se aumenta la carga máxima Ortiz F. 2018 (8).

El Reglamento Argentino de estructuras de hormigón CIRSOC 201-05 (9) define a las VGC, como aquellos elementos cargados en un borde y apoyados en el opuesto de tal manera que puedan generar bielas de compresión entre las cargas y los apoyos, y que se de alguna de las siguientes condiciones (Figura 1):

- a) que las luces libres, l_n , sean iguales o menores que 4 veces la altura total (h) del elemento ($l_n \leq 4h$), o bien
- b) que las zonas cargadas con cargas concentradas estén ubicadas a una distancia a desde el borde de la viga, igual o menor que 2 veces la altura h ($a \leq 2h$).

Las VGC se deben diseñar considerando la distribución no lineal de la deformación. Entre los procedimientos para su diseño se tiene el método de bielas y tirantes, adoptado por el Reglamento Argentino CIRSOC 201-05 (9) Apéndice A y diferentes códigos a nivel mundial como el ACI 318 S-14 (10).

El método de bielas y tirantes permite representar con un aceptable grado de aproximación, el comportamiento de aquellas zonas particulares de las estructuras en donde no es válida la hipótesis de Bernoulli y, por lo tanto, no se cumple con la distribución lineal de deformaciones en la sección o zona de estudio. El método está basado en el teorema de límite inferior de cálculo plástico y se reduce a encontrar los caminos de las fuerzas a través de tracciones y compresiones, es decir idealizando los campos tensionales (isostáticas de compresión y tracción), mediante un conjunto de bielas comprimidas de hormigón y tirantes traccionados de acero, que se conectan a través de nodos de forma de poder transmitir las cargas hasta los apoyos. Es decir, interpreta la resistencia de la viga como el trabajo de un reticulado formado por bielas comprimidas y traccionadas. En la Figura 1 se muestra un posible modelo de bielas y tirantes a aplicar en la resolución de una VGC con dos cargas puntuales. En dicha figura las líneas de trazo discontinuo delimitan las bielas comprimidas y el tirante es representado por la línea continua inferior. Cuando se hace referencia a un “posible modelo” se quiere destacar que siempre existirán varios trazos posibles para idealizar el comportamiento estructural y entre varios modelos tentativos, se debería optar por aquel que produzca el menor trabajo interno de deformación.

La mayor parte de las cargas que soportan las VGC se transmiten directamente a los apoyos debido a la pequeña proporción entre la luz de corte (distancia desde el punto de aplicación de

la carga al centro del apoyo) y la altura total. En consecuencia, la rotura generalmente es causada por corte, es decir, son las tensiones de corte las que controlan la resistencia de una VGC. Por esto, los diferentes códigos de diseño establecen una cuantía mínima para el refuerzo a corte que garantice tanto los requerimientos de resistencia como de servicio (CIRSOC 201 (9), ACI 318 S-14 (10), Eurocódigo, EN 1992-1-1 (11)). Sin embargo, se ha demostrado que la capacidad resistente de las vigas de gran canto (VGC) aumenta con la resistencia del hormigón y con el incremento de la cuantía del refuerzo a corte (Aguilar et al. 2002 (12), Mohammad et al. 2012 (13), Choi et al. 2012 (14)). Pero a su vez, el incremento de la cuantía puede provocar grandes congestionamientos de refuerzo. Por ejemplo, las vigas de acoplamiento en estructuras sismorresistentes requieren una gran cantidad de refuerzo de acero, tanto diagonal como transversal. Ello genera congestionamiento de armaduras y dificultades constructivas, asociados a la ubicación de las barras diagonales y la escasa separación del refuerzo transversal.

Los hormigones reforzados con fibras surgen entonces, como alternativa constructiva. Además, su uso, tiene otros beneficios según algunas investigaciones como ahorros significativos de tiempo y mano de obra, buen control de calidad del material, y reducción o eliminación de la armadura mínima de corte (Canbolat et al. 2005 (15), Parra Montesinos, 2006 a (16), Parra Montesinos et al., 2006 b (17), Sagar M. et al., 2021 (18), Tuchscherer y Quesada 2015 (19), Albidah et al. 2019 (20)). Otras investigaciones han demostrado también, la efectividad del uso de fibras de acero, polipropileno e híbridas como agregado al hormigón en VGC (Chittaranjan N. 2021 (21) Suhail et al., 2017 (22), Moradi y Esfahani 2017 (23), Campione G. 2012 (24), Madan et al., 2007 (25), Smarzewski P. 2019 (26)).

El estudio del comportamiento mecánico de las VGC resulta de gran importancia debido a sus numerosas aplicaciones en distintas estructuras. Sin embargo, en la bibliografía se encuentran muy pocos antecedentes de estudios de VGC de HRFH, empleando fibras de acero y fibras sintéticas Smarzewski P. 2019 (26). Por ello, resulta necesario contar con resultados de pruebas experimentales que reporten los beneficios que el uso de este material compuesto tiene en el comportamiento mecánico de las VGC y la posibilidad del reemplazo parcial o total de la armadura mínima de corte.

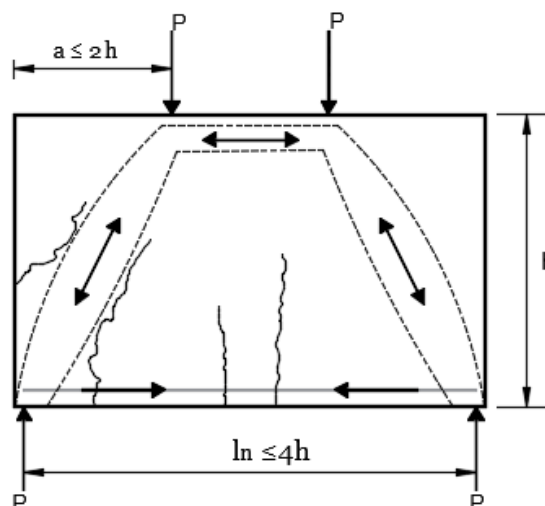


Figura 1. Ejemplo de viga de gran canto sometida a cargas concentradas: cargas, reacciones y esfuerzos internos más importantes (CIRSOC 201-05 (9))

En este trabajo se muestran los resultados de una campaña experimental en la que se evalúa la efectividad del uso de fibras de acero e híbridas (de acero y macrofibras de polipropileno) como agregado al hormigón en VGC, en reemplazo parcial de la armadura tradicional de barras de acero. La efectividad del uso de dichas fibras se evaluó a partir del análisis de curvas carga – desplazamiento, resistencia residual post pico de carga y modos de rotura.

2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

El programa experimental consistió en la elaboración y ensayo a flexión en tres puntos de vigas con 3 tipos diferentes de hormigón: simple, hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA) y hormigón reforzado con fibras de acero y polipropileno (HRFH). Este programa se desarrolló en tres etapas en las que se analizaron 12 VGC cada una. En total, se estudiaron 36 vigas, de las cuales:

- A) 18 vigas elaboradas con hormigón armado sin fibras: 9 con armadura de flexión y corte en la dirección paralela y perpendicular a la luz del tramo, y 9 con armadura de flexión y armadura reducida de corte en la dirección perpendicular a la luz del tramo.
- B) 12 vigas con HRFA según dos volúmenes de fibras de acero: 3 con 1% del volumen (80 kg/m³) y 9 con 0.5% del volumen (40 kg/m³). Todas con armadura a corte reducida.
- C) 6 especímenes restantes se elaboraron con HRFH con 0.5% del volumen de fibras de acero y 0.5% de macrofibras de polipropileno.

Además, se elaboraron y ensayaron probetas cilíndricas de hormigón con y sin fibras y vigas prismáticas con entalla de hormigón reforzado con fibras de polipropileno (de acuerdo con la norma EN 14651:2005 (27)) para caracterizar el comportamiento mecánico del hormigón.

En la Tabla 1 se presenta la descripción de los especímenes ensayados en cuanto a denominación, contenido de fibras en porcentajes de volumen y cuantía de barras de acero. En la misma tabla se pueden ver las tres etapas en las que se dividió el programa experimental. Una primera etapa donde se construyeron especímenes de hormigón armado y de hormigón armado con un solo tipo de fibras. Y una segunda y tercera etapas en las que se elaboraron además vigas de hormigón armado con dos tipos de fibras, acero y polipropileno. La nomenclatura utilizada es la siguiente: V, hace referencia a las VGC. La sigla AC, representa a los especímenes de hormigón armado sin fibras con armadura a corte reglamentaria según CIRSOC 201-05 (9), mientras que la AR hace referencia a las vigas de hormigón armado sin fibras y armadura a corte reglamentaria reducida. Los especímenes de hormigón reforzado con fibras de acero son representados con la nomenclatura HRFA, en los que 05 y 1, representa el porcentaje de adición de fibras en volumen que es 0.5% y 1% respectivamente. Por su parte, las letras HRFH representan los especímenes de hormigón reforzado con fibras híbridas.

Seguidamente, se describen los especímenes, propiedades de los materiales y procedimiento de ensayo e instrumental empleado.

2.1. Características de los especímenes ensayados

El diseño de las VGC se realizó siguiendo las directrices del Apéndice A Cirsoc 201-05 (9). Cada espécimen tiene una longitud de 600 mm con una luz entre apoyos de 500 mm y una sección transversal rectangular de 300 mm de alto y 100 mm de ancho. La luz de corte (distancia horizontal entre el punto de aplicación de la carga y el centro del apoyo) es de 250 mm y la relación entre la luz libre y la altura es de 1.67. Según los reglamentos CIRSOC 201-05 (9) y ACI 318 S-14 (10), establecen que dicha relación debe ser menor que 4, para que una viga sea considerada de gran canto.

Tabla 1. Detalle de los especímenes

Etapas	Especímenes		Fibras (% de volumen)		Armadura de corte	
	Cantidad	Nomenclatura	Acero	Polipropileno	Horizontal Cuantía %	Vertical Cuantía %
I	3	V-AC	–	–	0.1885 (mínima reglamentaria)	0.5654 (mínima reglamentaria)
	3	V-AR	–	–	–	0.3769
	3	V-HRFA-05	0.5	–	–	0.3769
	3	V-HRFA-1	1	–	–	0.3769
II	3	V-AC	–	–	0.1885 (mínima reglamentaria)	0.5654 (mínima reglamentaria)
	3	V-AR	–	–	–	0.3769
	3	V-HRFA-05	0.5	–	–	0.3769
	3	V-HRFH	0.5	0.5	–	0.3769
III	3	V-AC	–	–	0.1885 (mínima reglamentaria)	0.5654 (mínima reglamentaria)
	3	V-AR	–	–	–	0.3769
	3	V-HRFA-05	0.5	–	–	0.3769
	3	V-HRFH	0.5	0.5	–	0.3769

En la Figura 2 se muestran detalles constructivos de un espécimen con armadura reglamentaria de flexión y corte y en la Figura 3 otro con armadura de corte reducida: sin refuerzo horizontal a corte y con 4 estribos verticales en lugar de 6 (lo que implica una reducción del 33% en la cuantía vertical referida a la sección total de hormigón).

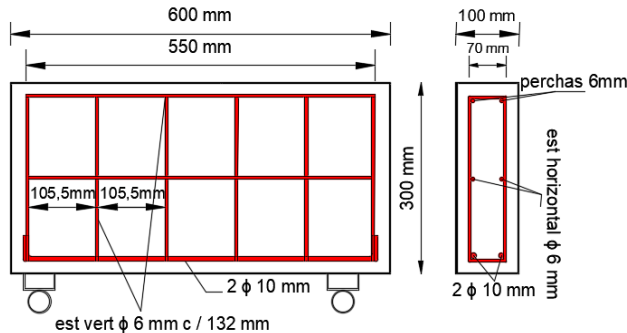


Figura 2. Geometría y detalle de armado de especímenes con armadura de corte reglamentaria según norma CIRSOC 201-05 (9)

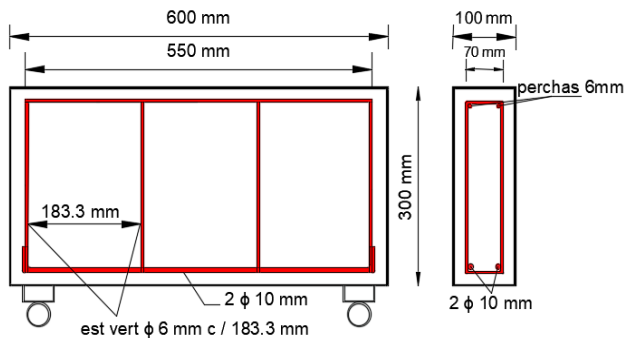


Figura 3. Geometría y detalle de armado de especímenes con armadura a corte reducida

2.1.1. Elaboración de los especímenes

La dosificación del hormigón se realizó un sistema automatizado de la planta hormigonera que pesa y suministra a la mezcladora el cemento, los agregados gruesos y finos y el agua.

Se utilizó una máquina mezcladora tipo “tambor” con una capacidad de 0.20 m³, por lo cual, se elaboraron dos amasadas en cada etapa de la campaña. Con cada pastón se obtuvo el volumen de hormigón necesario para elaborar 6 especímenes de VGC, 3 probetas cilíndricas y 3 vigas prismáticas con una sección cuadrada de 150 mm de lado y un largo de 600 mm con entalla central (norma EN 14651:2005 (27)). Las fibras fueron agregadas manualmente a la mezcla, incorporándolas dentro de la mezcladora con la precaución de distribuirlas uniformemente en toda la superficie, a fin de evitar la formación de erizos.

El llenado de las VGC se realizó de manera manual empleando pala, en moldes metálicos. El vibrado se ejecutó utilizando un vibrador tipo “aguja” de manera externa. En la Figura 4 se muestra un instante del llenado de los especímenes de VGC.



Figura 4. Detalles de llenado y vibrado de los especímenes de VGC

3. MATERIALES

3.1. Hormigón

En la ejecución de las vigas se utilizaron 3 tipos de hormigón: simple, HRFA y HRFH, dosificados según el Método ICPA de Diseño Racional de Mezclas de Hormigón del Instituto del Cemento Portland Argentino (G. Balado 1982 (28)) en función de obtener una resistencia característica de rotura a compresión a los 28 días de 25 MPa. Se trabajó con agregados de la zona y cemento portland compuesto (CPC40). En la Tabla 2 se detalla la dosificación para 1 m³.

Tabla 2. Dosificación del hormigón

Material	Cantidad (kg)
Agua	182,55
Cemento	356,99
Agregado grueso	985,77
Agregado fino	762,26

3.1.1. Caracterización del comportamiento mecánico a compresión uniaxial

La resistencia a compresión se determinó mediante ensayos de compresión uniaxial sobre probetas cilíndricas de 150 mm x 300 mm, según normas IRAM 1534 (29) e IRAM 1865 (30). La resistencia media a compresión f'_m de los tres tipos de hormigón para cada una de las campañas se muestra en la Tabla 3. En dicha tabla, se puede observar que en la etapa II la resistencia a la compresión de las probetas de hormigón reforzado con fibras resultó menor que las del hormigón simple, esto se estima que se debe a una falla en el caudalímetro al momento de realizar esa amasada de hormigón. Ello llevo a que se incorporara más agua en detrimento de la resistencia a la compresión. Por ello, en el apartado de resultados se incluye un análisis de cargas normalizadas.

En cuanto a la nomenclatura, las siglas HS representan el hormigón simple sin fibras, HRFA-05 es el hormigón con 0.5% de fibras de acero, HRFA-1 es el hormigón con 1% de fibras de acero y HRFH corresponde al hormigón con fibras híbridas (polipropileno y acero).

Tabla 3. Resistencia a la compresión del hormigón

Etapas	Tipo de hormigón	Resistencia media a la compresión: f'_{cm} (MPa)
I	HS	26.07
	HRFA-05	32.48
	HRFA-1	33.87
II	HS	31.28
	HRFA-05	26.20
	HRFH	27.42
III	HS	30.73
	HRFA-05	33.31
	HRFH	35.51

3.1.2. Caracterización del comportamiento mecánico a tracción

En las etapas 2 y 3 se realizó el ensayo de las vigas prismáticas de hormigón reforzado con fibras de polipropileno (HRFPP) sección cuadrada de 150 mm por lado y 600 mm de largo, con entalla central, según la norma EN 14651:2005 (27). El objetivo de dicho ensayo fue caracterizar el comportamiento a tracción del HRFPP con el fin de ser incorporado en un modelo constitutivo implementado en un código de elementos finitos no lineal. Dicho modelo busca reproducir el comportamiento mecánico de las vigas de gran canto de hormigón reforzado con fibras híbridas, modelando al HRFPP como material homogéneo con las propiedades del conjunto, por un lado, y las fibras de acero aleatoriamente distribuidas en la masa del hormigón por el otro.

Se muestran las curvas fuerza vs desplazamiento y el instrumental del ensayo en las Figuras 5 y 6, respectivamente.

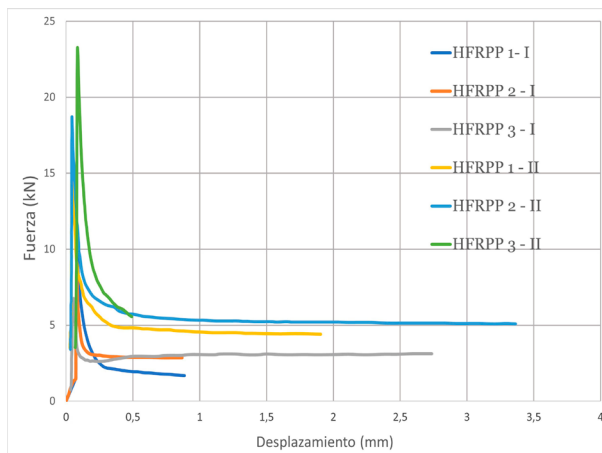


Figura 5. Curvas carga – desplazamiento vertical de vigas prismáticas (norma 14651:2005 (27))

La nomenclatura utilizada es la siguiente: las siglas HRFPP refiere a las vigas prismáticas de hormigón reforzado con fibras de polipropileno; los números distinguen los distintos especímenes dentro de la misma campaña y por último se hace referencia a la fecha de ensayo.



Figura 6. Disposición del instrumental del ensayo

En cuanto a los resultados se puede decir que los especímenes ensayados en la tercera campaña (serie I) muestran mayores valores de fuerza máxima además de cargas residuales post pico mayores a los especímenes correspondientes a la segunda campaña (serie II). Esto se debe a que la resistencia promedio a la compresión del hormigón de la segunda campaña (ensayados en julio) es menor a la de la tercera campaña.

3.2. Acero

El acero empleado para la armadura principal y la constructiva de todas las vigas se empleó acero de dureza natural Acindar denominado comercialmente DN A-420, con límite de fluencia de 420 MPa, resistencia a la tracción de 500 MPa y alargamiento porcentual a la rotura del 12 %.

3.3. Fibras

Se utilizaron dos tipos de fibras, acero y polipropileno. Las fibras de acero que se emplearon fueron de extremo en gancho del tipo AR65 de ferrocement®. En el caso de las de polipropileno se utilizaron macrofibras sintéticas recortadas de materiales poliméricos denominadas comercialmente MACRONITA®. Este tipo de fibras es químicamente inerte, tienen estabilidad volumétrica, un bajo módulo de elasticidad y bajo punto de fusión. En la Figura 7a se muestra la fibra de acero y en la Figura 7b se observa el tipo de macrofibra de polipropileno empleadas.

En la Tabla 4 se detallan las principales características geométricas y mecánicas de las fibras empleadas.

Tabla 4. Características de las fibras

Propiedades	Fibras de acero	Macrofibras de polipropileno
Longitud (mm)	50	50
Diámetro (mm)	0.8	0.6
Módulo elástico (GPa)	210	6
Relación de aspecto	62	83



Figura 7 a. Imagen de fibras de acero utilizadas



Figura 7 b. Imagen de las macrofibras de polipropileno utilizadas

4. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO E INSTRUMENTAL

4.1 Ensayo a flexion

Con el objetivo de conocer el comportamiento mecánico de las VGC, se las sometió al ensayo de flexión en 3 puntos, bajo la condición de simplemente apoyadas. Esta prueba consiste en la aplicación de una carga cuasi estática monótona creciente en el centro de la luz de las vigas.

Se utilizó para ello, una máquina universal de ensayos Shimadzu con sistema hidráulico con capacidad de desarrollar una

carga vertical nominal máxima de 1000 kN. Los valores de los desplazamientos se tomaron de manera continua con un equipo HBM QuantumX® MX840B conectado a una computadora mediante el uso del software CatmanEasy®.

En las Figuras 8 a y 8 b se muestran el esquema del ensayo y la disposición del instrumental utilizado. La Figura 8a ilustra el esquema completo de ensayo y el instrumental. Por otra parte, la Figura 8b muestra detalles del sistema de medición de cargas y desplazamientos.

5. RESULTADOS

Seguidamente, se presentan los resultados obtenidos experimentalmente. Se analizan cargas correspondientes a la primera fisura, cargas máximas, modos de rotura y curvas carga-desplazamiento.

En la Tabla 5 se presentan los valores promedio de carga correspondiente a la primera fisura, carga máxima (P_{max}), desplazamiento vertical (δ_{max}) correspondiente a dicha carga y los modos de rotura. Además, se muestra el porcentaje de incremento de las cargas máxima y primera fisura de las vigas de hormigón reforzado con fibras. Dicho porcentaje de incremento se calculó haciendo el cociente entre la diferencia entre las cargas de los especímenes de hormigón con fibras y las de los sin fibras, sobre la carga los especímenes de hormigón simple con armadura de corte reducida.

Los resultados de los ensayos de la primera etapa mostraron que las cargas de primera fisura de los especímenes de HRFA para ambos porcentajes de adición de fibras resultaron similares y de alrededor de un 30% mayores que las de HS con armadura reducida, en promedio. Se puede decir, además, observando la Tabla 5, que las fibras de acero resultaron más efectivas que la armadura mínima reglamentaria de corte, en cuanto a la aparición de la primera fisura.

En la segunda etapa, se observó que las cargas de primera fisura de los especímenes de HRFA con 0.5% de adición resultaron similares a las de hormigón sin fibras con armadura reducida (V-AR). Por otra parte, las VGC de HRFH mostraron un mejoramiento promedio del 5% en dicha carga respecto de las V-AR. En este caso, la adición de las macrofibras de polipropileno en combinación con las fibras de acero, produjo un aumento en la carga de fisuración, obteniéndose valores mayores a los de los especímenes con armadura mínima de corte reglamentaria (Cirsoc 201-05 (9)). Es decir, se produjo una sinergia positiva entre las fibras de refuerzo.

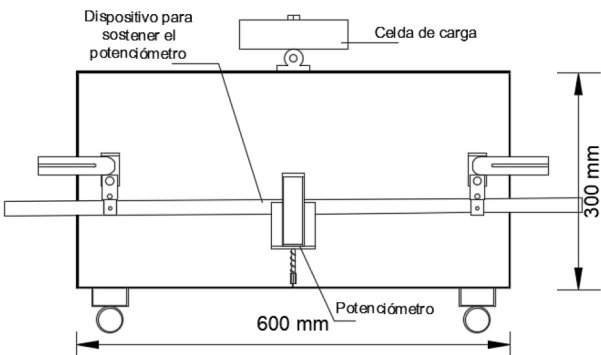


Figura 8 a. Esquema del ensayo a flexión de las VGC



Figura 8 b. Vista lateral de la disposición del instrumental del ensayo a flexión de las VGC

Tabla 5. Resultado de ensayo a flexión de VGC

Campaña	Especimen	Per (N)	% incremento	Pmax (N)	% incremento	δ_{max} (mm)	Modo de rotura
I	V-AC	94000	–	140000	–	1.04	corte
	V-AR	92000	–	120000	–	1.02	corte
	V-HRFA-05	121666,6	32.24	151285,66	26.07	0.98	corte
	V-HRFA-1	120000	30.43	167074,33	39.23	1.18	corte
II	V-AC	94000	–	164412,33	–	0.77	corte
	V-AR	100000	–	147540,00	–	0.90	aplastamiento en apoyos
	V-HRFA-05	100000	0	158700,64	7,56	0.94	corte
	V-HRFH	105000	5,00	170253,48	15,39	0.97	corte
III	V-AC	95000	–	203722,60	–	2.03	corte
	V-AR	95000	–	172875,56	–	0.92	corte
	V-HRFA-05	105000	10,52	198123,93	14,60	2,31	corte
	V-HRFH	115000	21,05	217901,93	26,04	2,46	corte y flexión

Finalmente, en la tercera etapa, se obtuvieron para las vigas de HRFA cargas de primera fisura un 10.5% mayores que las de hormigón armado sin fibras. A su vez, en los especímenes de HRFH la primera fisura se produjo con cargas un 21% mayores que en las VGC de hormigón armado sin fibras y con armadura reducida.

En cuanto a la carga máxima (Pmax) de los especímenes de la primera etapa, las VGC de HRFA, con 0.5% de fibras, mostraron un incremento promedio del 26% respecto de las VGC de hormigón sin fibras con armadura a corte reducida (V-AR) y un 8% respecto de las vigas de hormigón sin fibras y armadura de corte reglamentaria según CIRSOC 201-05 (9) (V-AC). Por su parte, las vigas de HRFA con 1% de fibras alcanzaron cargas máximas promedio un 19% mayores a las V-AC y un 39% mayores que las registradas por las V-AR. En este caso, el aumento del volumen de fibras, de 0.5 % a 1%, mejoró la resistencia a pesar de la reducción de la trabajabilidad de la mezcla por la incorporación de las fibras.

En la segunda etapa, los especímenes de HRFA, con 0.5% de fibras mostraron cargas máximas un 3.5% menores a las V-AC, sin embargo, resultaron un 7.5% mayores a la carga máxima de las vigas de hormigón sin fibras y armadura de corte reducida. Por su parte las vigas de HRFH con 0.5% de fibras de acero y 0.5% de macrofibras de polipropileno alcanzaron cargas máximas promedio un 3.5% mayores a las de las V-AC y un 15.4% mayores que las registradas por las vigas de hormigón armado sin fibras y armadura de corte reducida (V-AR).

En la tercera etapa, los especímenes de HRFA, con 0.5% de fibras alcanzaron cargas máximas un 2.8% menores a las V-AC, pero resultaron un 14.60% mayores a las cargas máximas de las vigas de hormigón simple y armadura de corte reducida. Las vigas de HRFH con 0.5% de fibras de acero y 0.5% de macrofibras de polipropileno alcanzaron cargas máximas promedio un 7% mayores a las de las V-AC y un 26.04% mayores a las registradas por las V-AR.

Se puede concluir, que tanto para cargas máximas como para cargas correspondientes a la aparición de la primera fisura la adición de fibras de polipropileno en la matriz de hormigón generó un rendimiento más efectivo de las fibras de acero mejorando la respuesta estructural de las vigas.

A fin de comparar la efectividad del uso de fibras se efectuó una normalización las cargas de primera fisura y máxima se normalizaron dividiéndolas por f'_{cm} b.d (en donde f'_{cm} es la resistencia media a compresión, b el ancho de las VGC en mm y d el espesor en mm). En la Figura 9 se muestran las cargas normalizadas.

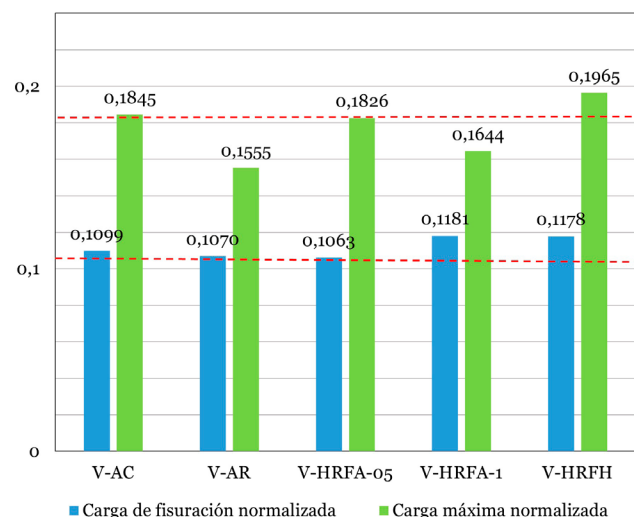


Figura 9. Cargas de fisuración y máximas promedio normalizadas

5.1. Modos de rotura

En la primera etapa todas las vigas fallaron por corte o compresión de la diagonal comprimida. En cuanto a la segunda campaña, todos los especímenes fallaron por corte (ver figura 10 y 12) a excepción de dos especímenes de hormigón armado sin fibras que fallaron por aplastamiento del hormigón en los

apoyos y punto de carga y fisuración vertical, como se observa en la figura 11. Por su parte, en la tercera campaña todas las vigas fallaron por corte. En los especímenes de HRFH se observó una rotura combinada de corte y flexión, tal como se ve en la figura 13, lo que demuestra la efectividad del uso de fibras como refuerzo a la resistencia a corte de las VGC. Es decir, el uso de fibras no sólo resultó en un incremento de la capacidad de carga, sino también en una mejora del comportamiento a la rotura que cambia de frágil a semi dúctil, que es una de las características más importantes del diseño por capacidad.

En general, se observó que las vigas de HRF mostraron patrones de fisuración más extensos en el espacio, con mayor cantidad de fisuras y de menor apertura que las de las vigas de HS con armadura reducida, que mostraron fisuras localizadas y de mayor tamaño. Todos los especímenes conservaron el monolitismo luego de la rotura.

En cuanto a los modos de fallo de las fibras, se observó que las de acero sufrieron arrancamiento mientras que las de polipropileno fallaron por rotura.



Figura 10. Modo de rotura de VGC de hormigón armado sin fibras y armadura a corte reglamentaria



Figura 11. Modo de rotura de VGC de hormigón armado sin fibras y con armadura de corte reducida



Figura 12. Modo de rotura de VGC de HRFA-05 y armadura de corte reducida



Figura 13. Modo de rotura de VGC de HRFH

5.2. Curvas carga - desplazamiento

En las Figuras 14, 15 y 16 se reproducen las curvas carga – desplazamiento de las vigas de hormigón armado sin fibras con armadura de corte reglamentaria y con armadura de corte reglamentaria reducida, HRFA con 0.5% y 1% de adición de fibras y de HRFH, correspondientes a las tres campañas.

En la primera campaña, y según se puede ver en la figura 14 las vigas de hormigón armado sin fibras con armadura a corte reglamentaria mostraron una resistencia promedio mayor a las vigas de hormigón armado sin fibras pero con armadura reducida. La rigidez y la capacidad de deformación de ambos tipos de viga fueron similares. Los especímenes de HRFA con 0.5% y con 1% de adición de fibras, alcanzaron valores de carga máxima promedio mayores a las vigas de hormigón armado sin fibras con armadura a corte reglamentaria. Se puede ver el efecto beneficioso de las fibras que retardan la aparición de la primera fisura y permiten alcanzar una mayor carga máxima que se incrementa con el aumento del volumen de fibras. También se puede ver que las vigas de HRFA mostraron mayor rigidez que las de hormigón armado sin fibras con armadura de corte reglamentaria y con armadura de corte reducida.

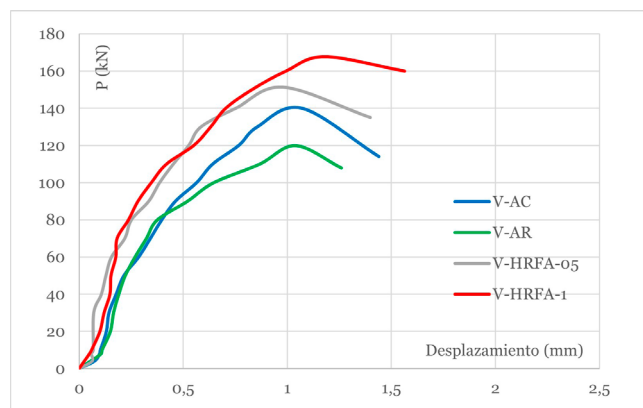


Figura 14. Curvas carga desplazamiento promedio del ensayo a flexión de las VGC de la primera campaña

La capacidad de deformación y la rigidez de las VGC de HRFA fue mayor a la de las vigas de hormigón armado.

En la segunda campaña, las vigas de hormigón armado sin fibras y con armadura a corte reglamentaria mostraron una resistencia promedio un 11,43% mayor a las vigas de hormigón armado, pero con armadura reducida (Figura 15). La rigidez del espécimen de hormigón armado con armadura a corte reducida fue menor que la de la viga con armadura a corte reglamentaria,

la capacidad de deformación de ambos tipos de viga fue similar. Los especímenes de HRFA-05 con 0.5% de adición de fibras, alcanzaron valores de carga máxima promedio un 4% menores a las vigas de hormigón armado sin fibras y con armadura a corte reglamentaria pero dichas cargas resultaron mayores a las de las vigas de hormigón sin fibras y armadura a corte reducida. Por su parte, los especímenes de HRFH desarrollaron cargas máximas promedio mayores a las vigas de hormigón armado sin fibras y con armadura a corte reglamentaria. Las vigas de HRF no mostraron un aumento tan significativo en la resistencia con respecto a las de hormigón armado sin fibras debido a que la resistencia a compresión del HRF resultó menor a la del hormigón armado sin fibras, por tratarse de diferentes dentro de la misma campaña. Esto concuerda con Smarzewsky P. 2019 (26) que encontró que la resistencia a la compresión del hormigón tiene una influencia decisiva en el pico de carga de las VGC. En cuanto a las cargas correspondientes a la primera fisura, se puede ver en la Figura 15, que la hibridización de acero y fibras sintéticas, viga V-HRFH muestra un efecto mejorado, en comparación con la viga V-HRFA-05, con un solo tipo de fibra y una mayor ductilidad.

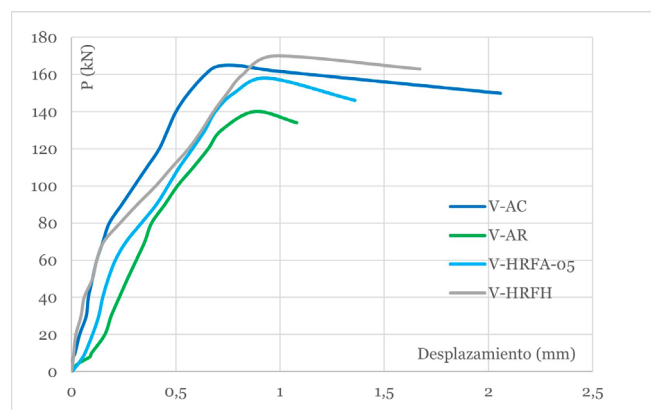


Figura 15. Curvas carga desplazamiento promedio del ensayo a flexión de las VGC de la segunda campaña

La rigidez de la viga V-HRFH resultó similar a la V-AC y ligeramente mayor a la V-HRFA-05 y la V-AR.

En la tercera campaña (Figura 16), las vigas de hormigón armado sin fibras y con armadura a corte reglamentaria mostraron una resistencia promedio un 11,43% mayor a las vigas de hormigón armado, pero con armadura reducida. La rigidez del espécimen de hormigón armado sin fibras y armadura a corte reducida fue menor que la de la viga con armadura a corte reglamentaria, al igual que la ductilidad. Los especímenes de HRFA con 0.5% de adición de fibras, alcanzaron valores de carga máxima promedios mayores a las vigas de hormigón armado sin fibras y armadura a corte reglamentaria. Por su parte, los especímenes de HRFH desarrollaron cargas máximas promedio mayores a las vigas de hormigón armado con armadura a corte reglamentaria. La capacidad de deformación de las VGC de HRFA fue superior a la de las vigas de hormigón armado sin fibras, mostrando una mayor rigidez inicial. Por su parte, las vigas de HRFH tuvieron una capacidad de deformación sensiblemente superior a las vigas de hormigón armado sin fibras e incluso a las de HRFA, con una rigidez inicial superior a las de hormigón armado. En este caso la combinación de fibras de acero y fibras sintéticas resultó en una mayor capacidad resistente y de deformación que las alcanzadas por las vigas con armadura de corte reglamentaria y armadura de corte reducida, y también ligeramente superior

a la resistencia del espécimen reforzado con un solo tipo de fibra y a la resistencia del espécimen reforzado con un solo tipo de fibra y armadura de corte reducida.

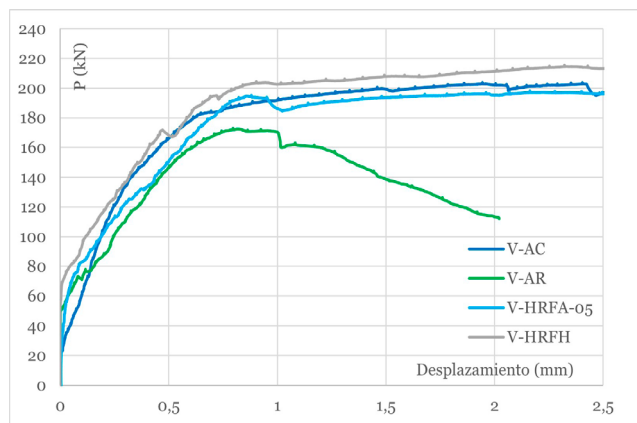


Figura 16. Curvas carga desplazamiento promedio del ensayo a flexión de las VGC de la tercera campaña

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un estudio experimental de la capacidad resistente a corte de VGC de hormigón armado sin fibras, HRFA y HRFH. Del análisis y comparación de los resultados, se puede concluir que:

El agregado de fibras permitió obtener cargas correspondientes a la primera fisura, mayores que las obtenidas en el caso de los especímenes de hormigones sin fibras. El incremento en dicha carga en promedio fue de hasta un 32.24% para el caso de HRFA. En cuanto a los especímenes de HRFH mostraron aumentos promedio en la carga de aparición de primera fisura entre 5% y 21.05% comparándolas con las VGC de hormigón armado sin fibras. Además, las cargas de primera fisura de los especímenes de HRFH resultaron entre un 5.00% y un 9.50% mayores a las de las VGC de HRFA-05.

La incorporación de fibras de acero en un 0.5% del volumen, aumentó las cargas correspondientes a la aparición de la primera fisura. Dicho aumento en promedio fue de 32.24% en la primera campaña, no se vieron aumentos de dicha carga en la segunda campaña y en la tercera campaña el aumento fue de 10.52%. A su vez dicha adición de fibras de acero aumentó la capacidad resistente de las vigas con armadura a corte reducida. Alcanzando cargas máximas promedio un 26% en la primera campaña, 7.6% en la segunda y 32.74% en la tercera campaña. Sin embargo, el aumento del volumen de fibras, resultó en detrimento de la trabajabilidad de la mezcla.

Los especímenes de HRFH mostraron, mayor resistencia y capacidad de deformación que los de hormigón armado sin fibras y HRFA. Alcanzando cargas máximas promedio un 15% mayores a las de las VGC de hormigón sin fibras y con armadura reglamentaria en la segunda campaña y un 26% mayores respecto a los especímenes con armadura reglamentaria en la tercera campaña.

Los especímenes de hormigón reforzado con fibras híbridas mostraron modos de rotura combinado a corte y flexión, sin desprendimientos y conservando el monolitismo en todos los casos, lo que demuestra la eficiencia del uso de las fibras como refuerzo al corte.

Si bien es necesario realizar un mayor número de ensayos, se puede decir que las vigas de HRFH tuvieron un comportamiento resistente muy satisfactorio, con valores de carga máxima superiores a los obtenidos no solo en las vigas de hormigón armado sin fibras y armadura de corte reducida, sino también a las VGC tradicionales de hormigón armado sin fibras con armadura a corte reglamentaria e incluso con respecto a aquellos especímenes reforzados con un solo tipo de fibra. Ello alienta la posibilidad de sustituir parcialmente la armadura convencional de corte por hormigón reforzado, en este caso con dos tipos de fibras. También se puede decir que la capacidad de deformación de las vigas de HRFH, es comparable a la de los especímenes de hormigón armado sin fibras y con armadura a corte reglamentaria.

Los resultados de este trabajo sirven a un trabajo de modelación numérica implementado en un software de análisis por elementos finitos cuyo objetivo es representar el comportamiento mecánico de las VGC de hormigón armado y reforzado con fibras. Dicho estudio numérico, para el caso de las VGC de HRFH, considera, por un lado, las fibras de acero aleatoriamente distribuidas en la masa del hormigón, y, por el otro el hormigón reforzado con fibras de polipropileno como material homogéneo con las propiedades de conjunto.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los/as autores/as de este artículo declaran no tener conflictos de intereses financieros, profesionales o personales que pudieran haber influido de manera inapropiada en este trabajo.

DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Miqueas Denardi: Análisis formal, investigación, metodología, administración de proyecto, validación, visualización, redacción borrador original.

Viviana Rougier: Conceptualización, adquisición de fondos, provisión de recursos, supervisión, Redacción – revisión y edición.

REFERENCIAS

- (1) Lantsoght, E.O.L. (2019). How do steel fibers improve the shear capacity of reinforced concrete beams without stirrups?. *Composites Part B*, 175, 107079. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107079>
- (2) Cuenca E. (2015). On Shear Behavior of Structural Elements Made of Steel Fiber Reinforced Concret. *Universitat Politècnica de València*, España. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-13686-8>
- (3) Heek P. y Mark P. (2017). Numerical Simulation of Steel Fibre Reinforced Concrete Girders Subjected to Cyclic Loads. *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet*, 356-365. https://doi.org/10.1007/978-3-319-59471-2_43
- (4) Harvinder Singh (2014). Steel Reinforced Concrete. *Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering*.
- (5) ACI 544.1R (1996-2002). Report on fiber reinforced concrete.
- (6) Katzer J. (2006). Steel fibers and steel fiber reinforced concrete in civil engineering. *The Pacific Journal of Science and Technology*, 7(1), 53-58. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/210346533_Steel_fibers_and_steel_fiber_reinforced_concrete_in_civil_engineering
- (7) Kotecha, P. Abolmaali A. (2019). Macro synthetic fibers as reinforcement for deep beams with discontinuity regions: Experimental investigation. *Engineering Structures*, 200, 109672. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109672>
- (8) Ortiz Navas, F., Leiva Herdocia, G., Serna, P., Cuenca, E. (2018). An experimental study on the shear behaviour of reinforced concrete beams with macro-synthetic fibres. *Construction and Building Materials*, 169, 888-899. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.023>
- (9) CIRSOC 201-2005 (2005). Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón. <http://contenidos.inpres.gob.ar/docs/Reglamentos/CIRSOC-201-Reglamento.pdf>
- (10) ACI (2014). Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural. American Concrete Institute.
- (11) Eurocode 2: Design of concrete structures. European Standards. European Standards, Belgium.
- (12) Aguilar, G., Matamoros, A.B., Parra-Montesinos, G., Wight, J.K. (2002). Experimental Evaluation of Design Procedures for Shear Strength of Deep Reinforced Concrete Beams. *ACI Structural Journal*, 99(4), 539-548. https://www.researchgate.net/publication/261359854_Experimental_Evaluation_of_Design_Procedures_for_Shear_Strength_of_Deep_Reinforced_Concrete_Beams
- (13) Mohammadhassani, M., Nezamabadi-Pour, H., Jumaat, M., Jameel, M., Hakim, S.J.S., Zargar, M. (2013). Application of the ANFIS model in deflection prediction of concrete deep beam. *Structural Engineering and Mechanics*, 45(3), 319-332. <https://doi.org/10.12989/SEM.2013.45.3.323>
- (14) Choi, Y., Lee, H., Chu, S., Cheong, S., Jung W. (2012). Shear behavior and performance of deep beams made with self-compacting concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. <https://doi.org/10.1007/s40069-012-0007-y>
- (15) Canbolat, B. A., Parra-Montesinos, G. J., Wight, J. K. (2005). Experimental Study on Seismic Behavior of High-Performance Fiber Reinforced Cement Composite Coupling Beams. *ACI Structural Journal*, 102(1), 159-166. <https://doi.org/10.14359/13541>
- (16) Parra-Montesinos, G. (2006). Shear strength of beams with deformed steel fibers, evaluating an alternative to minimum transverse reinforcement. *Concrete International*, 58-65. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=b2864f4dee5e31104c4934f02051fbd41dd1884>
- (17) Parra-Montesinos, G., Wight, J.K., Dinh, H., Libbrecht, A., Padilla, C. (2006). Shear Strength of fiber reinforced concrete beams without stirrups. Report No. UMCEE 06-04. University of Michigan, Ann Arbor, MI, pp 39.
- (18) Sagar, M., Lakavath, C., Shanmugan, S.P., Sharma, A., (2021). Experimental study on evaluation of replacing minimum web reinforcement with discrete fibers in RC deep beams. *Fibers*, 9(11), 73. <https://doi.org/10.3390/fib9110073>
- (19) Tuchscherer, R.G., Quesada A. (2015). Replacement of deformed side-face steel reinforcement in deep beams with steel fibers. *Structures*, 3, 130-136. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2015.03.008>
- (20) Abadel, A.A., Albidah, A.S. (2021). Investigation of shear reinforcement schemes for RC deep beams. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46, 4747-4763. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-05123-z>
- (21) Nayak, C.B. (2022). Experimental and numerical study on reinforced concrete deep beam in shear with crimped steel fiber. *Innovative Infrastructure Solutions*, 7, 41. <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00638-2>
- (22) Kulkarni, S.K., Kekade, G.A., Halkude, S.A. (2017). Effect of hybrid fibre reinforcement in concrete deep beams. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR)*, 4(3), 33-39. <https://doi.org/10.14445/23488352/IJCE-V4I2P106>
- (23) Moradi, M., Reza Esfahani, M., (2017). Application of the strut-and-tie method for steel fiber reinforced concrete deep beams. *Construction and Building Materials*, 131, 423-437. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.042>
- (24) Campione, G., (2012). Flexural behavior of steel fibrous reinforced concrete deep beams. *Journal of Structural Engineering*, 138(2), 235-246. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000442](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000442)
- (25) Madan, S.K., Rajesh Kumar, G., Singh, S.P. (2007). Steel fibers as replacement of web reinforcement for RCC deep beams in shear. *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, 8. https://www.researchgate.net/publication/267414669_Steel_fibers_replacement_of_web_reinforcement_for_RCC_deep_beams_in_shear
- (26) Smarzewski, P. (2019). Analysis of failure mechanics in hybrid fibre-reinforced high-performance concrete deep beams with and without openings. *Materials*, 12(1), 101. <https://doi.org/10.3390/ma12010101>
- (27) EN 14651 (2005). Test method for metallic fibre concrete-Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOF), residual. European Standards, Belgium.
- (28) García Balado, J.F. (1982). Método para la dosificación de hormigones. Instituto del cemento Portland Argentino (ICPA).
- (29) IRAM 1534. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (1985). Hormigón de cemento Portland. Preparación y curado de probetas de ensayo en laboratorio.
- (30) IRAM 1865. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. (1985). Hormigón de cemento. Métodos de ensayo para la determinación del módulo elástico y la relación de Poisson de probetas y testigos cilíndricos de hormigón sometidos a esfuerzos de compresión axial.