



ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA RESISTENCIA AL CORTE DE VIGAS DE GRAN ALTURA DE HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS.

Denardi, Miqueas C.; Rougier, Viviana C.
Ingeniero Civil

Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Concordia.
miqueasdenardi@gmail.com

RESUMEN

Las vigas de gran altura (VGA) son utilizadas en numerosas estructuras tales como edificios de altura y fundaciones, entre otras. Se ha demostrado que el uso de fibras de acero e híbridas (mezcla de fibras de acero y polipropileno) como refuerzo en el hormigón proporciona un mayor control de fisuración e incremento de la tenacidad. Por ello, el uso de las fibras híbridas, en reemplazo total o parcial de la armadura convencional de estribos, resulta de interés en VGA, en las que suelen existir grandes congestionamientos de armaduras.

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 VGA. Para ello, se ensayaron a flexión, VGA de $H^o A^o$ 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 VGA de hormigón con fibras alcanzaron cargas máximas de entre un 4 % y un 8% mayores a las de las vigas con armadura mínima a corte y mostraron una mayor resistencia residual post pico de cargas. Los resultados se muestran a partir de tablas y gráficos. Finalmente, se emiten algunas conclusiones.

ABSTRACT

Deep beams (DB) have useful applications in many structures, such as tall buildings and foundations, among others. It has been shown that the use of steel and hybrid fibers (a mixture of steel and polypropylene fibers) provides greater crack control and increased toughness. Thus, the use of these fibers, in total or partial replacement of the conventional stirrup reinforcement, is of interest in DB, in which there are usually large congestion of reinforcements.

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.

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. The results shown in tables and graphs in terms of maximum load and load-displacement curves are then discussed. Finally some conclusions are

issued.

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 útil y económica al refuerzo tradicional de barras de acero. 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 en los que se combina la armadura tradicional con macrofibras de PP, se aumenta la carga máxima **Ortiz F. 2018** ^[8].

El Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón CIRSOC 201-05^[9] y el Reglamento para Concreto Estructural ACI 318 S-14^[10] definen a las VGA, 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 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 ($a \leq 2h$)”

La mayor parte de las cargas que soporta este tipo de vigas se transmite 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 útil. En consecuencia, la falla generalmente es causada por corte es decir, son las tensiones de corte las que controlan la resistencia de una VGA. Por ello, los diferentes códigos de diseño establecen una cuantía mínima para el refuerzo a corte que garantice tanto los requerimientos de resistencia como de serviciabilidad (CIRSOC 201-05^[9], ACI 318 S-14^[10], Eurocódigo, BS EN1992-1-1^[11]). Sin embargo, se ha demostrado que la capacidad resistente de las VGA 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, esto último puede provocar grandes congestionamientos de refuerzo. Por ejemplo, las vigas de acoplamiento en estructuras sismo resistentes requieren importante cantidad de refuerzo de acero, tanto diagonal como transversal, pues se debe garantizar un comportamiento estable frente a sismos. Ello genera congestionamiento de armaduras y dificultades constructivas, asociados a la ubicación de las barras diagonales y la escasa separación del refuerzo transversal. Surgen entonces, como alternativa constructiva, los hormigones reforzados con fibras, que según algunas investigaciones dan como resultado 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 Montensinos et

al., 2006 b^[17], Shahabi et al. 2007^[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 VGA (Chittaranjan N. 2021^[21], Aref et al., 2020^[22], Suhail et al., 2017^[23], 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 VGA 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 VGA 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 VGA y la posibilidad del reemplazo parcial o total de la armadura mínima de corte.

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 VGA, 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 falla.

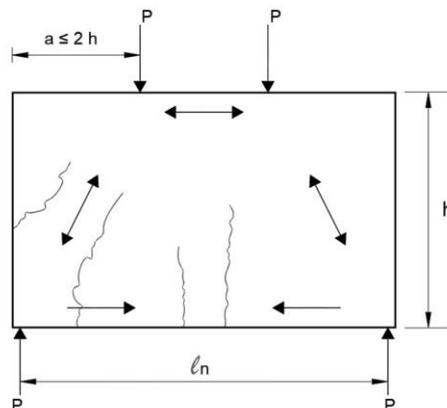


Figura 1. Ejemplo de viga de gran altura sometida a cargas concentradas: cargas, reacciones y esfuerzos internos (CIRSOC 201-05).

Campaña Experimental

El programa experimental consistió en la elaboración y ensayo a flexión en tres puntos de 36 VGA elaboradas con 3 tipos de hormigón: simple, HRFA y HRFH. Dicho programa se desarrolló en 3 etapas de 12 VGA cada una. Dieciocho vigas fueron elaboradas con hormigón simple (HS), 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 de corte reducida y solo en la dirección perpendicular a la luz del tramo. Con HRFA se elaboraron 12 especímenes 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). Los 6 especímenes restantes se elaboraron con HRFH con 0.5% del volumen de fibras de acero y 0.5% de macrofibras de polipropileno. Todas las VGA de HRFA y HRFH se elaboraron con armadura de flexión y armadura de corte reducida. Además, se elaboraron y ensayaron probetas cilíndricas y vigas tipo RILEM para caracterizar el comportamiento mecánico del hormigón.

En la Tabla 1 se presenta la descripción de los especímenes ensayados, en cuanto a denominación, características geométricas y contenido de fibras en porcentajes de volumen. La nomenclatura utilizada es la siguiente: V, hace referencia al tipo de elemento VGA. Las letras AC, representan a los especímenes de hormigón simple con armadura a corte reglamentaria, mientras que las AR hacen referencia a las vigas de hormigón simple 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.

Campaña	Especimen	Fibras		Armadura de corte	
		Acero %	Polipropileno %	Horizontal Cuantia %	Vertical Cuantia %
I	V-AC	-	-	0.1885 (mínima reglamentaria)	0.5654 (mínima reglamentaria)
	V-AR	-	-	-	0.3769
	V-HRFA-05	0,5	-	-	0.3769
	V-HRFA-1	1	-	-	0.3769
II	V-AC	-	-	0.1885 (mínima reglamentaria)	0.5654 (mínima reglamentaria)
	V-AR	-	-	-	0.3769
	V-HRFA-05	0,5	-	-	0.3769
	V-HRFH	0,5	0,5	-	0.3769
III	V-AC	-	-	0.1885 (mínima reglamentaria)	0.5654 (mínima reglamentaria)
	V-SA	-	-	-	0.3769

	V-HRFA-05	0,5	-	-	0.3769
	V-HRFH	0,5	0,5	-	0.3769

Tabla 1 – Detalle de los 5 ítemes

Seguidamente, se describen dichos especímenes, propiedades de los materiales y procedimiento de ensayo e instrumentación.

Características de los especímenes ensayados.

El diseño de las VGA se realizó siguiendo los lineamientos del Cirsoc 201-05^[9] Apéndice A. Cada espécimen tiene una longitud de 600 mm con una luz entre apoyos de 500 mm y una sección de 300 mm de alto y 100 mm de ancho. La luz de corte es de 250 mm y la relación entre la luz libre y la altura es de 1.67 (los reglamentos CIRSOC y ACI, establecen que dicha relación sea menor que 4, para considerar una viga como de gran altura).

En todos los especímenes se colocó armadura de flexión. En las vigas de la serie "V" se colocó armadura de corte reglamentaria, Cirsoc 201-05^[9]. En el resto de los especímenes se colocó armadura de corte reducida y solo en la dirección perpendicular a la luz del tramo. En la Figura 2 se muestran detalles constructivos de un espécimen con armadura de flexión y corte completa y en la Figura 3 otro con armadura de corte reducida: sin esfuerzo 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).

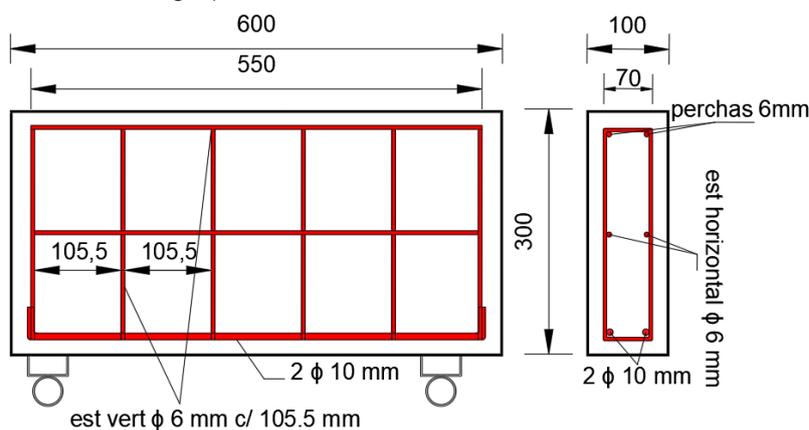


Figura 2. Dimensiones geométricas y detalle de armado de especímenes con armadura a corte mínima.

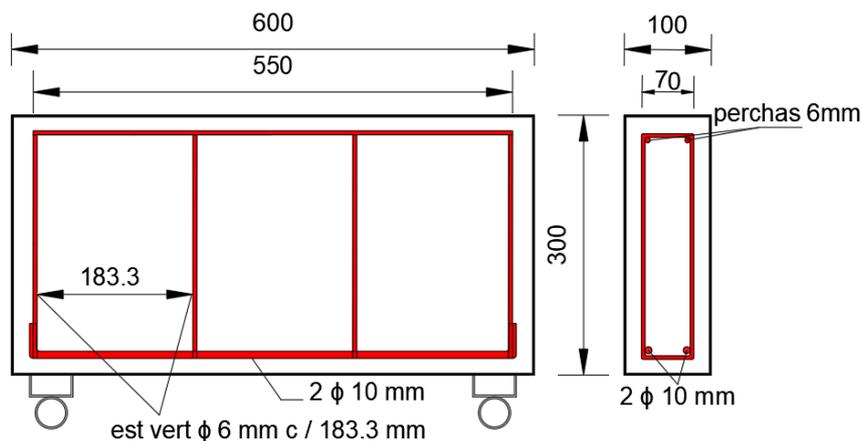


Figura 3. Dimensiones geométricas y detalle de armado de especímenes con armadura a corte mínima.

Elaboración de los especímenes

Para la dosificación del hormigón, se utilizó 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, cada campaña se organizó en dos etapas de elaboración y llenado. Con cada pastón se obtuvo el volumen de hormigón necesario para elaborar 6 especímenes de VGA, 3 probetas cilíndricas y 3 vigas prismáticas tipo Rilem, para la caracterización del comportamiento mecánico del hormigón. Las fibras fueron agregadas manualmente a la mezcla, arrojándolas dentro de la mezcladora con la precaución de distribuir las uniformemente en toda la superficie, a fin de evitar la formación de erizos.

El llenado de las VGA se realizó de manera manual empleando pala, en moldes metálicos. El vibrado se realizó utilizando un vibrador tipo “aguja” de manera externa.

Materiales

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 (ICPA) 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.

	Kg
Agua	182,55
Cemento	356,99
Agregado grueso	985,77
Agregado fino	762,26

Tabla 2. Dosificación del hormigón

La resistencia a compresión se determinó mediante ensayos de compresión uniaxial sobre probetas cilíndricas de 150 mm x 300mm, según normas **IRAM 1534 y 1865**, respectivamente. 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**.

Campaña	Tipo de Hormigón	Resistencia media a la compresión, f'_m (Mpa)
I	HS	26.07
	HRFA	32.48
	HRFA-1	33.87
II	HS	31.28
	HRFA	26.20
	HRFH	27.42
III	HS	30.73
	HRFA	33.31
	HRFH	35.51

Tabla 3. Resistencia a la compresión del hormigón.

Acero

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%.

Fibras

Las fibras de acero empleadas son de extremo en gancho del tipo AR65 de ferrocement®. Para la elaboración del HRFH se utilizaron además macrofibras de polipropileno MACRONITA®, son fibras sintéticas recortadas de materiales poliméricos. Este tipo de fibras es químicamente inerte, tienen estabilidad volumétrica, un bajo módulo de elasticidad y bajo punto de fusión.

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

Tabla 4 – Características de las fibras empleadas.



Figura 4. Imagen de las fibras empleadas.

Procedimiento de ensayo e instrumentación.

Con el objetivo de conocer el comportamiento mecánico de las VGA, se las sometió al ensayo de flexión en 3 puntos, bajo la condición de simplemente apoyadas. Estas pruebas implicaron la aplicación de cargas cuasi estáticas monótonas crecientes en el centro de la luz de las vigas. Las mismas fueron aplicadas usando una prensa 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 con el software CatmanEasy®.

En las Figuras 5ª y 5b se muestra el esquema de ensayo e instrumentación utilizados. La Figura 5ª ilustra el esquema completo de ensayo e instrumentación, con detalles

de las dimensiones y la Figura 5b incluye detalles del sistema de medición de cargas y desplazamientos.

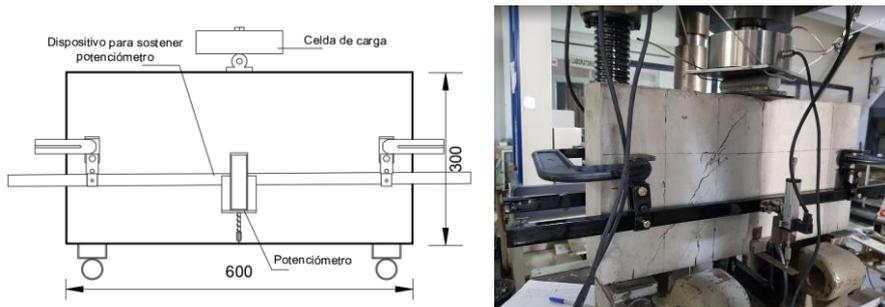


Figura 5. Esquema de ensayo e instrumentación de las VGA: a) esquema completo, b) Instrumentación de una de las caras.

Resultados

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

En la Tabla 5 se presentan los valores promedio de carga correspondiente a primera fisura, carga máxima (P_{max}), desplazamiento vertical correspondiente a dicha carga y los modos de falla. 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 la carga 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.

Campaña	Especimen	P_{cr} (N)	% incremento	P_{max} (N)	% incremento	δ_{max}	Modo de falla
I	V-SA	92000	-	120000	-	1,04	corte
	V-CA	94000	-	140000	-	0,98	corte
	V-HRFA	121666,6	29,4326241	151285,66	26,07138	1,02	corte
	V-HRFA-1	120000	27,6595745	167074,33	39,22861	1,18	corte

II	V-SA	94000	-	147540,00	-	0,77	Aplastamiento en los apoyos
	V-CA	100000	-	164412,33	-	0,90	corte
	V-HRFA	100000	6,38297872	158700,64	7,564484	0,94	corte
	V-HRFH	105000	11,7021277	170253,48	15,39479	0,97	corte
III	V-SA	95000	-	143547,00	-	0,92	corte
	V-CA	95000	-	183692,50	-	2,03	corte
	V-HRFA	105000	10,5263158	190554,50	32,74711	2,31	corte
	V-HRFH	115000	21,0526316	198152,00	38,03980	3,10	Corte y flexión

Tabla 5 – Resultados de ensayo a flexión de VGA.

Los resultados de los ensayos de la primera campaña mostraron que las cargas de primera fisura de los especímenes de HRFA para ambos porcentajes de adición de fibras resultaron similares y casi un 30% mayores que las de HS con armadura reducida, en promedio. Se puede decir además, observando la Tabla 4, 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 campaña, las cargas de primera fisura de los especímenes de HRFA con 0.5% de adición resultaron en promedio un 6.4% mayores que las de HS con armadura reducida. Mientras que las VGA de HRFH mostraron un mejoramiento promedio del 11.7% en dicha carga. En este caso, la adición de las macrofibras de polipropileno en combinación con las fibras de acero, produjo un aumento de la carga de fisuración, mayor que la armadura mínima de corte que establece el reglamento (Cirsoc 201-05^[9]). Es decir, se produjo una sinergia positiva entre las fibras de refuerzo.

Por su parte, en la tercera campaña, las vigas de HRFA mostraron cargas de primera fisura un 10.5% mayores a las de HS. A su vez, en los especímenes de HRFH la primera fisura apareció en cargas un 21% mayores que en las VGA de HS con armadura reducida.

En cuanto a la carga máxima de los especímenes de la primera campaña, las VGA de HRFA, con 0.5% de fibras mostraron un incremento promedio del 26% en la carga máxima comparado con las vigas de hormigón simple y armadura de corte reducida. Por su parte las vigas de HRFA con 1% de fibras alcanzaron cargas máximas promedio un 39% mayores a las registradas por las vigas de hormigón simple. 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 campaña, los especímenes de HRFA, con 0.5% de fibras mostraron un incremento promedio del 7.5% en la carga máxima comparado con las vigas de hormigón simple 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 15.4% mayores a las registradas por las vigas de hormigón

simple.

En la tercera campaña, los especímenes de HRFA, con 0.5% de fibras mostraron un incremento promedio del 32.74% en la carga máxima comparado con 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 38% mayores a las registradas por las vigas de hormigón simple.

Se observa 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.

Modos de falla

En la primera campaña todas las vigas fallaron por corte o compresión de la diagonal comprimida (Figuras 6^a y 6b). En cuanto a la segunda campaña, todos los especímenes fallaron por corte a excepción de dos especímenes de HS que fallaron por aplastamiento del hormigón en los apoyos y punto de carga y fisuración vertical (Figuras 7^a y 7b). Por su parte, en la tercera campaña todas las vigas fallaron por corte (Figuras 8^a, 8b, 8c y 8d). En los especímenes de HRFH se pudo observar una falla combinada de corte y flexión, lo que demuestra la efectividad del uso de fibras como refuerzo a la resistencia a corte de las VGA. 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 falla 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 mas 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 falla.

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



a. VGA de HRFA con 40 kg/m³ de fibras



b. VGA de HS y armadura reducida

Figura 6. Modos de falla de VGA de primera campaña.



a. VGA de HS con armadura reducida



b. VGA de HS con armadura 12ínima reglamentaria.



c. VGA de HRFA.



d. VGA de HRFH.

Figura 7. Modo de falla de los especímenes de la segunda campaña.



a. VGA de HS con armadura reducida



b. VGA de HS con armadura mínima r reglamentaria.



c. VGA de HRFA.



d. VGA de HRFH.

Figura 8. Modos de falla de los especímenes de la tercera campaña.

Curvas carga-desplazamiento

En las Figuras 9, 10 y 11 se reproducen las curvas carga – desplazamiento de las vigas de HS con armadura de corte mínima y con armadura de corte mínima 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 9 las vigas de HS con armadura a corte mínima mostraron una resistencia promedio un 16% mayor a las vigas de HS 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% de adición de fibras, alcanzaron valores de carga máxima promedio un 8% mayor a las vigas de HS con armadura a corte mínima y un 26% mayores a las vigas de HS y armadura reducida. Por su parte, los especímenes de HRFA con 1% de adición de fibras, desarrollaron cargas máximas promedio un 19.34% mayor a las vigas de HS con armadura a corte mínima y un 39,23% mayores a las vigas de HS y armadura reducida. Se puede ver el efecto beneficioso de las fibras que retardan la aparición de dicha 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 HS con armadura de corte reglamentaria y con armadura de corte reducida.

La capacidad de deformación y la rigidez de las VGA de HRFA fue mayor a la de las vigas de HS.

En la segunda campaña, las vigas de HS con armadura a corte mínima mostraron una resistencia promedio un 11,43% mayor a las vigas de HS pero con armadura reducida (Figura 10). La rigidez del espécimen de HS y armadura a corte reducida fue menor que la de la viga con armadura mínima a corte, la capacidad de deformación de ambos tipos de viga fue similar. Los especímenes de HRFA con 0.5% de adición de fibras, alcanzaron valores de carga máxima promedio un 4% menores a las vigas de HS con armadura a corte mínima y un 7,6% mayores a las vigas de HS y armadura reducida. Por su parte, los especímenes de HRFH desarrollaron cargas máximas promedio un 3% mayor a las vigas de HS con armadura a corte mínima y un 15,4% mayores a las vigas de HS y armadura reducida. Las vigas de HRF no mostraron un



aumento tan significativo en la resistencia con respecto a las de HS debido a que la resistencia a compresión del HRF resultó menor a la del HS, por tratarse de diferentes pastones dentro de la misma campaña. Esto concuerda con **Smarzewsky2019** que encontró que la resistencia a la compresión del hormigón tiene una influencia decisiva en el pico de carga de las VGA. En cuanto a las cargas correspondientes a la primera fisura, se puede ver en la Figura 10, que la hibridización de acero y fibras sintéticas, viga V-HRFH muestra un efecto mejorado, en comparación con la viga V-HRFA, con un solo tipo de fibra y una mayor ductilidad.

La rigidez de la viga V-HRFH resultó similar a la V-CA y ligeramente mayor a la V-HRFA y la V-SA.

En la tercera campaña (Figura 11), las vigas de HS con armadura a corte mínima mostraron una resistencia promedio un 11,43% mayor a las vigas de HS pero con armadura reducida. La rigidez del espécimen de HS y armadura a corte reducida fue menor que la de la viga con armadura mínima a corte, al igual que la ductilidad. Los especímenes de HRFA con 0.5% de adición de fibras, alcanzaron valores de carga máxima promedio un 3,7% mayores a las vigas de HS con armadura a corte mínima y un 32,74% mayores a las vigas de HS y armadura reducida. Por su parte, los especímenes de HRFH desarrollaron cargas máximas promedio un 8% mayor a las vigas de HS con armadura a corte mínima y un 38% mayor a las vigas de HS y armadura reducida. Las vigas de HRFH a su vez desarrollaron cargas correspondientes a la primera fisura un 21% mayor a las de HS y armadura reducida. La capacidad de deformación de las VGA de HRFA fue superior a la de las vigas de HS, mostrando una mayor rigidez inicial. Por su parte, las vigas de HRFH tuvieron una capacidad de deformación sensiblemente superior a las vigas de HS e incluso a las de HRFA, con una rigidez inicial superior a las de HS. En este caso la hibridización con 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 armadura de corte reducida.

Si bien es necesario realizar un mayor número de ensayos, se puede vislumbrar que el reemplazo parcial de la armadura de corte mínima, por fibras híbridas, puede proveer resistencias últimas y capacidad de deformación, similares.

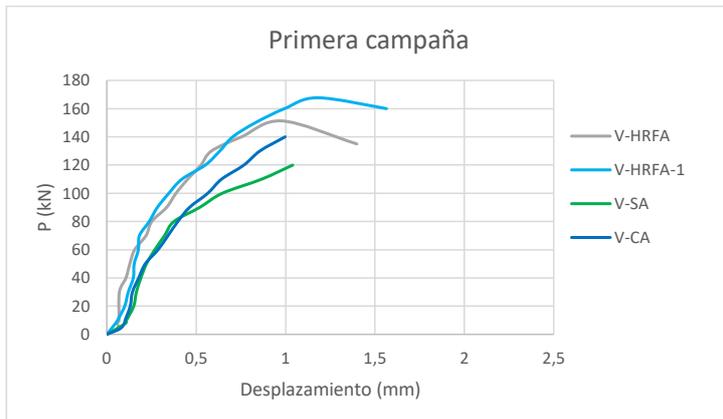


Figura 9. Curvas carga – desplazamiento primera campaña.



Figura 10. Curvas carga – desplazamiento segunda campaña.

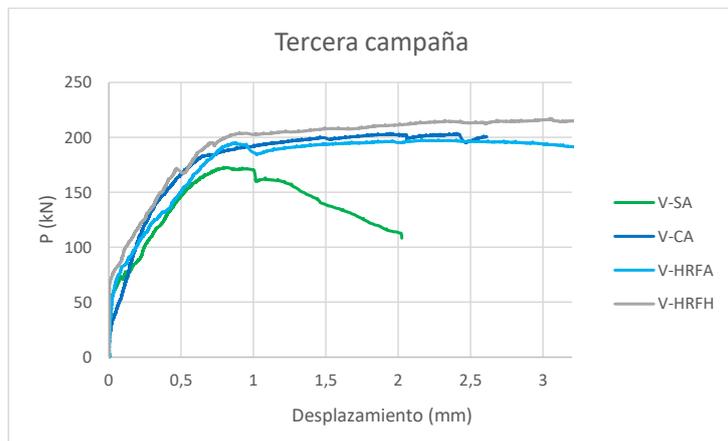


Figura 11. Curvas carga – desplazamiento tercer campaña.

Conclusiones

En este trabajo se presentó un estudio experimental de la capacidad resistente a corte de VGA de HS, HRFA y HRFH. Del análisis y comparación de los resultados, se puede decir que:

La incorporación de fibras de acero mejoró el comportamiento en resistencia de las vigas con armadura a corte reducida. Al aumentar el volumen de fibras agregado al hormigón, se logró un incremento significativo de la capacidad resistente, en detrimento de la trabajabilidad de la mezcla.

En general se observó, que la adición de un solo tipo de fibras, y más aún, el agregado de dos tipos diferentes, fibras de acero y fibras de polipropileno, permitió obtener cargas correspondientes a la primera fisura, mayores que las obtenidas en el caso de los especímenes con armadura de corte mínima, y armadura de corte reducida.

Algunos de los especímenes de hormigón reforzado con fibras mostraron modos de falla combinado a corte y flexión lo que demuestra la eficiencia del uso de las fibras como refuerzo al corte.

Los especímenes de HRFH mostraron en general, mayor resistencia y capacidad de deformación que los de HS y HRFA.

La resistencia a la compresión del hormigón tiene una fuerte influencia en la carga máxima de las VGA.



Bibliografía

- [1] Lantsoght Eva O. L., 2019. *How do steel fibers improve the shear capacity of reinforced concrete beams without stirrups?* Composites Part B, vol. 175.
- [2] Cuenca E., 2015. *On Shear Behavior of Structural Elements Made of Steel Fiber Reinforced Concret.* Universitat Politècnica de València, España.
- [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 pp. 356.365.
- [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] Kotecha P y Abolmaali A., 2019. *Macro synthetic fibers as reinforcement for deep beams with discontinuity regions: Experimental investigation.* Engineering Structures
- [8] Ortiz Navas F., Leiva Herdocia G, Serna P y Cuenca E., 2018. *An experimental study on the shear behaviour of reinforced concrete beams with macro-synthetic fibres.* Construction and Building Materials, vol. 169.
- [9] CIRSOC 201-2005. Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón.
- [10] ACI, 2014. Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural. American Concrete Institute.
- [11] EUROCODIGO BS EN1992-1-1.
- [12] Aguilar G, Matamoros A. B., Parra-Montesinos G. and Wight James K., 2002. Experimental Evaluation of Design Procedures for Shear Strength of Deep Reinforced Concrete Beams. ACI Structural Journal pp 539-548.
- [13] Mohammad Mohammadhassani, Hossein Nezamabadi-Pour, MohdZamin Jumaat, Mohammed Jameel1b, S.J.S.Hakim and Majid Zargar, 2012. *Application of the ANFIS model in deflection prediction of concrete deep beam.* Structural Engineering and Mechanics, vol. 45, pp. 319-332.
- [14] Choi Y., Lee H., Chu S., Cheong S and Jung W., 2012. Shear Behavior and Performance of Deep Beams Made with Self-Compacting Concrete. International Journal of Concrete Structures and Materials.
- [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.
- [16] Parra-Montesinos, G. 2006 a), "Shear Strength of Beams with Deformed Steel Fibers, Evaluating an alternative to minimum transverse reinforcement". Concrete International, pp. 58-65.



[17] Parra-Montesinos, G., Wight, J.K., Dinh, H., Libbrecht, A., and Padilla, C., 2006 b), "Shear Strength of Fiber Reinforced Concrete Beams Without Stirrups," Report No. UMCEE 06-04, University of Michigan, Ann Arbor, MI, 39 pp.

[18] Shahabi, S.; Hassan, Z.M.; Mahdavi, M.; Dezfouli, M.; Rahvar, M.T.; Naseri, M.; Jazani, N.H., 2007. Steel fibers as replacement of web reinforcement for rcc deep beams in shear. *Asian J. Civ. Eng. Build. Hous*, 8, pp. 479–489.

[19] Tuchscherer Robin G. and Quesada Alejandra, 2015. Replacement of Deformed Side-Face Steel Reinforcement in Deep Beams With Steel Fibers. *Structures*, vol. 3 pp. 130-136.

[20] Aref A. Abadel y Abdulrahman S. Albidah, 2019. *Investigation of Shear Reinforcement Schemes for RC Deep Beams*. *Arabian Journal for Science and Engineering*.

[21] Chittaranjan B. Nayak, 2021. *Experimental and numerical study on reinforced concrete deep beam in shear with crimped steel fiber*. *Innovative Infrastructure Solutions* vol 7:41.

[22] Suhail Shaikh, S. K. Kulkarni, S. S. Patil y S. A. Halkude, 2017. *Effect Of Hybrid Fibre Reinforcement In Concrete Deep Beams*. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR)*, vol. 3.

[23] Moradi, M. y Reza Esfahani, M., 2017. *Application of the strut-and-tie method for steel fiber reinforced concrete deep beams*. *Construction and Building Materials*, vol. 131, pp. 423-437.

[24] Campione G., 2012. *Flexural Behavior of Steel Fibrous Reinforced Concrete Deep Beams*. *Journal of structural engineering*, pp. 235-246.

[25] S. K. Madan, G. Rajesh Kumar y S. P. Singh, 2007. *Steel fibers as replacement of web reinforcement for rcc deep beams in shear*. *Asian Journal of civil engineering (building and housing)*, vol 8.

[26] Smarzewski P, 2019. *Analysis of Failure Mechanics in Hybrid Fibre-Reinforced High-Performance Concrete Deep Beams with and without Openings*. *Materials* vol 12, 101.