

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

Rougier, Viviana^{a,b}; González, Federico^a; Denardi, Miqueas^{a,b}; Retamal, Facundo^a

^aFacultad Reg. Concepción del Uruguay, Universidad Tecnológica Nacional,
rougierv@frcu.utn.edu.ar

^bFacultad Reg. Concordia, Universidad Tecnológica Nacional

Palabras clave: Vigas de gran altura, hormigón reforzado con fibras, resistencia a corte.

RESUMEN

Las vigas de gran altura (VGA) son utilizadas comúnmente como elementos de transición entre columnas de niveles superiores a plantas inferiores de edificios elevados. Investigaciones experimentales recientes han demostrado que el uso de hormigón reforzado con fibras (HRF) en dichos elementos mejora la tenacidad y el comportamiento a tracción. Sin embargo, las técnicas analíticas convencionales para el estudio del hormigón no resultan adecuadas para el análisis de elementos contruidos con HRF. En este trabajo se presenta un estudio analítico y experimental de la capacidad resistente a corte de VGA de hormigón armado reforzado con fibras de acero y la combinación de acero y polipropileno. Se utilizan formulaciones existentes y modificadas para predecir la resistencia a corte cuando se usan refuerzos de fibras híbridas. Finalmente, las predicciones analíticas se comparan con resultados experimentales propios de especímenes a escala ensayados a flexión en tres puntos. Se analizan diferentes fracciones de volúmenes de fibra, y la existencia o no de armadura distribuida.

ABSTRACT

Deep beams (DB) are commonly used as transition elements between columns from upper levels to lower floors in high-rise buildings. Recent experimental research has shown that the use of fiber-reinforced concrete (FRC) in such elements improves toughness and tensile behavior. However, conventional analytical techniques for studying concrete are not suitable for analyzing elements constructed with FRC. This work presents an analytical and experimental study of the shear strength of reinforced concrete DB strengthened with steel fibers, as well as with a combination of steel and polypropylene fibers). Existing and modified formulations are used to predict shear strength when hybrid fiber reinforcement is used. Finally, the analytical predictions are compared with experimental results obtained from scaled specimens tested under three-point bending. Different fiber volume fractions and the presence or absence of distributed reinforcement are analyzed.

Organiza:

INTRODUCCIÓN

Las vigas de gran altura (VGA) son estructuras en forma de placas solicitadas en su plano y sustentadas como vigas, de modo tal que se pueden desarrollar puntales de compresión entre las cargas y los apoyos. Se utilizan en numerosas estructuras tales como fundaciones, plataformas offshore, tanques, etc. También se suelen usar como elementos de transición entre columnas de niveles superiores a plantas inferiores de edificios elevados, cuando por razones arquitectónicas o funcionales son necesarias luces mayores entre columnas¹. El Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón (CIRSOC 201-25)², las define como aquellas vigas en que las luces libres, l_n , no exceden cuatro veces la altura total del elemento ($l_n \leq 4h$), o bien aquellas con cargas concentradas aplicadas dentro de una distancia igual a $2h$ de la cara del apoyo.

Debido a la pequeña relación entre la distancia desde el punto de aplicación de la carga y el eje del apoyo y la altura útil (a/d), las VGA desarrollan un mecanismo de transferencia de carga diferente al de las vigas esbeltas. En las VGA, una gran proporción de la carga que soportan es transmitida directamente a los apoyos. Por ello las tensiones de corte son significativamente mayores, y en general controlan la resistencia de estos elementos. Sin embargo, algunos autores^{3,4,5} incluyen también, las fallas por anclaje por aplastamiento en la zona de apoyos, modos de rotura que, en general, son indeseables y no son exclusivos de las VGA, aunque la geometría y el comportamiento de estas incrementan la probabilidad de que se produzcan⁵.

Las VGA se deben diseñar considerando la distribución no lineal de deformaciones o bien conforme al capítulo 23 del Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón (CIRSOC 201-25)², que permite el diseño por “método puntal-tensor” (MPT). El MPT está basado en el teorema de límite inferior del cálculo plástico, razón por la cual, un elemento diseñado utilizando este método requiere suficiente armadura para promover la redistribución de las fuerzas internas en el estado fisurado. Es decir, debe colocarse una armadura mínima distribuida atravesando los ejes de puntales interiores, que además de permitir la redistribución de fuerzas, controla la fisuración ante cargas de servicio y conduce a un comportamiento dúctil y la carga será resistida por la estructura sin llegar a la rotura. Dependiendo del tipo y valor de las solicitaciones, ello puede dar lugar a grandes congestionamientos de armaduras. En este sentido el uso de fibras, como complemento o reemplazo parcial de la armadura distribuida, resulta de gran interés.

Algunas investigaciones han demostrado que el uso de hormigón reforzado con fibras (HRF), particularmente de acero, mejora significativamente el comportamiento de VGA, proporcionando un incremento en la capacidad de carga y la ductilidad y un mejor control de la fisuración, aún para bajos contenidos de fibras^{6,7,8,9}. Sin embargo,

una de las barreras para el uso estructural del HRF es la falta de modelos analíticos que describan el comportamiento de aquellos elementos de HRF que fallan por corte, más aún, expresiones que contemplen el efecto de la hibridación de dos tipos de fibras. Tanto la industria en general que utiliza cada vez más estos hormigones especiales, como la ingeniería civil, que recurre en muchas ocasiones al uso de sistemas híbridos, requieren el desarrollo de herramientas de diseño apropiadas.

En este trabajo se analiza la capacidad de diferentes modelos analíticos desarrollados por otros autores^{2,10,11,12,13} para predecir la resistencia a corte de VGA de hormigón armado con y sin refuerzo de fibras de acero (HRFA). Además se introducen modificaciones a dichos modelos a los efectos de evaluar el comportamiento de VGA de hormigón reforzados con fibras híbridas (acero y prolipropileno), HRFH. Los resultados teóricos se cotejan con datos experimentales propios obtenidos de una campaña tendiente a evaluar la efectividad del uso de HRFA y HRFH en VGA, en comparación con la armadura distribuida convencional, en términos de resistencia a corte y modos de falla.

ESTUDIO ANALÍTICO

Generalidades

Los elementos de hormigón estructural, o regiones de estos elementos, donde la carga o discontinuidad geométrica provoca una distribución no lineal de la deformación unitaria dentro de la sección transversal se denominan “regiones D”, o perturbadas, y dentro de ellas se encuentran las vigas de gran altura. El reglamento argentino de estructuras de hormigón, CIRSOC 201-2025², permite el diseño de dichos elementos, mediante el método puntal tensor (MPT), según los lineamientos del Capítulo 23. Otros códigos, tales como el ACI 318-19¹⁴ y el Euro-Código EC2:2004¹⁵, también adoptan este método.

El MPT 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. A estos elementos se los considera articulados en los nodos, y dichos nodos, que son zonas de intersección de bielas y tirantes, no se consideran puntuales, debido a que tanto las bielas comprimidas como los tensores, tendrán un determinado ancho, transformándose en zonas nodales con ciertas dimensiones, que se deben considerar la seleccionar las dimensiones del reticulado¹.

Por otro lado, según el apartado 9.9.2 del Reglamento CIRSOC 201-2025², las

dimensiones de las VGA deben seleccionarse de tal manera que cumplan con un límite impuesto para controlar la fisuración bajo cargas de servicio y como protección ante fallas por compresión diagonal:

$$V_u \leq \phi 0.83 \sqrt{f'_c} b_w d \quad (1)$$

Además, se estipula que el área de refuerzo distribuido a lo largo de las dos caras laterales de las VGA, tanto vertical, A_v como horizontal A_h , no deben tener una separación s que exceda del menor valor entre $d/5$ y 30 cm, y deben cumplir con:

$$A_v \geq (0.0025 b_w s); A_{vh} \geq (0.0025 b_w s_2) \quad (2)$$

Donde s y s_2 es la separación de la armadura transversal longitudinal distribuida, respetivamente.

El MPT permite cálculos simples de elementos complejos y dado un problema, siempre se puede resolver, con razonable aproximación, aplicando dicho método. Sin embargo, la capacidad resistente obtenida con el método puntal tensor siempre es menor que la real¹⁶. Por ello algunos investigadores, en búsqueda de resultados más cercanos a la carga última han realizado modificaciones al MPT, entre ellos, Matamorosy Wong (2003)¹¹; Arabzadeh et al. (2009)¹⁰; Amornpinnyo y Teerawong (2014); Adrija et al. (2017)¹⁶. Por otro lado, algunos autores han propuesto modificaciones y/o adaptaciones del MPT que permiten determinar la capacidad de carga última de VGA de HRFA, según diferentes dosificaciones de fibras y características geométricas de los especímenes^{9,13}. Sin embargo, no se encontraron en la literatura disponible, expresiones analíticas, a partir de las cuales se pueda obtener la resistencia a corte de VGA de HRFH.

A continuación, se describen brevemente las formulaciones teóricas de Matamoros y Wong (2003)¹¹, Arabzadeh et al. (2009)¹⁰; Amornpinnyo y Teerawong (2014)¹², desarrolladas para predecir la resistencia a corte de VGA de hormigón armado. Luego se introduce una modificación a dichas formulaciones a los efectos de considerar la contribución de las fibras de acero y de la mezcla híbrida de acero y polipropileno, a partir de datos experimentales. Además, se presenta el modelo de Sagi et al. (2022)¹³ desarrollado para hormigón reforzado con fibras y una adaptación del mismo con el fin de predecir la carga máxima de VGA de HRFH.

Modelo de Matamoros y Wong (2003)¹¹

Matamoros y Wong (2003)¹¹ proponen una formulación para determinar la resistencia de VGA, basada en el MPT. El modelo relaciona la resistencia a corte de una VGA con las fuerzas desarrolladas en el puntal diagonal que representan la carga resistida por el hormigón simple, y la armadura distribuida, vertical y horizontal. Las ecuaciones de diseño propuestas, fueron calibradas con los resultados experimentales obtenidos de 175 VGA simplemente apoyadas, disponibles en la literatura, con una relación máxima $a/d = 3$. La ecuación resultante es la siguiente:

$$V = \frac{0.3}{a} f'_c b w_{st} + A_{tv} f_{yv} + 3 \left(1 - \frac{a}{d}\right) A_{th} f_{yh} \quad (3)$$

donde: f'_c = resistencia a compresión del hormigón; b = ancho de la viga; w_{st} = ancho del puntal; A_{tv} y A_{th} = áreas del refuerzo vertical y horizontal, respectivamente; f_{tv} y f_{th} = tensión de fluencia en el refuerzo vertical y horizontal, respectivamente.

Modelo de Arabzadeh et al. (2009)¹⁰

Arabzadeh et al., (2009)¹⁰ proponen también un método, basado en el MPT, para determinar la capacidad resistente a corte de VGA de hormigón armado simplemente apoyadas, y la determinación de un “factor de eficiencia del hormigón” que considera el efecto de la armadura distribuida o de corte. El método, supone que la fuerza cortante total resistida por la VGA está compuesta por dos mecanismos resistentes independientes: el puntal diagonal de hormigón, correspondiente al mecanismo de bielas y tirantes, y la fuerza resistente equivalente aportada por la armadura distribuida. La función y los parámetros desconocidos del modelo se determinan a partir de 324 datos experimentales obtenidos por otros investigadores. Los resultados obtenidos indican que el método es capaz de predecir con razonable aproximación la resistencia a corte de VGA, de diferentes dimensiones geométricas, resistencias del hormigón y disposición de los puntos de carga. A continuación se presenta la formulación:

$$V_u = \frac{f'_c{}^{0.70}}{0.7+0.15\left(\frac{a}{d}\right)^2} A_{str} \sin\theta + 0.0065 \rho_p^{-0.35} A_{wp} \cos\theta \quad (4)$$

donde: V_u = resistencia al corte de la viga, N; f'_c = resistencia a compresión del hormigón, MPa, obtenida de probetas cilíndricas; A_{str} = área tangencial del puntal,

mm^2 ; θ = ángulo entre el eje del puntal diagonal y el tensor; ρ_p = cuantía equivalente de la armadura distribuida = $(\rho_v \cos^2 \theta + \rho_h \sin^2 \theta)$; ρ_v = cuantía de refuerzo vertical; ρ_h = cuantía de refuerzo horizontal y A_{wp} = área equivalente del refuerzo horizontal y vertical = $A_v \cos \theta + A_h \sin \theta$.

Modelo de Amornpinnyo y Teerawong (2014)¹²

Amornpinnyo y Teerawong (2014)¹² proponen un modelo modificado del MPT del código ACI 318-11, el cual logra ajustar razonablemente los resultados experimentales obtenidos por los propios autores. Al igual que la formulación anterior tiene en cuenta el aporte de la armadura distribuida en la resistencia final al corte de una VGA, además de la resistencia del puntal diagonal de hormigón. La ecuación propuesta es la siguiente.

$$P_{max} = 2[(0.85 f'_c \beta_s b w_{st})] \sin \theta + A_v f_v + (A_h f_h) \tan \theta \quad (5)$$

donde: P_{max} = resistencia total a corte de la viga; β_s = coeficiente de puntal = 0.75; w_{st} = ancho del puntal; A_v y A_h = área del refuerzo vertical y horizontal respectivamente; f_v y f_h = tensión de tracción en el refuerzo vertical y horizontal, respectivamente.

Modificación de los modelos de Matamoros y Wong (2003)¹¹, Arabzadeh et al. (2009)¹⁰ y Amornpinnyo y Teerawong (2014)¹² para considerar las fibras de acero.

Lee et al. (2016)¹⁷ proponen una ecuación que tiene en cuenta la contribución de las fibras de acero en la resistencia al corte del hormigón, a través de la tensión de adherencia y la orientación en el espacio de dichas fibras. La formulación propuesta es la siguiente:

$$V_{sf} = 0.41 V_f \tau_{max} \frac{L_f}{d_f} \rho_f b_w (d_s - c) \cot \theta \quad (6)$$

donde: V_{sf} = contribución de las fibras en la resistencia al corte, V_f = fracción de volumen de fibras; τ_{max} = máxima tensión de adherencia de las fibras; L_f y d_f = longitud y diámetro de las fibras; b_w = ancho de la sección de hormigón; d_s = altura efectiva de la sección; c = profundidad del eje neutro; θ = ángulo de la fisura de corte.

El valor de V_{sf} es incorporado en las ecuaciones (3), (4) y (5), de manera de tener en cuenta el aporte de las fibras de acero en la resistencia al corte de VGA.

Modelo de Sagi et al. (2022)¹³

Sagi et al. (2022)¹³ proponen un modelo analítico basado en el MPT Fisurado (CSTM, por sus siglas en inglés) desarrollado por Cheng et al.¹³ a los efectos de predecir la capacidad resistente última al corte de VGA de hormigón reforzado con fibras de acero. Dicho modelo se amplía para incorporar el efecto de las fibras, y se propone un MPT Fisurado para hormigón reforzado con fibras (FR-CSTM, por sus siglas en inglés) simplificado. De acuerdo a sus autores, la comparación de las predicciones del modelo, con resultados experimentales y modelos existentes en la literatura, demuestra que el método propuesto es capaz de predecir con buena aproximación la resistencia última a corte de VGA de HRFA. La formulación propuesta es la siguiente¹³:

$$V_n = 0.8(F_{si} + F_{sc})\sin\theta \quad (5)$$

$$F_{si} = \beta_{si}f'_c w_{si}b; F_{sc} = \beta_{sc}f'_c w_{sc}b$$

donde: V_n = resistencia ultima a corte de la viga; F_{si} = componente vertical de la fuerza transferida a lo largo del eje del puntal y a través de la porción no fisurada; F_{sc} = fuerza transferida a lo largo del eje del puntal y a través de la porción fisurada; β_{si} , β_{sc} y w_{si} , w_{sc} son los factores de eficiencia y anchos del puntal no fisurado y fisurado; b = ancho de la viga y θ =ángulo entre el eje del puntal diagonal y el tensor.

Los factores de eficiencia β_{si} y β_{sc} contienen el aporte del hormigón, de la armadura distribuida vertical y horizontal y de las fibras, a la resistencia al corte. β_{si} proporciona la contribución del hormigón no fisurado y β_{sc} el aporte del hormigón fisurado, de la armadura distribuida y de las fibras. En la Figura 1 se puede ver un esquema de parte de un puntal donde se destacan las regiones fisurada y no fisurada.

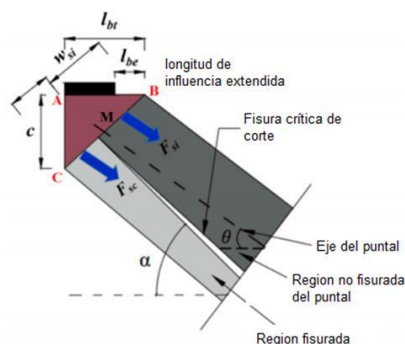


Figura 1. Esquema de un puntal bajo el punto de carga del modelo de Sagi et al.¹³

Modificación de los modelos de de Matamoros y Wong (2003)¹¹, Arabzadeh et al. (2009)¹⁰, Amornpinnyo y Teerawong (2014)¹² y Sagi et al. (2022)¹³ para considerar las fibras híbridas.

La mejora de la matriz circundante a las FA por la presencia de las FPP se puede modelar, de manera simplificada, como una presión radial que actúa sobre la superficie de las FA e incrementa su resistencia al arrancamiento. La mejora mencionada, impacta en la tensión máxima de unión fibra-matriz τ incrementando su valor, en función de dos factores obtenidos experimentalmente por Deng et al. (2018)¹⁸, el coeficiente de fricción matriz-acero (μ) y el volumen de FA (V_{FA}) y FPP (V_{FPP}) empleados, según la siguiente ecuación:

$$\tau_{HRFH} = \tau + (1,22 V_{FA} + 28,74 V_{FPP}) \quad (8)$$

donde el valor de μ puede estimarse en 0,3 según las recomendaciones de Li et al. (1991)¹⁹. El nuevo valor τ_{HRFH} es empleado en la ecuación 7 para determinar la tensión de extracción vertical de la fibra (v_b) a lo largo de la fisura inclinada generada por el punzonado.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

El programa experimental se llevó a cabo mediante ensayos a flexión de ocho prototipos de vigas de gran altura a escala reducida, sometidas a la acción de una carga puntual aplicada concéntricamente y con una relación luz de corte- altura, a/h , de 0.67. Los especímenes fueron diseñados siguiendo los lineamientos del CIRSOC 201-05²⁰, Apéndice A, y verificadas según el capítulo 23 del CIRSOC 201-25².

Detalle de los especímenes

Se elaboraron tres tipos de hormigón, hormigón simple, HRFA y HRFH (acero y polipropileno). Dos especímenes se fabricaron con hormigón sin fibras y armadura de flexión únicamente y con hormigón sin fibras, armadura de flexión y armadura mínima distribuida. Las restantes vigas se elaboraron con HRFA, y HRFH, con armadura de flexión y sin armadura distribuida en todos los casos. Para el HRFA se utilizaron dos fracciones de volumen de fibras (V_f), 0.30 % (25 kg/m³) y 0.64 % (50 kg/m³). En el HRFH, se emplearon 30 kg/m³ de fibras de acero ($V_f = 0.4$ %) y 5 kg/m³ de fibras de polipropileno ($V_f = 0.5$ %). En las Figuras 2 a y b, respectivamente, se pueden ver los detalles constructivos de un espécimen con armadura distribuida y de otro con armadura de flexión solamente. Se adoptó un recubrimiento de 20 mm. En

la Tabla 1 se presenta la descripción de los especímenes ensayados en cuanto a denominación, cuantías de armaduras longitudinal (ρ) y de estribos horizontales y verticales (ρ_h y ρ_v) y fracción de volumen de fibras (V_f %) de acero y de polipropileno. En la nomenclatura, FA representa fibras de acero y FPP, fibras de polipropileno, los números 25, 50 y 30 indican la fracción de volumen de FA, 0.30 %, 0.64 % y 0.40 %, respectivamente. Los números 30-5 representan las fracciones de V_f de FA y FPP, respectivamente. Los especímenes denominados V-1 y V-ADM-2, representan las vigas de referencia de hormigón sin fibras y sin armadura distribuida mínima, y de hormigón sin fibras y con armadura distribuida mínima, respectivamente, según CIRSOC 201-05²⁰, Apéndice A.

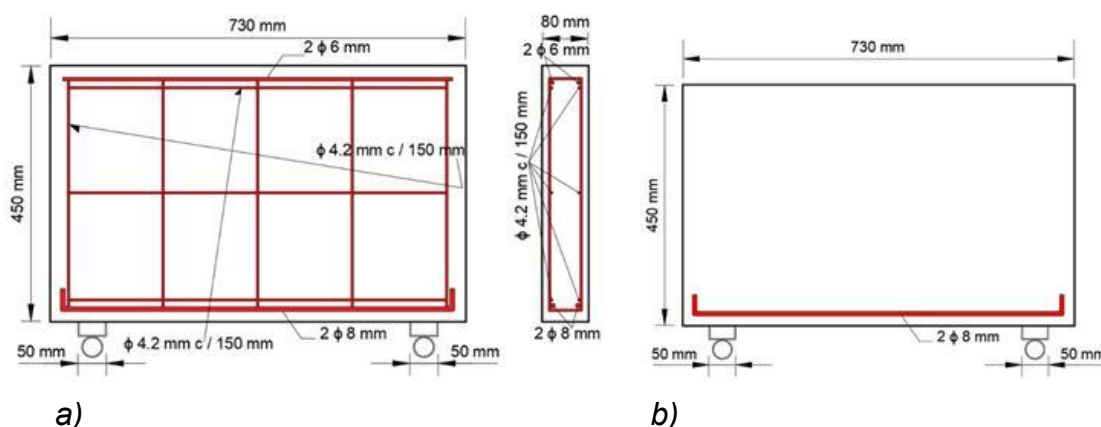


Figura 2. Esquema de la estructura: a) Viga con armadura distribuida; b) Viga con armadura de flexión únicamente.

DENOMINACIÓN	V_f FA (%)	V_f FPP (%)	ρ (%)	ρ_v (%)	ρ_h (%)
V-1(referencia)	-	-	0.29	-	-
V-ADM-2 (referencia)	-	-	0.29	0.23	0.23
V-FA25-1	0.30	-	0.29	-	-
V-FA25-2	0.30	-	0.29	-	-
V-FA50-3	0.64	-	0.29	-	-
V-FA50-4	0.64	-	0.29	-	-
V-FAFPP-30-5 -5	0.40	0.50	0.29	-	-
V-FAFPP-30-5 -6	0.40	0.50	0.29	-	-

Tabla 1 – Detalle de los especímenes ensayados

Características y propiedades de los materiales

En la ejecución de las vigas se utilizaron tres tipos de hormigón, hormigón simple, HRFA, y HRFH. El hormigón sin fibras fue dosificado 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 30 MPa. Se trabajó con agregados de la zona y cemento portland compuesto (CPC40). Para el HRFA se emplearon fibras de acero (FA) con extremo de gancho WIRAND®, denominadas FF1, de 50 mm de longitud (l_f) y 1 mm de diámetro (d_f), relación de aspecto $l_f/d_f = 50$. Para el HRFH se emplearon las mismas fibras de acero descriptas anteriormente y macrofibras de polipropileno (FPP), denominadas comercialmente “MACRONITA”, de 50 mm de longitud, 0.6 mm de diámetro, y una relación de aspecto de 83. Este tipo de fibras son químicamente inertes, tienen estabilidad volumétrica, un bajo módulo de elasticidad y bajo punto de fusión. Tanto las FA como las FPP se agregaron en forma manual, gradual y directamente a la mezcladora. En la Tabla 2 se presentan las propiedades mecánicas (resistencia media f'_m y módulo elástico E) de los hormigones, la tensión de fluencia y la resistencia a tracción (f_y y f_t) del acero de refuerzo y de las fibras. La resistencia a compresión de los diferentes hormigones, se determinó mediante ensayos de compresión uniaxial sobre probetas cilíndricas de 150 mm x 300 mm, según norma IRAM 1546²¹ y el módulo de elasticidad de acuerdo a formulación propuesta por el Reglamento CIRSOC 201-05²⁰. La preparación y el curado de las probetas se realizaron conforme lo establece la norma IRAM 1534²².

MATERIALES	f'_m (MPa)	E (GPa)	f_y (MPa)	f_t (MPa)
HORMIGÓN SIN FIBRAS	33.25	27.10	-	-
HORMIGÓN CON FA ($V_f = 0.3 \%$)	35.60	28.04	-	-
HORMIGÓN CON FA ($V_f = 0.64 \%$)	31.07	26.48		
HORMIGON CON FA y FPP	32.00	27.80		
ACERO	-	210	420	500
FA	-	200	800	1100
FPP		6	-	550

Tabla 2 – Propiedades mecánicas de los materiales

Se puede ver en la Tabla que la resistencia media a compresión del HRFA para la fracción $V_f = 0.64 \%$ (50 kg/m^3), resultó significativamente menor que la correspondiente a la fracción de volumen de fibras, $V_f = 0.3\%$, y que aquella del hormigón sin fibras. Ello responde a un aumento en la viscosidad de la mezcla, al incrementar el volumen de fibras de $0,30 \%$ a $0,64 \%$, lo que podría haber provocado problemas en la compactación de las probetas. Lo mismo se puede observar en el HRFH.

Procedimiento de ensayo e instrumentación

Todas las VGA fueron ensayadas en la condición de simplemente apoyadas con la aplicación de una carga cuasi estática monótona creciente en el centro de la luz. Se adoptó una velocidad de carga de 1.5 mm/min y se midieron cargas y desplazamientos en la dirección longitudinal. La carga fue aplicada usando una máquina de ensayos universal con sistema hidráulico con posibilidad de desarrollar una carga vertical nominal máxima de 1000 kN . Para la medición de los desplazamientos se utilizó un reloj comparador digital con una sensibilidad de 0.001 mm . En la Figura 3 se ilustra el esquema de ensayo e instrumentación utilizado. El instrumento de medición de los desplazamientos transversales fue retirado antes de alcanzar la carga máxima, como medida de precaución para evitar la posible rotura de este.

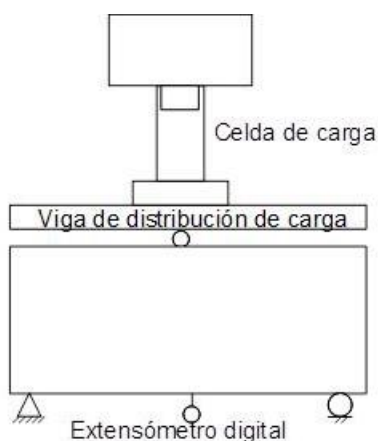


Figura 3. Esquema de ensayo e instrumentación

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En general, las vigas fallaron por la formación de una fisura diagonal entre el apoyo y la placa de carga dentro de la luz de corte, a. La fisura diagonal que conduce a la falla ha sido denominada en este estudio Fisura de Corte (FC). La resistencia máxima

al corte depende de la formación y propagación de dicha fisura. La propagación y apertura de la FC son resistidas principalmente por la armadura distribuida mínima (en los casos que se colocó) o por las fibras discretas, particularmente las de acero, mediante un mecanismo de puenteo (*bridging action*) una vez que la fisura se formó. El análisis detallado de cada respuesta se presenta en las secciones siguientes.

Respuesta carga-desplazamiento

En la Figura 4 se muestran las curvas carga-desplazamiento axial y transversal ($P-\delta_l$; $P-\delta_t$) de las vigas de hormigón simple, con y sin armadura de corte, y de las vigas de HRFA y de HRFH. En general, se observa un comportamiento frágil a corte y con pequeñas deformaciones de todos los especímenes, si se compara con vigas de hormigón armado que responden a la teoría de Bernoulli. La respuesta de los diferentes prototipos muestra un aumento sostenido de la carga y luego una disminución junto con un cambio en la rigidez, en coincidencia con la aparición de la primera fisura diagonal. Luego, se puede ver un incremento de la carga a medida que aumenta la deflexión, hasta alcanzar la carga máxima. En este punto se produce una caída de la capacidad resistente debido a la extensión a toda la altura de la viga y aumento de apertura de la fisura diagonal mencionada anteriormente.

La viga de referencia V-1, sin armadura distribuida mínima, las vigas de HRFA, V-FA25-1, V-FA25-2 y V-FA50-4 y el prototipo de HRFH, V-FAFPP-30-5-5, muestran una rigidez inicial similar en la respuesta carga-desplazamiento. En contraste, los especímenes V-ADM-2 y V-FA50-3, registran una rigidez inicial menor que el resto de las VGA. La curva correspondiente al segundo espécimen de HRFH, V-FAFPP-30-5-6, no ha sido considerada, pues problemas en el sistema de medición de desplazamientos, impidieron registrar correctamente esos los datos.

Por otro lado, se puede ver en el gráfico, que la viga V-ADM-2 con armadura distribuida mínima, presenta la mayor capacidad de carga y de deformación, seguida por las vigas de HRFA, V-FA-50-3 y 4. Si bien es necesario realizar un mayor número de ensayos, en principio, se puede decir que no sería prudente reemplazar en su totalidad, la armadura distribuida mínima por fibras discretas.

En Tabla 3 se presentan los resultados obtenidos durante los ensayos, correspondientes a las vigas consideradas en este estudio. Se muestran cargas últimas (P_u), desplazamiento correspondiente a la carga máxima (δ_u) y modos de falla.

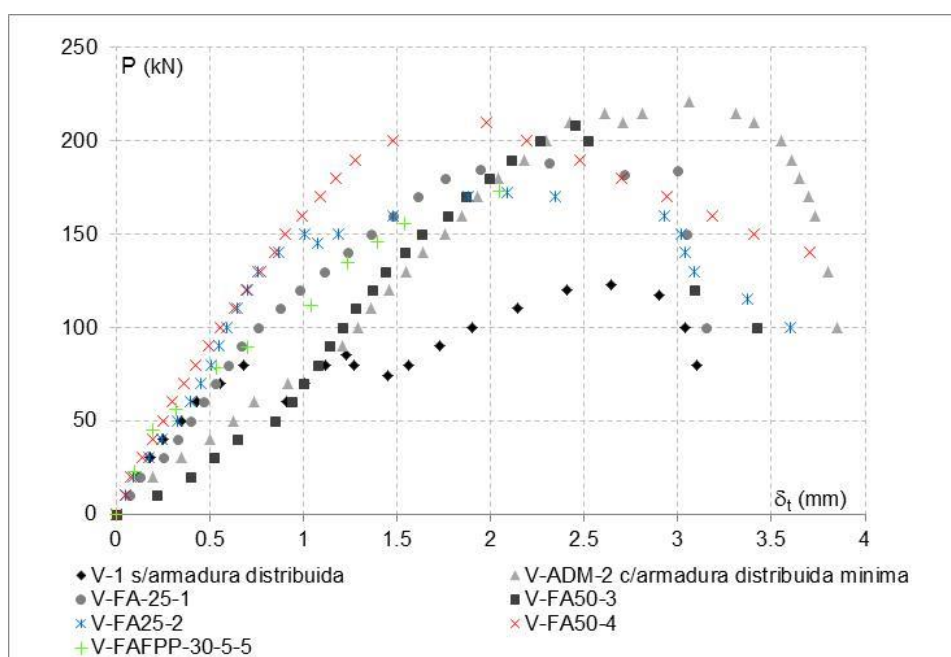


Figura 4. Curvas carga-desplazamiento axial y transversal ($P-\delta_l$ y $P-\delta_t$)

Según se puede ver en la Tabla 3, la viga con armadura distribuida y los especímenes de HRFA muestran un incremento significativo en resistencia, en comparación con el prototipo V-1 de hormigón sin fibras y con armadura de flexión solamente. Sin dudas, la viga V-ADM-2 con armadura mínima distribuida, registra el mayor incremento de carga. Los especímenes de HRFA y 0.64 % de fracción de volumen de fibras, alcanzaron un valor de carga última similar (210.48 kN y 208.50 kN) y muy cercano a V- ADM-2 (222.20 kN). En las VGA de HRFA con una fracción de volumen de fibras de 0.31 %, los valores de carga última fueron menores comparados con los obtenidos por la viga V-ADM-2 con armadura distribuida mínima y los especímenes de HRFA y 0.64 % de V_f . El incremento de la fracción de volumen de fibras se reflejó en un aumento de la resistencia al corte. Sin embargo, se debe tener en cuenta que un volumen alto de fibras (mayor a 1.5 %, según Adam et al. (2016)¹⁵) puede afectar la trabajabilidad de la mezcla. Por otro lado, y en cuanto a los prototipos de HRFH, se puede ver que alcanzaron un valor de carga última menor que las VGA de HRFA, tanto para $V_f = 0.3$ % como para $V_f = 0.64$ %. La viga denominada V-FAFPP-30-5 -6, registro una falla prematura en el apoyo, y un importante desplazamiento correspondiente a dicha carga, por lo cual no se la consideró en el análisis.

VIGA	V_u (kN)	δ_u (mm)	Modos de falla
V-0-1(referencia)	124.40	3.10	Falla en apoyo
V-ADM-2 (referencia)	222.20	3.20	Fisura diagonal
V-FA25-1	185.00	2.15	Fisura diagonal
V-FA25-2	171.92	2.24	Aplastamiento del hormigón en punto de carga
V-FA50-3	208.50	2.73	Fisura diagonal
V-FA50-4	210.48	2.25	Fisura diagonal
V-FAFPP-30-5 -5	173.64	2.05	Fisura diagonal
V-FAFPP-30-5 -6	106.00	3.22	Falla en apoyo

Tabla 3 – Resultados experimentales

Modos de falla

En la Figura 5 a) se muestra el modo de falla de la viga denominada V-ADM-2 con armadura distribuida. Con el incremento de la carga, la fisura diagonal se extiende desde el punto de carga al apoyo, se aumenta el espesor de las fisuras existentes y en la etapa final que conduce a la falla por corte, se produce la rotura del hormigón situado por encima de la fisura crítica de corte. En el caso de la viga V-1, de hormigón sin fibras y con armadura de flexión solamente, se produjo la rotura en uno de los apoyos, debido, probablemente a un anclaje deficiente de la armadura longitudinal, Figura 5 b). En la Figura 6 se observa la falla por corte, sin rotura del hormigón, del espécimen V-FA50-4. En ese caso la fisura diagonal se inicia en uno de los apoyos. Las vigas V-FA50-3, V-FA25-2 y 3 y el prototipos de HRFH, V-FAFPP-30-5-5 tuvieron un modo de falla similar, fisura diagonal, pero con inicio en el punto de carga. En la Figura 6 se muestra también, el modo de falla del espécimen V-FA50-3 y el efecto de “costura o punteo” de las fibras de acero. Se observó arrancamiento de estas últimas.

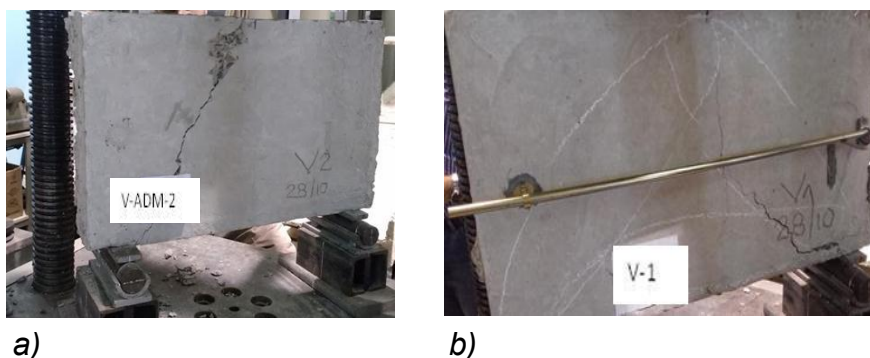


Figura 5. Modos de falla de las VGA: a) VGA de hormigón si fibras y con armadura distribuida; b) VGA de hormigón sin fibras y sin armadura distribuida



Figura 6. Modos de falla de las VGA de HRFA

COMPARACIÓN ENTRE MODELOS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la Tabla 4 se comparan la resistencia última promedio, V_u , de las vigas de la campaña experimental descrita anteriormente, y los resultados de los modelos teóricos de Matamoros y Wong, (2003)¹¹, Arabzadeh et al. (2009)¹⁰ y Amornpinnyo y Teerawong (2014)¹² adaptados para tener en cuenta el aporte de las fibras de acero y de las fibras híbridas, acero y polipropileno. También se compara el modelo de Sagi et al. (2022)¹³ y su modificación que permite considerar la contribución de un segundo tipo de fibra, FPP en este caso. En la Tabla, se agrega además, el MPT del CIRSOC 201-25² y las adaptaciones correspondientes para tener en cuenta el aporte de las fibras. Al comparar los resultados teóricos y experimentales, se observa que en general, todos los modelos subestiman los valores últimos de resistencia, tanto para los prototipos de hormigón sin fibras como para aquellos de HRFA y HRFH. El modelo de Sagi et al. (2022)¹³ ajusta razonablemente todos los resultados experimentales. Sin embargo, es un modelo complejo y con numerosos parámetros y supuestos, que requieren atención y criterio. El MPT del Reglamento CIRSOC 201-25² y la formulación de Arabzadeh et al. (2009)¹⁰ dan resultados

conservadores, al igual que sus modificaciones para tener en cuenta la contribución de las fibras. Se destaca que en caso de haberse considerado la segunda VGA de HRFH, V-FAFPP-30-5 -6, cuya falla fue prematura, en el apoyo (106 kN), el único modelo que quedaría del lado de la seguridad, en cuanto a estimación de resistencia última, sería El MPT del Reglamento CIRSOC 201-25². El modelo de Matamoros y Wong (2003)¹¹ y su adaptación al aporte de las fibras, tiene una correlación aceptable con los valores de resistencia última de las VGA de HRFA y de HRFH, pero, en su forma original, sobrestima los valores de las VGA de hormigón sin fibras, con y sin armadura distribuida. La formulación de Amorpinnyo y Teerawong (2014)¹², relativamente sencilla de implementar, sobrestima, en su formato original la capacidad resistente de la VGA de hormigón sin fibras y con armadura distribuida mínima. Ello podría indicar que el aporte de dicha armadura resulta sobrestimado. Para el caso de las VGA de HRFA y de HRFH, el modelo original subestima en todos los casos el valor de V_u .

Finalmente, es importante aclarar que es necesario continuar realizando ensayos experimentales que permitan lograr una mejor calibración de los modelos teóricos, así como también una caracterización más completa de los hormigones reforzados con fibras.

VIGA	$V_{uExp.}$ (kN)	V_u (kN) M y W ¹¹	V_u (kN) A et al. ¹⁰	V_u (kN) A y T. ¹²	V_u (kN) S et al. ¹³	V_u MPT (kN) C201-25 ²
V-0-1	124.40	160.90	134.32	115.40	122.60	93.10
V-ADM-2	222.20	183.02	134.48	244.08	159.26	174.57
V-FA25-1 V-FA25-2	178.46	186.72	154.14	138	168.52	106.90
V-FA50-3 V-FA50-4	209.49	179.14	142.52	136.62	151.14	101.39
V-FAFPP- 30-5 -5	173.64	170.32	143.74	124.82	132.02	102.52

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un estudio analítico y experimental de la capacidad resistente a corte de VGA de HRFA y de HRFH. Para el estudio analítico se utilizaron formulaciones existentes y modificadas a los efectos de predecir la

capacidad resistente cuando se usan refuerzos de fibras. Finalmente, las predicciones analíticas se compararon con resultados experimentales propios de especímenes a escala ensayados a flexión en tres puntos. Se analizaron diferentes fracciones de volúmenes de un solo tipo de fibra (FA), la combinación de dos tipos, FA y FPP, y la existencia o no de armadura distribuida. Aun cuando es necesaria la ejecución de un mayor número de ensayos experimentales, del análisis y la comparación de dichos resultados se puede decir lo siguiente:

La comparación de los valores de carga última obtenidos experimentalmente con las predicciones resultantes de la aplicación de modelos teóricos y sus adaptaciones para tener en cuenta la contribución de las fibras, muestra que dichos modelos, en general, dan resultados conservadores. El modelo de Sagi et al. (2022)¹³ ajusta razonablemente todos los valores experimentales. El resultado más conservador para este modelo corresponde a la VGA de HRFH. Luego el modelo de Matamoros y Wong (2003)¹¹, tiene una buena correlación con los resultados experimentales de las VGA de HRFA y de HRFH.

Las VGA de HRFA tuvieron un comportamiento muy satisfactorio en cuanto a resistencia y capacidad de deformación, en comparación con la VGA de hormigón sin fibras y sin armadura distribuida. Con el aumento del volumen de fibras, se incrementó la capacidad resistente de las vigas, obteniéndose valores cercanos al alcanzado por el espécimen con armadura distribuida y sin fibras. Sin embargo, y dado que el número de ensayos realizados hasta el momento es pequeño, no se puede pensar aún en un reemplazo parcial y/o total de la armadura distribuida mínima, por HRFA. Todas las vigas de HRFA y las de HRFH tuvieron un tipo de falla dúctil, conservando el monolitismo luego de la falla, sobre todo la VGA de HRFH que no falló en el apoyo. El otro espécimen de HRFH alcanzó una resistencia última similar a las VGA de HRFA con una fracción de volumen de fibras 0.3 %.

Referencias

- [1] Orlor, R. y Donini, H. (2008). Diseño básico de hormigón estructural. Editorial Científica Universitaria.
- [2] CIRSOC 201-2005 (2025). Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón Armado.
- [3] Ahmad, S., Shah, A., Zaman, M., Salimullah, K. (2011). Design and evaluation of the shear strength of deep beams by strut and tie model (STM). IJST, Transactions of Civil and Environmental Engineering, 35, 1-13.
- [4] Besser, B., Macgregor, J.G. (1967). Review of concrete beams failing in shear. ASCE Journal Proceedings, 93,1.
- [5] Osman, B. (2008). Shear in R.C Deep Beams. Thesis of M.Sc. degree in

Organiza:

Structural Engineering. University of Khartoum. Sudán.

- [6] Beshara, F., Mahmoud, A., El-Barbary, A. (2015). Experimental Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Deep Beams. ERJ- Faculty of Engineering at Shoubra, 104-115.
- [7] Naik, U. y Kute, S. (2017). Use of Steel Fibers as Shear Reinforcement for Deep Beams in Shear: an experimental study. International Journal of Engineering Science and Computing, 7, 13748-13750.
- [8] Pabale A. y Mehetre A.J. (2015). Evaluation of Effectiveness of SFRC Deep Beams in Shear. International Journal of Research Studies in Science, Engineering and Technology, 2, 120-124.
- [9] 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, 131, 423–437.
- [10] Arabzadeh, A., Rahaie, A., Aghayari, R. (2009). A Simple Strut-and-Tie Model for Prediction of Ultimate Shear Strength of RC Deep Beams. International Journal of Civil Engineering, 7(3), 141-153.
- [11] Matamoros, A. y Wong, K. (2003). Design of Simply Supported Deep Beams Using Strut-and-Tie Models. ACI Structural Journal, 100 (6), 704-712.
- [12] Amornpinnyo, P. y Teerawong, J. (2014). Shear Behavior of Reinforced Concrete Deep Beams with Various Horizontal to Vertical Reinforcements and Shear Span-to-Effective Depth Ratios. Advanced Materials Research, 931-932, 473-477.
- [13] Sagi, M., Lakavath, Ch., Prakash, S. (2022). Effect of steel fibers on the shear behavior of Self-Compacting reinforced concrete deep Beams: An experimental investigation and analytical model. Engineering Structures 269.
- [14] ACI 318S-19 (2019). Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural.
- [15] EN 1992-1-1 (2004). Eurocode 2: Design of concrete structures.
- [16] Adrija, D., Geevar, I., Menon, D., Prasad, A. (2017) Assessment of strut-and-tie methods to estimate ultimate strength of RC deep beams. Proceedings of Int. Multiconference of Eng. and Comp. Scientists, IMECS 2017, Vol II.
- [17] Lee, D., Han, H., Kim, K. y LaFave, L. (2016). Shear capacity of steel fiber-reinforced concrete beams. Structural Concrete, 18, 278–291.
- [18] Deng, F., Ding, X., Chi, Y., Xu, L., Wang, L. (2018). The pull-out behavior of straight and hooked-end steel fiber from hybrid fiber reinforced cementitious composite: experimental study and analytical modelling. Composite Structures, 206, 693-712.
- [19] Li, Z., Mobasher, B., & Shah, S. P. (1991). Characterization of interfacial

properties in fiber-reinforced cementitious composites. Journal of the American Ceramic Society, 74(9), 2156–2164.

[20] CIRSOC 201-2005 (2005). Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón Armado.

[21] IRAM-1546 (2013). Hormigón de cemento. Método de ensayo de compresión.

[22] IRAM-1534 (1985). Preparación y curado de probetas para ensayos en laboratorio.