

VIGAS DE GRAN ALTURA DE HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS: ESTUDIO NUMÉRICO

Miqueas C. Denardi^{a,b} y Viviana C. Rougier^b

^a*Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Concordia, Salta 277*

^b*Grupo de Mecánica Computacional y Estructuras, Universidad Tecnológica Nacional, Regional Concepción del Uruguay Ingeniero Pereyrera 676, Concepción del Uruguay, Argentina*

Palabras clave: Viga de gran altura, Hormigón orzado con fibras, Resistencia al corte, Simulación numérica.

Resumen. Numerosos estudios han demostrado que el uso de fibras en el hormigón (HRF) permite una reducción de la cuantía de barras de acero en distintas aplicaciones estructurales. En este trabajo se analiza experimental y numéricamente la aplicación del HRF de acero y polipropileno en vigas de gran altura (VGA). El objetivo del estudio es evaluar la eficiencia del uso del HRF en reemplazo parcial de la armadura tradicional de barras acero y la comparación del uso de hormigones reforzados con uno o más tipos de fibras. Para ello se analiza el comportamiento mecánico de las VGA por el método de elementos finitos empleando el software ABAQUS ©. El modelado del HRF se realiza considerando al hormigón con fibras de polipropileno como material homogéneo por un lado y las fibras de acero como elementos discretos distribuidos en el volumen de hormigón. Los resultados obtenidos numéricamente se comparan con los de un estudio experimental en el que se ejecutaron y ensayaron 36 especímenes de VGA sometidos al ensayo de flexión en 3 puntos. Se observa por un lado que las fibras incorporadas a la matriz de hormigón mejoraron la capacidad resistente de las VGA con armadura a corte reducida. Por otro lado, el estudio permite concluir que el modelo numérico logra reproducir con aceptable aproximación los resultados experimentales.

Keywords: Deep Beam, Fiber reinforced concrete, shear behavior.

Abstract. Numerous studies have shown that the use of fibers in concrete (HRF) allows a reduction in the amount of steel bars in different applications structural. In this work, the application of the HRF of steel and polypropylene in deep beams (DB). The objective of the study is to evaluate the efficiency of the use of the HRF in partial replacement of the traditional steel bar reinforcement and the comparison of the use of concrete reinforced with one or more types of fibers. For this reason, the mechanical behavior of the VGA is analyzed by the method of the finite elements using ABAQUS © software. HRF modeling is done considering concrete with polypropylene fibers as a homogeneous material by one side and the steel fibers as discrete elements distributed in the volume of concrete. The results obtained numerically are compared with those of an experimental study in which 36 specimens of VGA subjected to the 3-point bending test. It is observed on the one hand that the fibers incorporated into the concrete matrix improved the resistant capacity of the VGA with reduced shear armor. On the other hand, the study allows us to conclude that The numerical model has a good approximation to the results with an acceptable approximation. experimental.

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón es un material frágil, con resistencia a 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 resistencia del hormigón a tracción y corte. (Lantsoght, 2019), (Estefania, 2015), (Heek P. Look K. Minelli F, 2017), (Singh, 2017), (ACI-544.2R-89, 2002), (Katzner, 2006). El uso de macrofibras de polipropileno ha sido investigado por autores como (Kotecha y Abolmaali, 2019) (Ortiz Navas F, 2018), demostrando que al igual que las de acero, logran reemplazar en alguna proporción la armadura tradicional de acero a corte. Los casos en los que se combina la armadura tradicional con macrofibras de polipropileno, muestran un aumento de la carga máxima. (Ortiz Navas F, 2018)

Las Vigas de Gran Altura (VGA) son piezas estructurales en las que la luz libre entre apoyos es menor que cuatro veces la altura total de la viga. (ACI-544.2R-89, 2002) (CIRSOC-201/05, 2005).

La mayor parte de la carga que soporta este tipo de vigas se transmite directamente a los apoyos debido a la pequeña relación entre la luz de corte (distancia desde el punto de aplicación de la carga al centro del apoyo) y la altura útil. Por ello, la falla generalmente se produce por corte. El uso del hormigón reforzado con fibras como reemplazo total o parcial de la armadura a corte en VGA resulta de gran interés ya que son piezas donde suelen existir grandes congestionamientos de armaduras. En este sentido, resultados de numerosas investigaciones demuestran la efectividad del uso de fibras de acero, polipropileno e híbridas como agregado al hormigón en VGA. (Alwesabi et al., 2022), (M. Moradi, 2017) (Campione, 2012) (Smarzewski, 2018).

El estudio del comportamiento mecánico de las VGA resulta de gran importancia debido sus numerosas aplicaciones en distintas estructuras. Sin embargo, en la bibliografía se encuentran pocos antecedentes de estudios numéricos de VGA de hormigón reforzado con fibras híbridas (HRFH). Por ello, es necesario contar con un modelo numérico para predecir el comportamiento VGA de hormigón reforzado con fibras.

En este trabajo se presenta un modelo numérico del comportamiento de VGA de hormigón simple (HS) y HRF implementado en el software comercial **ABAQUS**®. Para representar el comportamiento en régimen no lineal del hormigón se adopta un modelo de daño plástico. El modelo de las VGA de HRFH considera por un lado, las fibras de acero discretas aleatoriamente distribuidas en la masa de hormigón y, por otro, el hormigón con las fibras de polipropileno como material homogéneo.

2. SIMULACIÓN NUMÉRICA

A los fines de predecir numéricamente el comportamiento mecánico de las VGA de hormigón simple y HRFA, se simuló el ensayo a flexión en tres puntos de la VGA mediante un modelo tridimensional implementado en un software de análisis por elementos finitos **ABAQUS**®. En la sección siguiente se describe el modelo constitutivo adoptado para el hormigón.

Los resultados numéricos se comparan con los obtenidos de una campaña experimental en la que se ensayaron 36 VGA: 18 de Hormigón simple, 12 de hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA) de las cuales 9 se elaboraron agregando $40 \frac{kg}{m^3}$ y 3 con $80 \frac{kg}{m^3}$ de fibras de acero, los 6 especímenes restantes fueron de HRFH con $40 \frac{kg}{m^3}$ de fibras de acero y $4.6 \frac{kg}{m^3}$ de macrofibras de polipropileno.

Las VGA de HS tienen armadura a flexión y corte mínima según según Apéndice A, "Método de Bielas y Tirantes", (CIRSOC-201/05, 2005). Los especímenes de HRFA y HRFH tienen

armadura a flexión y armadura a corte reducida: sin estribo horizontal y con una cuantía vertical un 33 % menor a la de los especímenes con armadura a corte mínima. En las figuras 1a y 1b se muestran las características geométricas de las VGA.

Para la elaboración de las VGA se empleó un hormigón de 25 MPa de resistencia característica, obtenida de ensayos sobre probetas cilíndricas a compresión según norma (IRAM-1546, 2013). Para las armaduras se utilizó un 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 %. Las fibras de acero empleadas en el presente trabajo son de extremo de gancho WIRAND®, denominadas FF1, de 50 mm de longitud y 1 mm de diámetro, con límite de fluencia de 800 MPa y resistencia a tracción de 1100 MPa. Para la elaboración del HRFH se utilizaron además macrofibras de polipropileno MACRONITA®, que son fibras sintéticas recortadas de materiales poliméricos, con una longitud de 50 mm, un diámetro de 0.6 mm, y una relación de aspecto de 83.

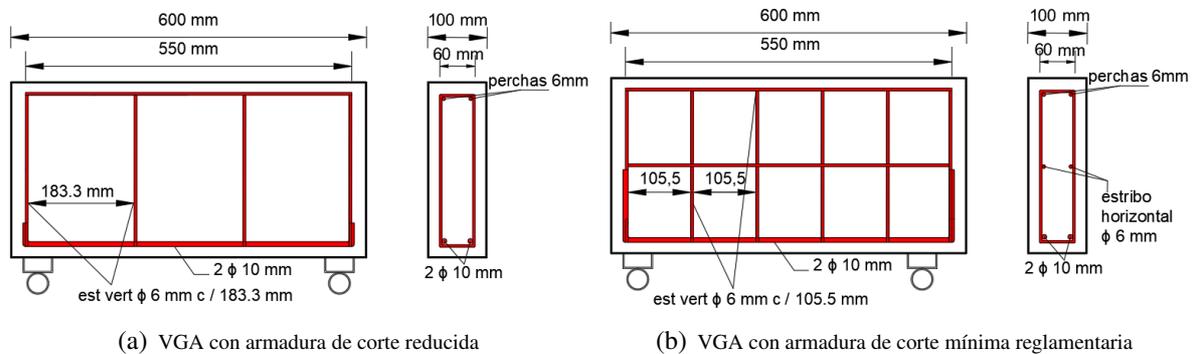


Figura 1: Características geométricas de los especímenes

2.1. Ecuaciones constitutivas adoptadas

2.1.1. Hormigón

Con el objetivo de simular el comportamiento real del hormigón, incluyendo la etapa inelástica y ocurrencia de daño, en la simulación numérica se utilizó el modelo Concrete Damaged Plasticity (CDP) de Abaqus®. Este modelo está basado en los trabajos de Kupfer y Gerstle (1973) y (Lubliner et al., 1989). Dicho modelo asume que los dos principales mecanismos de falla son fisuración por tracción y aplastamiento por compresión. La evolución de la superficie de fluencia (o de falla) está controlada por dos variables de endurecimiento, ϵ_t^{pl} y ϵ_c^{pl} vinculadas a mecanismos de falla bajo cargas de tracción y compresión, respectivamente.

Los parámetros requeridos por el modelo se enumeran en la TABLA 1.

Tabla 1: Parámetros Plasticidad CDP

Parámetro	ψ	Excentricidad	$\frac{f_{bo}}{f_{co}}$	K	Viscosidad
Valor	38	0.1	1.16	0.6667	0

Modelar el comportamiento del hormigón de manera precisa juega un papel vital en el esfuerzo de obtener resultados realistas (Aikaterini S. Genikomsou, 2015). El valor del ángulo de dilatación ψ , en general, se puede adoptar en un amplio rango de entre 5-55° (Adam et al., 2019).

(Malm, 2006) que modeló vigas de gran altura en 3D, adoptó un valor de ψ 56°. Por otro lado, los autores (Kamel A. Bilal y Ford, 2023) probaron el efecto del ángulo de dilatación para un rango de entre 34-40°. Teniendo en cuenta estas consideraciones, se evaluó la sensibilidad del ángulo de dilatación comparando los resultados numéricos con los datos experimentales en la viga de gran altura de hormigón armado. Se adoptó, entonces un valor del ángulo de dilatación de 38.

La relación $\frac{f_{bo}}{f_{co}}$ entre la resistencia a compresión biaxial y la resistencia a la compresión uniaxial, se adoptó según (Kupfer y Gerstle, 1973) y (Lubliner et al., 1989).

El factor de forma, K , se adoptó de acuerdo a (Lubliner et al., 1989) y (Najafgholipour et al., 2017).

El modelo requiere además ingresar los comportamientos del hormigón a compresión y tracción uniaxial.

2.1.2. Comportamiento a compresión uniaxial

El comportamiento a compresión en el modelo CDP de ABAQUS ® se define como tensión vs. deformación inelástica. Dicha relación se obtuvo, al igual que en trabajos anteriores (Denardi et al., 2019), utilizando el modelo para hormigón no confinado del (fib model code, 2010). En la figura 2a se muestra la curva a compresión uniaxial adoptada en el modelo.

2.1.3. Comportamiento a tracción uniaxial para el Hormigón Simple y HRFA

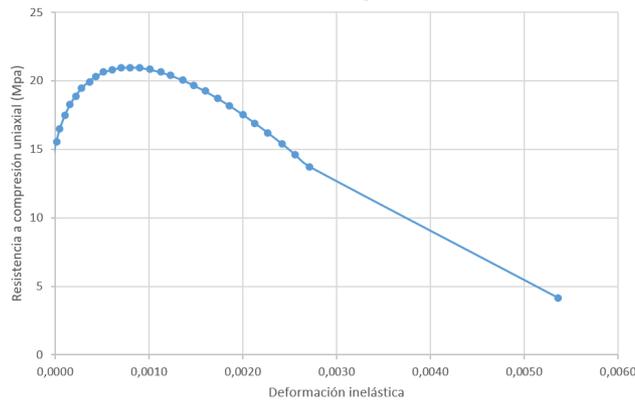
El comportamiento a tracción del hormigón se supone elástico lineal hasta la tensión de tracción máxima. El pico de tensión a tracción f_{ctm} se calculó de acuerdo al (fib model code, 2010). Para definir el comportamiento de ablandamiento se utilizó un gráfico de tensión vs. apertura de fisura ($f_{ct} - w$). Este concepto de fractura frágil es definido como la energía de fractura (G_f) requerida para abrir una fisura de una unidad de área. EL valor de G_f se calculó de acuerdo al (fib model code, 2010). Para definir la relación tensión- apertura de fisura se consideró la aproximación bilineal del código modelo (fib model code, 2010). En la figura 2b se muestra la curva adoptada en el modelo.

2.2. Comportamiento a tracción uniaxial para el HRFH

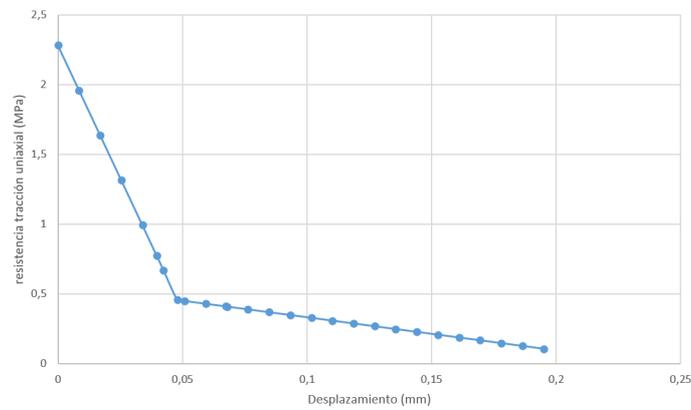
El comportamiento a tracción uniaxial del HRFH se modeló considerando por un lado las fibras de acero aleatoriamente distribuidas y por otro el hormigón reforzado con las fibras de polipropileno (HRFPP) como material homogéneo. Las curvas de comportamiento a tracción uniaxial del HRFPP se obtuvieron experimentalmente siguiendo los lineamientos de la norma (EN-14651, 2007). En la figura 3 se muestra el resultado de comportamiento a tracción uniaxial de 6 probetas de HRFPP.

2.2.1. Acero

El comportamiento del acero se representó adoptando un modelo bilineal con criterio de rotura de Von Mises, el cual ha sido utilizado por otros autores (Rodríguez G, 2016). De acuerdo a este modelo, el material se comporta como lineal elástico hasta que se alcanza la tensión de fluencia y una vez rebasado este punto plastifica de manera perfecta. En el modelado se utiliza la opción PLASTIC para definir la zona de régimen de trabajo plástico. (ABAQUS ®2017)



(a) Curva de tensión-deformación a compresión uniaxial adoptada en el modelo CDP.



(b) Curva de tensión-desplazamiento a tracción uniaxial adoptada en el modelo CDP.

Figura 2: Curvas de comportamiento a compresión y tracción uniaxiales adoptadas en el modelo CDP.

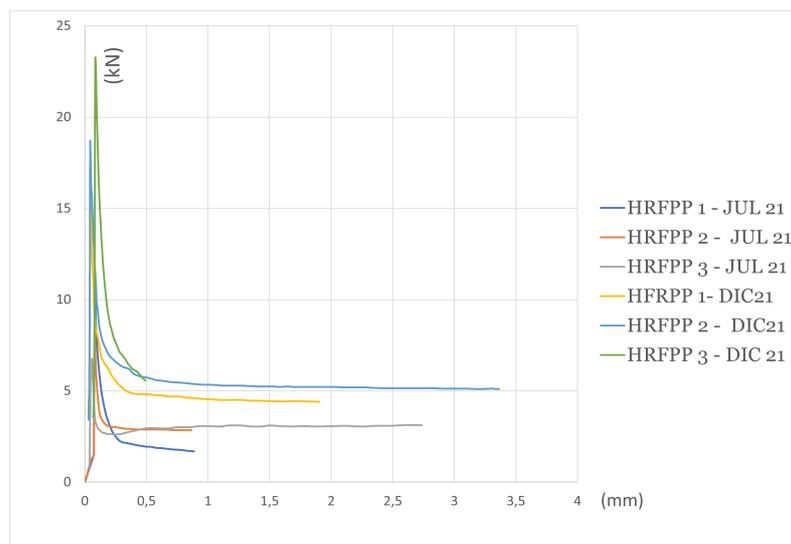


Figura 3: Comportamiento a tracción uniaxial del HRFPP con $4.6 \frac{kg}{m^3}$ fibras de polipropileno

2.2.2. Fibras

Las fibras se modelaron discretas y aleatoriamente distribuidas en la masa de hormigón. Para ello, se adoptó un algoritmo desarrollado por (Ferrado F. et al., 2023) que requiere como parámetros de entrada el número de fibras en la VGA, las características geométricas de las fibras y las de la VGA.

2.2.3. Distribución aleatoria de fibras

La ubicación de cada fibra de longitud L_f está determinada por las coordenadas de su punto medio O' y su vector dirección. Las coordenadas del punto medio (u, v, w) definen la posición del punto medio y el par de ángulos (θ, ϕ) con $0 \leq \theta \leq \pi$ y $0 \leq \phi \leq 2\pi$ determina la orientación de la fibra. La figura 4a muestra esos parámetros en un sistema coordenado.

El número de fibras para una VGA queda determinado por el **dosaje** ($\frac{Kg}{m^3}$), el número de fibras por kilogramo y el volumen de la VGA. Este número e fibras sirve como parámetro de entrada al algoritmo desarrollado por (Ferrado F. et al., 2023) que genera aleatoriamente la posición y orientación de cada fibra en la VGA. Las fibras son creadas como líneas rectas con longitud y área de la sección determinadas. El algoritmo se implementa como un Script de Python ejecutado por ABAQUS ®. La figura 4b muestra un ejemplo de la nube de fibras generada por dicho algoritmo.

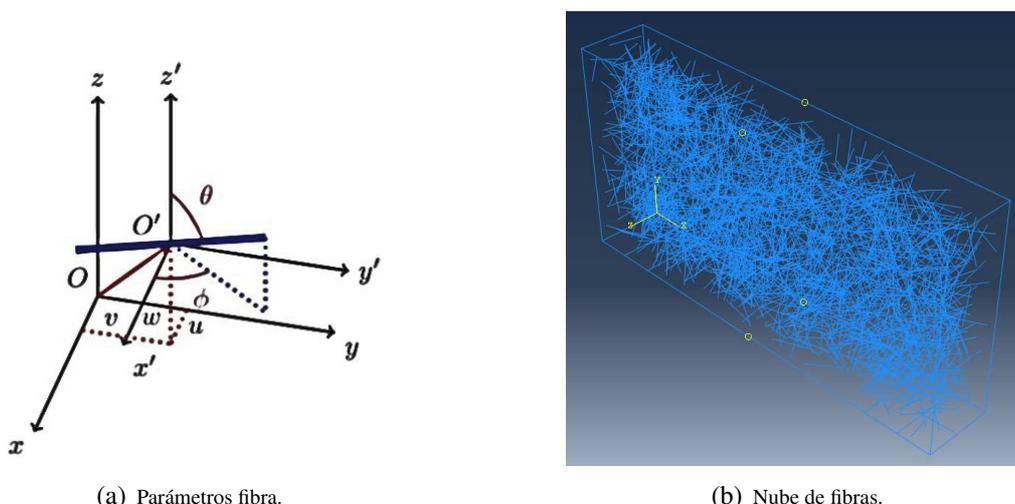


Figura 4: Nube de fibras con distribución y orientación aleatorias.

2.3. Modelo de elementos finitos del ensayo a flexión de la VGA

EL modelo de ensayo a flexión en tres puntos de la VGA consiste en una placa de carga de acero superior, dos placas de apoyo inferiores sobre rodillos de acero y la VGA. La carga es aplicada como un desplazamiento vertical controlado en la placa superior. Los rodillos sobre los que se ubica la VGA están sobre apoyos fijos que, como en el ensayo experimental, restringen el desplazamiento pero permiten el giro. La interacción entre la VGA, los rodillos, las placas de carga y de apoyo se modeló como "standard general contact". La armadura y la nube de fibras de acero se consideran totalmente embebidas en el hormigón teniendo en cuenta la interacción entre estos dos materiales.

El tipo de elemento finito adoptado en el modelo de elementos finitos para la VGA, las placas de apoyo y de aplicación de carga es del tipo (C3D8R). Se utilizó un tamaño de elemento de 20 mm por lado para la VGA y de 10 mm por lado para los apoyos. La armadura de acero y las fibras de acero se mallaron con elementos finitos del tipo "T3D2" con dos nodos e interpolación lineal. Este tipo de elementos se adaptan muy bien a las geometrías modeladas permitiendo un mallado uniforme como se muestra en la figura 5. Además, han sido utilizados con éxito por otros autores (Senthil et al., 2018), (Rodríguez G, 2016), (Aydin Demir y Dok, 2016).

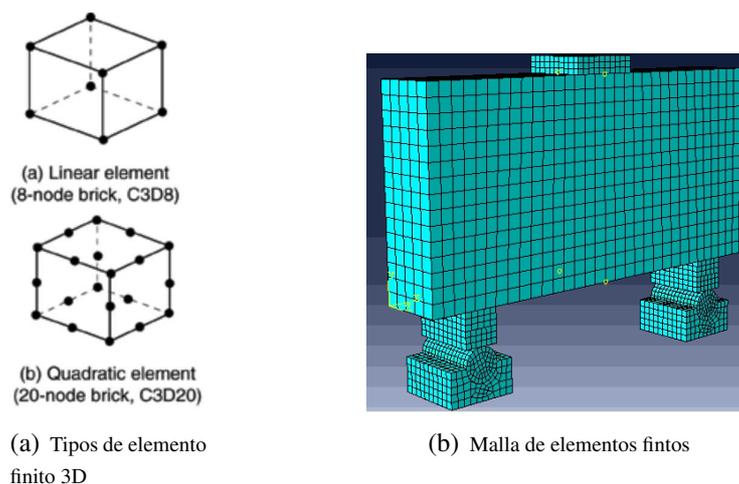


Figura 5: Tipo de elemento finito 3D y malla de elementos finitos

La densidad del hormigón y del acero también fueron definidas ya que el problema se resolvió a través de un análisis dinámico (cuasistático). Se aplicó la carga en un período de 600 segundos. Además, se adoptó un número máximo de 400 incrementos y un incremento mínimo de 0.003.

2.4. Resultados

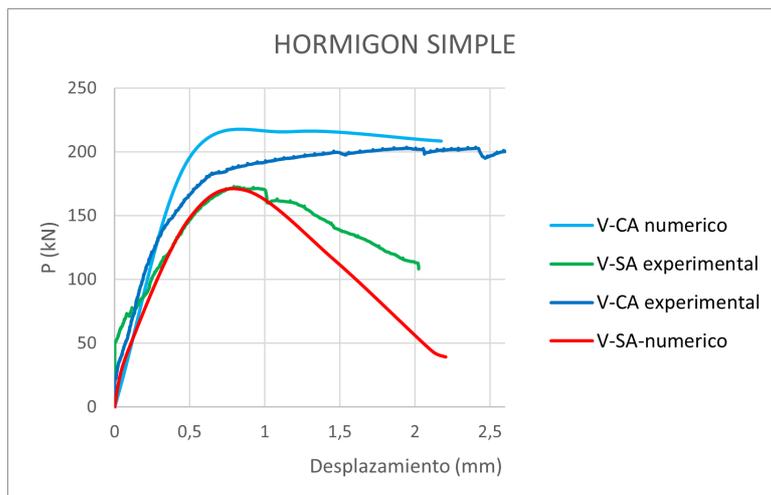
En las figuras 6a, 6b y 6c se muestran las curvas experimentales promedio carga desplazamiento conjuntamente con los resultados numéricos obtenidos. La nomenclatura utilizada es: V-CA, corresponde a las VGA de HS y armadura a corte reglamentaria, V-SA, son las VGA de HS y armadura a corte mínima reglamentaria reducida, V-HRFA, son las VGA de HRFA y V-HRFH son las VGA de hormigón reforzado con fibras híbridas. Se observa que el modelo se aproxima razonablemente al comportamiento experimental de las VGA en cuanto a rigidez inicial, carga máxima y comportamiento residual post pico de cargas.

En las figuras 7a y 7b se muestran los resultados de la deformación final y las tensiones en la nube de fibras de un espécimen de VGA de HRFA con $40 \frac{Kg}{m^3}$.

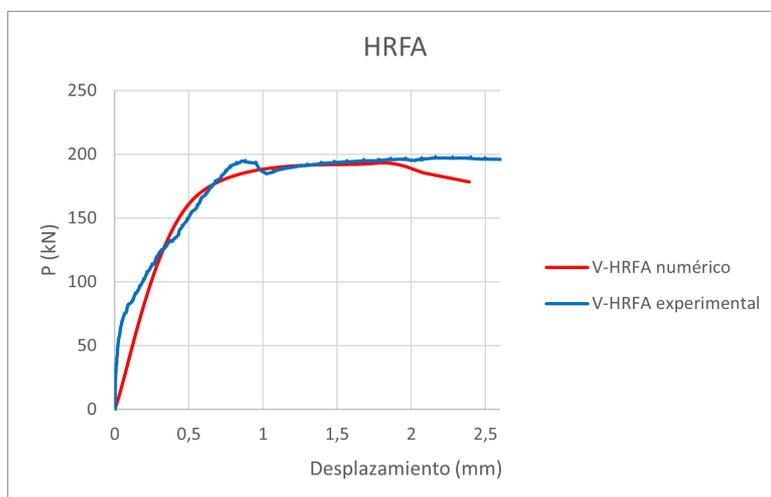
3. CONCLUSIONES

Se presentó un estudio numérico experimental del comportamiento mecánico de VGA de hormigón simple, HRFA y HRFH. Algunas conclusiones que se pueden considerar en función de los resultados son:

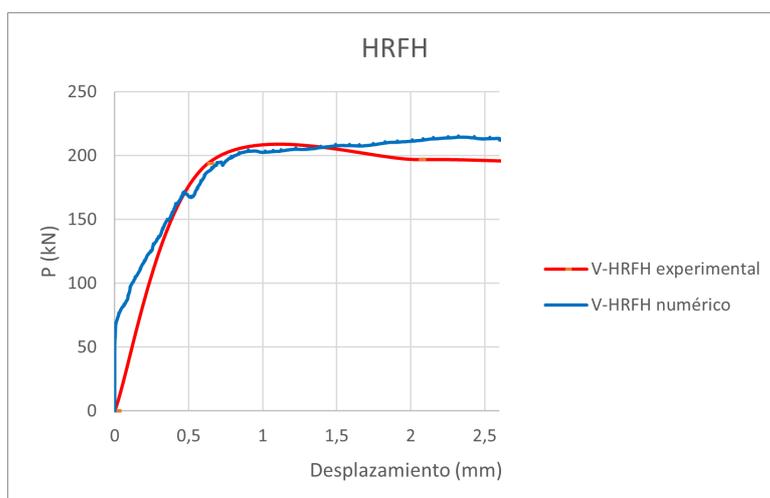
- Teniendo en cuenta los resultados experimentales, queda claro que el HRFA con adiciones del 0.5 % y 1 % del volumen logra sustituir la totalidad del refuerzo horizontal y el 33 %



(a) Curvas carga desplazamiento de los especimenes de HS.

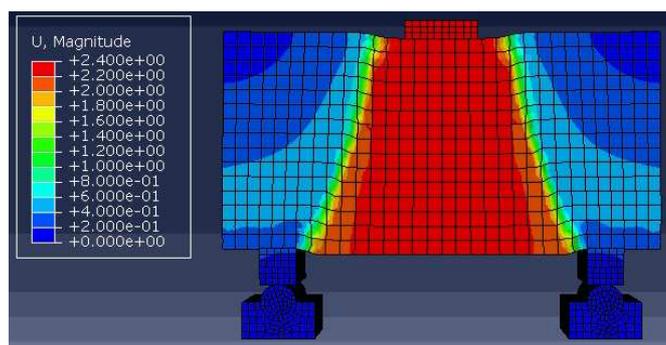
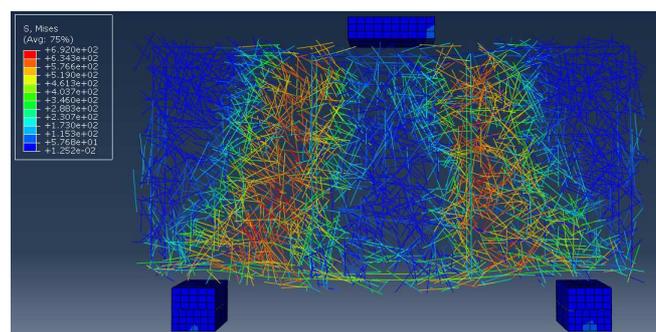


(b) Curvas carga desplazamiento de los especimenes de HRFA.



(c) Curvas carga desplazamiento de los especimenes de HRFH.

Figura 6: Comportamiento mecánico de las VGA

(a) Desplazamientos en VGA con $40 \frac{kg}{m^3}$ 

(b) Tensiones en fibras de VGA

Figura 7: Resultados de simulación numérica

de la cuantía del refuerzo vertical a corte. Los especímenes de VGA de HRFA alcanzaron valores de carga máxima entre un 38 % y un 76 % mayores al valor promedio obtenido para las VGA con armadura de corte reducida. También se observó un aumento en la resistencia residual post-pico de los especímenes de HRF frente a los de hormigón simple.

- El análisis de elementos finitos no lineal logró predecir razonablemente el comportamiento mecánico de las VGA, con buena aproximación de la rigidez inicial, carga máxima y comportamiento post pico.

REFERENCIAS

- ACI-544.2R-89. Aci 544. 2002.
- Adam W., Andrzej W., Polak M.A., y Pamin J. Role of dilatancy angle in plasticity-based models of concrete. *ScienceDirect*, 2019.
- Aikaterini S. Genikomsou M.a.P. Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in abaqus. *Engineering Structures*, 2015.
- Alwesabi E., Bakar B.H.A., Alshaikh I.M.H., Abadel A.A., Alghamdi H., y Wasim M. An experimental study of compressive toughness of steel-polypropylene hybrid fibre-reinforced concrete. *Structures*, 2022.
- Aydin Demir H.O. y Dok G. 3d numerical modeling of rc deep beam behavior by nonlinear finite element analysis. *Disaster Science And Engineering*, 2016.
- Campione G. Flexural behavior of steel fibrous reinforced concrete deep beams. *JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING*, 2012.
- CIRSOC-201/05. *Reglamento Argentino de estructuras*, 2005.

- Denardi M., Escalante M., y Rougier V. Vigas de gran altura de hormigón reforzado con fibras: estudio numérico y experimental. *XL CILAMCE. Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in engineering*, 2019.
- EN-14651. Test method for metallic fibre concrete. measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (lop), residual). 2007.
- Estefania C. *On Shear Behavior of Structural Elements Made of Steel Fiber Reinforced Concrete*. Tesis de Doctorado, Universitat Politècnica de València, 2015.
- Ferrado F. L., Escalante M., y Rougier V. Estudio numérico probabilístico de la capacidad resistente de tubos de hrfa con distribución aleatoria de fibras. *Informes de la Construcción*, 2023.
- fib model code. *fib model code for concrete structures 2010*. Ernst and Sohn, Wiley, 2010. ISBN 9783433604090.
- Heek P. Look K. Minelli F M.P.P.G. Datenbank für querkraftbeanspruchte stahlfaserbetonbauteile. *Beton- Stahlbetonbau*, 2017.
- IRAM-1546. Hormigón de cemento. método de ensayo de compresión. 2013.
- Kamel A. Bilal Mostafa Mahamid M.A.H.A.C.T. y Ford T. Parameter selection for concrete constitutive models in finite element analysis of composite columns. *Buildings*, 2023.
- Katzer J. Steel fibers and steel fiber reinforced concrete in civil engineering. *The Pacific Journal of Science and Technology*, 2006.
- Kotecha P. y Abolmaali A. Macro synthetic fibers as reinforcement for deep beams with discontinuity regions: Experimental investigation. *Engineering Structures*, 2019.
- Kupfer H.B. y Gerstle K.H. Behavior of concrete under biaxial stresses. *Journal of the engineering mechanics division*, 99(4):853–866, 1973.
- Lantsoght E.O.L. How do steel fibers improve the shear capacity of reinforced concrete beams without stirrups? *Composites Part B*, 2019.
- Lublinter J., Oliver J., Oller S., y Oñate E. A plastic-damage model for concrete. *International Journal of Solids and Structures*, 25(3):299–326, 1989.
- M. Moradi M.R.E. Application of the strut-and-tie method for steel fiber reinforced concrete deep beams. *Construction and Building Materials*, 2017.
- Malm R. Shear cracks in concrete structures subjected to in-plane stresses. *Royal Institute of Technology (KTH)*, 2006.
- Najafgholipour M., Dehghan S.M., Dooshabi A., y Niroomandi A. Finite element analysis of reinforced concrete beam-column connections with governing joint shear failure mode. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2017.
- Ortiz Navas F Juan Navarro Gregori G.L.H.P.S.E.C. An experimental study on the shear behaviour of reinforced concrete beams with macro-synthetic fibres. *Construction and Building Materials*, 2018.
- Rodríguez G Bonilla J H.J. Numerical modeling of reinforced concrete of continuous deep beams. *Revista Ingeniería de Construcción*, 2016.
- Senthil K., Gupta A., y Singh S. P. Computation of stress-deformation of deep beam with openings using finite element method. *Advances in Concrete Construction*, 2018.
- Singh H. *Steel Fiber Reinforced Concrete Behavior, Modelling and Design*. Springer, 2017.
- Smarzewski P. Analysis of failure mechanics in hybrid fibre-reinforced high-performance concrete deep beams with and without openings. *Materials*, 2018.