

CAPACIDAD DE CARGA DE TUBOS DE HRFH. COMPARACIÓN EXPERIMENTAL, TEÓRICA Y NUMÉRICA

González, Federico Alejandro; Rougier, Viviana Carolina.

Ingeniero Civil

Universidad Tecnológica Nacional - FRCU

gonzalezf@frcu.utn.edu.ar

RESUMEN

El hormigón reforzado con dos o más tipos diferentes de fibras, racionalmente combinadas, se denomina Hormigón Reforzado con fibras híbridas (HRFH) y es un material compuesto que puede ofrecer propiedades mejoradas, especialmente en términos de ductilidad y control de fisuras. El uso de estos hormigones en tubos de drenaje, sustituyendo de manera parcial o total los refuerzos tradicionales, puede tener un impacto favorable en la industria del prefabricado desde un punto de vista técnico y económico. El HRFH puede ser elaborado y colocado en los moldes de manera similar al hormigón simple. Las fibras de refuerzo se agregan a la mezcla como cualquier otro agregado, evitando el uso de las armaduras tradicionales fabricadas a partir de mallas de acero, simplificando así, el proceso productivo. En este trabajo, se presenta una comparación entre resultados experimentales, teóricos y numéricos de la capacidad de carga de tubos de HRFH (THRFH) sometidos al ensayo de compresión diametral (ECD). Se obtuvo buena correlación entre los resultados experimentales, teóricos y numéricos. Este artículo es una extensión de un trabajo presentado en las 26° Jornadas de la AIE que incluye, como novedad, un modelo 3D creado en ABAQUS para la simulación numérica del ECD de THRFH.

ABSTRACT

Reinforced concrete with two or more different types of fibers, rationally combined, is termed Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HRFH). It is a composite material that can offer improved properties, especially in terms of ductility and crack control. The use of these concretes in drainage pipes, partially or totally replacing traditional reinforcements, can have a favorable impact on the precast industry from both technical and economic standpoints. HRFH can be formulated and placed in molds like plain concrete. The reinforcing fibers are added to the mix like any other aggregate, avoiding the use of traditional reinforcements made from steel mesh, thus simplifying the production process. This paper presents a comparison among experimental, theoretical, and numerical results of the load-carrying capacity of HRFH pipes subjected to the diametral compression test (DCT). A good correlation was obtained between the experimental, theoretical, and numerical results. This article is an extension of a paper presented at the 26th AIE Conference, which includes, as a novelty, a 3D model created in ABAQUS for the numerical simulation of the DCT of HRFH.

Organiza:

INTRODUCCIÓN

Existe un tipo de hormigón reforzado con fibras (HRF) que se obtiene a partir de la combinación de fibras de diferentes materiales, geometría y/o propiedades mecánicas¹. Este tipo de material compuesto se denomina hormigón reforzado con fibras híbridas y obtiene sus propiedades potenciales, además de las propias del material, de la sinergia que se produce entre las fibras que lo componen².

Según varios estudios³, la hibridación de dos o más tipos de fibras resulta en compuestos cementicios con mayores resistencias finales, capacidades de deformación y comportamiento de endurecimiento por deformación⁴. Una de las diversas estrategias de hibridación es combinar fibras de diferentes longitudes, diámetros, módulos y resistencias a la tracción.

En la actualidad, el hormigón reforzado con fibras (HRF) se utiliza de forma casi sistemática en el ámbito de la construcción subterránea, como revestimiento primario y/o secundario mediante la técnica de la proyección o en anillos de dovelas prefabricadas. También en aplicaciones de carácter arquitectónico, en las que se recurre al trabajo por forma para resistir las tensiones de tracción por flexión, como puede ocurrir en algún tipo de mobiliario urbano. Además, en pavimentos, soleras y en elementos prefabricados de bajo o moderado compromiso estructural, entre ellos los tubos premoldeados⁵.

En el caso particular de los tubos premoldeados, para generalizar el uso de fibras como refuerzo es necesario superar ciertos obstáculos presentes en la industria como son: la inercia al cambio que se da en la misma para adaptarse a nuevas alternativas de refuerzo en lugar de las tradicionales; la falta de experiencia y/o desconocimiento de los métodos de fabricación, diseño y control de calidad del HRF⁶. Dentro de los obstáculos mencionados, quizás hay uno que tiene importante gravitación en el medio y es el sistema de diseño. En este sentido, en la actualidad, existen métodos sistemáticos y confiables para tubos de hormigón armado (THA) con armadura tradicional, plasmados en tablas de códigos, de donde se obtienen las cuantías mínimas de refuerzo en función de la geometría y clase resistente del tubo⁷. Sin embargo, los resultados de estos métodos no son extrapolables a los refuerzos con fibras y menos aún, con la utilización de la combinación de ellas. Es por ello que los fabricantes deben recurrir a los ensayos de rotura para poder realizar el diseño de los tubos de HRF mediante un sistema de prueba y error. Sin duda, esta estrategia es ineficiente debido a la gran variedad de fibras presentes en el mercado, por lo cual, la ausencia en el medio de una metodología simple de diseño ralentiza la implantación de los tubos de HRF en el mercado, y más aun de los tubos de HRFH (THRFH)⁸

Por lo mencionado anteriormente, en las 26° jornadas de ingeniería estructural, los autores presentaron un trabajo que abordaba el problema desde una perspectiva experimental y teórica⁹. Precisamente, se intentó avanzar hacia la calibración de un modelo teórico para utilizar como método de diseño y así, reducir la cantidad de ensayos experimentales realizados por la planta de premoldeados.

En este trabajo, se comparan los resultados experimentales y teóricos del trabajo

Organiza:

previo⁹, con los obtenidos mediante un modelo de elementos finitos 3D. Se modela el ensayo de compresión diametral de tres aristas sobre THRFH, considerando al material homogéneo con propiedades equivalentes.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Durante el programa experimental se elaboraron y ensayaron 12 tubos de 600 mm de diámetro interno y una longitud de 1 m. En la Tabla 1 se detallan las características de refuerzos de los mismos, utilizando la combinación de fibras de acero (FA) y polipropileno (FPP), y la cantidad de unidades.

Denominación	FA	FPP	Cantidad
	kg/m ³	kg/m ³	Unidades
THRFH-FF1-20/0.5	20	0,5	3
THRFH-FF1-20/1.0	20	1,0	3
THRFH-FF3-20/0.5	20	0,5	3
THRFH-FF3-20/1.0	20	1,0	3

Tabla 1: características de refuerzo y cantidad de tubos ensayados.

Fueron ensayados 3 tubos de hormigón reforzado con fibras híbridas (THRFH) por cada variante en la dosificación. Se consideraron principalmente dos variables: i) el contenido de fibras en combinación y; ii) la esbeltez de la fibra de acero utilizada en el sistema híbrido de refuerzo. Para el estudio de la primera variable, se plantearon dos dosificaciones diferentes: una con 20 kg/m³ de FA combinada con 0,5 kg/m³ de FPP y la otra, con 20 kg/m³ de FA combinada con 1,0 kg/m³ de FPP. Para la segunda variable, las dosificaciones de fibras mencionadas anteriormente se repitieron, pero utilizando FA con mayor esbeltez. En las fibras, la esbeltez es igual al cociente entre la longitud de las mismas y su diámetro. El propósito de incluir este parámetro de estudio se debe a que, en investigaciones previas^{10,11}, se ha demostrado que la eficiencia de refuerzo de las fibras se incrementa precisamente con el aumento de la esbeltez.

A continuación, se describe la nomenclatura utilizada:

- THRFH-FF1-20/0.5 = tubos de hormigón reforzado con fibras híbridas con 20 kg/m³ de fibras de acero con esbeltez igual a 50 y 0,5 kg/m³ de fibras de polipropileno.
- THRFH-FF1-20/1.0 = tubos de hormigón reforzado con fibras híbridas con 20 kg/m³ de fibras de acero con esbeltez igual a 50 y 1,0 kg/m³ de fibras de polipropileno.
- THRFH-FF3-20/0.5 = tubos de hormigón reforzado con fibras híbridas con 20 kg/m³ de fibras de acero con esbeltez igual a 67 y 0,5 kg/m³ de fibras de polipropileno.
- THRFH-FF3-20/1.0 = tubos de hormigón reforzado con fibras híbridas con 20 kg/m³ de fibras de acero con esbeltez igual a 67 y 1,0 kg/m³ de fibras de

Organiza:

polipropileno.

Materiales

El hormigón empleado para la elaboración de los especímenes se logró a partir de las proporciones mostradas en la Tabla 2. Este diseño teórico de mezcla es el mismo que utiliza la Planta para fabricar los tubos que comercializa.

MATERIAL	kg/m ³
Agua	80
Cemento (CPC 50)	300
Árido Fino (módulo fineza 2,52)	980
Árido Grueso (Tamaño máximo 1/2")	1020

Tabla 2: dosificación teórica del hormigón simple en kg/m³.

Para la caracterización del material se calaron, de siete tubos post ensayo, 7 testigos cilíndricos de 75 mm de diámetro. Dichos testigos fueron ensayados a compresión simple dando como resultado una resistencia promedio de 17 MPa.

Para el refuerzo de los tubos se emplearon macrofibras de polipropileno (FPP) denominadas comercialmente como MACRONITA® 0.6. Las anteriores, se combinaron con dos tipos de fibras de acero, denominadas comercialmente como WIRAND® FF1 y WIRAND® FF3, siendo la esbeltez o relación de aspecto (RA) su principal diferencia. En fibras tipo FF3 la RA es igual a 67 y en las fibras tipo FF1, la RA es igual a 50.

En Tabla 3 se presentan las características geométricas de las fibras utilizadas y algunas de sus propiedades más importantes.

MATERIAL	LONGITUD (mm)	DIAMETRO (mm)	DENSIDAD (kg/m ³)	MÓDULO (GPa)
Acero-Wirand FF1	50	1,00	7840	210
Acero-Wirand FF3	50	0,75	7840	210
Polip.-Macronita 0.6	50	0,60	920	6

Tabla 3: características de las fibras empleadas.

Ensayo de Compresión diametral

El método de ensayo al cual fueron sometidos los especímenes, se encuentra establecido por la norma IRAM 11503¹² y es comúnmente denominado ensayo de compresión diametral de tres aristas. Mediante este ensayo se determina la carga máxima o de rotura de los tubos, la cual, determina la clase resistente a la que pertenece según la norma citada. En el presente trabajo, los tubos se diseñaron para alcanzar la clase II¹², cuya carga mínima de rotura es 45 KN.

Organiza:

Durante el ensayo, las cargas se registran a través de una celda electrónica de 100 kN instalada en el marco de carga que se muestra en la Figura 1.

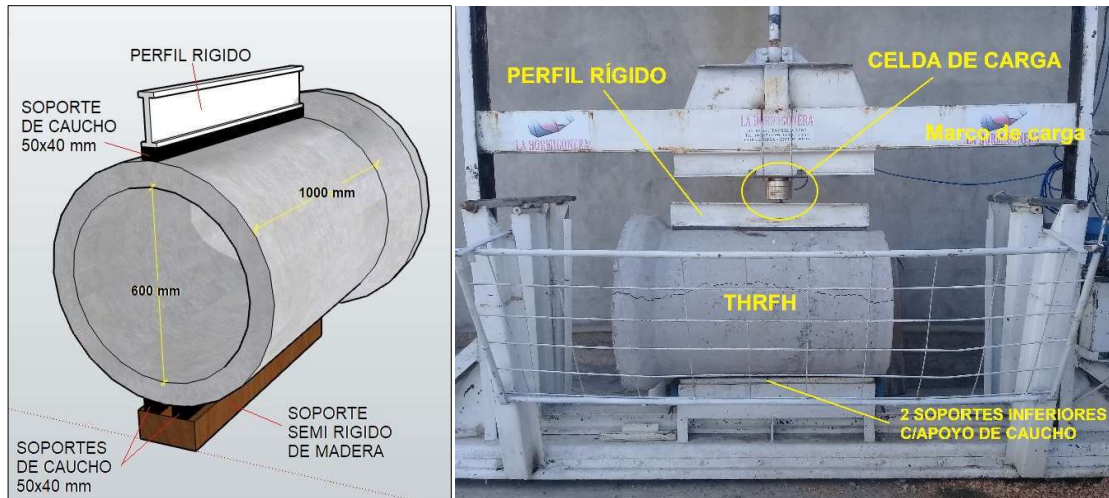


Figura 1:(izquierda) esquema de ensayo; (derecha) fotografía del marco de carga y de un tubo ya ensayado.

MODELACIÓN NUMÉRICA DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN DIAMETRAL

Modelo de daño y plasticidad acoplados (MDP)

El MDP es un modelo continuo de ABAQUS® basado en la plasticidad que sirve para modelar el daño en el hormigón y asume que los dos principales mecanismos de daño son la fisuración por tracción y el aplastamiento por compresión. En general, el modelo incluye cuatro componentes principales: la evolución del daño, el criterio de falla, la regla de flujo y la ley de endurecimiento/ablandamiento uniaxial. Por lo tanto, para la simulación numérica del ensayo es necesario obtener las curvas de respuesta del material a la tracción y a la compresión uniaxial. Para ello, se utilizan los modelos constitutivos que se describen seguidamente.

Modelo constitutivo para el comportamiento del HRFH a la compresión uniaxial

En este trabajo, se parte de la relación tensión deformación en compresión definida a partir de la expresión propuesta por Barros y Figueiras (1999)¹³:

$$\sigma_c = f_{cm} \frac{\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1}}}{(1 - p - q) + q \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1}} \right) + p \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1}} \right)^{(1-q)/p}} \quad (1)$$

donde f_{cm} es la resistencia media a la compresión del material determinada experimentalmente; ϵ_{c1} es la deformación en la tensión pico y se calcula mediante la siguiente expresión:

Organiza:

$$\varepsilon_{c1} = \varepsilon_{c10} + 0,0002 W_f \quad (2)$$

donde ε_{c10} es la deformación para la tensión pico del hormigón simple, igual a -2 ‰ según fib model code (2010)¹⁴; W_f es el porcentaje en peso de las fibras en la mezcla, considerando las FA y las FPP.

Además, p y q se obtienen:

$$p = 1,0 - 0,919 \exp(-0,394 W_f) \quad (3)$$

$$q = 1 - p - \frac{E_{c1}}{E_{ci}}, p + q \in [0,1] \quad (4)$$

E_{ci} es el módulo de elasticidad del hormigón.

Modelo constitutivo para el comportamiento del HRFH a la tracción uniaxial

En este trabajo, el comportamiento a tracción del HRFH se modela introduciendo cambios a las expresiones de desarrolladas por Lee et al. (2013)¹⁵ para HRFA. El modelo propuesto por Lee et al. (2013)¹⁵ evalúa el comportamiento de las fibras considerando por separado el efecto de la unión por fricción y el del anclaje mecánico. Por lo tanto, la resistencia a la tracción de un elemento de HRFA puede ser calculada a partir de la siguiente sumatoria de efectos:

$$f_{HRFA} = f_f + f_{ct} \quad (5)$$

donde la resistencia aportada por las fibras (f_f) es igual a la suma $f_{st} + f_{eh}$, siendo f_{st} la tensión de tracción aportada al compuesto por la unión por fricción y f_{eh} el aporte producido por el anclaje mecánico de las fibras con extremos conformados. Además, $f_{ct} = 0,106 f'_c{}^{0,948}$ es la resistencia a la tracción de la matriz de hormigón estimada por Selim (2008)¹⁶ y f'_c es la resistencia cilíndrica a la compresión del hormigón determinada experimentalmente.

La tensión de tracción de un elemento de HRFA debido al efecto de unión por fricción se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$f_{st} = \alpha_f V_f K_{st} \tau_f \left(1 - \frac{2W_{cr}}{l_f}\right)^2 \quad (6)$$

donde α_f es un factor que depende de la distribución de la fibra dentro del elemento estructural y puede estimarse en 0,5; V_f el volumen de fibras empleado; l_f y d_f son la longitud y el diámetro equivalente de la fibra, respectivamente; τ_f es la tensión máxima de adherencia entre las fibras de acero con extremo conformado y la matriz del material, Foster y Voo (2003)¹⁷ lo establecen como $\tau_f = 1,5 \sqrt{f'_c}$. Además, K_{st} es un factor para representar las tensiones de extracción promedio de la fibra debido al comportamiento de la unión por fricción. La tensión de tracción de un elemento de HRFA debido al efecto de unión por anclaje mecánico de las fibras de acero se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$f_{eh} = \alpha_f V_f K_{eh} \tau_{eh} \frac{2(l_i - 2W_{cr})}{d_f} \quad (7)$$

Organiza:

donde K_{eh} es un factor empleado para representar las tensiones de extracción promedio de la fibra debido al anclaje mecánico que posee en sus extremos y la tensión por anclaje mecánico τ_{eh} es igual a $0,429 \sqrt{f'_c}$ según Foster y Voo (2003)¹⁷.

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 arrancamiento¹⁸. La mejora mencionada, impacta en la tensión máxima de adherencia 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:

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

donde el valor de μ puede estimarse en 0,3 según las recomendaciones de Li et al. (1991)¹⁹. El valor de τ_{HRFH} es empleado en la ecuación 6 para obtener las curvas que se muestran en la Figura 2.

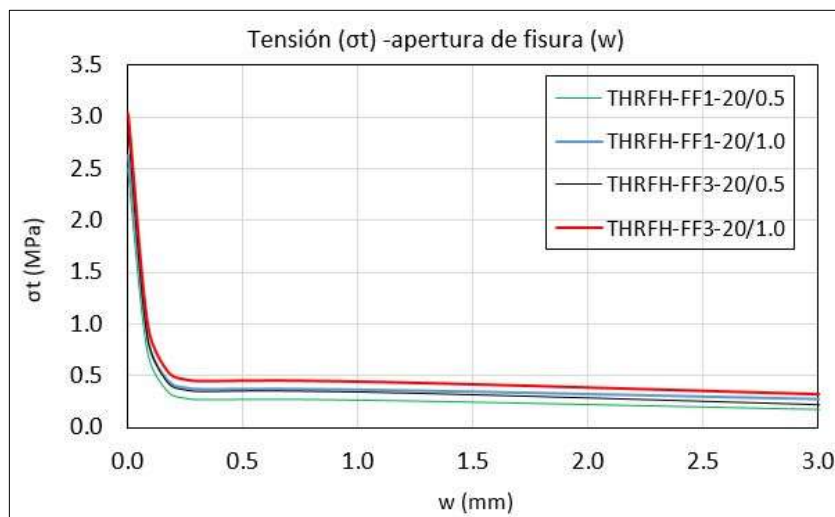


Figura 2: Diagrama tensión de tracción-apertura de fisura para las diferentes dosificaciones de fibras híbridas empleadas.

Modelación del Ensayo a compresión diametral (ECD)

Para la simulación del ECD en ABAQUS® se creó un modelo 3D, compuesto por el apoyo de carga superior, dos listones de apoyo inferiores y la tubería de hormigón. En la Figura 3 (izquierda), se puede ver el modelado del ECD, donde se muestra la malla de elementos finitos para el tubo y los puntos de apoyo y carga. Los dos soportes inferiores y el aplicador de carga superior fueron modelados como material elástico y sus dimensiones fueron de 40 mm x 50 mm. El método de aplicación de la carga se realizó imponiendo un desplazamiento controlado de 10 mm de recorrido al soporte superior. Para la tubería se utilizaron elementos C3D8R tipo Linear-Brick de 8 nodos,

Organiza:

con integración reducida y control de reloj de arena. Para los apoyos elásticos se emplearon elementos C3D8H tipo Linear-Brick de 8 nodos, híbridos y con constante de presión.

En la Figura 3 (derecha) se expresan los parámetros plásticos del material requeridos por ABAQUS® en el MDP.

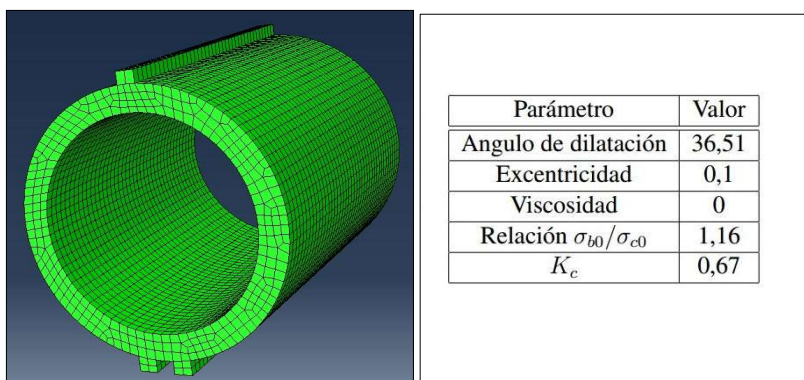


Figura 3:(izquierda) modelo 3D ECD; (derecha) parámetros plásticos requeridos por el MDP.

RESULTADOS

En el diagrama de la Figura 4 se comparan las cargas medias de rotura de los THRFH obtenidas experimentalmente, mediante el modelo teórico y el modelo numérico desarrollado en el presente trabajo.

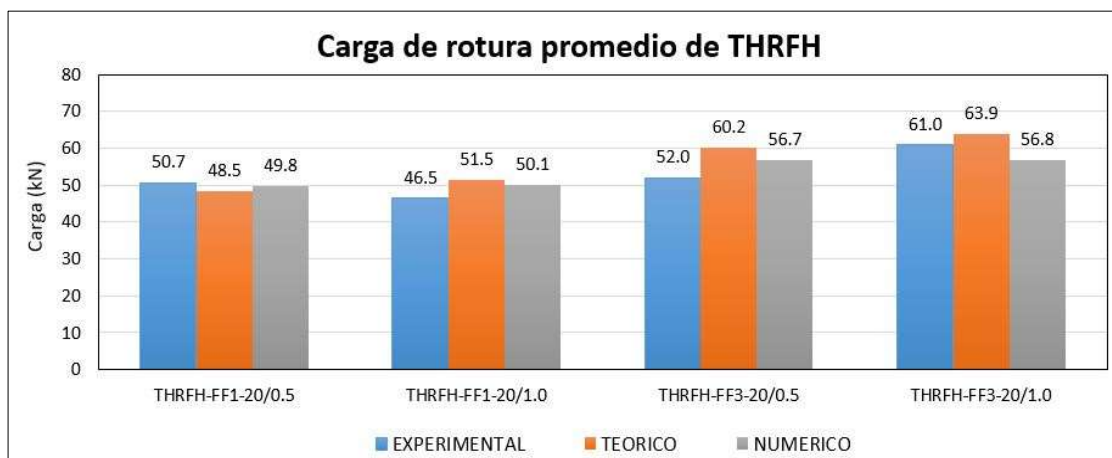


Figura 4:(izquierda) modelo 3D ECD; (derecha) parámetros plásticos requeridos.

En el trabajo anterior⁹ se observó una buena correlación entre los resultados experimentales y teóricos para los THRFH-FF1-20/0,5 y para los THRFH-FF3-20/1,0. Sin embargo, la diferencia para los grupos THRFH-FF1-20/1,0 y THRFH-FF3-20/0,5 fue significativa, ya que el modelo teórico sobreestima la carga máxima en 10,8 % y

15,8 %, respectivamente. Esto podría deberse a que el modelo no tiene la capacidad de representar los aspectos vinculados estrechamente a la tecnología del HRF, como podrían ser los cambios en la consistencia y la cohesión del material que se generan a partir de la inclusión de las fibras²⁰. Es decir que, las diferencias mencionadas, se dieron por las simplificaciones que se deben adoptar para el cálculo teórico debido a la gran cantidad de variables relacionadas al problema.

Al comparar grupo por grupo los resultados numéricos y experimentales, se observa que las diferencias porcentuales entre ambos son bajas, 1,8 % y 7,7 % para los grupos de THRFH-FF1-20/0.5 y THRFH-FF1-20/1.0, respectivamente. En los grupos de THRFH-FF3-20/0.5 y THRFH-FF3-20/1.0, las diferencias son 9 % y 6,9 %, respectivamente.

Para continuar discutiendo los resultados numéricos, se puede considerar dos casos diferentes, de acuerdo a la relación de aspecto (RA) o esbeltez de la fibra de acero utilizada en el refuerzo híbrido. O sea, el primero es cuando se utilizan fibras con RA igual a 50 (Wirand FF1) y el segundo, cuando se emplean fibras de acero con esbeltez igual a 67 (Wirand FF3).

En el primer caso, al considerar los resultados numéricos se observa que, al igual que en los teóricos, existe una tendencia al incremento de la resistencia proporcional al aumento del volumen de fibras de refuerzo. Sin embargo, esta tendencia obtenida por simulación es marcadamente menor que la obtenida mediante la formulación teórica. Para los grupos de THRFH-FF1-20/0.5 y THRFH-FF1-20/1.0 el modelo numérico muestra un incremento de la resistencia del 0,59 %, mientras que el modelo teórico un 5,82 %. Es decir, el modelo numérico es más conservador ya que no sobreestima el aporte de las fibras, teniendo en cuenta que se lleva la dosificación de 0,5 kg/m³ a 1 kg/m³ de FPP combinadas con 20 kg/m³ de FA, es decir, un porcentaje de adición muy pequeño. Se podría considerar que estos resultados mejoran la estimación, teniendo en cuenta que experimentalmente se observó que el incremento del volumen de fibras para los grupos mencionados no aumenta la resistencia, sino que la reduce levemente.

En el segundo caso, para los grupos de THRFH-FF3-20/0.5 y THRFH-FF3-20/1.0 los resultados conservadores del modelo numérico no constituyen una ventaja, ya que experimentalmente se observó que el aumento del volumen de FPP, más el uso de FA con mayor esbeltez, generaron una sinergia que logró obtener resistencias significativamente más altas en el grupo de THRFH-FF3-20/1.0. Numéricamente el incremento de resistencia entre ambos grupos representó el 0,17 %, mientras que para el modelo teórico fue de 5,8 % y experimentalmente fue de 14,7 %.

En cuanto a la comparación entre resultados numéricos y experimentales por grupo, la mayor diferencia fue de 8,28 % en los THRFH-FF3-20/0.5 y la menor fue de 1,77 % en los THRFH-FF1-20/0.5. Por las diferencias expresadas anteriormente, se podría concluir que el modelo numérico se ajusta de manera aceptable a los valores de resistencia obtenidos en los ensayos a escala real de los THRFH. Finalmente, es importante aclarar que será necesario continuar realizando ensayos experimentales para obtener un volumen de datos suficientes para lograr una mejor calibración de los

Organiza:

modelos teóricos y numéricos.

CONCLUSIONES

Se realizó la simulación numérica 3D, mediante ABAQUS®, del ensayo de compresión diametral (ECD) de tres aristas en THRFH de 600 mm de diámetro. Los valores de carga máxima obtenidos se contrastaron con resultados experimentales y teóricos de un trabajo anterior⁹. Sobre la base del análisis de dichos resultados, los autores concluyen lo siguiente:

- El modelo numérico mostró una predicción de la carga máxima más conservadora que el modelo teórico, es decir que no sobreestima el refuerzo de fibras.
- En general, las cargas máximas estimadas numéricamente se ajustan adecuadamente a las obtenidas experimentalmente, considerando que la mayor diferencia se da para el grupo de THRFH-FF3-20/0.5, y la misma es menor a 10 %.
- Al igual que el modelo teórico empleado en el trabajo anterior⁹, el modelo numérico no tiene la capacidad de reproducir cuestiones netamente tecnológicas, como es la afectación de la compactación de la mezcla por efecto del mayor contenido de fibras. Es por ello que muestra una tendencia a estimar una mayor resistencia del tubo para mayores volúmenes de fibras.

Referencias:

- [1] Das, S., Sobuz, M. H. R., Tam, V. W., Akid, A. S. M., Sutan, N. M., & Rahman, F. M. (2020). Effects of incorporating hybrid fibres on rheological and mechanical properties of fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 262, 120561.
- [2] Banthia, N., & Gupta, R. (2004). Hybrid fiber reinforced concrete (HyFRC): fiber synergy in high strength matrices. *Materials and structures*, 37, 707-716.
- [3] Singh, N. K., & Rai, B. (2018). A review of fiber synergy in hybrid fiber reinforced concrete. *Journal of applied engineering sciences*, 8(2), 41-50.
- [4] Pakravan, H. R., Latifi, M., & Jamshidi, M. (2017). Hybrid short fiber reinforcement system in concrete: A review. *Construction and building materials*, 142, 280-294.
- [5] Deng, Z., Liu, X., Chen, P., de la Fuente, A., Zhou, X., Liang, N., ... & Du, L. (2022). Basalt-polypropylene fiber reinforced concrete for durable and sustainable pipe production. Part 1: Experimental program. *Structural Concrete*, 23(1), 311-327.
- [6] Mohamed, N., Soliman, A. M., & Nehdi, M. L. (2015). Mechanical performance of full-scale precast steel fibre-reinforced concrete pipes. *Engineering Structures*, 84, 287-299.
- [7] De la Fuente, A., Escariz, R. C., de Figueiredo, A. D., Molins, C., & Aguado, A.

Organiza:

- (2012). A new design method for steel fibre reinforced concrete pipes. *Construction and Building Materials*, 30, 547-555.
- [8] Al Rikabi, F. T., Sargand, S. M., Khoury, I., & Kurdziel, J. (2020). A new test method for evaluating the long-term performance of fiber-reinforced concrete pipes. *Advances in Structural Engineering*, 23(7), 1336-1349.
- [9] González, F. A., & Rougier, V. C. (2021). Capacidad de carga en tubos de hormigón reforzados con fibras híbridas. evaluación experimental y teórica. *Memorias de las 26° Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural, Argentina*. 978-987-23292-5-9.
- [10] Park, Y.; Abolmaali, A.; Mohammadagha, M.; Lee, S. (2016) Structural performance of dry-cast rubberized concrete pipes with steel and synthetic fibers. *Construction and Building Materials*, 77, 218–226.
- [11] Deng, Z., Liu, X., Chen, P., de la Fuente, A., Zhou, X., Liang, N., ... y Du, L. (2022). Basalt-polypropylene fiber reinforced concrete for durable and sustainable pipe production. Part 1: Experimental program. *Structural Concrete*, 23(1), 311-327.
- [12] IRAM 11503 (1994). Canos de hormigón no pretensado. Destinados a la conducción de líquidos sin presión. Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- [13] Barros, J. A., & Figueiras, J. A. (1999). Flexural behavior of SFRC: testing and modeling. *Journal of materials in civil engineering*, 11(4), 331-339.
- [14] Taerwe, L., & Matthys, S. (2013). *Fib model code for concrete structures 2010*. Ernst & Sohn, Wiley.
- [15] Lee S.C., Cho J.Y., y Vecchio F.J. (2013). Simplified diverse embedment model for steel fiber-reinforced concrete elements in tension. *Materials Journal*, 110(4):403–412.
- [16] Selim P. (2008). Experimental investigation of tensile behavior of high strength concrete. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 11(15):467–472.
- [17] Foster S. y Voo J. (2003). Variable engagement model for fibre reinforced concrete in tension. University of New South Wales, Sydney, Australia.
- [18] Deng F., Ding X., Chi Y., Xu L., y 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., y Shah S.P. (1991). Characterization of interfacial properties in fiber-reinforced cementitious composites. *Journal of the American Ceramic Society*, 74(9):2156–2164.
- [20] González, F., & Rougier, V. (2022). Análisis experimental del comportamiento mecánico de tubos de hormigón reforzado con fibras híbridas. *Informes de la Construcción*, 74(565), 432-432.

Organiza: