

SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN DIAMETRAL EN TUBOS DE HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS HÍBRIDAS

NUMERICAL SIMULATION OF THE DIAMETRAL COMPRESSION TEST IN HYBRID FIBER REINFORCED CONCRETE PIPES

Federico A. González^a y Viviana C. Rougier^b

^aFacultad Regional Concepción del Uruguay-UTN, Ing. Pereira 676 C. del Uruguay, Entre Ríos,
Argentina, gonzalezf@frcu.utn.edu.ar

^bFacultad Regional Concepción del Uruguay-UTN, Ing. Pereira 676 C. del Uruguay, Entre Ríos,
Argentina, rougierv@frcu.utn.edu.ar

Palabras clave: fibras híbridas, hormigón reforzado, tubos, simulación numérica.

Resumen. En las últimas décadas, los tubos de hormigón reforzados con fibras se han introducido con éxito en la industria de la construcción. En este trabajo, se evalúa numéricamente mediante la simulación del ensayo de compresión diametral de tres aristas (ECD) el comportamiento mecánico de tubos de hormigón reforzados con la combinación de fibras de acero y polipropileno (THRFH). Dicha combinación se denomina comúnmente hibridación. El hormigón reforzado con fibras híbridas se modela como un material homogéneo equivalente con propiedades promedio (macro modelo). El problema se resuelve mediante un código de elementos finitos no lineal en el que se utiliza un modelo constitutivo de daño y plasticidad acoplados. Finalmente, los resultados se comparan con datos obtenidos a través de una campaña experimental en la que se elaboraron y ensayaron 6 THRFH con dos dosificaciones distintas de fibras combinadas. El modelo numérico reproduce con razonable aproximación la capacidad de carga y deformación de los THRFH, teniendo en cuenta la gran cantidad de variables involucradas en el problema.
Keywords: Hybrid fibers, reinforced concrete, pipes, numerical simulations.

Abstract. Fiber-reinforced concrete pipes have been successfully applied in the construction industry in recent decades. In this work, the mechanical behavior of hybrid fiber-reinforced concrete pipes (HFRCP) is numerically assessed by simulating the three-edge bearing test (TEBT). The hybrid reinforcement was obtained by combining steel and polypropylene fibers. The hybrid fiber-reinforced concrete is modeled as a homogeneous material with average properties (macro model). The problem is solved by a nonlinear finite element code using a damage plasticity model. Finally, the numerical results are compared with the experimental results obtained from the 6 HFRCP test with two doses of combined fibers. The numerical model reproduces with a reasonable agreement the bearing capacity and deformation of HFRCP, considering the large number of variables involved in the problem.

1. INTRODUCCIÓN

La utilización del hormigón reforzado con fibras (HRF) en la fabricación de tubos premoldeados genera beneficios desde el punto de vista técnico y económico (Singh y Rai, 2021). En los tubos de hormigón armado (THA) con refuerzo tradicional, la elaboración de la armadura tipo jaula insume gran cantidad de tiempo y es necesario contar con equipamiento adecuado para el corte, cilindrado y soldado de la malla de acero, además, requiere de mano de obra calificada para realizar dichas tareas (Singh y Rai, 2021). Por el contrario, el refuerzo con fibras se realiza con menor complejidad, ya que las mismas pueden adicionarse directamente en la mezcladora como cualquier otro agregado y así utilizarse en cualquier planta hormigonera sin necesidad de grandes modificaciones en el proceso productivo (Al Rikabi et al., 2018).

En la actualidad, el uso de HRF en tubos premoldeados se encuentra en expansión. Sin embargo, los estudios realizados por diferentes investigadores (Mohamed et al., 2015; Abolmaali et al., 2012; Lee et al., 2019) y las normas técnicas relacionadas a esta tecnología, tratan acerca del uso de un solo tipo de fibras como refuerzo, ya sean fibras de acero (FA) o fibras sintéticas (FS), mientras que el uso de sistemas compuestos por combinaciones de diferentes tipos de fibras ha sido escasamente estudiado.

Teniendo en cuenta que el hormigón posee un comportamiento de fisuración multiescala, el uso de un solo tipo de fibra puede proporcionar refuerzo en una sola escala y para determinada edad y rango de carga-deformación (Pakravan et al., 2017). Por lo tanto, la utilización de fibras de diferentes materiales, geometría y/o características mecánicas proporcionaría un refuerzo más óptimo, cubriendo rangos más amplios y actuando en los diferentes estados del material, desde su colocación en estado fresco hasta su estado endurecido (Zhang y Pan, 2021). Cuando el refuerzo se realiza con dos o más tipos de fibras el material compuesto se denomina hormigón reforzado con fibras híbridas (HRFH). En el HRFH se genera una sinergia positiva entre las fibras que ha sido reportada en diferentes trabajos de investigación (Hadassa Joice et al., 2020). La presencia de una fibra en la matriz del hormigón potencia el rendimiento de la otra fibra (Singh y Rai, 2021).

En este trabajo, se evalúa numéricamente, mediante la simulación del ensayo de compresión diametral de tres aristas (ECD), el comportamiento mecánico de THRFH. Para dicha simulación, se implementa un modelo de elementos finitos no lineal en 2D (macro modelo) empleando un modelo de daño y plasticidad acoplados que se encuentra incorporado en el software ABAQUS[®]. Se modificaron las ecuaciones constitutivas, originalmente desarrolladas para hormigón reforzado con fibras de acero, con el fin de representar mecánicamente el comportamiento a la compresión y a la tracción uniaxial del hormigón reforzado con fibras híbridas. Para dichas modificaciones, se tuvieron en cuenta la teoría de mezclas y los efectos de la hibridación de las fibras sobre la tensión de unión en la interfaz fibra-matriz. Finalmente, los resultados se comparan con datos experimentales obtenidos a través de la elaboración y el ensayo de 6 THRFH con dos dosificaciones distintas de fibras combinadas (acero y polipropileno).

Por lo expresado anteriormente, este trabajo consta de la fase experimental, durante la cual se elaboran y ensayan los THRFH que constituyen los grupos de comparación y calibración; y la fase de modelación del problema.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1. Dosificación del hormigón

La mezcla de hormigón tiene una consistencia muy seca debido a que, durante la producción, los tubos se desmoldan casi inmediatamente después del llenado, por ello se requiere una mezcla

con gran cohesión y baja relación agua-cemento. Por metro cúbico de hormigón, la dosificación teórica está compuesta por: 80 l de agua, 300 kg de cemento, 980 kg de agregado fino (módulo de finura 2,6) y 1020 kg de agregado grueso (Tamaño máximo 13,2 mm). Se calaron 4 testigos cilíndricos (ϕ 75 mm) de los tubos ensayados, determinándose una resistencia a compresión característica de 17 MPa.

2.2. Fibras utilizadas

Para el refuerzo de los tubos se utilizaron macrofibras de acero (FA) y de polipropileno (FPP) disponibles en el mercado nacional argentino. En la Tabla 1, se presentan las características geométricas de las fibras utilizadas, algunas de sus propiedades más importantes y se pueden observar sus formas.

Material	Longitud mm	Diámetro mm	Densidad kg/m^3	Módulo elástico GPa	Formas
Acero	50	1,00	7840	210	
Polipropileno	50	0,60	920	6	

Tabla 1: Características de las fibras empleadas.

2.3. Características de los especímenes y norma de ensayo

Se elaboraron tubos de 600 mm de diámetro interior, 1000 mm de longitud y un espesor de pared de 75 mm. En la Tabla 2 se muestra la cantidad y denominación de los especímenes a ensayar, agrupados de acuerdo a sus características de refuerzo.

Para el refuerzo de los THRFH se adoptaron dosis de $0,5 kg/m^3$ y $1 kg/m^3$ de FPP combinadas con $20 kg/m^3$ de FA (THRFH-20/0.5 y THRFH-20/1.0). El uso de $20 kg/m^3$ de FA en este trabajo se debe a que otros autores han demostrado la eficiencia del refuerzo en esta dosis para tubos de hormigón reforzados con fibras de acero (Abolmaali et al., 2012; Mohamed et al., 2015; Lee et al., 2019). Por otra parte, cuando las FPP se encuentran combinadas con otras, se recomiendan fracciones de bajo volumen comprendidas entre 0,05 % y 0,2 % con el fin de evitar la aparición de erizos localizados y asegurar la distribución uniforme de las mismas (Li et al., 2017). Por ello, se adicionaron $0,5 kg/m^3$ y $1,0 kg/m^3$ de FPP, para conformar el refuerzo híbrido.

Grupo	Denominación	FA kg/m^3	FPP kg/m^3	Vol. de fibras %	Cantidad de tubos
I	THRFH-20/0,5	20	0,5	0,30	3
II	THRFH-20/1,0	20	1,0	0,35	3

Tabla 2: Características de refuerzo y cantidad de tubos ensayados.

El procedimiento de ensayo a compresión diametral de los especímenes se encuentra especificado en la norma IRAM-11503 (1994), la cual es equivalente la ASTM-C497 (2020). En el esquema de la Figura 1 se observa la disposición del tubo durante el ensayo. La carga se aplica mediante una viga rígida en la generatriz superior del tubo, que distribuye uniformemente la carga, mientras el espécimen se apoya sobre dos largueros de caucho. Las deformaciones se

registran mediante un bastón retráctil dotado de un micrómetro, como se observa en la Figura 1.

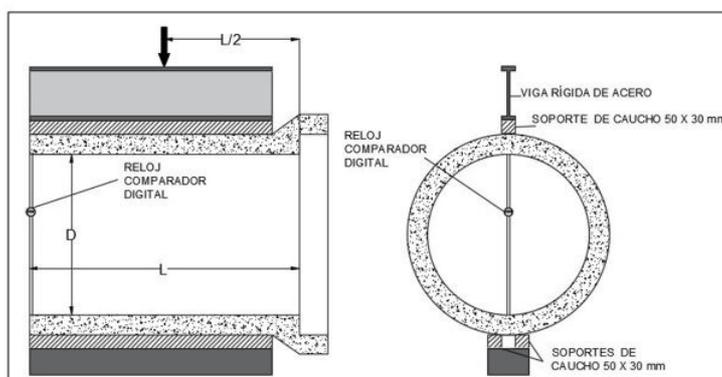


Figura 1: Esquema de instrumentación y ensayo de los THRFH.

3. MODELACIÓN NUMÉRICA

3.1. 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 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 en la siguiente sección.

3.2. Modelo constitutivo del comportamiento del HRFH a la compresión uniaxial

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

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

donde f_c 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:

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

donde ϵ_{c10} es la deformación en el pico para el hormigón simple (-2 ‰) (fib model code, 2010); 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:

$$p = 1,0 - 0,919 \exp(-0,394W_f); q = 1 - p - E_{c1}/E_{ci} \quad (3)$$

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

Las curvas obtenidas a partir del modelo se muestran en la Figura 2.

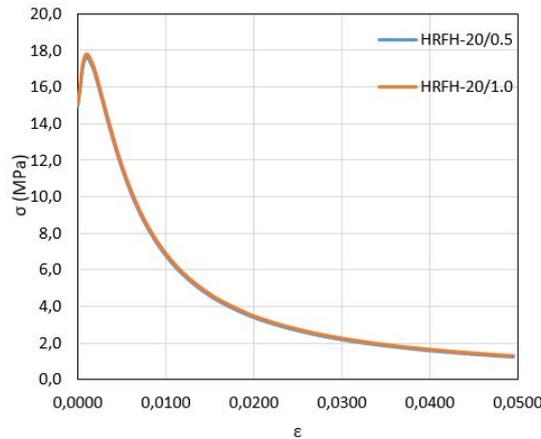


Figura 2: Curva $\sigma - \epsilon$ para el HRFH.

3.3. Modelo constitutivo del 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) para HRFA. El modelo propuesto por Lee et al. (2013) 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:

$$f_{HRFA} = f_f + f_{ct} \tag{4}$$

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 (Selim, 2008) 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:

$$f_{st} = \alpha_f V_f K_{st} \tau_{(f,max)} \frac{l_f}{d_f} \left(1 - \frac{2W_{cr}}{l_f} \right)^2 \tag{5}$$

donde α_f es un factor que depende de la distribución de la fibra dentro del elemento estructural y puede estimarse en $0,5V_f$, siendo V_f el volumen de fibras empleado; l_f y d_f son la longitud y el diámetro equivalente de la fibra, respectivamente; $\tau_{(f,max)}$ es la tensión máxima de adherencia entre las fibras de acero con extremo conformado y la matriz del material, Foster y Voo (2003) lo establecen como $\tau_{f,max} = 1,5\sqrt{f_c}$. 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:

$$f_{eh} = \alpha_f V_f K_{eh} \tau_{(eh,max)} \frac{2(l_f - 2W_{cr})}{d_f} \tag{6}$$

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

$\tau_{(eh,max)}$ es igual a $0,429 \cdot \sqrt{f_c}$ según Foster y Voo (2003).

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 (Deng et al., 2018). 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), el coeficiente de fricción matriz-acero (μ) y el volumen de FA (V_{FA}) y FPP (V_{FPP}) empleados, según la siguiente ecuación:

$$\tau_{(HRFH)} = \tau_{(f,max)} + \mu(1,22V_{FA} + 28,74V_{FPP}) \quad (7)$$

donde el valor de μ puede estimarse en 0,3 según las recomendaciones de Li et al. (1991).

El valor de $\tau_{(HRFH)}$ es empleado en la ecuación 5 para obtener las curvas que se muestran en la Figura 3

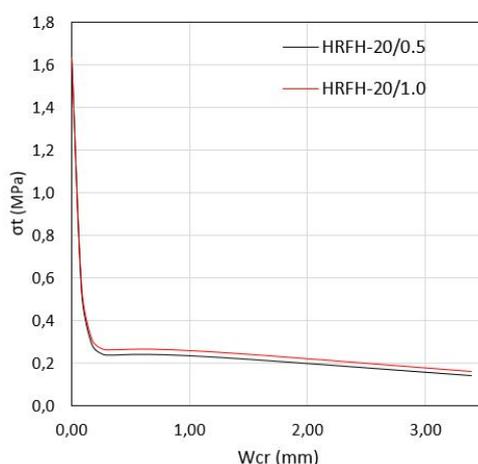


Figura 3: Curva $\sigma_t - W_{cr}$ para HRFH

3.4. Modelación del Ensayo a compresión diametral (ECD)

Para la simulación del ECD en ABAQUS® se creó un modelo en estado de deformación plana. Se modelaron el apoyo de carga superior, dos listones de apoyo inferiores y la tubería de hormigón. En la Figura 4, 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 50 mm x 50 mm. El método de aplicación de la carga se realizó imponiendo un desplazamiento controlado de 20 mm de recorrido al soporte superior. Para la tubería se utilizaron elementos triangulares lineales de 6 nodos en estado de deformación plana.

En la Tabla 3 se expresan los parámetros del material requeridos por ABAQUS® en el MDP.

4. RESULTADOS

En la Figura 5.a y b se observan las curvas de carga (P) y desplazamiento (v) experimentales y numéricas para los tubos con las dos dosis de fibras híbridas empleadas como refuerzo del hormigón.

En la Figura 5.a se observa un buen ajuste entre la curva $P - v$ numérica y las experimentales, por lo cual, el modelo reproduce adecuadamente el comportamiento de los THRFH-20/0.5.

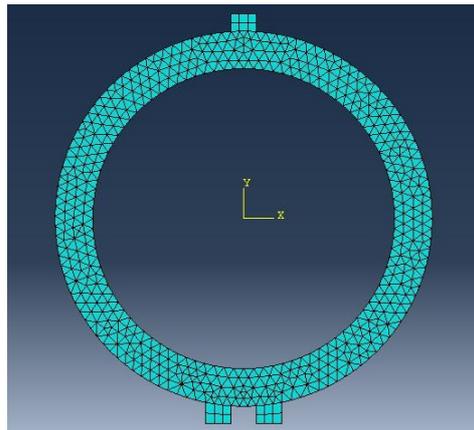


Figura 4: modelado del ensayo de compresión diametral.

Parámetro	Valor
Angulo de dilatación	36,51
Excentricidad	0,1
Viscosidad	0
Relación σ_{b0}/σ_{c0}	1,16
K_c	0,67

Tabla 3: Parámetros de plasticidad requeridos por el MDP.

El primer tramo de la curva corresponde, principalmente, al aporte de la matriz de hormigón a la resistencia del tubo. En esta fase, los especímenes experimentales mostraron una mayor rigidez, pero con una variación poco significativa. El primer cambio marcado en la dirección de la tangente de la curva corresponde a la aparición de las fisuras en los especímenes, donde también se observa una adecuada coincidencia entre el comportamiento numérico y experimental. El segundo cambio marcado de pendiente en la curva, corresponde a una carga característica en este tipo de ensayos sobre tubos, que se denomina carga de pre rotura. A partir de la misma, experimentalmente el ensayo se vuelve inestable con un gran tasa de crecimiento de las deformaciones que impidieron medir las deformaciones para la carga de rotura con los instrumentos utilizados en este trabajo. Sin embargo, en términos de cargas de rotura, los valores registrados experimentalmente y numéricamente fueron comparables.

Para el grupo de THRFH-20/1.0 (Figura 5.b), las curvas $P - v$ numéricas y experimentales mostraron un mejor ajuste en lo que se refiere a la rigidez inicial de los especímenes hasta alcanzar la carga de fisuración (P_F). A partir de la misma, la curva numérica muestra un mayor endurecimiento, mientras las curvas de los especímenes experimentales tienden a un amesetamiento de la misma. Al contrario de lo observado en las curvas experimentales del grupo THRFH-20/0.5, en el grupo de THRFH-20/1.0 no se pueden discretizar las cargas de pre rotura debido a que la inestabilidad del ensayo ocurre antes de la misma.

En la Tabla 4 se muestran los resultados de carga de fisuración y rotura media obtenidas experimentalmente y las obtenidas numéricamente a partir de la simulación del ensayo de compresión diametral para THRFH.

En la Tabla 4 se observa que, experimentalmente, los tubos del grupo de THRFH-20/0.5, con menor contenido de FPP en el sistema híbrido de refuerzo, alcanzaron una mayor carga de rotura promedio al compararlos con el grupo de THRFH-20/1.0, aunque la diferencia es poco

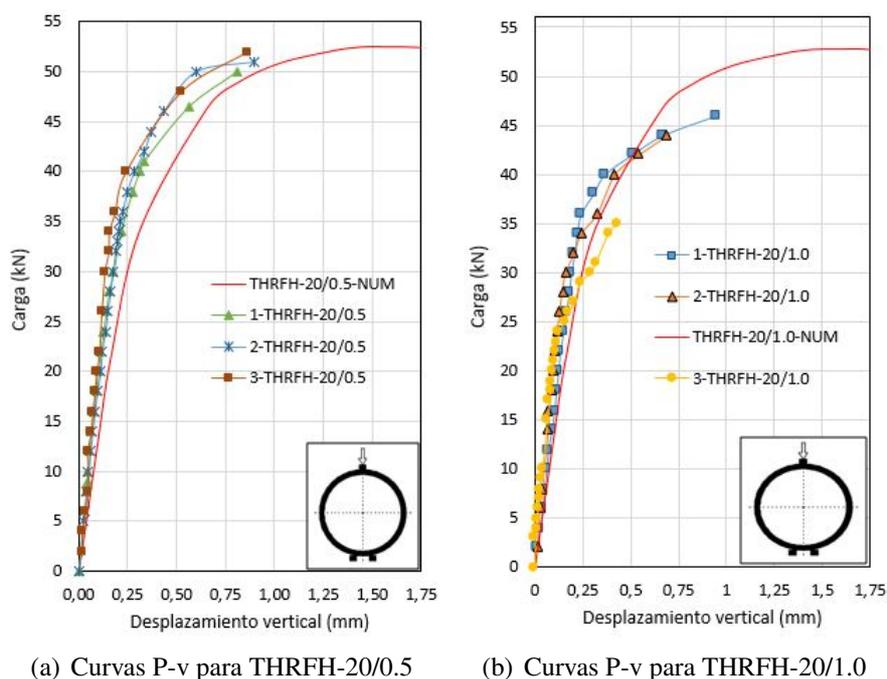


Figura 5: Comparación de curvas obtenidas experimental y numéricamente para el ECD en THRFH.

Tubo	Tipo de Ensayo	P_F kN	cov %	P_R kN	cov %
THRFH-20/0.5	Exp.	34,6	-	50,4	-
	Num.	33,5	-3,18	52,5	4,16
THRFH-20/1.0	Exp.	30,6	-	48,6	-
	Num.	33,5	9,5	52,72	8,5

Tabla 4: Resultados experimentales y numéricos de cargas de fisuración (P_F) y rotura (P_R) para THRFH-20/0.5 y THRFH-20/1.0.

significativa. Este fenómeno se podría explicar partiendo del hecho de que las fibras forman una estructura de red en el hormigón que impide que la mezcla segregue y fluya (Das et al., 2020). Cuando el volumen de fibras es bajo, la mezcla alcanza una mayor cohesión que favorece la compactación. Por lo cual, el aumento de la cohesión y la pérdida de movilidad del material pueden significar una mejora en la trabajabilidad, y así, es posible minimizar los riesgos de deformaciones del tubo otorgando mayor estabilidad dimensional durante el proceso de desmolde. Sin embargo, si la cohesión sobrepasa cierto límite el material podría pegarse al molde y, durante el desmolde, generarse tensiones en sentido contrario a la dirección del colado y compactación, perjudicando la compacidad de la mezcla fresca en el momento en que no posee la capacidad de resistir dichas tensiones (Abolmaali et al., 2012). Por ello, se estima que el aumento del volumen de FPP en los THRFH-20/1.0 podría sobrepasar dicho límite de cohesión de la mezcla, pegándose en el molde y perjudicando la compactación y la resistencia de los especímenes.

En cuanto a los resultados numéricos, para el grupo THRFH-20/0.5 la P_F tiene una variación 3,18 % respecto a la experimental y para P_R la variación es del 4,16 %. Para el grupo de THRFH-20/1.0 las variaciones respecto a la P_F y P_R experimentales fueron de 9,5 % y 8,5 %, respectivamente. La mayor variación para el grupo con mayor contenido de FPP en el refuerzo

híbrido se debe a que el modelo no tiene la capacidad de representar el fenómeno tecnológico del perjuicio en la compactación del material que genera la mayor cantidad de fibras. Fenómeno ya descrito al analizar los resultados experimentales. Por lo tanto, el modelo estima mayores valores de resistencia para mayores contenidos de fibras de refuerzo. A pesar de ello, se observa un ajuste adecuado y diferencias poco significativas entre los resultados numéricos y experimentales, considerando las cantidad de variables involucradas en el problema y las simplificaciones asumidas.

Finalmente, comparando las curvas numéricas, es de observar que el modelo no sobrestima los valores de carga máxima cuando se considera el grupo de tubos con mayor contenido de fibras. Esto se debe a que, en las curvas constitutivas, el impacto del incremento del contenido de FPP tampoco genera una variación significativa de las mismas. Lo expresado, coincide con lo observado experimentalmente donde los valores de carga máxima promedio no tienen gran diferencia entre ambos grupos, aunque decrece levemente su valor para el grupo de tubos con mayor contenido de fibras.

5. CONCLUSIONES

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

- En general, el modelo reprodujo adecuadamente el comportamiento mecánico de los THRFH sometidos al ECD, mostrando un buen ajuste entre las curvas $P - v$ numéricas y experimentales, principalmente para los THRFH-20/0.5.
- Los valores de carga de fisuración y rotura obtenidos por simulación del ECD aproximan razonablemente los resultados promedio experimentales para los dos grupos de THRFH analizados.
- El incremento de FPP en el sistema híbrido de refuerzo generó una leve disminución de la resistencia de los tubos, que impactó en una mayor diferencia entre el resultado numérico y experimental promedio para el grupo de THRFH-20/1.0.

REFERENCIAS

- Abolmaali A., Mikhaylova A., Wilson A., y Lundy J. Performance of steel fiber-reinforced concrete pipes. *Transportation research record*, 2313(1):168–177, 2012.
- Al Rikabi F.T., Sargand S.M., y Kurdziel J. Evaluation of synthetic fiber reinforced concrete pipe performance using three-edge bearing test. *Journal of Testing and Evaluation*, 47(2):942–958, 2018.
- ASTM-C497. Test methods for concrete pipe, concrete box sections, manhole sections, or tile. 2020. doi:10.1520/c0497-20e01.
- Barros J. y Figueiras J. Flexural behaviour of sfrc: Testing and modelling, *asce j. mater. Civ. Eng*, 11(8):331–339, 1999.
- Das S., Sobuz M.H.R., Tam V.W., Akid A.S.M., Sutan N.M., y Rahman F.M. Effects of incorporating hybrid fibres on rheological and mechanical properties of fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 262:120561, 2020.

- Deng F., Ding X., Chi Y., Xu L., y Wang L. 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, 2018.
- fib model code. *fib model code for concrete structures 2010*. Ernst Sohn, Wiley, 2010. ISBN 9783433604090.
- Foster S. y Voo J. Variable engagement model for fibre reinforced concrete in tension. *University of New South Wales, Sydney, Australia*, 2003.
- Hadassa Joice B., Aravindan A., y Brahmalla S. Review on behavior of hybrid fiber-reinforced concrete. En *Advances in Lightweight Materials and Structures*, páginas 117–125. Springer, 2020.
- IRAM-11503. Caños y piezas de conexión de mortero de cemento pórtland y de hormigón simple, destinados a obras de desagüe pluvial y cloacal. 1994.
- Lee S., Park Y., y Abolmaali A. Investigation of flexural toughness for steel-and-synthetic-fiber-reinforced concrete pipes. En *Structures*, volumen 19, páginas 203–211. Elsevier, 2019.
- Lee S.C., Cho J.Y., y Vecchio F.J. Simplified diverse embedment model for steel fiber-reinforced concrete elements in tension. *Materials Journal*, 110(4):403–412, 2013.
- Li Z., Mobasher B., y Shah S.P. Characterization of interfacial properties in fiber-reinforced cementitious composites. *Journal of the American Ceramic Society*, 74(9):2156–2164, 1991.
- Li Z.X., Li C.H., Shi Y.D., y Zhou X.J. Experimental investigation on mechanical properties of hybrid fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 157:930–942, 2017.
- Mohamed N., Soliman A.M., y Nehdi M.L. Mechanical performance of full-scale precast steel fibre-reinforced concrete pipes. *Engineering Structures*, 84:287–299, 2015.
- Pakravan H., Latifi M., y Jamshidi M. Hybrid short fiber reinforcement system in concrete: A review. *Construction and building materials*, 142:280–294, 2017.
- Selim P. Experimental investigation of tensile behavior of high strength concrete. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 11(15):467–472, 2008.
- Singh N.K. y Rai B. Assessment of synergetic effect on microscopic and mechanical properties of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete. *Structural Concrete*, 22(1):516–534, 2021.
- Zhang T. y Pan D. Mechanical properties of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete in building structure. *Civil engineering journal*, 37(2):501–5012, 2021.