

## TUBOS DE HORMIGÓN ARMADO Y REFORZADOS CON FIBRAS HÍBRIDAS. SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN DIAMETRAL

**REINFORCED CONCRETE PIPES AND HYBRID FIBER-REINFORCED PIPES.  
NUMERICAL SIMULATION OF THE DIAMETRICAL COMPRESSION TEST**

**Federico A. González<sup>a</sup>, Viviana C. Rougier<sup>a</sup>, Facundo A. Retamal<sup>a</sup> y Miqueas C. Denardi<sup>a, b</sup>**

<sup>a</sup>*Facultad Regional Concepción del Uruguay-UTN, Ing. Pereira 676 C. del Uruguay, Entre Ríos, Argentina, gonzalezf@frcu.utn.edu.ar*

<sup>b</sup>*Facultad Regional Concordia-UTN, Salta 277 C. del Uruguay, Entre Ríos, Argentina, rougierz@frcu.utn.edu.ar*

**Palabras clave:** Fibras híbridas, tubos de hormigón, simulación numérica, ensayo de compresión diametral.

**Resumen.** El hormigón reforzado con dos o más tipos diferentes de fibras, razonablemente combinadas, se denomina Hormigón Reforzado con Fibras Híbridas (HRFH). Este material compuesto ofrece propiedades mejoradas, especialmente en términos de ductilidad y control de fisuración. Su aplicación en tubos de drenaje, como sustituto parcial o total del refuerzo tradicional, puede generar un impacto favorable en la industria del prefabricado, tanto desde el punto de vista técnico como económico. En este trabajo se presenta la simulación numérica del Ensayo de Compresión Diametral de Tres Aristas (ECD) para evaluar el comportamiento mecánico de tubos de hormigón armado (THA) y de tubos de hormigón reforzado con fibras híbridas (THRHF). El hormigón reforzado con la combinación de fibras de acero y polipropileno, se modela como un material homogéneo equivalente, con propiedades promedio (modelo macroscópico). El problema se resuelve mediante un código de elementos finitos no lineal, que incorpora un modelo constitutivo con daño y plasticidad acoplados. Finalmente, los resultados numéricos se contrastan con datos experimentales obtenidos por la elaboración y ensayo de nueve tubos.

**Keywords:** Hybrid fibers, concrete pipes, numerical simulations, diametrical compression test.

**Abstract.** Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HFRC), defined as concrete reinforced with two or more different types of fibers rationally combined, exhibits enhanced properties, particularly in terms of ductility and crack control. Its application in drainage pipes, as a partial or total substitute for traditional reinforcement, can have a favorable impact on the precast industry, both from technical and economic perspectives. This paper presents the numerical simulation of the Three-Edge Bearing Test (TEBT) to evaluate the mechanical behavior of reinforced concrete pipes (RCP) and hybrid fiber reinforced concrete pipes (HFRCP). Concrete reinforced with a combination of steel and polypropylene fibers is modeled as an equivalent homogeneous material with average properties (macroscopic model). The problem is solved using a nonlinear finite element code that incorporates a constitutive model with coupled damage and plasticity. Finally, the numerical results are compared with experimental data obtained from the fabrication and testing of nine pipes.

## 1. INTRODUCCIÓN

El hormigón reforzado con fibras (HRF) comprende una amplia gama de compuestos cementicios en los que se incorporan fibras para mejorar su comportamiento mecánico. Dentro de esta categoría se encuentra un tipo particular denominado hormigón reforzado con fibras híbridas (HRFH), que se obtiene a partir de la combinación de fibras con diferentes características, ya sea en cuanto a su composición material, geometría y/o propiedades mecánicas. Las propiedades finales de este material no dependen únicamente de las capacidades individuales de cada tipo de fibra, sino que también se benefician de la sinergia que surge de su interacción ([González y Rougier, 2024](#)).

De acuerdo con diversos estudios, la hibridación de dos o más tipos de fibras puede generar compuestos cementicios con resistencias últimas superiores y mayor capacidad de deformación ([Singh y Rai, 2021](#)). Esto se debe a que, al seleccionar fibras con longitudes, diámetros, módulos de elasticidad y resistencias a tracción diferentes, es posible aprovechar las ventajas particulares de cada una y compensar sus limitaciones ([Pakravan et al., 2017](#)).

En cuanto a sus aplicaciones, el HRF se emplea de forma extendida en el ámbito de la construcción subterránea, donde se utiliza como revestimiento primario o secundario mediante proyección (“shotcrete”) o en la prefabricación de dovelas. Otras aplicaciones incluyen pavimentos, soleras y elementos prefabricados de bajo o moderado compromiso estructural, entre los que se encuentran y destacan los tubos premoldeados.

En el caso particular de los tubos premoldeados, la implementación generalizada de fibras como refuerzo presenta todavía desafíos o barreras importantes. Entre las principales se encuentran la resistencia al cambio que caracteriza a ciertos sectores de la industria, la limitada experiencia práctica en la fabricación de HRF y el desconocimiento de los procedimientos específicos de diseño y control de calidad ([Deng et al., 2022](#)). No obstante, uno de los factores que más influye en la lenta adopción de esta tecnología, es la falta de métodos de diseño sistemáticos y reconocidos para este tipo de productos.

Actualmente, los tubos de hormigón armado (THA) con refuerzo convencional cuentan con metodologías de cálculo consolidadas, que se encuentran normalizadas y plasmadas en tablas de reglamentos, normas o códigos. Estas tablas permiten determinar cuantías mínimas de armadura en función de parámetros como la geometría y la clase resistente del tubo. Sin embargo, estos métodos no son directamente aplicables al diseño de tubos reforzados con fibras, y menos aún a aquellos que utilizan combinaciones híbridas de fibras. Ante esta situación, los fabricantes que desean producir tubos de HRF o HRFH suelen verse obligados a recurrir a ensayos de rotura bajo un enfoque de prueba y error para validar el diseño, lo que implica un consumo elevado de tiempo y recursos. Esta estrategia, además de ineficiente, se ve dificultada por la gran variedad de fibras disponibles en el mercado, cada una con propiedades y comportamientos distintos ([González y Rougier, 2024](#)). La ausencia de una metodología de diseño clara, simple y adaptada a refuerzos con fibras constituye así un factor decisivo que ralentiza la incorporación de los tubos de HRF y, en mayor medida, de HRFH (THRFH) en el mercado ([Faisal et al., 2023](#)).

En este trabajo se continúa avanzando en la implementación de un modelo numérico que simule el ensayo a compresión diametral (ECD) de tres aristas, utilizado para evaluar la resistencia de los THA y los THRFH. En la edición 2023 del MECOM, los autores presentaron un artículo en el cual se describía la modelización en 2D y, en el artículo actual, se presenta el modelo 3D del ECD.

## 2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

El programa experimental contó con la elaboración y ensayo de un total de 9 tubos: 3 de hormigón armado (THA), reforzados con la armadura tradicional o jaula de acero, 3 tubos de hormigón reforzado con la combinación de  $20 \text{ kg/m}^3$  de fibras de acero (FA) y  $0,5 \text{ kg/m}^3$  de fibras de polipropileno (FPP) y 3 tubos reforzados con  $20 \text{ kg/m}^3$  de FA y  $1,0 \text{ kg/m}^3$  de FPP. Si bien, las características de refuerzo fueron diferentes, la geometría fue igual para todos los especímenes, ya que los mismos tenían una longitud de 1000 mm, 600 mm de diámetro interno y 75 mm de espesor de pared.

En la Tabla 1 se indica la nomenclatura de los grupos de tubos descriptos anteriormente.

Denominación	FA kg/m <sup>3</sup>	FPP kg/m <sup>3</sup>	Cantidad Unidades
THA	0	0	3
THRFH-20/0.5	20	0,5	3
THRFH-20/1.0	20	1,0	3

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

La armadura tradicional empleada para el refuerzo de los THA es la prescripta para tubos de Clase II, según la norma [IRAM-11503 \(1987\)](#). Dicha armadura se fabrica a partir de mallas electro soldadas y cilindradas, de manera que en el sentido longitudinal del tubo debe haber 7 Ø 6 mm y en el sentido transversal, una cuantía de  $1,5 \text{ cm}^2/\text{m}$ .

### 2.1. Materiales

El diseño teórico de mezcla u hormigón base, es el mismo que utiliza la Planta para fabricar los tubos que comercializa. La misma se basa en las siguientes proporciones por metro cúbico: agua 80 l, cemento (CPC 50) 300 kg, árido fino (módulo de finura 2,52) 980 kg y árido grueso (1/2") 1020 kg. Con el fin de caracterizar el material, luego del ensayo de los tubos se calaron 7 testigos de cilíndricos de 75 mm de diámetro, obteniéndose de los mismos una resistencia a la compresión igual a 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 fibras de acero (FA), denominadas comercialmente como WIRAND FF1 que poseen una esbeltez igual a 50.

En Tabla 2 se presentan las características geométricas de las fibras utilizadas y algunas de sus propiedades más importantes.

### 2.2. Ensayo de Compresión diametal

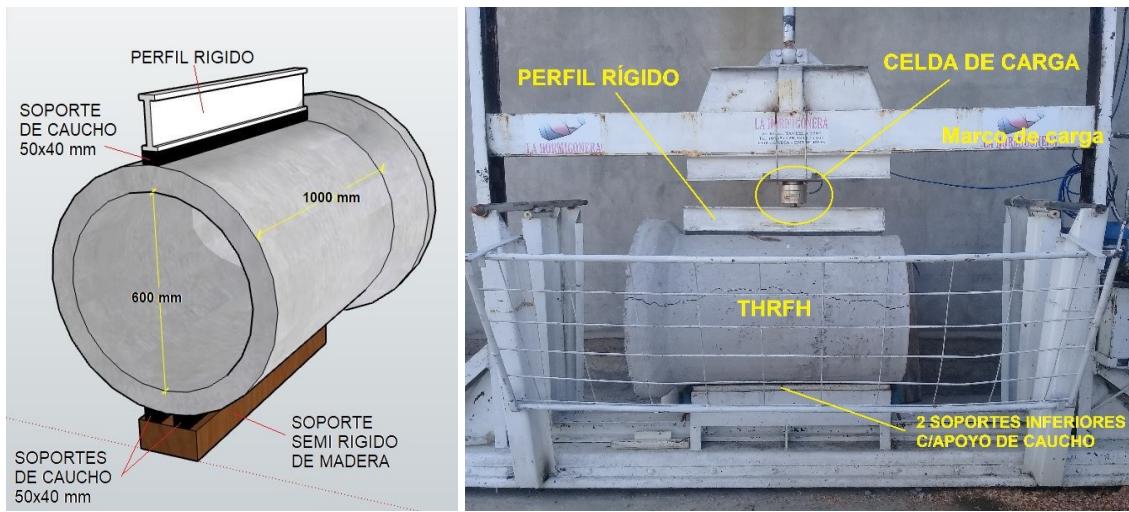
Los especímenes fueron ensayados de acuerdo al método que se encuentra establecido en la norma [IRAM-11503 \(1987\)](#) y es comúnmente denominado ensayo de compresión diametal de tres aristas. Mediante este ensayo se determina la carga máxima o de rotura de los tubos, la cual,

Material	Longitud mm	Diámetro mm	Densidad kg/m <sup>3</sup>	Módulo GPa
Acero-Wirand FF1	50	1,00	7840	210
Polip.-Macronita 0.6	50	0,60	920	6

Tabla 2: características de las fibras empleadas.

determina la clase resistente a la que pertenece según la citada norma. En el presente trabajo, los tubos se diseñaron para alcanzar la clase II, cuya carga mínima de rotura es 45 kN.

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. Las deformaciones diametrales se registraron por medio de un bastón retráctil colocado verticalmente, dotado de un micrómetro digital.



(a) esquema de ensayo. (b) fotografía del marco de carga y de un tubo ya ensayado.

Figura 1: Ensayo de compresión diametral de tres aristas según IRAM 11503

### 3. MODELACIÓN NUMÉRICA DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN DIAMETRAL

El modelo de daño y plasticidad acoplados (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.

#### 3.1. 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;  $\epsilon_{c1}$  es la deformación en la tensión pico y se calcula mediante la siguiente expresión:

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

donde  $\epsilon_{c10}$  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:

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

$$q = 1 - p - E_{c1}/E_{ci} \quad (4)$$

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

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

### 3.2. 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:

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

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,  $f_{ct} = 0,106f_c^{0,948}$  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:

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

donde  $\alpha_f$  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:

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

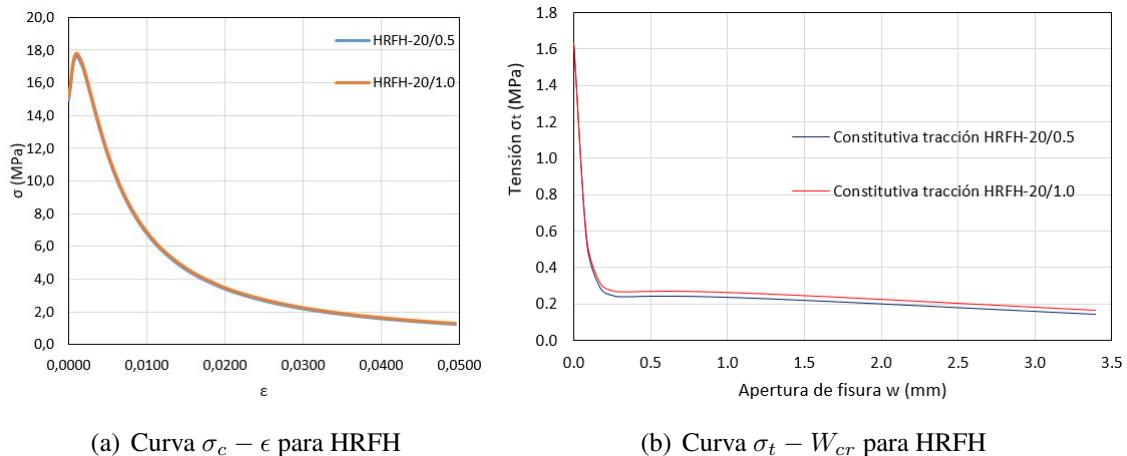
El factor  $K_{eh}$  es empleado para representar las tensiones de extracción promedio de la fibra debido al anclaje mecánico que posee en sus extremos y la tensión por anclaje mecánico  $\tau_{(eh,max)}$  es igual a  $0,429.\sqrt{f_c}$  según Foster y Voo (2003).

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 ( $\mu$ ) y el volumen de FA ( $V_{FA}$ ) y FPP ( $V_{FPP}$ ) empleados, según la siguiente ecuación:

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

El coeficiente de fricción  $\mu$  puede estimarse en 0,3 según las recomendaciones de [Li et al. \(1991\)](#).

El valor de  $\tau_{(HRFH)}$  es empleado en la ecuación 6 para obtener las curvas que se muestran en la Figura 2



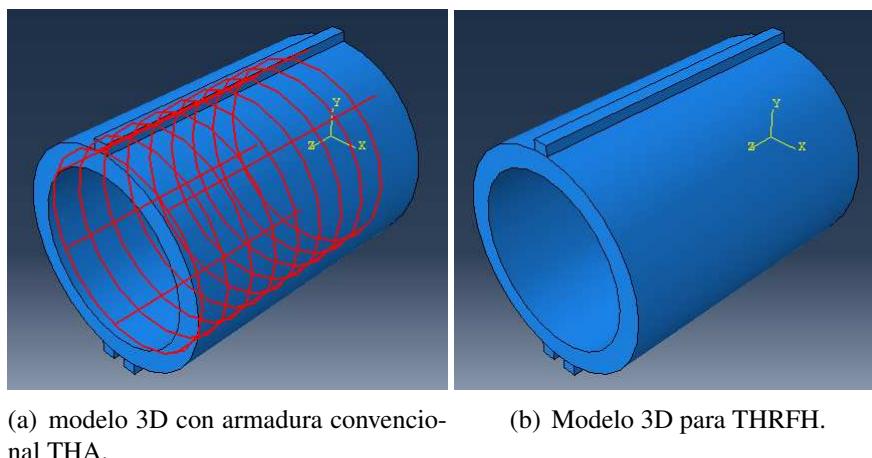
(a) Curva  $\sigma_c - \epsilon$  para HRFH

(b) Curva  $\sigma_t - W_{cr}$  para HRFH

Figura 2: Curvas constitutivas del HRFH.

### 3.3. 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. La Figura 3 (izquierda) muestra el THA con su respectiva armadura. La Figura 3 (derecha) muestra la modelación de un THRFH y se observan los dos listones inferiores de apoyo y el listón superior para la aplicación de la carga.



(a) modelo 3D con armadura convencional THA.

(b) Modelo 3D para THRFH.

Figura 3: Modelado del ECD.

En la Figura 4 (izquierda) 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 con integración reducida. Para los apoyos elásticos se emplearon elementos C3D8H tipo Linear-Brick de 8 nodos híbridos.

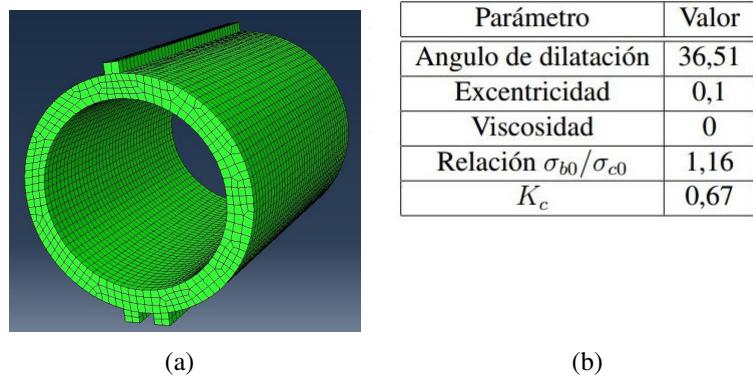


Figura 4: (a) Mallado del modelo 3D del ECD. (b) Parámetros plásticos requeridos por el MDP de Abaqus.

En la Figura 4 (derecha) se expresan los parámetros plásticos del material requeridos por ABAQUS en el MDP.

#### 4. RESULTADOS

En la Figura 5 se muestran los resultados experimentales obtenidos mediante el ECD. En primer lugar, se verifica que el grupo de control THA cumple con el requisito de resistencia para la clase que fue elaborado, ya que la clase II (IRAM-11503, 1987) establece que deben resistir una carga de rotura (PR) mayor a 45 kN. Por lo tanto, cada especímen cumple con dicha condición individualmente y alcanzan un promedio de 50,5 kN. De igual manera, el grupo de THRFH-20/0.5 alcanza en promedio una PR de 51 kN, similar a la alcanzada por los THA, cumpliendo con el requisito de resistencia de la clase mencionada. Por el contrario, para el grupo de THRFH-20/1.0 se observa que la carga de rotura promedio alcanzó 41,7 kN, es decir, 7,9 % por debajo de la carga reglamentaria.

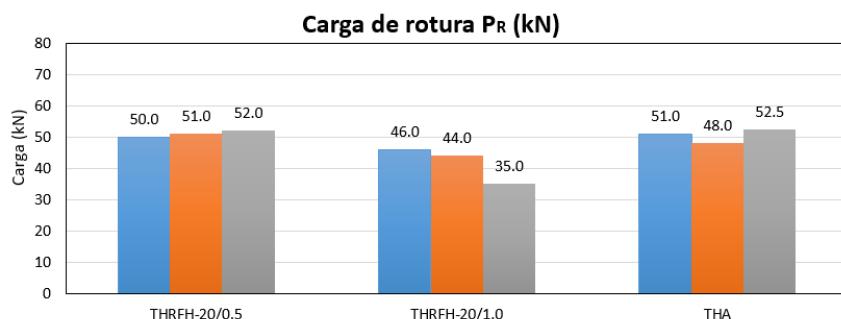


Figura 5: Cargas máximas obtenidas experimentalmente para los diferentes grupos de tubos.

Al comparar los grupos THRFH-20/0.5 y THRFH-25/1.0, se observa que el incremento del volumen de FPP en el sistema de refuerzo híbrido, no generó un aumento de la capacidad resistente del tubo, sino por el contrario, produjo una disminución significativa de la misma, en un porcentaje de 22,3 %.

En general, las fibras forman una estructura de red en el hormigón que impide que la mezcla segregue y fluya. Por ello, cuando se utilizó el volumen más bajo de fibras, la mezcla alcanzó mayor cohesividad que podría haber favorecido la compactación. Sin embargo, este incremento de la cohesión puede ser beneficioso hasta cierto límite, ya que el material podría pegarse al molde y, en el momento del 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 (González y Rougier, 2022). Este fenómeno podría explicar la reducción de la resistencia de los tubos de HRFH al incrementar el volumen de fibras de 0,30 % (THRFH-20/0.5) a 0,35 % (THRFH-20/1.0).

En la Figura 6 se muestra un gráfico que compara la resistencia media experimental para cada grupo de tubos con la resistencia obtenida numéricamente. Para los grupos de THRFH-20/0.5 y THA se observa una diferencia poco significativa de 6 % y 2 %, respectivamente. Por lo cual, se podría asumir que el modelo se ajusta de manera adecuada a los resultados experimentales. Sin embargo, para el grupo de THRFH-20/1.0, existe una diferencia significativa, de aproximadamente 30 %. Esto ocurre debido a que el modelo numérico no es capaz de predecir comportamientos propios de la tecnología del hormigón, como son los problemas de compactación del material dentro del molde o los problemas de desmolde mencionados anteriormente. Por el contrario, asume que el incremento de fibras de PP en el refuerzo híbrido, aportarían un leve incremento de la resistencia del tubo, lo que puede verificarse al comparar la carga de rotura numérica de los THRFH-20/0.5 y THRFH-20/1.0.

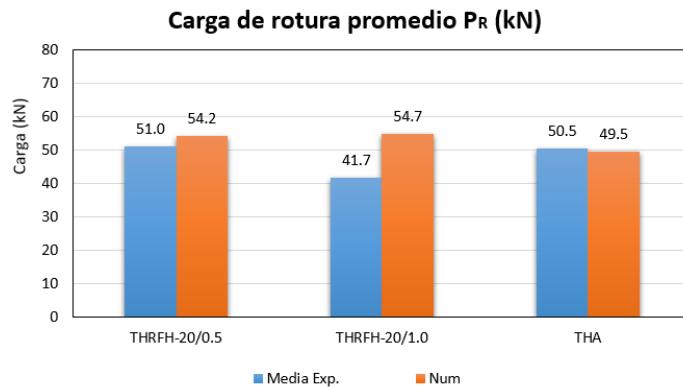


Figura 6: Comparación entre cargas promedio obtenidas experimentalmente y numéricamente para los diferentes grupos de tubos.

En la Figura 7 se muestran las curvas obtenidas a partir de la simulación numérica del ECD. Las mismas muestran un comportamiento muy diferente de acuerdo al tipo de refuerzo utilizado. Se observa que las curvas carga-deformación diametral de los THA mantienen su rigidez hasta los 0,4 mm de deformación, en donde los THA alcanzan la carga de fisuración. A partir de la misma, los tubos con este tipo de refuerzos sufren un aumento abrupto de la deformación. Este fenómeno también se observó experimentalmente durante los ensayos realizados a los THA y ha sido reportado anteriormente por otros autores (Al Rikabi et al., 2018; Mohamed et al., 2015) como patrón de comportamiento. Ocurre, principalmente, debido a que la jaula de acero de

refuerzo se debe posicionar entre el 35 % y el 50 % del espesor de la pared del tubo, por lo cual, el refuerzo se activa a niveles altos de desplazamiento vertical y apertura de fisura. Además, este comportamiento se agrava en los ensayos experimentales, cuando los mismos se realizan con sistemas de control abierto (sin control por deformación del tubo) para la aplicación de la carga como el que se usó en este trabajo, lo que genera la imposibilidad de controlar de manera eficiente la velocidad de las deformaciones. Una vez activado el refuerzo comienza una fase de endurecimiento en la curva hasta alcanzar la rotura, como efectivamente lo muestra la curva obtenida numéricamente.

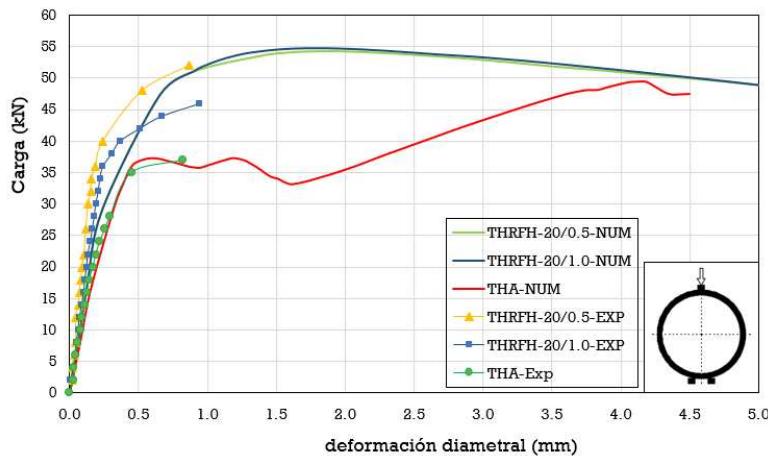


Figura 7: Comparación entre curvas carga-deformación diametral, obtenidas experimentalmente y numéricamente para los diferentes grupos de tubos.

Se observa, además, al comparar con las curvas experimentales que el modelo se ajusta de manera adecuada a la rigidez inicial de los distintos grupos de tubos, siendo los THA los de menor rigidez. Es importante observar, que los THRFH alcanzan la máxima resistencia con menor deformación diametral y apertura de fisura que los THA. Lo anterior, constituye una ventaja debido a que se reduce la posibilidad del ingreso, dentro del material, de sustancias agresivas propias del medio en el que se encontrará durante su servicio.

## 5. CONCLUSIONES

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

- El modelo numérico mostró una predicción adecuada de la carga máxima en los THA y en los THRFH con menor volumen de fibras de refuerzo, con diferencias de 2 % y 6 %, respectivamente. Sin embargo, el modelo no es capaz de predecir fenómenos asociados al déficit de compacidad del material en el molde, generado por el incremento de fibras de refuerzo. Es por ello que muestra una tendencia a estimar una mayor resistencia del tubo para mayores volúmenes de fibras.
- El modelo se ajusta de forma adecuada al comportamiento mecánico de los THA y los THRFH, considerando las curvas carga-deformación diametral. Si bien, por el instrumental utilizado en la fase experimental no se logró medir completamente las curvas,

las obtenidas numéricamente muestran el comportamiento observado para THRF y THA, también por otros autores.

## REFERENCIAS

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.

Barros J. y Figueiras J. Flexural behaviour of sfrc: Testing and modelling, asce j. mater. *Civ. Eng.*, 11(8):331–339, 1999.

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.

Deng Z., Liu X., Chen P., de la Fuente A., Zhou X., Liang N., Han Y., y Du L. Basalt-polypropylene fiber reinforced concrete for durable and sustainable pipe production. part 1: Experimental program. *Structural Concrete*, 23(1):311–327, 2022.

Faisal A., Abbas S., Kazmi S.M.S., y Munir M.J. Development of concrete mixture for spun-cast full-scale precast concrete pipes incorporating bundled steel and polypropylene fibers. *Materials*, 16(2):512, 2023.

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.

González F. y Rougier V. Análisis experimental del comportamiento mecánico de tubos de hormigón reforzado con fibras híbridas. *Informes de la Construcción*, 74(565):e432–e432, 2022.

González F.A. y Rougier V.C. Experimental study of the bearing capacity of hybrid fiber-reinforced concrete pipes. *Advanced Materials Research*, 1182:53–62, 2024.

IRAM-11503. Caños de hormigón armado no pretensado. destinados a la conducción de líquidos sin presión. 1987.

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.

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.