



## CAPACIDAD DE CARGA EN TUBOS DE HORMIGÓN REFORZADOS CON FIBRAS HÍBRIDAS. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL Y TEÓRICA

González, Federico A.; Rougier, Viviana C.  
Ingeniero Civil  
Facultad Regional C. del Uruguay, UTN  
gonzalezf@frcu.utn.edu.ar

### RESUMEN

Actualmente se ha extendido el uso de fibras de acero como refuerzo en tubos de hormigón premoldeados. Sin embargo, la combinación de fibras de diferentes materiales, geometría o propiedades mecánicas podría brindar resultados de refuerzo más óptimos, controlando la fisuración a distintas escalas, edades y niveles de deformación del hormigón. El hormigón reforzado con dos o más tipos de fibras diferentes se denomina Hormigón reforzado con fibras híbridas (HRFH). En este trabajo se presentan los resultados de ensayos en tubos de HRFH (THRFH) de 600 mm de diámetro. La capacidad de carga de los THRFH es comparada con la obtenida en tubos de hormigón reforzado con fibras de acero (THRFA) y tubos de hormigón reforzados con armadura convencional (THA), elaborados y ensayados en la misma campaña. Adicionalmente, los resultados experimentales se utilizan para calibrar un modelo teórico para la estimación de la capacidad de carga de los THRFH. Los THRFH alcanzaron una capacidad de carga equivalente a la de los THA y superior a la de los THRFA. Además, mediante el modelo teórico se han obtenido valores razonables en la estimación de la capacidad de carga de los THRFH, teniendo en cuenta la gran cantidad de variables involucradas.

### ABSTRACT

*The use of steel fibers as reinforcement in precast concrete pipes has now become widespread. However, the combination of fibers of different materials, geometry or mechanical properties could provide more optimal reinforcement results, controlling cracking at different scales, ages and levels of concrete deformation. Concrete reinforced with two or more different types of fibers is called Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HFRC). In this paper, the results of tests in HFRC pipes (HFRC) of 600 mm diameter are presented. The bearing capacity of HFRC is compared with that obtained in steel fiber reinforced concrete pipes (SFRCP) and conventional reinforced concrete pipes (RCP), elaborated and tested in the same campaign. Additionally, the experimental results are used to calibrate a theoretical model for estimating the bearing capacity of HFRC. HFRC reached a bearing capacity equivalent to that of RCP and higher than that of SFRCP. In addition, through the theoretical model, reasonable values have been obtained in the estimation of the bearing capacity of THRFH, taking into account the large number of variables involved.*



## 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<sup>1</sup>. En los tubos de hormigón armado (THA) con refuerzo tradicional, para la elaboración de la armadura tipo jaula es necesario disponer de equipo adecuado para el corte, cilindrado y soldado de la malla de acero, además, se requiere de tiempo y mano de obra calificada para realizar dichas tareas<sup>2</sup>. Por el contrario, el refuerzo con fibras se realiza con menor complejidad, ya que las mismas pueden adicionarse al igual que cualquier otro agregado y así utilizarse en cualquier planta hormigonera sin necesidad de grandes modificaciones en el proceso productivo<sup>3</sup>.

En la actualidad, el uso de HRF en tubos premoldeados es una práctica extendida y existen numerosas referencias bibliográficas<sup>4-6</sup> respecto de su utilización, además de existir, en diferentes países, normas<sup>7-10</sup> que regulan su empleo. Sin embargo, los estudios realizados por diferentes investigadores 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 la utilización de combinaciones de diferentes fibras ha sido escasamente estudiada.

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, para determinada edad y rango de carga-deformación<sup>11</sup>. 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<sup>12,13</sup>. 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<sup>14,15</sup>. La presencia de una fibra en la matriz del hormigón potencia el rendimiento de la otra fibra. En general, las fibras con bajo módulo actúan en las primeras edades del hormigón ayudando a controlar los efectos de la retracción plástica mejorando la calidad de la matriz. Esta mejora, favorece la adherencia y el anclaje de las fibras de alto módulo que son las encargadas de brindar resistencia mecánica al compuesto<sup>16</sup>. Por lo tanto, esta concatenación de fenómenos impacta en la mejora de la respuesta estructural del elemento analizado.

En cuanto al diseño de tubos, para los THA existen tablas basadas en resultados analíticos-experimentales, recogidos en normas técnicas, donde el diseñador puede encontrar la cantidad mínima de barras de acero necesarias para garantizar la clase de resistencia establecida en el proyecto<sup>17</sup>. Por el contrario, en el caso de los tubos de HRF, las normas antes referenciadas no establecen ni el tipo de fibras ni los parámetros mecánicos del HRF necesarios para cumplir con los requisitos de resistencia. Es por ello que los fabricantes deben recurrir a los ensayos de rotura para poder realizar un diseño indirecto de los tubos de HRF mediante un sistema de prueba y error<sup>18</sup>. Sin duda, esta estrategia es ineficiente debido a la gran variedad de

fibras presentes en el mercado. Es así que, la ausencia en el medio de una metodología simple de diseño ralentiza la implantación de los tubos de HRF en el mercado, y más aún de los tubos de HRFH (THRFH).

En el presente trabajo, el modelo teórico desarrollado por Peyvandi et al. (2014)<sup>19</sup> es modificado con el fin de estimar capacidad de carga de los THRFH. Además, se reportan los resultados de ensayos experimentales de THRFH de 600 mm de diámetro. La capacidad de carga de los THRFH es comparada con la obtenida en tubos de hormigón reforzado con fibras de acero (THRFA) y THA, elaborados y ensayados en la misma campaña. Finalmente, los resultados experimentales son comparados con los obtenidos mediante el modelo teórico.

## **MATERIALES: HORMIGÓN Y FIBRAS**

Los especímenes ensayados fueron fabricados en una Planta de premoldeados de la ciudad de Concordia, provincia de Entre Ríos y el hormigón utilizado se elaboró a partir de las proporciones mostradas en la Tabla 1. Este diseño teórico de mezcla es el mismo que utiliza la Planta para fabricar los tubos que comercializa. Se realizaron ensayos para determinar la humedad natural de los áridos, finos y gruesos, y se corrigieron las cantidades teóricas de los materiales, ajustando las proporciones antes de comenzar con la elaboración de los tubos. Debido al proceso productivo, donde el tubo recién elaborado es desmoldado y debe auto sustentarse, la mezcla debe tener consistencia seca y gran cohesión.

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

*Tabla 1: dosificación teórica del hormigón simple en kg/m<sup>3</sup>.*

Para la caracterización del material se calaron 7 testigos cilíndricos de 75 mm de diámetro en siete tubos ensayados elegidos aleatoriamente. La extracción de los testigos se realizó de acuerdo a las especificaciones de la norma IRAM 1551<sup>20</sup> y los mismos fueron ensayados a compresión simple dando como resultado una resistencia promedio de 17 MPa. En la Figura 1 se muestra el procedimiento de calado de los testigos.

Para el refuerzo de los tubos se utilizaron macrofibras de polipropileno y dos tipos diferentes de macrofibras de acero disponibles en el mercado argentino. Las fibras de polipropileno (FPP), denominadas comercialmente como MACRONITA<sup>®</sup> 0,6, son fibras sintéticas recortadas de materiales poliméricos. Este tipo de fibras son químicamente inertes, tienen gran estabilidad volumétrica, bajo módulo de elasticidad y bajo punto de fusión.



*Figura 1: Extracción de testigos calados.*

Las fibras de acero utilizadas, denominadas comercialmente como WIRAND® FF1 y WIRAND® FF3, se fabrican con alambre de acero de bajo carbono y de alta resistencia a la tracción 1200 Mpa, tienen un alto módulo de elasticidad y, al contrario de las fibras sintéticas, son susceptibles a la corrosión. La principal diferencia entre los dos tipos de fibras de acero utilizados es su esbeltez o relación de aspecto (RA), la cual se define como el cociente entre la longitud y el diámetro equivalente de las fibras. Las fibras tipo FF3 poseen una RA igual a 67, mientras que la RA de las fibras tipo FF1 es igual a 50. En la Tabla 2, se presentan las características geométricas de las fibras utilizadas y algunas de sus propiedades más importantes.

MATERIAL	LONGITUD D (mm)	DIAMETRO (mm)	DENSIDAD (kg/m <sup>3</sup> )	MÓDULO (GPa)
Acero Tipo FF1	50	1,00	7840	210
Acero Tipo FF3	50	0,75	7840	210
Polipropileno	50	0,60	920	6

*Tabla 2: características de las fibras empleadas.*



## PROGRAMA EXPERIMENTAL

En el presente estudio fueron elaborados un total 20 tubos de 600 mm de diámetro interior, 1000 mm de longitud y un espesor de pared de 75 mm. Se adoptaron estas dimensiones debido a que son las mínimas establecidas por la norma IRAM 11503<sup>21</sup> para tubos Clase II.

En la Tabla 3 se muestra la cantidad y denominación de los especímenes a ensayar agrupados de acuerdo a sus características de refuerzo.

Denominación	FA	FPP	Cantidad
	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	Unid.
THA-0/0	----	----	4
THRFA-FF1-20/0	20	0	4
THRFH-FF1-20/0,5	25	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 3: características de refuerzo y cantidad de tubos ensayados.*

El grupo THA corresponde a los tubos reforzados con armadura tradicional de barras de acero. La característica de la misma es establecida en la norma IRAM 11503<sup>21</sup> para tubos de Clase II y está formada por 7 barras de acero de 6 mm de diámetro en sentido longitudinal y una cuantía de 1,5cm<sup>2</sup>/m en sentido transversal.

Los THRFA-FF1-20/0 son tubos de hormigón reforzados con FA en una dosis de 20 kg/m<sup>3</sup>. Otros autores<sup>4,22</sup> han demostrado la eficiencia del refuerzo para este tipo de elemento premoldeado en la dosis de FA adoptada.

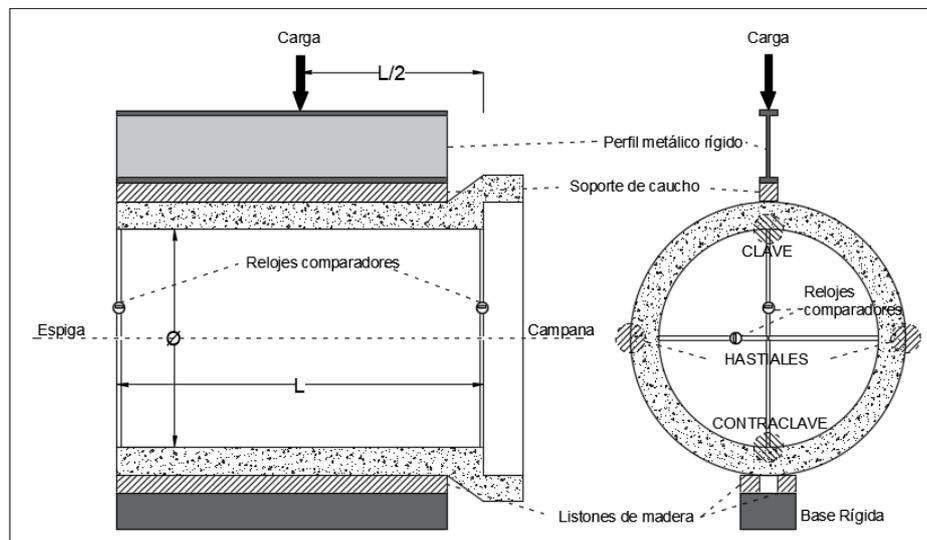
Los THRFH fueron reforzados utilizando dos dosis diferentes de fibras: 20 kg/m<sup>3</sup> de FA combinada con 0,5 kg/m<sup>3</sup> de FPP y 20 kg/m<sup>3</sup> de FA combinada con 0,5 kg/m<sup>3</sup> de FPP. Las dosis mencionadas se repitieron en los especímenes, pero utilizando dos tipos de FA, una con RA mayor que la otra, tal como se indicó en la Tabla 2. Los tenores de FPP adoptados para la hibridación, se establecieron de acuerdo a recomendaciones de otros autores<sup>23</sup> que demostraron que, para este tipo de fibras, cuando se encuentran combinadas con otras, se deben utilizar fracciones de bajo volumen comprendidas entre 0,05 % y 0,2 % con el fin de evitar la aparición de erizos (segregación de fibras) localizados y asegurar la distribución uniforme de las fibras.

## METODOLOGÍA DE ENSAYO

Todos los tubos elaborados fueron evaluados mediante el ensayo de compresión

diametral (ECD), denominado de “tres aristas”. Los procedimientos de este ensayo son establecidos por la norma IRAM 11503<sup>21</sup>. Durante el ensayo, el tubo es apoyado sobre dos largueros de caucho rígido y la carga se aplica en el eje generatriz superior a través de un perfil metálico que la distribuye uniformemente. La carga aplicada es cuasi-estática monótona creciente y para su aplicación se utiliza una prensa con un sistema hidráulico con capacidad para desarrollar una carga vertical nominal máxima de 140 kN.

Los valores de carga de rotura se registraron mediante una celda de carga de 10 Ton. En la Figura 2 se muestra un esquema con la identificación de las distintas partes del tubo y la instrumentación durante el ensayo de compresión diametral.



*Figura 2: Esquema con la identificación de las distintas partes del tubo e instrumentación para el ensayo.*

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la Figura 3 se observan las cargas de rotura promedio (PR) de cada grupo de tubos. Además, una línea de color rojo en 45 kN demarca la carga mínima de rotura (PR-CII) que deben alcanzar los tubos para la Clase resistente II según la norma IRAM 11503<sup>21</sup>.

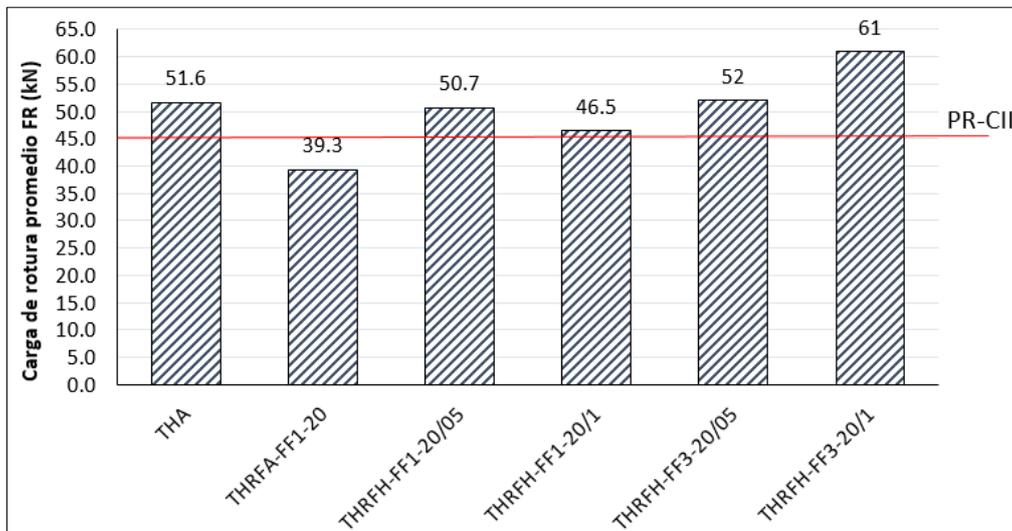


Figura 3: Carga de rotura promedio PR (kN) - Grupo de tubos.

Los THA alcanzaron y superaron la PR-CII en un porcentaje aproximado del 15 %. Los THRFH también superaron dicha carga, con ambas dosis de fibras adoptadas y con los dos tipos diferentes de FA usados. Por el contrario, los THRFA no alcanzaron la PR-CII, quedando por debajo de la misma en un porcentaje de 13 % aproximadamente.

En la Figura 3, se observa que la capacidad de carga aumentó significativamente cuando se combinaron FPP y FA como refuerzo del tubo. Esta sinergia positiva entre fibras ha sido reportada anteriormente por otros investigadores<sup>15</sup>. Las fibras generan una red tridimensional que impide que el hormigón segregue y fluya, otorgándole a la mezcla una mayor cohesión que mejoraría la respuesta del compuesto una vez endurecido. Además, Singh et al (2013)<sup>24</sup> demostró que la adición de un mayor volumen de fibras en el hormigón provoca problemas de trabajabilidad, sin embargo, este perjuicio es mayor cuando se adicionan mayores volúmenes de FA que de FPP. Por lo tanto, al combinar las FA con las FPP, se evita incrementar el contenido de FA en el refuerzo y así obtener una mejor colocación del hormigón, lo que se traduciría en una mejora en la respuesta estructural del tubo durante el ensayo.

Otro fenómeno que se observa en la Figura 3, es que la utilización FA con mayor RA en los THRFH genera un aumento de la resistencia a la rotura. La presencia de la FPP potenciaría el rendimiento de las FA de mayor RA, que de por sí es superior al de las fibras con menor RA según lo reportado por otros investigadores<sup>25</sup>. El grupo THRFH-FF3-20/1,0 alcanzó la mayor carga de rotura y superó la carga mínima de rotura para la Clase III (IRAM 11503<sup>21</sup>) que es de 60 kN.

## MODELO TEÓRICO

### Ecuaciones de diseño para la máxima resistencia a flexión de tubos de hormigón a partir del ECD.

Los momentos generados en tubos sometidos al ECD (ver Figura 2) están

relacionados con el peso propio del tubo ( $W_p$ ) y la carga total alcanzada durante dicho ensayo ( $W_t$ ). Según Peyvandi et. al. (2014)<sup>19</sup>, la relación entre cargas y momentos puede expresarse de la siguiente manera:

$$M = (C_{m1}W_p + C_{m2}W_t)(D_i + h) \frac{1}{2} \quad (1)$$

Donde  $D_i$  es el diámetro interno de la tubería,  $h$  es el espesor de la pared del tubo y los coeficientes  $C_{m1}$  y  $C_{m2}$  son constantes que se introducen seguidamente.

Durante el ECD, los momentos que se generan en los tubos circulares varían como se muestra en los diagramas de la Figura 4. Las condiciones críticas para el diseño de tubos a flexión ocurren en las zonas llamadas Clave y Contraclave (ver Figura 2).

La carga del ensayo genera un momento ligeramente menor en la contraclave que en la clave. Sin embargo, debido a que sucede lo contrario con el momento generado por el peso propio del tubo, la combinación de momentos hace que éstos sean prácticamente iguales en la clave y en la contraclave.

En la Contraclave, los coeficientes  $C_{m1}$  y  $C_{m2}$  para calcular el momento en el rango elástico son:  $C_{m1} = 0,75C_{m2}$ ;  $C_{m2} = 0,07$ <sup>19</sup>. Por lo tanto, la ecuación de momento se puede expresar de la siguiente manera:

$$M = \frac{0.14}{40} (0.75W_p + W_t)(D_i + h) \quad (2)$$

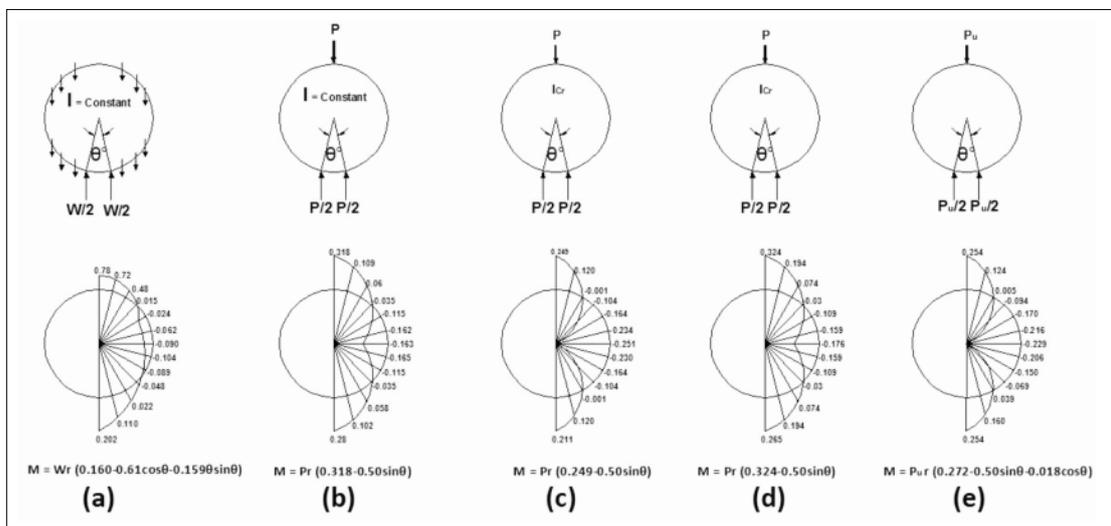
Definiendo DL como  $(W_t / D_i) \times 12$ , y reemplazando en la ecuación 2, nos queda,

$$M = 0.14 \left( \frac{9W_p}{D_i} + DL \right) \frac{D_i}{480} (D_i + h) \quad (3)$$

La ecuación (3) se puede expresar en la siguiente forma simplificada,

$$M = 2.917 \times 10^{-3} \left( \frac{9W_p}{D_i} + DL \right) D_i (D_i + h) \quad (4)$$

La ecuación (4) se puede utilizar para calcular la carga última de tubos de hormigón en el ECD.



*Figura 4: Distribuciones de momento para la carga del ensayo de tres aristas: (a) peso propio del tubo; (b) sin fisuras; (c) agrietamiento en primera etapa; (d) agrietamiento de segunda etapa; y (e) capacidad de flexión última.<sup>19</sup>*

### **Ecuaciones de diseño cuando domina el arrancamiento de las fibras**

Las fibras pueden presentar dos tipos de comportamiento de falla: arrancamiento o rotura. Luego del ensayo de los tubos, se realizó una inspección visual en las grietas de los THRFH, determinándose que las fibras de acero fallaron por arrancamiento de la matriz mientras que las fibras de polipropileno sufrieron una falla por rotura (ver figura 5). En general, la tendencia a la extracción de la fibra aumenta con el aumento del diámetro de la fibra y la disminución de su relación de aspecto, además, se relaciona con su resistencia a la tracción y su adherencia o anclaje a la matriz del hormigón.



*Figura 5: Imagen ampliada de la grieta del tubo luego de la rotura. Se observan fibras de acero arrancadas y fibras de polipropileno cortadas.*

Cuando domina la extracción de fibra, se asume que la distribución de tensiones de tracción del hormigón reforzado con fibras es uniforme. A partir de esta suposición, junto con las consideraciones de equilibrio de la Figura 6, se deduce la siguiente ecuación para la resistencia a la flexión nominal de secciones del THRF<sup>19</sup>

$$M_n = \left[ A_s f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) \right] + \left[ \sigma_t (d - c) b \left( c - \frac{a}{2} + \frac{(d - c)}{2} \right) \right] \quad (5)$$

Donde  $A_s = 0$  debido a que el modelo evalúa solamente los tubos con refuerzos de fibras. Entonces, la ecuación 5 nos queda:

$$M_n = \left[ \sigma_t (d - c) b \left( c - \frac{a}{2} + \frac{(d - c)}{2} \right) \right] \quad (6)$$

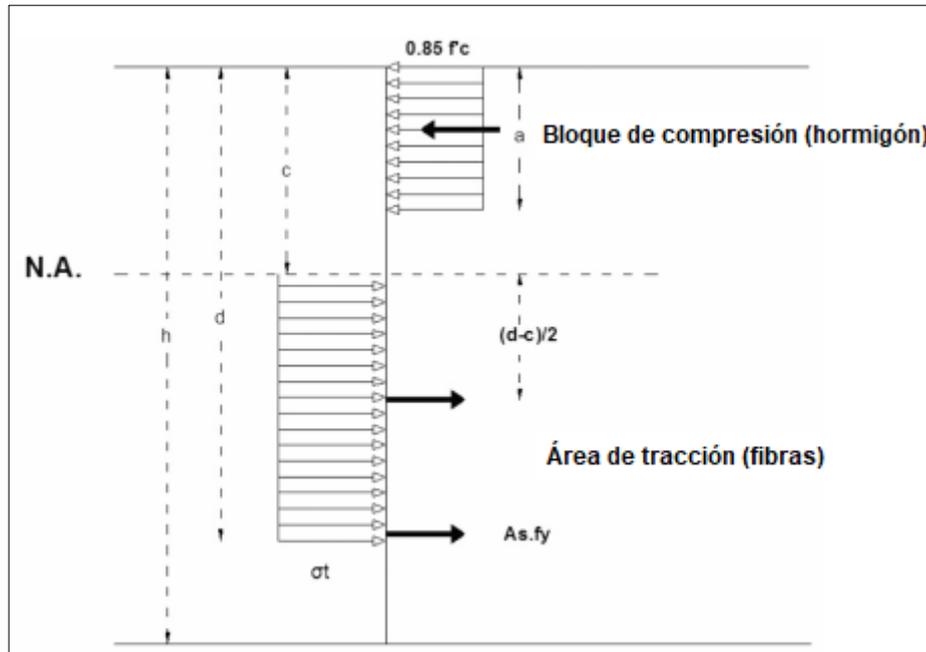


Figura 6: Distribución de la tensión de flexión en la condición final en una sección de hormigón reforzado con fibra con falla por arrancamiento.<sup>19</sup>

La altura del bloque de compresión  $a$ , se calcula utilizando la expresión planteada por Ezeldin (1991)<sup>26</sup>,

$$a = \frac{\left(\frac{A_s f_y}{b}\right) + \sigma_t h}{0.85 f'_c + \frac{\sigma_t}{\beta_1}} \quad (7)$$

La resistencia a la tracción del hormigón reforzado con fibras es igual a  $\sigma_t = N F$ , donde  $N$  es el número de fibras por unidad de área y  $F$  es la fuerza máxima de tracción de una sola fibra. El valor de  $F$  para las fibras de acero se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$F = \left(\frac{\tau_f \pi d_f l_f}{4}\right) \quad (8)$$

Sin embargo, Deng et al. (2018)<sup>25</sup> demostraron que la presencia de las fibras sintéticas en la matriz de hormigón genera efectos positivos en las propiedades de unión interfase de la fibra de acero. A este efecto lo modelizan como una presión superficial que actúa sobre las fibras de acero aumentando la resistencia al arrancamiento de las mismas. Entonces, la ecuación 8 para la fuerza de arrancamiento se puede expresar de la siguiente manera, teniendo en cuenta la sinergia positiva entre las fibras combinadas:

$$F = \left(\frac{\tau_f \pi d_f l_f}{4} + \frac{\mu(1.22 V_{sf} + 28.74 V_{ppf}) \pi d_f l_f}{4}\right) \quad (9)$$

Simplificando,



$$F = \left( \frac{\pi d_f l_f}{4} \right) \left( \tau_f + \mu (1.22 V_{sf} + 28.74 V_{ppf}) \right) \quad (10)$$

$\tau_f$  es la resistencia al corte en el HRF, que para fibras de acero con extremo conformado, como las usadas en este trabajo, Voo y Foster (2003)<sup>27</sup> lo establecen como  $\tau_f = 1.5 \sqrt{f_{cm}}$ ;  $\mu$  es el coeficiente de fricción acero-hormigón cuyo valor puede estimarse igual a 0.5 según Li y Mobasher (1998)<sup>28</sup>;  $V_{sf}$  y  $V_{ppf}$  son las fracciones de volumen (%) de fibras de acero y polipropileno, respectivamente. Entonces,

$$\sigma_t = \left( \frac{0.5 V_f}{\frac{\pi d_f^2}{4}} \right) \left( \frac{\pi d_f l_f}{4} \right) \left( \tau_f + \mu (1.22 V_{sf} + 28.74 V_{ppf}) \right) \quad (11)$$

Simplificando la ecuación anterior nos queda,

$$\sigma_t = \frac{0.5 V_f (\tau_f + \mu (1.22 V_{sf} + 28.74 V_{ppf})) l_f}{d_f} \quad (12)$$

Finalmente, una vez calculadas las variables anteriores, igualando el momento externo (ecuación 4) y el momento nominal (ecuación 6) y luego despejando DL obtenemos la carga total de rotura  $W_t$  del ECD.

## COMPARACIÓN ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTALES Y TEÓRICOS.

En la Tabla 4 se muestra la comparación entre la capacidad de carga de los tubos de HRF obtenida mediante el modelo teórico propuesto y los ensayos experimentales. En dicha tabla, se observa una buena correlación entre ambos tipos de resultados 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 es significativamente mayor ya que el modelo sobreestima la carga 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 fibras. Es decir que, las diferencias mencionadas, se dan por las simplificaciones que se deben adoptar para el cálculo teórico debido a la gran cantidad de variables relacionadas al problema.

A propósito de lo expresado anteriormente, si comparamos el grupo THRFH-FF1-20/0,5 con los grupos THRFH-FF1-20/1,0 y THRFH-FF1-20/0,5, es razonable que el modelo indique que la capacidad de carga del tubo es mayor, mientras mayor sea el volumen de fibras y/o la RA de las fibras utilizadas, aunque en las pruebas experimentales esto no haya ocurrido debido a los fenómenos ya mencionados.

Denominación	PR TEÓRICA	PR EXP.	Diferencia
	kN	kN	%
THRFA-FF1-20/0	44,83	39,3	14,0

THRFH-FF1-20/0,5	48.51	50,7	-4,3
THRFH-FF1-20/1,0	51,53	46,5	10,8
THRFH-FF3-20/0,5	60.21	52	15,8
THRFH-FF3-20/1,0	63,93	61	4,8

*Tabla 4: comparación entre resultados de carga de rotura estimados con el modelo teórico y los obtenidos experimentalmente.*

## CONCLUSIONES

En este trabajo se presentan los resultados de ensayos de THRFH de 600 mm de diámetro. Su capacidad de carga es comparada con la de THRFA y THA, elaborados y ensayados en la misma campaña. Adicionalmente, los resultados experimentales se utilizaron para calibrar un modelo teórico para la estimación de la capacidad de carga de los THRFH. A partir de los análisis de los resultados obtenidos, se puede concluir lo siguiente:

- Los THRFH alcanzaron una resistencia equivalente a los THA Clase II. Además, los THRFH con la mayor dosis total de fibras y con fibras de acero de mayor relación de aspecto alcanzaron la carga de rotura para la Clase III de la norma IRAM 11503<sup>21</sup>.
- Los THRFH mostraron una mayor resistencia a la rotura que los THRFA para las dosis de fibras empleadas.
- Con modelo teórico propuesto se obtuvo una aceptable estimación de la capacidad de carga de los THRF, teniendo en cuenta la gran cantidad de variables involucradas.

Teniendo en cuenta los resultados experimentales y teóricos obtenidos, los autores consideran que será necesario realizar nuevos ensayos con el fin de incorporar mayor evidencia experimental y, además, lograr una calibración más acertada del modelo incorporando nuevas variables para el análisis.

## Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Concepción del Uruguay. Además, agradecen la empresa Coinar S.A. de la ciudad de Concordia y a la Facultad Regional Concordia de la UTN por el apoyo técnico.

## Referencias

1. Ercoli N, Villarreal M, Pico L. (2014). Factibilidad técnica y evaluación estructural de tubos prefabricados de hormigón reforzado con fibras de acero. *Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural*.
2. Park, Y., Abolmaali, A., Mohammadagha, M., & Lee, S. (2015). Structural performance of dry-cast rubberized concrete pipes with steel and synthetic fibers. *Construction and Building Materials*, 77, 218-226.



3. Abolmaali, A., Mikhaylova, A., Wilson, A., & Lundy, J. (2012). Performance of steel fiber–reinforced concrete pipes. *Transportation research record*, 2313(1), 168-177.
4. 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.
5. Wilson, A., & Abolmaali, A. (2014). Performance of synthetic fiber-reinforced concrete pipes. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 5(3), 04014002.
6. de Figueiredo, A. D., Aguado, A., Molins, C., & Chama Neto, P. J. (2012). Steel fiber reinforced concrete pipes: part 1: technological analysis of the mechanical behavior. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 5(1), 1-11.
7. EN1916 (2002). *Concrete pipes and fittings, unreinforced, steel fibre and reinforced*. Belgisch Instituut voor normalisatie (BIN).
8. ABNT NBR 8890 (2007). *Tubo de concreto de seção circular, para águas pluviais e esgotos sanitarios*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
9. ASTM C1765-16 (2016). *Standard Specification for Steel Fiber Reinforced Concrete Culvert, Storm Drain, and Sewer Pipe*. ASTM International.
10. ASTM C1818-16 (2016). *Standard Specification for Synthetic Fiber Reinforced Concrete Culvert, Storm Drain and Sewer Pipe*. ASTM International.
11. Pakravan, H., Latifi, M., Jamshidi, M. (2017). Hybrid short fiber reinforcement system in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 142, 280-294.
12. Li, B., Chi, Y., Xu, L., Shi, Y., & Li, C. (2018). Experimental investigation on the flexural behavior of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 191, 80-94.
13. Singh, A. K., Jain, A., & Singh, D. (2013). Evaluation of mechanical properties for polypropylene and steel fibre reinforced concrete. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2(4), 1507-1517.
14. Xu, L., Huang, L., Chi, Y., & Mei, G. (2016). Tensile behavior of steel-polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete. *ACI Materials Journal*, 113(2), 219-229.
15. 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.
16. Banthia, N., Majdzadeh, F., Wu, J., Bindiganavile, V. (2014). Fiber synergy in Hybrid Fiber Reinforced Concrete in flexure and direct shear. *Cement and Concrete Composites*, 48, 91-97.
17. Haktanir, T., Ari, K., Altun, F., & Karahan, O. (2007). A comparative experimental investigation of concrete, reinforced-concrete and steel-fibre concrete pipes under three-edge-bearing test. *Construction and Building Materials*, 21(8), 1702-1708.



18. de la Fuente, A., Escariz, R. C., de Figueiredo, A. D., & Aguado, A. (2013). Design of macro-synthetic fibre reinforced concrete pipes. *Construction and Building Materials*, 43, 523-532.
19. Peyvandi, A., Soroushian, P., & Jahangirnejad, S. (2014). Structural Design Methodologies for Concrete Pipes with Steel and Synthetic Fiber Reinforcement. *ACI Structural Journal*, 111(1).
20. IRAM 1551 (2000). *Hormigón de cemento pórtland. Extracción, preparación y ensayo de testigos de hormigón endurecido*. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales.
21. IRAM 11503 (1986). *Caños de hormigón armado no pretensado. Destinados a la conducción de líquidos sin presión*. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales.
22. Lee, S., Park, Y., & Abolmaali, A. (2019). Investigation of Flexural Toughness for Steel-and-Synthetic-Fiber-Reinforced Concrete Pipes. *Structures*, 19, 203-211.
23. Li, B., Chi, Y., Xu, L., Shi, Y., & Li, C. (2018). Experimental investigation on the flexural behavior of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 191, 80-94.
24. Singh, A. K., Jain, A., & Singh, D. (2013). Evaluation of mechanical properties for polypropylene and steel fibre reinforced concrete. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2(4), 1507-1517.
25. Deng, F., Ding, X., Chi, Y., Xu, L., Wang, L. (2018). The pull-out behavior of straight and hooked-end steel fiber from hybrid fiber reinforced cementitious composite: experimental study and analytical modelling. *Composite Structures*, 206, 693-712.
26. Ezeldin, A. S. (1991). Optimum design of reinforced fiber concrete subjected to bending and geometrical constraints. *Computers & structures*, 41(5), 1095-1100.
27. Voo, J. Y. L., & Foster, S. J. (2003). Variable engagement model for the design of fibre reinforced concrete structures. *Proceedings Advanced Materials for Construction of Bridges, Buildings, and Other Structures III-Engineering Conferences International*, 1-10.
28. Li, C. Y., & Mobasher, B. (1998). Finite element simulations of fiber pullout toughening in fiber reinforced cement based composites. *Advanced Cement Based Materials*, 7(3-4), 123-132.