

Análisis experimental del comportamiento mecánico de tubos de hormigón reforzado con fibras híbridas

Experimental analysis of the mechanical behavior of hybrid fibers reinforced concrete pipes

Federico González^(*), Viviana Rougier^(**)

RESUMEN

El hormigón reforzado con dos o más tipos de fibras se denomina hormigón reforzado con fibras híbridas (HRFH). En este trabajo se evalúa el desempeño mecánico del HRFH, de acero y de polipropileno, en su aplicación en tubos de 600 mm de diámetro. Para ello, se determinan experimentalmente, a través del ensayo de compresión diametral, la capacidad de carga y el modo de falla de tubos de HRFH (THRFH) elaborados con dos dosificaciones distintas de fibras. Los resultados son comparados con los obtenidos del ensayo de tubos de hormigón reforzado con fibras de acero (THRFA), también elaborados con dos dosificaciones distintas de fibras, y tubos de hormigón armado (THA) con armadura tradicional de barras de acero. Los THRFH con las dosis de fibras híbridas utilizadas alcanzaron una resistencia equivalente a los THA y, además, mostraron un modo de falla dúctil, sin desprendimiento de hormigón o aplastamiento diametral luego de la rotura.

Palabras clave: hormigón reforzado; fibras; híbridas; tubos.

ABSTRACT

Concrete reinforced with two or more types of fibers is called hybrid fiber reinforced concrete (HFRC). In this paper, the mechanical performance of HFRC, steel (SF) and polypropylene (PPF), in their application in 600 mm diameter pipes is evaluated. For it, the bearing capacity and failure mode of HRFH (HFRC) pipes, elaborated with two different fiber dosages, are experimentally determined by means of the diametral compression test. The results are compared with those obtained from the test of steel fiber reinforced concrete pipes (SFRC), also elaborated with two different fiber dosages, and reinforced concrete pipes (RCP) with traditional steel bar reinforcement. The HFRC, with the doses of hybrid fibers used, reached a load capacity equivalent to the RCP and, in addition, they showed a ductile failure mode, without concrete detachment or diametral crushing after failure.

Keywords: reinforced concrete; fibers; hybrid; pipes.

(*) Ingeniero Civil. Docente e investigador. Universidad Tecnológica Nacional, Concepción del Uruguay (Argentina).

(**) Ph D. Ing. Civil. Docente e investigador. Universidad Tecnológica Nacional, Concepción del Uruguay (Argentina).

Persona de contacto/Corresponding author: gonzalezf@frcu.utn.edu.ar (Federico González)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0665-9258> (Federico González); <http://orcid.org/0000-0003-2252-4350> (Viviana Rougier)

Cómo citar este artículo/Citation: Federico González, Viviana Rougier (2022). Análisis experimental del comportamiento mecánico de tubos de hormigón reforzado con fibras híbridas. *Informes de la Construcción*, 74(565): e432. <https://doi.org/10.3989/ic.85975>

Copyright: © 2022 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Recibido/Received: 10/11/2020
Aceptado/Accepted: 08/06/2021
Publicado on-line/Published on-line: 09/03/2022

1. INTRODUCCIÓN

El refuerzo de hormigón con fibras cortas, distribuidas aleatoriamente en la matriz cementicia, es una tecnología exitosa capaz de modificar el comportamiento frágil del hormigón simple (HS). La adición de fibras influye directamente en el control de los procesos de fisuración provocando incrementos en la tenacidad, en la capacidad residual y en menor medida en la resistencia a tracción del material compuesto (1). Además, las fibras inciden en los efectos que provoca la contracción del material en las estructuras de hormigón, evitando la aparición de fisuras, minimizando su espesor o generando un cuadro de fisuración múltiple.

La mayoría de los hormigones reforzados con fibras (HRF) se refuerzan con un solo tipo de fibra. Sin embargo, la fisuración del hormigón es un proceso a escalas múltiples y un solo tipo de fibra puede proporcionar refuerzo solamente en un nivel y dentro de un rango limitado de deformaciones (2). Por ello, un refuerzo óptimo se puede obtener al combinar fibras de diferentes materiales, geometría y/o comportamiento mecánico (3, 4). Varios autores han demostrado que el hormigón reforzado con más de un tipo de fibra presenta un comportamiento mecánico superior en comparación con aquel reforzado con una sola clase de fibra o con el hormigón simple (5-7). Las mejoras del material compuesto, con fracciones de volumen altas y bajas de fibras, incluyen aumentos de la resistencia última y de la capacidad de deformación, además de un mayor control en la propagación de las fisuras (8). El hormigón reforzado con dos o más tipos de fibras se denomina Hormigón Reforzado con fibras híbridas (HRFH) (9). Existen diferentes métodos de hibridación que incluyen la combinación de fibras de diferentes longitudes, diámetros, módulos y resistencias a la tracción, pero los dos métodos principales son: híbridos basados en el tamaño de las fibras e híbridos basados en el módulo de las fibras (10). En este trabajo se evaluó la aplicación del método que combina fibras de alto módulo y de bajo módulo, fibras de acero (FA) y de polipropileno (FPP), respectivamente, como refuerzo del hormigón para tubos de drenaje.

En las últimas décadas, los tubos de HRF, con reemplazo parcial o total del refuerzo tradicional de barras de acero (jaula de acero), se han introducido con éxito en el mercado de tuberías para la construcción de alcantarillado (11). En los tubos de hormigón armado (THA), se requiere mano de obra calificada para el corte, doblado y montaje de la armadura formada por barras de acero y se debe disponer del equipamiento adecuado y costoso para realizar dichas tareas (12). Por lo contrario, las fibras se pueden agregar al mezclador como cualquier otro agregado del hormigón, es decir, sin la necesidad de modificaciones significativas en el proceso de elaboración de cualquier planta de premoldeados de hormigón (13). Esta ventaja conduce a beneficios desde el punto de vista técnico y económico (14).

Distintos investigadores han estudiado la incorporación de FA en tubos premoldeados. Abolmaali et al. (15) presentaron los resultados de ensayos de THRFA con diámetros internos que variaron entre 400 mm y 1200 mm. Los autores compararon los modos de falla, la resistencia, rigidez y ancho de fisuras de los THRFA con los THA. Los resultados obtenidos mostraron que los THRFA alcanzaron rangos de resistencia y rigidez comparables a los THA. El 82 % de los THRFA de 600 mm de diámetro interno y el 94 % los THRFA de 900 mm de

diámetro interno excedieron los requisitos para la clase III de la norma ASTM C76 (16). Además, mostraron que dosis de 20, 40 y 65 kg/m³ de FA, podrían considerarse óptimas para el refuerzo de los tubos de diámetro interno igual a 600, 900 y 1200 mm, respectivamente. Mohamed et al. (17) evaluaron el comportamiento mecánico, a través de ensayos a escala real, de THRFA con diámetros internos de 450 mm y 600 mm. Además, elaboraron y ensayaron tubos de hormigón simple (THS) y THA con el fin de comparar el desempeño mecánico de los THRFA. Los resultados obtenidos por los investigadores mostraron que una dosis de fibra de 30 kg/m³ es suficiente para que los THRFA, en los diámetros estudiados, cumplan con los requisitos de resistencia establecidos por la Norma ASTM c76 (16) para la Clase V. Además, observaron que el comportamiento pos pico de los THRFA fue comparable al de los THA.

Otros autores, han evaluado el uso de fibras sintéticas como refuerzo en tubos premoldeados. De la Fuente et al. (18) presentaron los resultados de un programa experimental en el que se fabricaron tubos de hormigón reforzado con fibras sintéticas (THRFS) que se compararon con THS. Los autores demostraron que el uso de fibras sintéticas como único refuerzo es compatible con los sistemas de producción de tubos y, además, los THRFS alcanzaron resistencias comparables a las clases más comunes de la norma EN 1916:2002 (19). Wilson y Abolmaali (20) ensayaron THRFS de diámetros internos comprendidos entre 375 mm y 900 mm, fabricados en tres sitios diferentes, manteniendo el mismo diseño de mezcla de cada planta. Demostraron que las fibras sintéticas pudieron soportar y resistir anchos de fisuras de hasta 25 mm, correspondientes a deformaciones del 10 % del diámetro interno del tubo. Además, observaron que las fibras en las fisuras, se encontraban intactas mostrando una gran resistencia a la rotura y al arrancamiento. Sin embargo, observaron que para cada planta de producción y diámetro de tubo se alcanzó un rango óptimo en el contenido de fibra a partir del cual la resistencia comenzó a bajar. Park et al. (21) propusieron un nuevo tipo de tubo semirrígido de pared delgada (THPD). Por ello, evaluaron la utilización de fibras sintéticas como refuerzo para lograr así una reducción del refuerzo tradicional de barras de acero. Los autores concluyeron que el uso de fibras sintéticas, como complemento del refuerzo tradicional de barras de acero, aumentó la resistencia al corte en los THPD, retrasando la falla y mejorando significativamente la capacidad de carga. Además, observaron que los THPD con reducción del 50 % del refuerzo de barras de acero y la adición de fibras sintéticas, mantuvieron la rigidez a la flexión hasta una deformación diametral del 5 % en los tubos de pequeño diámetro (760 mm, 910 mm y 1370 mm) y del 3 % en los tubos de gran diámetro (1830 mm, 2130 mm y 3050 mm).

Lee et al. (22) evaluaron la absorción de energía, la resistencia posterior al agrietamiento y la tenacidad de THRFA y THRFS. Del análisis de los resultados obtenidos, los autores concluyeron que los THRFA mostraron una mayor capacidad de absorción de energía que los THRFS. Además, observaron que el aumento de las fracciones de volumen de fibras, tanto de acero como sintéticas, no mejoró de manera constante la capacidad de carga de los tubos, mostrando que el porcentaje de fibras más eficiente en este aspecto fue de 0.15 % y 0.20 %. Sin embargo, el aumento en la fracción de volumen de fibras incrementó otras propiedades mecánicas

de los tubos, tales como la tenacidad y la resistencia posterior al agrietamiento.

Actualmente, existen normas técnicas que regulan el uso de HRF para la elaboración de tubos (19, 23-25). Sin embargo, dichas normas contemplan el uso de un solo tipo de fibra como refuerzo, mientras que el efecto de la combinación de fibras en tubos premoldeados ha sido escasamente estudiado (26).

En este trabajo se evalúa el desempeño mecánico del HRFH en su aplicación en tubos de 600 mm de diámetro. Para ello, se determinan experimentalmente, a través del ensayo de compresión diametral, la capacidad de carga y el modo de falla de 8 THRFH elaborados con dos dosificaciones distintas de fibras. Los resultados son comparados con los obtenidos del ensayo de 8 THRF y 4 tubos THA con armadura Clase II según la norma IRAM 11503 (27).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Dosificación del hormigón simple

Los tubos ensayados fueron elaborados en una planta de premoldeados de la región, utilizando una mezcla de hormigón con una consistencia muy seca. Durante la producción, el tubo es desmoldado casi inmediatamente después del llenado, por ello se requiere una mezcla con gran cohesión y baja relación agua-cemento. Las proporciones de dicha mezcla se pueden ver en la Tabla 1 y son las mismas que utiliza la planta para la producción de los tubos que comercializa.

Tabla 1. Dosificación del hormigón en kg/m³.

Agua	Cemento	Arena	Grava
80	300	980	1020

Las proporciones de la tabla anterior (Tabla 1) corresponden a los valores del diseño teórico de la mezcla. Por lo tanto, antes de comenzar la elaboración de los tubos, se determinó la humedad natural de los áridos y se realizaron las correcciones correspondientes al diseño, prestando especial atención al control del contenido de agua de amasado. Se registraron humedades naturales de 2,2% y 3% para los áridos gruesos y finos, respectivamente.

Los agregados utilizados fueron grava de 13,2 mm de tamaño máximo y arena natural con módulo de finura 2,5. El aglomerante utilizado fue Cemento Portland Tipo I/II. Se amasaron un total de 10 pastones (450 l cada uno) y por cada uno de ellos, se moldearon tres probetas cilíndricas de 150 x 300 mm, las cuales fueron ensayadas a compresión simple. La resistencia promedio a compresión de las mismas a los 28 días fue de 32 MPa.

2.2. Fibras utilizadas

Las fibras se agregaron en forma manual y directamente al mezclador antes del agua. La adición de las mismas fue gradual para asegurar una adecuada dispersión en la masa de hormigón. Se usaron como refuerzo macro fibras de acero y polipropileno disponibles en el mercado nacional. En la Figura 1 se muestran las formas de las fibras empleadas.



Figura 1. Fibra de acero (FA) con extremos conformados (izquierda); Fibra rizada de polipropileno (FPP) (derecha).

Las macrofibras sintéticas se elaboran a partir de materiales poliméricos. Este tipo de fibras son químicamente inertes, tienen estabilidad volumétrica, bajo módulo de elasticidad y bajo punto de fusión. Por otra parte, las fibras metálicas se fabrican con alambre de acero de bajo carbono y de alta resistencia a la tracción 1200 MPa. Al contrario de las fibras de polipropileno, las fibras de acero tienen un alto módulo de elasticidad y son susceptibles a la corrosión.

La Tabla 2 resume las propiedades físicas y mecánicas de las fibras consideradas para este estudio.

Tabla 2. Características de las fibras utilizadas.

Material	Longitud (mm)	Diámetro (mm)	Densidad (kg/m ³)	Módulo E (GPa)
Acero	50	1,00	7840	210
Polipropileno	50	0,60	920	6

2.3. Campaña experimental y características de los especímenes

Se elaboraron un total de 20 tubos premoldeados de hormigón con 600 mm de diámetro interno, 75 mm de espesor de pared y 1000 mm de longitud efectiva. Los tubos del tamaño descrito son ampliamente utilizados en la región Mesopotámica de la Argentina para la construcción de alcantarillados de drenaje. Además, las dimensiones adoptadas corresponden a las mínimas establecidas por la norma IRAM 11503 (27) para la clase resistente II. Dicha norma, también indica cargas mínimas de fisuración y de rotura para la clasificación de los tubos según su resistencia. En el caso de los tubos Clase II, las cargas mínimas de fisuración y de rotura son 30 y 45 kN, respectivamente. Este criterio de clasificación por resistencia es equivalente al establecido por la Norma ASTM C76 (16).

En la Tabla 3 se indica la denominación de los tubos, sus características de refuerzo, la cantidad y la nomenclatura adoptada para cada grupo de tubo.

En el presente trabajo se denominan tubos de control a los THA-0/0 que fueron reforzados con la armadura tradicional de barras de acero especificada para la clase II según la norma IRAM 11503 (27). En el sentido longitudinal del tubo se utilizaron 7 barras de 6 mm diámetro y en el sentido transversal una sección de acero de 1,5 cm²/m.

Tabla 3. Cantidad y características de refuerzo de los tubos ensayados.

Denominación	FA (kg/m ³)	PPF (kg/m ³)	Cantidad (Unidades)	Cuantía acero (%)
THA-0/0	----	----	4	2,19
THRFA-20/0	20	0	4	2,50
THRFA-25/0	25	0	4	3,12
THRFH-20/0,5	20	0,5	4	2,50
THRFH-20/1,0	20	1,0	4	2,50

En los THRFA-20/0 y THRFA-25/0 se utilizaron dosis de 20 kg/m³ y 25 kg/m³ de FA, respectivamente, debido a que otros autores han demostrado la eficiencia del refuerzo en estos tenores (17, 22, 26). Por otra parte, en los THRFH se combinó el refuerzo de 20 kg/m³ de FA con la adición de 0,5 kg/m³ y 1,0 kg/m³ de FPP, ya que las fibras sintéticas deben usarse en fracciones de bajo volumen (entre 0.05 % y 0.2 %) para asegurar una distribución uniforme dentro de la masa de hormigón (28).

2.4. Elaboración de los especímenes

Los tubos fueron elaborados en el mismo día para minimizar la influencia de las variables intervinientes en cuanto a materiales y mano de obra. Después de mezclar el hormigón en una máquina mezcladora tipo planetaria, el material fue llevado hasta el molde por medio de una cinta transportadora.

El molde para la fabricación de los tubos estaba compuesto por tres partes: una parte externa, una parte interna y un anillo que sirvió como base para el tubo durante el moldeo. La parte externa era una camisa cilíndrica de acero desmontable y la parte interna, o núcleo vibratorio, era un



Figura 2. A) Moldeo; B) Transporte hasta el lugar de almacenamiento; C) Desmolde; D) Humedecimiento de la superficie de los tubos.

tambor cilíndrico vibrante. Una vez colado y compactado el hormigón dentro del molde, el núcleo vibratorio se izó y el tubo fue transportado al sector de almacenamiento donde permaneció hasta la fecha de ensayo. Además, en dicho sector, se realizaron inspecciones visuales sobre los diferentes especímenes con el fin de identificar posibles problemas de llenado, como oquedades, segregación de las fibras (llamados erizos) o de los áridos. Sin embargo, dichas irregularidades no se observaron ni en los tubos reforzados con fibras ni en los THA. La superficie de los tubos fue mojada periódicamente mediante riego para evitar la pérdida excesiva de humedad.

En la Figura 2 se muestran diferentes etapas del proceso de elaboración de los especímenes, como son el moldeo, transporte hasta el lugar de almacenamiento y desmolde.

2.5. Método de ensayo

Los tubos se ensayaron de acuerdo con el método establecido en la norma argentina IRAM 11503 (27) que es equivalente a la norma ASTM C497 (29). La Figura 3 muestra un esquema del ensayo y la ubicación de los instrumentos de medición.

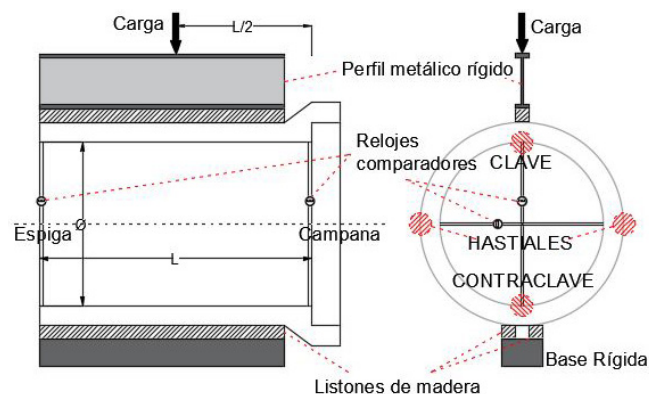


Figura 3. Esquema con la identificación de las distintas partes del tubo e instrumentación para el ensayo.

Este ensayo de compresión diametral es también denominado de “tres aristas” debido a que el tubo es apoyado sobre dos largueros de caucho rígido o madera, separados a una distancia normalizada, y la carga se aplica sobre el eje generatriz superior a través de un perfil metálico rígido que la distribuye uniformemente. Se registraron en la espiga y campana de los especímenes, las deformaciones diametrales verticales y horizontales. Además, se determinaron para cada tubo, la carga de rotura y la carga de fisuración. Esta última es definida según la norma IRAM 11503 (27) como aquella carga que produce una fisura con un espesor mínimo de 0,3 mm y una longitud de 300 mm en la superficie del tubo.

3. RESULTADOS

3.1. Efecto de las dosis de fibra en la capacidad de carga de los tubos

En la Figura 4 se presentan el promedio de las cargas de fisuración (PC) y de rotura (PR) alcanzadas por cada grupo de

tubos. Además, con dos líneas punteadas de color rojo en 30 kN y 45 kN se marcan las cargas mínimas de fisuración (PC-CII) y de rotura (PR-CII), respectivamente, establecidas por la norma IRAM 11503 (27). En dicha figura, se observa que los grupos de THRFA-20/0 y THRFA-25/0 no alcanzaron, en promedio, la PR-CII. Por otra parte, los tubos de control THA-0/0, los THRFH-20/0,5 y los THRFH-20/1,0 igualaron o superaron la PR-CII. En cuanto a la PC-CII solo fue superada por los grupos de THA-0/0 y THRFH-20/0,5. Por lo tanto, estos dos grupos de tubos cumplirían con los requisitos de resistencia para ser clasificados como Clase II de acuerdo al criterio de la norma.

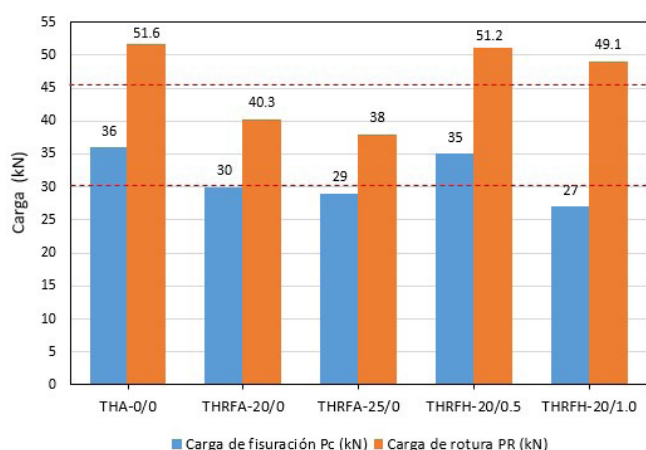


Figura 4. Carga de rotura promedio (PR) - Grupos de tubos.

Al comparar los THRFA-20/0 y los THRFH-20/0,5 en la Figura 4, se observa que la hibridación a través de la adición de 0,5 kg/m³ de FPP produjo un aumento en la capacidad de carga de los tubos, del orden del 27 %. La adición de FPP en la matriz de hormigón aumenta la energía de arrancamiento (pull-out) de las FA con extremo conformado según lo reportado por otros autores (30, 31). Este efecto genera un rendimiento más efectivo de las FA en el control de la fisuración lo que redundaría en la mejora de la respuesta estructural del tubo. Esta sinergia positiva entre las fibras de refuerzo, también ha sido observada anteriormente por otros investigadores (32, 33).

Al comparar los THRFH-20/0,5 y los THRFH-20/1,0, se observa que la adición de una dosis mayor de FPP no generó un aumento de la capacidad de carga, sino por el contrario, produjo una leve disminución de la misma, aunque en un porcentaje de 4,2 % que se podría considerar insignificante. En general, las fibras forman una estructura de red en el hormigón que impide que la mezcla segregue y fluya (34). Por ello, cuando se utilizó el volumen más bajo de fibras, la mezcla alcanzó una mayor cohesión que podría haber favorecido la compactación. Sin embargo, al incrementar el volumen de fibras de 0,30 % (THRFH-20/0,5) a 0,35 % (THRFH-20/1,0), también aumentó la viscosidad de la mezcla, lo que podría haber generado problemas en la compactación de los THRFH-20/1,0. Además, la observación anterior explicaría la razón por la cual los THRFA-25/0, con un volumen de 0,35 %, alcanzaron la menor PR registrada durante la campaña experimental. Esta observación, respecto al volumen de fibras, coincide con la realizada por otros inves-

tigadores que determinaron que, en sistemas de refuerzo híbridos, las FPP deben agregarse en bajos volúmenes para asegurar la adecuada dispersión de las fibras y la trabajabilidad de la mezcla (35).

En la tabla 4 se muestran los valores del coeficiente de variación porcentual (COV). El COV indica la variación de los resultados de la PR de cada grupo de tubos respecto de la PR alcanzada por los tubos de hormigón reforzados con armadura tradicional de barras de acero (grupo THA-0/0). Dicho coeficiente se calcula como se indica en la fórmula [1]:

$$[1] \quad COV = (PR(i) - PR(THA)) * 100 / PR(THA)$$

Donde PR(THA) es la PR del grupo de control THA-0/0 y PR(i) corresponde a la PR del grupo de tubos a comparar.

Tabla 4. COV calculado para los distintos grupos de tubos.

Denominación	FA (kg/m ³)	PPF (kg/m ³)	PR (kN)	COV (%)
THA-0/0	----	----	51,6	0
THRFA-20/0	20	0	40,3	-21,6
THRFA-25/0	25	0	38,0	-26,4
THRFH-20/0,5	20	0,5	51,2	-0,8
THRFH-20/1,0	20	1,0	49,1	-4,8

El mayor coeficiente porcentual de variación (COV) respecto a los THA-0/0, se observó para los THRFA-25/0 alcanzando una PR inferior en 26 %, seguido por el grupo de THRFA-20/0, también inferior en 21,8%. Ferrado et al. (36) ensayaron THRFA de idénticas características, elaborados con los mismos medios de producción, utilizando las mismas dosificaciones de FA, pero con una mezcla de hormigón de diferente diseño teórico y obtuvieron resultados de resistencia más elevados. Esto indicaría que una variación en el diseño de la mezcla podría modificar significativamente el rendimiento de las FA mejorando la capacidad de carga.

En cuanto a los THRFH-20/0,5 y THRFH-20/1,0 tuvieron un COV de 0,8 % y 4,8 %, respectivamente, lo que muestra que ambos grupos alcanzaron una capacidad de carga equivalente a los THA-0/0.

3.2. Modo de falla y patrón de fisuración

En todas las muestras durante el ensayo aparecieron fisuras en la clave, en la contraclave (eje y-y, Figura 5) y en los hastiales (eje x-x, Figura 5), que muestran un mecanismo de falla por flexión. Este mecanismo de falla fue observado por otros investigadores (17, 18, 20-22) y podría considerarse una falla típica en tubos ensayados según el método de tres aristas.

La primera grieta siempre se produjo en la contraclave o en la clave de la espiga y su desarrollo fue hacia la campana, luego aparecieron fisuras secundarias en los hastiales, como se observa en la Figura 6, donde se muestra el patrón de grietas longitudinales.



Figura 5. Patrón de fisuración en la sección transversal del tubo.



Figura 6. Patrón de fisuración Longitudinal del tubo.

Se observó que todos los tubos de hormigón reforzado con fibras ensayados mantuvieron el monolitismo después de la rotura, es decir, no hubo desprendimientos de hormigón o aplastamiento diametral. Por el contrario, en los THA se observaron desprendimientos de hormigón, incluso antes de alcanzar la carga máxima.

Al finalizar el ensayo, se observó que el ancho promedio de fisuras longitudinales en los hastiales de los tubos reforzados con fibras varió entre 6 mm y 15 mm. Mediante un examen visual se determinó que existieron dos mecanismos de falla en las fibras, las FA fallaron por arrancamiento con rectificación del extremo conformado y las FPP fallaron por rotura. En la Figura 6, además, se muestra el patrón general de los mecanismos de falla de las fibras utilizadas. También se puede observar que las fibras se orientaron preferentemente en la dirección tangencial al diámetro del tubo, es decir, siguiendo la trayectoria de las tensiones de tracción. Por las características del ensayo y la distribución de tensiones durante

el mismo, esta orientación contribuye a mejorar la eficiencia de las fibras, logrando aumentar la capacidad resistente y la ductilidad de los tubos.

En la Figura 7 se presentan las curvas carga-deformación diametral (eje y-y, Figura 5), medidas hasta 35 kN. Se adoptó este límite de carga para la medición de las deformaciones debido a que los instrumentos de medición fueron retirados para evitar su rotura.

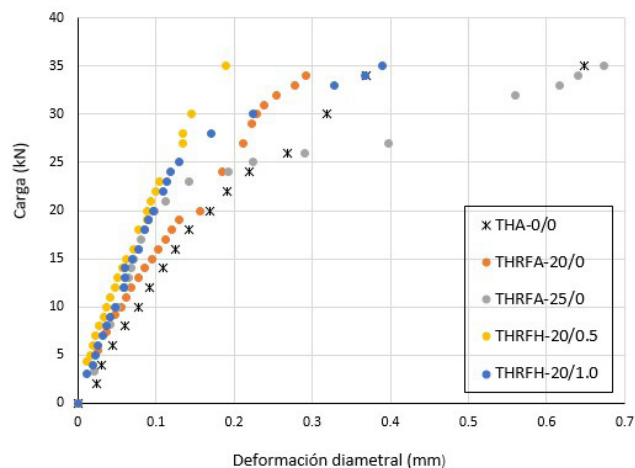


Figura 7. Curva carga-deformación diametral promedio de los distintos grupos de tubos.

En dicha figura se observa que la rigidez inicial de los THRFH fue similar hasta una carga aproximada de 30 kN para las dos dosificaciones utilizadas. Luego del paso de carga mencionado, en los THRFH-20/1,0 la matriz se fisura y se produce un cambio en la pendiente en la curva, mientras que en los THRFH-20/0,5 no se observa una variación en el comportamiento de misma, debido a que la carga de fisuración adoptado fue igual al límite de medición adoptado de 35 kN. Por otra parte, se observa similitud en la pendiente inicial de las curvas de los THRFA-20/0 y de los THA-0/0. Sin embargo, los THA alcanzan una carga de fisuración mayor (35 kN), pero la fisuración va acompañada de un aumento abrupto de la deformación. Este fenómeno solo se observó en los THA debido al proceso de fabricación, ya que la jaula de acero de refuerzo se debe colocar entre el 35 % y el 50 % del espesor de la pared del tubo, medida desde la cara interna, según lo establece la norma IRAM 11503 (27) y por ello, el refuerzo se activa a niveles altos de fisuración y desplazamiento.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se evaluó el desempeño mecánico del HRFH, de acero (FA) y de polipropileno (FPP), en su aplicación en tubos de 600 mm de diámetro. Para ello, se determinó experimentalmente, a través del ensayo de compresión diametral de tres aristas, la capacidad de carga y el modo de falla de 8 THRFH, 8 THRFA y 4 THA. Aun cuando es necesaria la ejecución de un mayor número de ensayos, del análisis y comparación de los resultados obtenidos se puede decir lo siguiente:

Todos los THRFH alcanzaron y superaron la carga de rotura mínima para la Clase II según IRAM 11503 (27). Sin embargo, solamente los THA y los THRFH con la menor dosis de FPP alcanzaron los requisitos de resistencia mínima de fisuración y rotura establecidos por dicha norma.

La combinación de FA y FPP, en las dosis utilizadas, produjo un aumento de la capacidad de carga de los tubos, respecto de los reforzados solamente con FA.

El incremento de la dosis de FPP, de 0,5 kg/m³ a 1,0 kg/m³, en el refuerzo híbrido no generó una variación significativa en la capacidad de carga de los THRFH, solo una reducción de la misma en un 4 % aproximadamente.

Los THRFH mantuvieron el monolitismo luego de la rotura, sin desprendimiento de hormigón o aplastamiento diametral y mostrando una rotura dúctil.

En virtud de los resultados obtenidos, se prevé como trabajo a futuro, la realización de una nueva campaña experimental para obtener mayor evidencia experimental a través del ensayo de nuevos especímenes.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero de la Universidad Tecnológica Nacional que posibilitaron el desarrollo del presente trabajo

6. REFERENCIAS

- (1) Zerbino, R.L. (2013). Uso de macrofibras sintéticas en hormigón. *Hormigonar*, 31, 12-18.
- (2) 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, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.202>.
- (3) 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.
- (4) Prathipati, S. T., Koniki, S., Rao, C. B. K., & Kasagani, H. (2021). Assessment of fiber distribution characteristics in the hybrid fiber reinforced concrete-An experimental study. *Materials Today: Proceedings*, 38(5), 2541-2548, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.556>.
- (5) Guo, H., Jiang, L., Tao, J., Chen, Y., Zheng, Z., & Jia, B. (2021). Influence of a hybrid combination of steel and polypropylene fibers on concrete toughness. *Construction and Building Materials*, 275, 122132, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122132>.
- (6) Caggiano, A., Gambarelli, S., Martinelli, E., Nisticò, N., & Pepe, M. (2016). Experimental characterization of the post-cracking response in hybrid steel/polypropylene fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 125, 1035-1043, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.068>.
- (7) Yao, W., Li, J., & Wu, K. (2003). Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction. *Cement and concrete research*, 33(1), 27-30, doi: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00913-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00913-4).
- (8) Singh, N. K., & Rai, B. (2020). Assessment of synergetic effect on microscopic and mechanical properties of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete. *Structural Concrete*, 1-19, doi: <https://doi.org/10.1002/suco.201900166>.
- (9) Pakravan, H. R., Latifi, M., & Jamshidi, M. (2017). Hybrid short fiber reinforcement system in concrete: A review. *Construction and building materials*, 142, 280-294, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.059>.
- (10) Singh, N.K., & Rai, B. (2019). A review of fiber synergy in hybrid fiber reinforced concrete. *Journal of Applied Engineering Sciences*, 8 (2), 41-50, doi: <https://doi.org/10.2478/jaes-2018-0017>.
- (11) Al Rikabi, F.T., Sargand, S.M., Kurdziel, J., & Khoury, I. (2020). Performance of Thin-Wall Synthetic Fiber-Reinforced Concrete Pipes under Short and Long-Term Loading. *Journal of Testing and Evaluation*, 48(5), 3713-3733. doi: <https://doi.org/10.1520/JTE20180369>
- (12) Peyvandi, A., Soroushian, P., & Jahangirnejad, S. (2014). Structural Design Methodologies for Concrete Pipes with Steel and Synthetic Fiber Reinforcement. *ACI Structural Journal*, 111(1). DOI:10.14359/51686432
- (13) De la Fuente, A., de Figueiredo, A. D., Aguado, A., Molins, C., & Neto, P. J. C. (2011). Experimentation and numerical simulation of steel fibre reinforced concrete pipes. *Materiales de Construcción*, 61(302), 275-288, doi: <https://doi.org/10.3989/mc.2010.62810>.
- (14) 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, doi: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952012000100002>.
- (15) Abolmaali, A., Mikhaylova, A., Wilson, A., & Lundy, J. (2012). Performance of Steel Fiber-Reinforced Concrete Pipes. *Transportation research record*, 2313(1), 168-177, doi: <https://doi.org/10.3141/2313-18>.
- (16) ASTM C76-19b (2019). *Standard Specification for Reinforced Concrete Culvert, Storm Drain, and Sewer Pipe*. ASTM International. DOI: 10.1520/C0076-20
- (17) 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, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.11.033>.
- (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, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.036>.
- (19) EN 1916:2002 (2008). *Concrete pipes and fittings, unreinforced, steel fibre and reinforced*. European Committee for Standardization.
- (20) Wilson, A., & Abolmaali, A. (2014). Performance of synthetic fiber-reinforced concrete pipes. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 5(3), 04014002, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000166](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000166).

- (21) Park, Y., Abolmaali, A., Beakley, J., & Attiogbe, E. (2015). Thin-walled flexible concrete pipes with synthetic fibers and reduced traditional steel cage. *Engineering Structures*, 100, 731-741, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.06.049>.
- (22) Lee, S., Park, Y., & Abolmaali, A. (2019). Investigation of Flexural Toughness for Steel and Synthetic Fiber Reinforced Concrete Pipes. *Structures*, 19, 203-211, doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.12.010>.
- (23) ABNT NBR 8890 (2007). *Tubo de concreto de seção circular, para águas pluviais e esgotos sanitarios*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- (24) ASTM C1765-16 (2016). *Standard Specification for Steel Fiber Reinforced Concrete Culvert, Storm Drain, and Sewer Pipe*. ASTM International. DOI: 10.1520/C1765-19
- (25) ASTM C1818-16 (2016). *Standard Specification for Synthetic Fiber Reinforced Concrete Culvert, Storm Drain and Sewer Pipe*. ASTM International. DOI: 10.1520/C1818-19
- (26) 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, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.061>.
- (27) IRAM 11503 (1986). *Caños de hormigón armado no pretensado. Destinados a la conducción de líquidos sin presión*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- (28) Chi, Y., Xu, L., & Zhang, Y. (2014). Experimental study on hybrid fiber-reinforced concrete subjected to uniaxial compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(2): 211-218, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000764](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000764).
- (29) ASTM C497-19a (2019). *Standard Test Methods for Concrete Pipe, Concrete Box Sections, Manhole Sections, or Tile*. ASTM International. DOI: 10.1520/C0497M-20A
- (30) 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, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.08.066>.
- (31) Christ, R., Pacheco, F., Ehrenbring, H., Quinino, U., Mancio, M., Muñoz, Y., & Tutikian, B. (2019). Study of mechanical behavior of ultra-high performance concrete (UHPC) reinforced with hybrid fibers and with reduced cement consumption. *Revista Ingeniería de Construcción*, 34(2), 159-168, doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732019000200159>.
- (32) Bantia N, Majdzadeh F, Wu J, Bindiganavile V. (2014). Fiber synergy in hybrid fiber reinforced concrete (HyFRC) in flexure and direct shear. *Cement and Concrete Composite*, 48, 91-97, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.10.018>.
- (33) Hsie, M., Tu, C., Song P. (2008). Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete. *Materials Science and Engineering*, 494(1-2), 153-157, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.05.037>.
- (34) 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, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120561>.
- (35) Akcay, B., & Tasdemir, M.A. (2012). Mechanical behaviour and fibre dispersion of hybrid steel fibre reinforced self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 28(1), 287-293, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.044>.
- (36) Ferrado, F. L., Escalante, M. R., & Rougier, V. C. (2018). Simulation of the Three Edge Bearing Test: 3D Model for the Study of the Strength Capacity of SFRC Pipes. *Mecánica Computacional*, 36(6), 195-204.