

Evaluación tecnológica y estructural de tubos prefabricados de hormigón con fibras de acero

Norma Luján Ercoli, Leonel Osvaldo Pico y Marcos M. Villarreal

Resumen

Este trabajo muestra estudios experimentales y numéricos sobre tubos de 600 mm de diámetro de hormigón reforzado con fibras de acero, HRFA, con dosis de fibras de 25 y 30 kg/m³. La sustitución de armadura tradicional por fibras tiene ventajas técnicas y económicas, pues modifica el comportamiento material y la respuesta estructural. Los tubos se ensayaron mediante compresión diametral. Se observó que las fibras controlan la fisuración y aumentan la ductilidad, estanqueidad y durabilidad en servicio. Los resultados confirman que el HRFA es viable y sustentable para fabricación de tubos de hormigón, potenciando su uso en la industria del prefabricado.

Palabras claves: tubos de hormigón, fibras de acero, prefabricado, comportamiento estructural

Abstract

This paper presents experimental and numerical studies on steel fiber concrete pipes of 600 mm diameter, SFRC, with dosages of fibers of 25 and 30 kg/m³. The replacement of traditional reinforcement by fibers has technical and economic advantages and it modifies the material behavior and structural response. Pipes were tested by diametral compression. Fibers control the cracking and they increase ductility, tightness and durability in service. The results confirm that the SFRC is viable and sustainable for manufacturing concrete pipes, upgrade their use in precast industry.

Keywords: concrete pipes, steel fibers, precast, structural performance.

Ingenieros Civiles – Grupo de investigación “Teoría y Modelos para Análisis Estructural”, Facultad de Ingeniería, UNCPBA.

nercoli@fio.unicen.edu.ar, lpico@fio.unicen.edu.ar

Introducción

La industria del prefabricado presenta variedad de productos en constante expansión porque se plantea como una solución sustentable para el desarrollo de productos en serie y con calidad asegurada para obras civiles. Ejemplo de ello es la fabricación de tubos de hormigón armado destinados principalmente a conducir aguas cloacales, aguas pluviales y aguas superficiales en obras de infraestructura civil. En el diseño de los tubos de hormigón, la tendencia actual es reemplazar la armadura tradicional de barras de acero por fibras de acero, conformándose un nuevo material denominado Hormigón Reforzado con Fibras de Acero (HRFA). La adición de fibras de acero conduce a ventajas tanto técnicas como económicas. Recientes investigaciones demuestran que la incorporación de dosis adecuadas de fibras de acero modifica tanto el comportamiento a nivel material como la respuesta estructural, [1-3]. Entre los factores principales que controlan el desempeño del material compuesto hay que mencionar las propiedades físicas de las fibras y de la matriz y la adherencia entre ellas. El uso de fibras incrementa la capacidad de absorción de energía permitiendo un comportamiento más dúctil hasta la carga última. Esto se traduce desde el punto de vista estructural en que la presencia de fibras retarda

y reduce el proceso de fisuración en un elemento de hormigón, lo cual es de importancia en la evaluación del análisis al límite o modo de falla de los elementos. Esto es de interés para aquellas aplicaciones donde el diseñador debe contemplar los aspectos de durabilidad y seguridad durante la vida útil de las estructuras para evitar colapsos frágiles mediante un adecuado incremento de ductilidad, tenacidad y control de fisuración. En ese sentido, se destacan los trabajos realizados en el LEMIT y sus contribuciones para la difusión en el país del HRFA [4-6]. Asimismo, la combinación de armadura más fibras conduce a una sinergia positiva en la respuesta estructural. En la Facultad de Ingeniería de Olavarría existen antecedentes de utilización del HRFA en vigas de hormigón armado como sustitución de armadura de estribos [7,8]. El HRFA es de práctica usual en varios países europeos y en EE.UU, y es una innovación aplicable a nuevos productos y usos en la ingeniería civil. Particularmente, se destaca su empleo en la industria del prefabricado. El uso de fibras de acero para refuerzo de tubos de hormigón se inició hace aproximadamente dos décadas, y su introducción en el mercado es progresiva, acrecentándose a medida que las contribuciones e investigaciones van sumando ventajas a su uso, las cuales se detallan a continuación [1-2]:

- La eliminación total de la armadura convencional de barras de acero externa en tuberías de gran diámetro.

- El ahorro de estas cuantías de armadura de barras de acero repercute directamente en los esfuerzos destinados a la manipulación y montaje de las jaulas de armado, disminuyendo tiempos, personal y recursos económicos involucrados en este proceso.

- Se evitan los problemas asociados al movimiento de las jaulas de armado, al cumplimiento de separaciones y a los recubrimientos mínimos exigidos en los códigos.

- Se genera una malla homogénea que inicia su colaboración en la tarea resistente desde la fisuración de la matriz y que se extiende hasta cargas avanzadas.

- Los sistemas de giro-compresión y giro-vibración empleados para la fabricación de tubos no presentan problemas técnicos relacionados

con la factibilidad de producción con HRFA.

- Debido a la naturaleza de los esfuerzos que se generan durante el proceso de vibrado, compactación y al efecto pared causado por los contornos del molde, las fibras tienden a posicionarse paralelas al flujo de tensiones normales que aparecen en servicio. Esto aumenta la eficiencia de la fibra incrementándose la capacidad resistente y la ductilidad de la pieza.

- El reparto homogéneo de fibras impide la aparición de fisuras superficiales durante el proceso de fraguado y favorece el proceso de autoprotección por hidratación de las partículas del cemento. Todo ello mejora las propiedades de estanqueidad, de durabilidad y de resistencia a la fatiga.

En este trabajo se muestran los resultados experimentales de estudios realizados mediante un convenio con una empresa de prefabricados de Olavarría. Se realizaron tubos de 0,60 m de diámetro con cuantías de fibras de 25 y 30 kg/m³ de hormigón, con y sin encastre, según Figura 1. Se presentan resultados sobre la tecnología del proceso de fabricación y sobre el desempeño estructural, ensayos instrumentados y realizados en el Laboratorio de Estructuras de la FIO, a través del ensayo de compresión diametral. Los resultados obtenidos confirman que la sustitución de armadura convencional por fibras es una solución viable para la realización de tubos de hormigón.



Figura 1. a) Tubos nervurados con encastre; b) tubos lisos sin encastre.

Contexto normativo para el diseño de tubos de hormigón

Varios códigos internacionales contemplan el uso de HRFA, estableciendo especificaciones de la tecnología del material, de usos y de bases para su diseño resistente. En Argentina aún no se ha incorporado el HRFA al Reglamento de Estructuras de Hormigón, CIRSOC 201/05 [9], que

tiene como base filosófica al Código ACI 318, cuya versión 2008 [10] lo incorpora con especificaciones tanto desde el punto de vista material como de las prestaciones estructurales. Al respecto, el American Concrete Institute define al Hormigón Reforzado con Fibras (HRF) como "... un hormigón realizado con cementos hidráulicos que contiene agregado fino o fino y grueso y fibras discontinuas. Las mallas continuas o barras largas quedan excluidas de la definición" [11]. En Europa la Norma UNE-EN 1916 [12] regula los tubos de hormigón en masa o simples (THS), los tubos de hormigón armado (THA) y los tubos de hormigón con fibras (THF), en base a las normas americanas ASTM-C14 y ASTM-C76 para THS y THA, respectivamente [13,14] Específicamente, en las normativas nacionales europeas se fijan las cuantías de armadura [15]. En Brasil existe una norma integral que considera las tres variantes de tubos mencionados [16]. Tanto la normativa de Europa como la de Brasil no sugieren cuantías de fibras para alcanzar las clases resistentes. Solo indican valores de carga de fisuración y de resistencia y no consideran la situación mixta de fibras y armadura. En Argentina las normas IRAM 11503 e IRAM 11513 [17,18] regulan los tubos de THA y THS respectivamente. En la Tabla 1 se resume el contexto normativo vigente.

Tabla 1. Estado actual de normativas de tubos de hormigón.

| País | Normativa | Regulación | | |
|-----------|----------------|------------|-----|-----|
| | | THS | THA | THF |
| Argentina | IRAM 11503 | -- | Sí | -- |
| Argentina | IRAM 11513 (*) | Sí | -- | -- |
| Brasil | NBR 8890 | Sí | Sí | Sí |
| España | UNE 127916 | Sí | Sí | Sí |
| EE.UU. | ASTM-C14 | Sí | -- | -- |
| EE.UU. | ASTM-C76 | -- | Sí | -- |
| EE.UU. | ASTM-C76M | -- | -- | Sí |
| Europa | UNE-EN 1916 | Sí | Sí | Sí |

(*) Clase de tubos no permitidos por la Dirección Nacional de Vialidad

Evaluación comportamiento estructural de tubos de hormigón

El ensayo tradicionalmente utilizado para la evaluación estructural de los tubos se denomina "prueba de tres aristas" o "ensayo de compresión diametral", donde se analiza la respuesta hasta la rotura con seguimiento del proceso de fisuración. En Argentina, el ensayo de tubos de hormigón se rige por la Norma IRAM 11503 [17], la cual no contempla la incorporación de fibras al material hormigón. En esta norma se deben

evaluar las cargas de fisuración y las cargas de rotura solo para tubos reforzados con barras de acero para hormigón armado. Para el caso de los tubos de hormigón con fibras de este desarrollo y al no contar con normativa en el país, se utilizaron como referencia y marco conceptual las normas de España [12,15] y de Brasil [16]. El procedimiento de ensayo para THRFA es el siguiente:

Se carga hasta la fisuración con F_c y se mantiene esta carga durante 1 min sin que aparezcan nuevas fisuras, donde F_c debe ser el 67% de la carga de rotura especificada, F_n .

Se carga el tubo hasta la rotura, donde se obtiene la carga última F_u mayor que F_n .

Cuando la carga desciende más de un 5% respecto a F_u se debe descargar el tubo y luego recargar. En esta recarga se debe alcanzar como mínimo el 67% de F_n durante 1 min, sin que se produzca la destrucción total del tubo.

La Figura 2 muestra la disposición del ensayo y el proceso de carga y descarga en función del tiempo de ensayo. Este proceso cíclico tiene como fin verificar que el tipo y cantidad de fibras son las adecuadas para garantizar la carga mínima post-rotura.

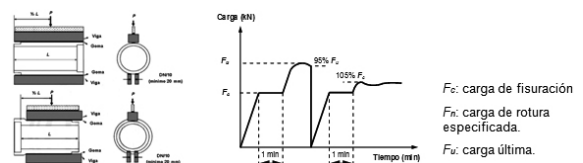


Figura 2. Disposición de ensayo de THRFA y Curva de carga en función del tiempo, según NBR 8890 [16].

Descripción del diseño de tubos

Los tubos se diseñaron considerando criterios de dimensiones de interés comercial, y de tecnología de fabricación y fibras disponibles en el país. Al efecto se estudiaron tubos de diámetro interior de 600 mm, ya que es ampliamente utilizado en obras de infraestructura civil. Estos tubos se fabricaron en una empresa de premoldeados de la ciudad de Olavarría en el marco de un Convenio y luego se ensayaron en el Laboratorio de Estructuras de la Facultad de Ingeniería según la modalidad que proponen las normativas [12,15,16]. Para el refuerzo de los tubos se utilizaron fibras de acero Wirand del tipo FF3,

cuya geometría y sus características se describen en la Tabla 2 [19]. Según las investigaciones recientes, [1-3], las dosificaciones de fibras que influyen en el comportamiento del material se encuentran entre 20 kg/m³ y 40 kg/m³. En particular, para la construcción de los tubos de este trabajo se adoptaron dosificaciones de fibras de 25 kg/m³ y 30 kg/m³. Los tubos de hormigón simple (sin fibras) se utilizaron como patrones de referencia. La Tabla 3 presenta las características generales de los tubos realizados, en un total de 6 especímenes.

Tabla 2. Propiedades físicas de las fibras [19].


| Fibra | Material | Resistencia a la tracción (MPa) | Dimensiones | | |
|--|---|---------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| | | | Longitud (mm) | Diámetro (mm) | Esbeltez (ld) |
|  Wirand FF3 | Alambre de acero de bajo contenido de carbono | 1200 | 50 | 0,75 | 67 |

Tabla 3. Características generales de los tubos realizados.

| Nomenclatura | Características | Dosificación (kg/m ³) | Espesor (mm) |
|--------------|---------------------|-----------------------------------|--------------|
| THS | Hormigón simple | 0 | 70 |
| THRFA25 | Hormigón con fibras | 25 | |
| THRFA30 | Hormigón con fibras | 30 | |

Proceso de fabricación de tubos

La factibilidad tecnológica de estos tubos está dada en el proceso de prefabricación. Según relevamientos realizados, en la fabricación de tubos de hormigón son utilizados los sistemas de “giro-compresión o compresión radial” y “giro-vibración”, empleándose el primero de ellos para los tubos de este trabajo. En el sistema de giro-compresión se colocan en posición vertical el molde externo metálico del tubo a llenar y el eje rotatorio eléctrico interno. Este eje tiene un sistema hidráulico de rodillos dispuestos al tresbolillo que originan un movimiento de rotación que comprime al hormigón contra el molde externo, conformándose así el tubo, como se muestra en las Figuras 3 y 4. La dosificación para el hormigón utilizado se presenta en la Tabla 4, resultando una mezcla “seca” debido a la baja relación agua/cemento. Sin embargo, se logró una adecuada cohesión de la mezcla con el proceso mencionado.

Tabla 4. Dosificación utilizada para el hormigón.

| Material | Cantidad |
|-------------------------------------|-----------------------|
| Arena de trituración 0-6 | 860 kg/m ³ |
| Arena silícea | 125 kg/m ³ |
| Agregado grueso de trituración 6-12 | 800 kg/m ³ |
| Cemento CFF40 | 400 kg/m ³ |
| Agua | 110 kg/m ³ |
| Relación agua/cemento | 0,28 |

El hormigón se prepara en una mezcladora de eje horizontal, que alimenta a una cinta transportadora que lo vuelca en el molde, Figura 3. Las fibras se incorporaron en las dosis especificadas y se mezclaron durante 2 minutos. Finalizado el llenado del tubo, éste se retira de la máquina y se lo traslada al lugar de disposición de curado durante las primeras horas de fragüe. El desmolde se realiza casi instantáneamente a la finalización del llenado, lo cual muestra que el tubo adquiere rápidamente la capacidad de autosustentarse, como se ilustra en la Figura 4. Esto se debe a la elevada compacidad de la mezcla y a su reducida relación agua/cemento. Simultáneamente, se moldearon probetas cilíndricas de 15 cm por 30 cm para caracterizar el material utilizado en el moldeo de los tubos. Debido a la consistencia seca de la mezcla, el moldeo se realizó en tres capas por medio de una mesa vibradora.



Figura 3. Disposición de equipos en el proceso de fabricación de los tubos.



Figura 4. Proceso de llenado molde, traslado y desmolde.

Predicción numérica de la carga de rotura

Se realizaron ensayos numéricos para estimar la carga de rotura de tubos de hormigón simple. Estos ensayos se efectuaron por medio de un software que emplea el Método de los Elementos Finitos [20]. Se consideró un modelo material tipo “Reinforced Concrete”, ya que es capaz de representar el comportamiento tanto a tracción como a compresión del hormigón. Investigaciones recientes plantean modelos de



cálculo [23]. Según el art. 9.5.2.3 del Reglamento CIRSOC 201/05, la resistencia a tracción del hormigón de calidad H-35 es $0,625\sqrt{f'_c} = 3,7$ MPa. La Figura 5 ilustra el comportamiento a tracción y compresión del modelo material empleado en las simulaciones numéricas. En la Tabla 5 se muestran los datos ingresados para los modelos numéricos de tubos.

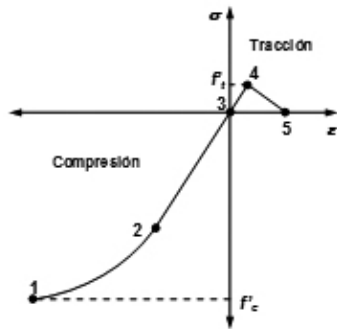


Figura 5. Curva tensión-deformación del modelo numérico material.

Tabla 5. Datos para el modelo material hormigón.

| | |
|-----------------------------|--|
| Resistencia a la tracción | 3,7 MPa (punto 4, Figura 5). |
| Resistencia a la compresión | 35 MPa (punto 1, Figura 5). |
| Módulo de elasticidad | 27805 MPa (pendiente de los puntos 2, 3 y 4, Figura 5). |
| Densidad | 2400 kg/m ³ |
| Módulo de Poisson | 0,2 |
| Energía de fractura | 46125 J/m ² (área encerrada por los puntos 3, 4 y 5, Figura 5). |

La curva de tensión-deformación se determinó con la expresión de Thorenfeld, [21,22], Ecuación 1.

$$\frac{f_c}{f'_c} = \frac{n \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} \right)}{n-1 + \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} \right)^{nk}} \quad (1)$$

donde n puede expresarse como una función aproximada de la resistencia a la compresión de un hormigón normal, dada por la Ecuación 2 y k es un factor que depende de la relación de deformaciones, Ecuación 3.

$$k = 1 \text{ si } \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} \right) < 1; \quad k > 1 \text{ si } \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} \right) > 1 \quad (2)$$

$$n = 0,4 \cdot 10^{-3} f'_c (\text{psi}) + 1 \quad (3)$$

donde f_c es la tensión de compresión del hormigón, f'_c es la resistencia del hormigón a la compresión, ϵ_c es la deformación de compresión del hormigón y ϵ_{co} es la deformación en rotura ($\epsilon_{co} = 0,002$). Los resultados obtenidos de los modelos numéricos indican que la carga

de fisuración es de 35 kN/m y que la carga de rotura es 50 kN/m, experimental 54 kN/m, con muy buena concordancia. La Figura 6 muestra los estados tensionales resultantes.



Figura 6: Tensiones máximas de tracción y compresión de THS, en N/m². Software Algor.

Ejecución de ensayos estructurales

Los tubos y las probetas se ensayaron luego de 28 días en el Laboratorio de Estructuras de la Facultad de Ingeniería. Los resultados de ensayos de compresión de las probetas permitieron identificar al hormigón como H-35 ($f'_c = 35$ MPa). Para la ejecución de los ensayos se confeccionaron una viga de apoyo con la separación exigida por la Norma IRAM 11503, una viga de reparto en la parte superior para lograr carga uniformemente distribuida y un soporte para flexímetro ubicado en el interior del tubo, como se muestra en la Figura 7.

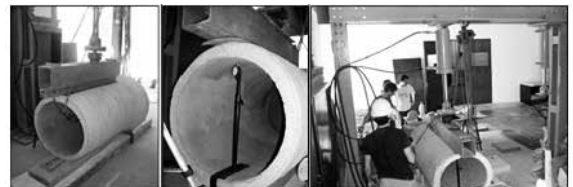


Figura 7. Ensayos realizados en el Laboratorio de Estructuras de la Facultad de Ingeniería

Resultados y discusión

El ensayo del tubo de hormigón simple (THS) permitió obtener una rotura frágil y súbita, como se muestra en la Figura 8. La carga experimental concuerda con la predicha por el modelo numérico computacional desarrollado, según Figuras 5 y 6.



Figura 8. Modo de rotura de THS.

Las Figuras 9 y 10 muestran que las fisuras que provocaron la falla de los tubos con fibras de acero se encuentran en las partes superior, inferior y en los laterales de cada tubo. No se observaron desprendimientos de partes de la pieza y cada tubo permaneció armado. Esto se corresponde con un tipo de rotura dúctil. Durante la aplicación de las cargas, entre la fisuración y la rotura se observó un retardo en la aparición, propagación y apertura de fisuras, lo cual se explica con la energía de deformación almacenada por las fibras y la consecuente ductilidad desarrollada. La Figura 11 ilustra la carga aplicada en función del desplazamiento vertical del tubo, donde se grafican los comportamientos estructurales de THRFA25 y THRFA30 y las cargas mínimas de fisuración y de rotura requeridas por la norma IRAM 11503 para tubos de hormigón de clase resistente II. La Figura 10 muestra que las fibras se orientaron preferentemente en la dirección tangencial al diámetro del tubo, es decir, siguiendo la trayectoria de las tensiones de tracción. Esta orientación contribuyó a mejorar la eficiencia de las fibras, lográndose aumentar tanto la capacidad resistente como la ductilidad de los tubos, como se muestra en la Figura 11 y en la Tabla 6.

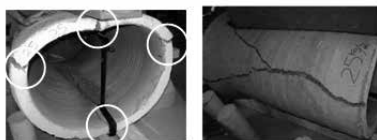


Figura 9. Modo de rotura de THRFA25.



Figura 10. Distribución de fisuras en los laterales y fibras cortadas en THRFA30.

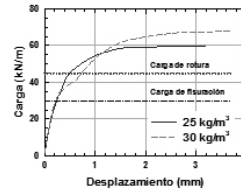


Figura 11. Carga aplicada en función del desplazamiento vertical del tubo.

En la Figura 11 se indican además las líneas correspondientes a cargas de fisuración y rotura según la Norma IRAM 11503, y los resultados comparativos se muestran en Tabla 6. Los tubos ensayados se corresponden con la clase resistente III. Desde el punto de vista de los requerimientos de armadura de acero para tubos de Clase III, según IRAM 11503 corresponde colocar 5,2 kg de acero de diámetro 6 mm, para tubos de 600 mm de diámetro. En este desarrollo se han reemplazado por fibras de acero, resultando 4,7 kg de fibras de acero para tubo de HRFA con 25 kg/m³, y en el caso de incorporar 30 kg/m³, resultan 5,7 kg de fibras de acero.

Tabla 6: Resultados de cargas de fisuración y rotura y exigencias mínimas de IRAM 11503.

| Tubo | Carga experimental (kN/m) | | Cargas mínimas exigidas por IRAM 11503 (kN/m) | | | | | |
|---------|---------------------------|------|---|------|-----------|------|----------|------|
| | | | Clase II | | Clase III | | Clase IV | |
| | Fis. | Rot. | Fis. | Rot. | Fis. | Rot. | Fis. | Rot. |
| THRFA25 | 40,6 | 60,0 | 30 | 45 | 39 | 60 | 60 | 90 |
| THRFA30 | 40,7 | 68,2 | | | | | | |

Conclusiones

En este trabajo se demostró la factibilidad técnica de fabricación de tubos de HRFA con dosis de 25 y 30 kg/m³, con la tecnología y materiales empleados en la industria del prefabricado en nuestro país.

La fabricación de tubos de hormigón por el sistema de giro-compresión presenta la dificultad de colocar malla de acero convencional en los tubos. Sin embargo, para las dosis indicadas, este proceso no presentó inconvenientes en el llenado y desmolde de los tubos con HRFA. El ahorro de cuantías de armadura de barras de acero influye en la manipulación y montaje de las mallas de armado, disminuyendo los tiempos, el personal y los recursos económicos involucrados y asegurando el cumplimiento de separaciones y recubrimientos mínimos fijados por los códigos.

Durante el proceso de fraguado no se detectaron aparición de fisuras superficiales, lo cual

puede atribuirse al reparto homogéneo de fibras que favorece el proceso de autoprotección por hidratación de las partículas del cemento, mejorándose así las propiedades de estanqueidad, durabilidad y resistencia a la fatiga. Los tubos presentaron muy buena terminación superficial, sin presencia visible de fibras en la superficie.

El ensayo de tres aristas instrumentado en el Laboratorio de Estructuras de la Facultad permitió evaluar el comportamiento estructural de los tubos de HRFA. La carga de fisuración se determinó por inspección visual de aparición de fisuras y resultó similar para los prototipos, independientemente de la cuantía de fibras incorporada. La primera fisura apareció para todos los especímenes ensayados en la cara interna de la clave del tubo.

Se observó que el ensayo continuo con medición de los desplazamientos mediante el sistema instrumentado, en reemplazo del cíclico establecido en la normativa, conduce a resultados representativos del comportamiento mecánico hasta la rotura.

Existieron diferencias en la forma de rotura y en el proceso de fisuración respecto al tubo de hormigón simple, según las dosis de fibras incorporadas. Los tubos con fibras presentaron cierto endurecimiento en la curva de carga-desplazamiento y retraso en el crecimiento de las fisuras, lo cual se traduce en una mejor respuesta en régimen de servicio.

De acuerdo con las cargas de fisuración y de rotura establecidas en la norma IRAM 11503, todos los tubos ensayados alcanzaron al menos la clase resistente III. Desde el punto de vista de los requerimientos de armadura de acero para tubos de Clase III, según IRAM 11503 corresponde colocar 5,2 kg de acero de diámetro 6 mm, para tubos de 600 mm de diámetro. El consumo de fibras de acero, resulta 4,7 kg de fibras de acero para tubo de HRFA con 25 kg/m³, y en el caso de incorporar 30 kg/m³, resultan 5,7 kg de fibras de acero.

Finalizado el ensayo hasta la rotura y debido a la naturaleza del proceso de fabricación de los tubos, se comprobó que las fibras se orientan mayoritariamente paralelas al flujo de tensiones normales que aparecen en servicio en este tipo de estructuras. Esto mejora notablemente la efi-

ciencia de la fibra en el comportamiento estructural, aumentando globalmente la capacidad resistente y la ductilidad del tubo.

Desarrollos a futuro

Los autores continúan realizando nuevas experiencias, para contar con mayor cantidad de datos surgidos de la propia experimentación, a fin de contrastar y ajustar el modelo numérico representativo de la respuesta estructural. Por otro lado, es necesario profundizar el estudio de métodos de cálculo para secciones con HRFA, disponibles en las normativas que contemplan este material. Con ello se pretende aportar conocimiento sobre el tema y contribuir a la difusión y adopción de estas innovaciones para la industria del prefabricado.

Referencias

- [1] De la Fuente A.; Armengou Orús, J. (2007). Aplicaciones estructurales del HRF: tubos de saneamiento, paneles de cerramiento y placas de suelo reforzado. Cátedra BMB, Universidad Politécnica de Cataluña.
- [2] Mohamed, Soliman, Nehdi. (2014). Full-scale pipes using dry-cast steel fibre reinforced concrete. *Constructions and Buildings Materials* 72: 411-422.
- [3] Ramos, M.F.; Júnior, N.O.P.; Franco, B.L.M. (2007). Avaliação de tubos de concreto reforçado com fibras de aço submetidos ao ensaio de compressão diametral. *Anais do 49º Congresso Brasileiro do Concreto, CBC. IBRACON*.
- [4] Zerbino, R. (2004). Hormigón reforzado con fibras. *Hormigones especiales. Seminario de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Santa Fe. E. F. Irassar (Ed.), 143 y ss.*
- [5] Torrijos, M.C.; Zerbino, R.; Barragán, B. (2008). Estudio de la orientación y distribución de fibras de acero en hormigón autocompactante. *1er Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante, Publicado en Comunicaciones, Pág. 555, Valencia.*
- [6] Tobes, J.M.; Monetti, D.; López, A.; Giacchio, G.; Zerbino, R. (2007). Hormigones autocompactables reforzados con fibras. *Revista Ciencia y Tecnología del Hormigón, LEMIT, Nº 14.*
- [7] Ercoli, N.; Peralta, M.; Negrette, A. (2011). Análisis del comportamiento estructural de vi-

gas de hormigón armado con incorporación de fibras de acero. IV Congreso Internacional y 18ª Reunión Técnica AATH 2010, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. Cabrera, O.; Sota, J. (Eds.). ISBN 978-987-21660-4-5.

[8] Ercoli, N.; Peralta, M. (2011). Comportamiento estructural de vigas de hormigón armado con incorporación de fibras de acero. V Congreso Internacional ACHE, España.

[9] CIRSOC 201-05. (2005). Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón. INTI-CIRSOC y Comentarios.

[10] ACI 318-08. (2008). Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Farmington Hills, Michigan. American Concrete Institute, Committee 318.

[11] ACI Committee 544. (1982). State of the art report on fiber reinforced concrete.

[12] Norma Española UNE-EN1916:2003. (2003). Tubos y piezas complementarias en masa, de hormigón con fibra de acero y de hormigón armado. AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación.

[13] Norma ASTM C14-14. (2014). Standard Specification for Nonreinforced Concrete Sewer, Storm Drain, and Culvert Pipe.

[14] Norma ASTM C76-14. (2014). Standard Specification for Reinforced Concrete Culvert, Storm Drain, and Sewer Pipe.

[15] Norma Española UNE 127916. (2004). Tubos y piezas complementarias en masa, de hormigón con fibra de acero y de hormigón armado. Complemento nacional a la Norma UNE-EN1916:2003. AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación.

[16] Norma Brasileña NBR 8890. "Tubos de hormigón de sección circular de aguas pluviales y alcantarillado sanitario. Requisitos y métodos de ensayo" (2007).

[17] Norma Argentina IRAM 11503. "Caños de hormigón armado no pretensado destinados a la conducción de líquidos sin presión" (1986).

[18] Norma Argentina IRAM 11513 (1994). Caños y piezas de conexión de mortero de cemento pórtland y de hormigón simple, destinados a obras de desagüe pluvial y cloacal.

[19] Maccaferri, Manual Técnico. (2009). Fibras como elemento estructural para el refuerzo de hormigón. Manual Técnico: 256 y ss.

[20] Algor Software (2008). Analysis by the Finite Element Method.

[21] Popovics, S. (1973). A numerical approach to the complete stress-strain curves of concrete. Cement and Concrete Research, 3(5): 583-599.

[22] Thorenfeldt, E.; Tomaszewicz, A.; Jensen, J.J. (1987). Mechanical properties of high-strength concrete and application in design. Proc. of the Symposium on Utilization of High-Strength Concrete, Tapir, Trondheim, Norway: 149-159.

[23] De la Fuente, A.; Escariz, R.; Figueiredo, A.; Aguado, A. (2012). A new design method for steel fibre reinforced concrete. Construction and Building Materials, 30: 547-555.

Agradecimientos

Los autores agradecen por sus contribuciones a la realización de este trabajo:

A la empresa de prefabricados "Premoldeados Len", Planta PYME, Olavarría, por la fabricación, donación y transporte de tubos y materiales al Laboratorio de Estructuras de la Facultad de Ingeniería, U.N.C.P.B.A.

A la empresa "Maccaferri S.A." de Argentina, por la donación de las fibras utilizadas.

Al Dr. Ing. Oscar A. Cabrera, Laboratorio de Materiales, Facultad de Ingeniería, U.N.C.P.B.A., por su asesoramiento y aportes en la fabricación de los tubos.