

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL USO DE FIBRAS HÍBRIDAS COMO REFUERZO DEL HORMIGÓN EN TUBOS PREMOLDEADOS

Federico A. González¹, Viviana C. Rougier², Mario R. Escalante¹

¹ UTN, FRCU, gonzalezf@frcu.utm.edu.ar

^{1,2} UTN, FRCon, rougierv@frcon.utm.edu.ar

RESUMEN

El refuerzo de hormigón con fibras cortas, distribuidas aleatoriamente en la matriz, es una tecnología exitosa capaz de modificar el comportamiento frágil del hormigón simple. En la mayoría de los hormigones reforzados con fibras (HRF) se utiliza un solo tipo de fibra como refuerzo. Sin embargo, la fisuración del hormigón es un proceso a escalas múltiples y el uso de un solo tipo de fibra puede proporcionar refuerzo dentro de un rango limitado de deformaciones. Por ello, un refuerzo óptimo se puede obtener al combinar fibras de diferentes materiales, geometría y/o comportamiento mecánico. 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 (FA) y de polipropileno (FPP), en su aplicación en tubos de 600 mm de diámetro. Para ello, se determinan experimentalmente (ensayo de tres aristas) la capacidad de carga y el modo de falla de 8 tubos de HRFH (THRFH) elaborados con dos dosificaciones distintas de fibras. Los resultados son comparados con los obtenidos del ensayo de 4 tubos de hormigón reforzado con fibras de acero (THRFA) y 4 tubos de hormigón armado (THA) Clase II según IRAM 11503.

Palabras claves: hormigón reforzado con fibras, fibras híbridas, tubos.

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]. El hormigón reforzado con dos o más tipos de fibras se denomina Hormigón Reforzado con fibras híbridas (HRFH) [4]. 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 [5]. 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 [6]. 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 [7]. 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 [8]. Esta ventaja conduce a beneficios desde el punto de vista técnico y económico [9].

Actualmente, existen normas técnicas que regulan el uso de HRF para la elaboración de tubos [10-13]. 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 [14].

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 4 THRFA y 4 tubos THA con armadura Clase II según la norma IRAM 11503 [15].

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Dosificación del hormigón simple y características de las fibras utilizadas

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 se desmolda 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

Los agregados utilizados fueron grava de 13,2 mm de tamaño máximo y arena natural con módulo de finura 2,5. Por cada pastón se moldearon tres probetas cilíndricas de 150x300 mm, las cuales se ensayaron a compresión simple. La resistencia promedio a compresión de las mismas a los 28 días fue de 32 MPa.

Por otra parte, 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: Formas de las fibras empleadas.

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

Tabla 2: Fibras utilizadas.

Material	Longitud (l) mm	Diametro (d) mm	Relación de aspecto l/d	Densidad kg/m ³	Módulo de elasticidad GPa
Acero	50	1,00	50	7840	210
Polipropileno	50	0,60	83	920	6

Características de los especímenes

Se elaboraron un total de 16 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 para la construcción de alcantarillados de drenaje. Los especímenes fueron agrupados de acuerdo a sus características de refuerzo como se muestra en la Tabla 3, donde además se puede ver la cantidad y denominación de los mismos.

Tabla 3: Cantidad, denominación y características de refuerzo de los tubos ensayados.

Denominación	FA kg/m ³	PPF kg/m ³	Cantidad Unid.	Cuántía acero ‰
THA-0/0	----	----	4	2,19
THRFA-20/0	20	0	4	
THRFH-20/0,5	20	1,0	4	2,50
THRFH-20/1,0	20	0,5	4	

Nomeclatura:
 THRFX-X/X
 → Contenido de FPP en kg/m³
 → Contenido de FA en kg/m³
 → Fibras de acero "A"
 Fibras híbridas "H"

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 [15]. 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.

En los THRFA-20/0 se utilizó una dosis de 20 kg/m³ de FA debido a que otros autores han demostrado la eficiencia del refuerzo en este tenor [6, 14, 16]. 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 estas 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 [17].

Elaboración de los tubos y método de ensayo

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 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 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. La superficie de los tubos fue mojada periódicamente mediante riego para evitar la pérdida excesiva de humedad. La Figura 2a muestra el moldeo del tubo y la Figura 2b el riego de la superficie del tubo que se realiza en el área de almacenamiento de la planta.



Figura 2: a) Moldeo; b) Curado.

Los tubos se ensayaron de acuerdo con el método denominado de tres aristas establecido en la norma argentina IRAM 11503 [15]. Además, dicha norma establece las dimensiones mínimas de los tubos, las características de la jaula de acero para su refuerzo y dos criterios para su clasificación, según su resistencia, a través de una carga mínima de fisuración (P_{C-II}) y una de rotura (P_{R-CII}).

La Figura 3 muestra un esquema del ensayo y la ubicación de los instrumentos de medición. Se registraron cargas y desplazamientos longitudinales y transversales.

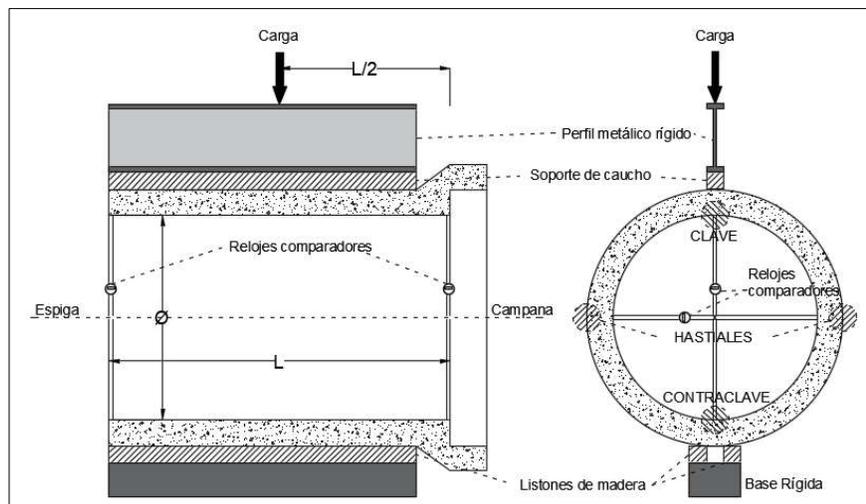


Figura 3: Esquema con la identificación de las distintas partes del tubo e instrumentación para el ensayo.

Para la aplicación de la carga se usó una prensa con sistema hidráulico que puede desarrollar una carga nominal máxima de 140 kN. Para la medición de los desplazamientos

se utilizaron micrómetros digitales con una sensibilidad de 0,001 mm. En todos los ensayos se retiraron los instrumentos de medición antes de alcanzar la carga máxima para evitar su rotura.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto de la dosis de fibra en la capacidad de carga del tubo

En la Figura 4 se presentan el promedio de las cargas de fisuración (P_C) y de rotura (P_R) 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 (P_{C-CII}) y de rotura (P_{R-CII}), respectivamente, establecidas por la norma IRAM 11503 [15]. En dicha figura, se observa que el grupo de THRFA-20/0 no alcanzó, en promedio, la P_{R-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 P_{R-CII} . En cuanto a la P_{C-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.

Los THA-0/0, o denominados de control, alcanzaron la mayor P_R . El mayor coeficiente porcentual de variación (COV) respecto a estos últimos, se observó para los THRFA-20/0 alcanzando una P_R inferior en 28 %. En cuanto a los THRFH-20/0,5 y THRFH-20/1,0 no tuvieron un COV significativo, 0,8 % y 5 %, respectivamente.

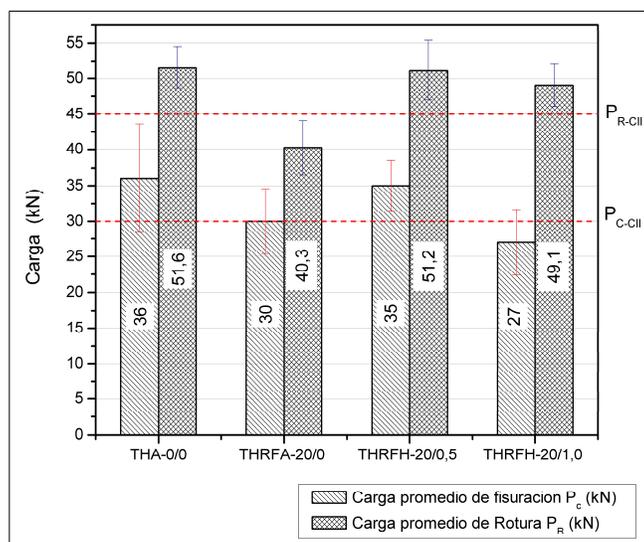


Figura 4: Carga de rotura (P_R) - Grupos de tubos.

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 $0,5 \text{ kg/m}^3$ de FPP produjo un significativo aumento en la capacidad de carga de los tubos, del orden del 27 %. La adición de PPF en la matriz de hormigón aumenta la energía de arrancamiento (pull-out) de las FA con extremo conformado [19]. Este efecto genera un rendimiento más efectivo de las FA en el control de la fisuración lo que redundará en la mejora de la respuesta estructural del tubo. Esta sinergia positiva entre las fibras de refuerzo ha sido observada anteriormente por otros investigadores [19, 20]

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 [21]. 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 pudo haber generado problemas en la compactación de los THRFH-20/1,0. Esta observación, respecto al volumen de fibras, coincide con la realizada por otros investigadores que determinaron que en sistemas de refuerzo híbridos, las FPP deben agregarse en bajos volúmenes para asegurar la adecuada dispersión de las fibras y trabajabilidad de la mezcla [18, 22].

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 5a) y en los hastiales (eje x-x, Figura 5a), que muestran un mecanismo de falla por flexión. Este mecanismo de falla fue observado por otros investigadores [6-8] 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 5b, donde se muestra el patrón de grietas longitudinales.

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. La Figura 5c muestra el patrón general de los mecanismos de falla de las fibras utilizadas. Además, en dicha figura, 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.



Figura 5: a) Patrón de fisuración transversal; b) Patrón de fisuración longitudinal; c) Orientación de las fibras.

En la Figura 6 se presentan las curvas carga-deformación diametral (eje y-y, Figura 5a), medidas hasta 35 kN que corresponde a un valor superior en 5 kN a la carga de fisuración establecida por la norma IRAM 11503 [15]. 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, como ya se había expresado anteriormente. 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 en promedio 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 TRFA-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 [15] y por ello, el refuerzo se activa a niveles altos de fisuración y desplazamiento.

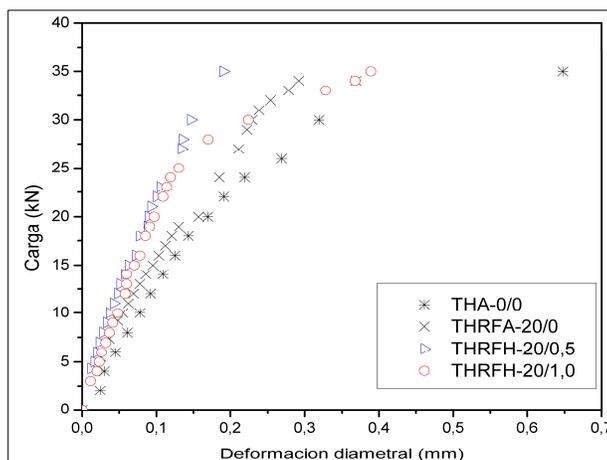


Figura 6: Curva carga-deformación diametral promedio de los distintos grupos de tubos.

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, 4 THRFH y 4 THA. En base a los resultados obtenidos se concluye que:

- Todos los THRFH alcanzaron y superaron la carga de rotura mínima para la Clase II según IRAM 11503 [15]. 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 significativo (27 % aprox.) 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.

REFERENCIAS

- [1] Zerbino RL, "Uso de macrofibras sintéticas en hormigón", *Hormigonar*, Vol. 31, (2013), 12-18.
- [2] Banthia N, Majdzadeh F, Wu J, Bindiganavile V, "Fiber synergy in Hybrid Fiber Reinforced Concrete in flexure and direct shear", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 48, (2014), 91-97.
- [3] Singh AK, Jain A, Singh D, "Evaluation of mechanical properties for polypropylene and steel fibre reinforced concrete", *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Vol. 2, N°4, (2013), 1507-1517.
- [4] Pakravan HR, Latifi M, Jamshidi M, "Hybrid short fiber reinforcement system in concrete: A review", *Construction and building materials*, Vol. 142, (2017), 280-294.
- [5] Singh NK, Rai B, "A review of fiber synergy in hybrid fiber reinforced concrete", *Journal of Applied Engineering Sciences* Vol. 8, N°2, (2018), 41-50.
- [6] Mohamed N, Soliman AM, Nehdi ML, "Mechanical performance of full-scale precast steel fibre-reinforced concrete pipes", *Engineering Structures*, Vol. 84, (2015), 287-299.
- [7] Abolmaali A, Mikhaylova A, Wilson A, Lundy J, "Performance of Steel Fiber-Reinforced Concrete Pipes", *Transportation research record*, Vol. 2313, N°1 (2012), 168-177.
- [8] Lee S, Park Y, Abolmaali A, "Investigation of Flexural Toughness for Steel-and-Synthetic-Fiber-Reinforced Concrete Pipes", *Structures*, Vol. 19, (2019), 203-211.
- [9] De la Fuente A, de Figueiredo AD, Aguado A, Molins C, Neto PJC, "Experimentation and numerical simulation of steel fibre reinforced concrete pipes", *Materiales de construcción*, Vol. 61, N° 302, (2011), 275-288.
- [10] EN1916, N. B. N. "Concrete pipes and fittings, unreinforced, steel fibre and reinforced", *Belgisch Instituut voor normalisatie (BIN)*, Brussel (2002).
- [11] ABNT NBR 8890, "Tubo de concreto de seção circular, para águas pluviais e esgotos sanitarios", *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, (2007).
- [12] ASTM C1765-16, "Standard Specification for Steel Fiber Reinforced Concrete Culvert, Storm Drain, and Sewer Pipe", *American Society for Testing and Materials International*, (2016).
- [13] ASTM C1818-16, "Standard Specification for Synthetic Fiber Reinforced Concrete Culvert, Storm Drain and Sewer Pipe", *American Society for Testing and Materials International*, (2016).
- [14] Park Y, Abolmaali A, Mohammadagha M, Lee S, "Structural performance of dry-cast rubberized concrete pipes with steel and synthetic fibers", *Construction and Building Materials*, Vol. 77, (2015), 218-226.
- [15] IRAM 11503, "Caños de hormigón armado no pretensado. Destinados a la conducción de líquidos sin presión", *Instituto Argentino de Normalización y Certificación*, (1986).
- [16] Ferrado F, Escalante M, Rougier V, "Simulation of the three-edge bearing test: 3D model for the study of the strength capacity of SFRC pipes", *Mecánica computacional*, Vol. 36, (2018), 195-204.
- [17] Chi Y, Xu L, Zhang Y, "Experimental study on hybrid fiber-reinforced concrete subjected to uniaxial compression", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 26, N°2, (2014), 211-218.
- [18] Deng F, Ding X, Chi Y, Xu L, Wang L, "The pull-out behavior of straight and hooked-end steel fiber from hybrid fiber reinforced cementitious composite: experimental study and analytical modelling", *Composite Structures*, Vol. 206, (2018), 693-712.
- [19] Singh N, Rai B, "A review of fiber synergy in hybrid fiber reinforced concrete", *Journal of applied engineering sciences*, Vol. 8, N° 21, (2018), 41-50.
- [20] Pakravan H, Latifi M, Jamshidi M, "Hybrid short fiber reinforcement system in concrete: A review", *Construction and Building Materials*, Vol. 142, (2017), 280-294.
- [21] Hsie M, Tu C, Song P, "Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete", *Materials Science and Engineering*, Vol. 494, (2008), 153-157.
- [22] Akcay B, Tasdemir M, "Mechanical behaviour and fibre dispersion of hybrid steel fibre reinforced self-compacting concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 28, (2012), 287-293.