

TUBOS DE HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS: ESTUDIO PARAMÉTRICO DE LA CAPACIDAD RESISTENTE MEDIANTE UN MODELO MATERIAL BIFASE

STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE PIPES: PARAMETRIC STUDY OF THE BEARING CAPACITY THROUGH A BIPHASE MODEL

Facundo L. Ferrado^a, Viviana C. Rougier^a y Omar R. Faure^a

^a*Grupo de Investigación en Mecánica Computacional y Estructuras, Universidad Tecnológica Nacional- Facultad Regional Concepción del Uruguay, Ing. Pereyra 676, 3260 Concepción del Uruguay, Argentina, gimce@frcu.utn.edu.ar*

Palabras clave: HRFA, Tubos de drenaje, Análisis estocástico, Orientación y distribución de fibras.

Resumen. El hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA) posee cierta imprevisibilidad en cuanto a la distribución del refuerzo dentro de la masa del hormigón. Las diferentes orientaciones y distribuciones de las fibras, junto a otros factores, influyen en el desempeño mecánico del material compuesto. En este trabajo se realiza un estudio paramétrico de la capacidad resistente de tubos de HRFA mediante un modelo material de dos fases (hormigón + fibras) que considera la geometría de las fibras y su posición dentro del hormigón. Las variables analizadas en el estudio paramétrico son dosaje de fibras y calidad de hormigón. Se estudiaron a su vez casos ideales de orientaciones de fibras. Para realizar dicho estudio, se simula el ensayo de tres aristas de acuerdo a la norma IRAM 11503, el cual es implementado en un software de elementos finitos (ABAQUS®). Finalmente, se muestran los valores de carga última obtenidos de las simulaciones y se propone un método analítico para estimar dicha carga.

Keywords: SFRC, Drainage pipes, Stochastic analysis, Fiber distribution and orientation.

Abstract. Steel fiber reinforced concrete (SFRC) has some unpredictability in terms of the distribution of reinforcement within the concrete mass. Different fiber orientations and distributions, along with other factors, influence the mechanical performance of the composite material. In this work, a parametric study of the strength capacity of SFRC pipes is carried out using a bi phase material model (concrete + fibers) that considers the geometry of the fibers and their position within the concrete. The variables analyzed in the parametric study are fiber dosage and concrete class. Ideal cases of fiber orientations were also studied. In order to carry out this study, the three edge bearing test according to IRAM 11503 standard is simulated, which is implemented with a finite element software (ABAQUS®). Finally, the maximum load values obtained from the simulations are shown and an analytical method to estimate this load is proposed.

1. INTRODUCCIÓN

La mejora de las propiedades mecánicas del HRFA se puede atribuir a que las fibras contrarrestan la apertura de fisuras y la propagación de las microfisuras ya existentes. Por este hecho, y a diferencia del hormigón convencional, el HRFA muestra una mayor capacidad de deformación tanto en tracción como en compresión junto con un valor significativo de resistencia residual. La mejora de las características mecánicas del HRFA depende de varios factores. Algunos de ellos están relacionados directamente con la cantidad y tipo de fibras y otros con las propiedades de la matriz cementicia (Barros y Figueiras, 1999; Bentur y Mindess, 2007; Buratti et al., 2011; Soulioti et al., 2009). Un factor importante en el desempeño de las fibras, es la orientación de las mismas en la matriz de hormigón en función de su alineación en relación a la dirección de las tensiones principales (Dupont y Vandewalle, 2005; Kiranbala y Bishwotrij, 2013; Michels et al., 2013; Ozyurt et al., 2007; Zandi et al., 2011). Puede mencionarse un tercer grupo de factores vinculados al tipo de elemento estructural ya que la orientación y distribución de las fibras puede verse afectada por distintos procesos y elementos propios de cada tipo de estructura como la forma del encofrado, la dirección de colado y de los métodos de compactación (Laranjeira et al., 2011; Song y Hwang, 2004; Svec y Zirgulis, 2014).

Según lo anterior, se propone aquí un estudio paramétrico para cuantificar la influencia de la clase de hormigón junto con la cantidad y la orientación de las fibras, en la capacidad de carga de tubos de HRFA. Finalmente, se presenta una herramienta analítica para estimar de manera teórica dicha capacidad de carga.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En el marco de un trabajo de tesis doctoral desarrollado por el autor (Ferrado, 2024), se llevó a cabo una campaña experimental en tubos de HRFA. Los tubos se elaboraron con un diámetro interno de 600 mm, espesor de pared de 75 mm y una longitud de 1000 mm según requerimientos para tubos Clase II de acuerdo a la normativa IRAM 11503. Para estudiar el efecto de la adición de fibras se elaboraron tubos con dos contenidos de fibras: 20 kg/m³ y 25 kg/m³ junto con tubos reforzados con armadura tradicional. Se utilizaron fibras de acero con extremo de gancho WIRAND FF1 las cuales poseen 50 mm de longitud y un diámetro de 1 mm. La composición del HRFA se muestra en la Tabla 1.

Material	Contenido por m ³
Cemento CP40	325 kg
Agua	130 kg
Arena	958 kg
Agregado Grueso 5-12	1001 kg
Aire Incorporado	1.5 lts
Fibras de Acero	0,20 y 25 kg

Tabla 1: Composición del HRFA utilizado en los tubos.

En la Tabla 2 se muestran las cargas máximas medidas en los tubos de 600 mm fabricados.

La denominación THRFA corresponde a tubos de hormigón reforzado con fibras de acero mientras que la numeración 20/25 indica el dosaje de fibras, por su parte las siglas THRB corresponden a tubos de hormigón reforzado con barras y los caracteres CII indican la clase de armadura de acuerdo a la norma IRAM 11503.

Tubo	Carga última (KN.)	Carga última media (KN.)
Primer Serie		
1-THRFA-20	37	41
2-THRFA-20	45	
1-THRFA-25	36	38
2-THRFA-25	42	
1-THRB-CII	51	53.5
2-THRB-CII	55	
Segunda Serie		
3-THRFA-20	43	43
4-THRFA-20	43	
3-THRFA-25	36	37
4-THRFA-25	38	
3-THRB-CII	52	50
4-THRB-CII	48	

Tabla 2: Cargas últimas alcanzadas por tubos de 600 mm.

3. SIMULACIÓN DEL ENSAYO DE TRES ARISTAS

Se construyó un modelo tridimensional para simular el ensayo de tres aristas. La geometría del modelo consiste en el apoyo superior, las bandas de apoyo inferiores y el tubo. Las bandas de goma de los apoyos, modeladas como material hiperelástico, tienen 50 mm de ancho y 30 mm de espesor. Las bandas inferiores se encuentran separadas 50 mm como especifica la norma IRAM 11513 (Figura 1).

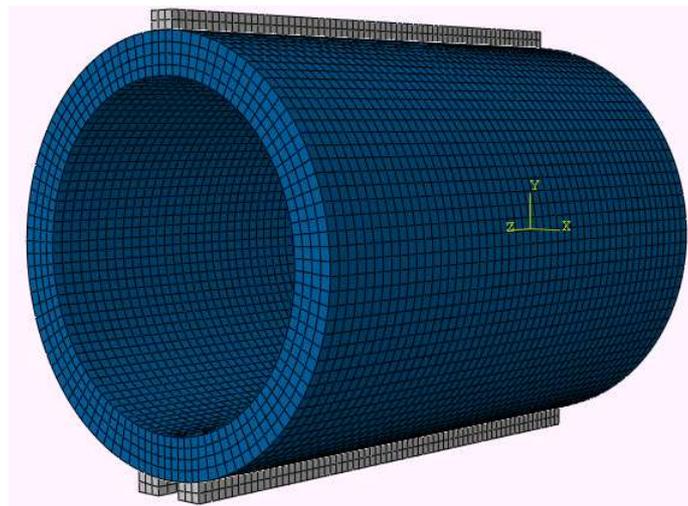


Figura 1: Modelo tridimensional de elementos finitos del ensayo de tres aristas.

Los apoyos inferiores se encuentran fijados en su cara inferior para evitar desplazamientos y rotaciones. La vinculación entre los apoyos y el tubo se considera de adherencia perfecta. Se adoptó un tamaño global para la malla de 20 mm después de haber realizado un estudio de sensibilidad de malla. Finalmente, para calcular la capacidad de carga de los tubos se determinó numéricamente la reacción total de los apoyos (equivalente a la carga total).

4. CONCEPTO DE MODELADO BIFASE

Algunos autores como [De la Fuente et al. \(2012\)](#) y [Mohamed y Nehdi \(2016\)](#) han estudiado el comportamiento de tubos de HRFA usando análisis por elementos finitos. Sin embargo, estos trabajos modelan al HRFA como un material homogéneo. En este trabajo se modela el HRFA como un material bifase considerando a las fibras como entidades discretas dentro de la masa de hormigón. Se modela el hormigón como hormigón simple y para las fibras se utiliza un modelo de acero que tiene en cuenta el fenómeno de arrancamiento. La interfaz fibra-matriz es aproximada sin modelar explícitamente la interfaz sino que se modifica la ecuación constitutiva del acero en función de la clase de hormigón y del tipo y geometría de fibra para así considerar el posible fenómeno de arrancamiento. Mayores detalles acerca de la modelación constitutiva de los materiales pueden encontrarse en el trabajo de tesis mencionado ([Ferrado, 2024](#)).

4.1. Sorteo aleatorio de fibras dentro del tubo

El número de fibras en un tubo queda determinado por el dosaje (kg/m^3), por el número de fibras por kilogramo y por el volumen del tubo. Este número de fibras se utiliza como parámetro de entrada de un algoritmo de muestreo desarrollado por los autores para generar la posición y la orientación de cada fibra dentro del tubo. Junto al número de fibras a generar también se especifica su longitud y diámetro. La Figura 2 muestra una nube de fibras generada con el algoritmo descrito.

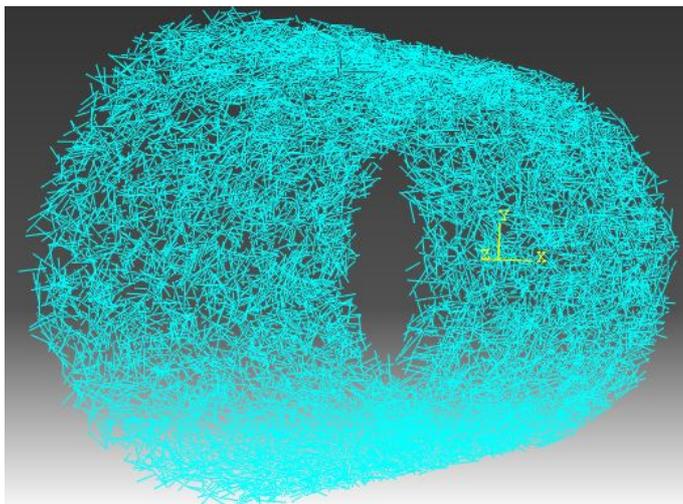


Figura 2: Nube de fibras con orientación y distribución aleatoria.

5. ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA DISTRIBUCION Y ORIENTACION DE LAS FIBRAS EN LA CAPACIDAD RESISTENTE DEL TUBO

Para analizar como la distribución y orientación de las fibras afectan el desempeño del tubo, se realizó un estudio paramétrico en el cual se generaron a partir del algoritmo descrito 100 nubes de fibras con orientación y distribución aleatoria fijando el dosaje y la clase de hormigón. Se adoptó una clase de hormigón C30 y un dosaje de fibras de $20 \text{ kg}/\text{m}^3$. Siguiendo una metodología similar a la empleada en un trabajo anterior ([Ferrado et al., 2019](#)), se obtuvo a partir de las 100 realizaciones Monte Carlo un valor medio de $\mu = 5476 \text{ N}$ con una desviación estándar de $\sigma = \pm 9,59 \text{ N}$, a partir de la simulación del ensayo de tres aristas descrito en la sección 3.

La diferencia entre valores de carga mínimos y máximos fue de alrededor del 5 %. Dichos resultados están en concordancia con lo ya obtenido en el trabajo anterior, pudiendo concluir que la distribución y orientación de las fibras no afecta significativamente a la capacidad resistente del tubo cuando se considera distribución aleatoria uniforme.

Para profundizar el análisis, se generaron nubes de fibras considerando cuatro orientaciones de fibras ideales. En la primera, las fibras se encuentran orientadas en dirección tangencial al radio del tubo, en la segunda en dirección radial, en la tercera en dirección axial y en la última en dirección perpendicular a dicho radio. Estas nubes se muestran en las Figuras 3 y 4.

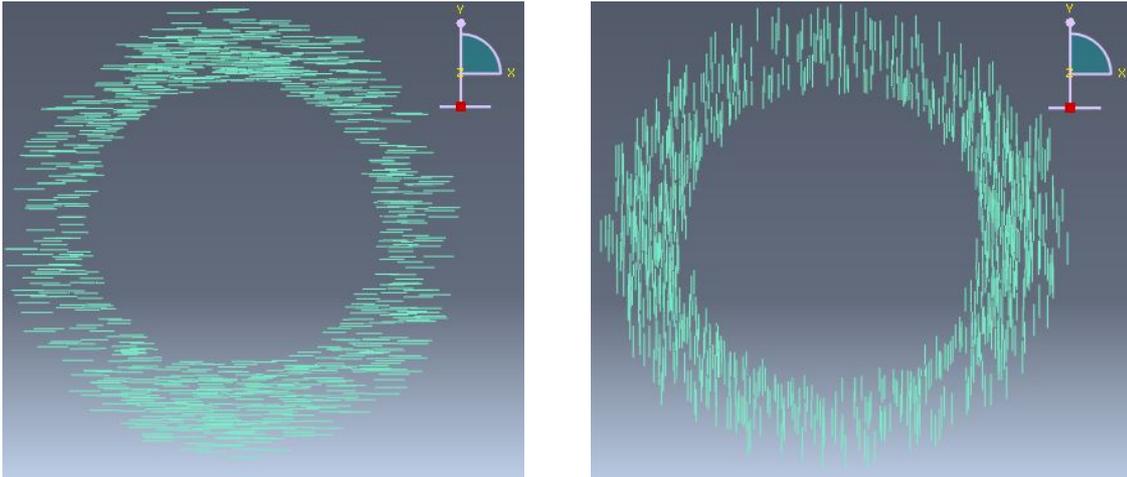


Figura 3: Nubes de fibras con orientaciones ideales. Izq.: tangenciales. Der.: radiales.

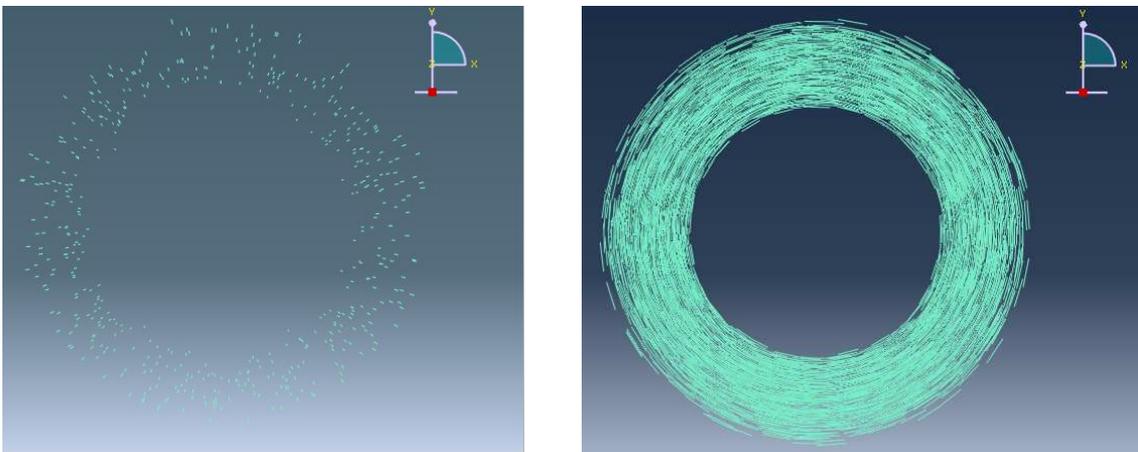


Figura 4: Nubes de fibras con orientaciones ideales. Izq.: axiales. Der.: perpendiculares.

Las cargas últimas obtenidas para estas orientaciones ideales se muestran en la Tabla 3

De dichos valores se concluye que la respuesta del tubo varía notablemente según las orientaciones ideales propuestas. Esto coincide con lo observado por Boulekbache et al. (2010) quienes afirman que la orientación juega un papel preponderante en cuanto a la respuesta del material bajo flexión, esfuerzo al que se encuentra sometido el tubo durante el ensayo de tres aristas. Así, el desempeño del material fibrado está estrechamente vinculado con dicha orientación de las fibras respecto al plano de fisura. La dirección normal al plano de fisura puede considerarse paralela a la dirección de las tensiones principales máximas.

Tabla 3: Diferencia entre cargas últimas obtenidas en tubos con fibras con orientaciones ideales y tubos sin fibras. (Dosaje de fibras: 20 kg/m^3 . Clase de hormigón: C20.)

Orientación de las fibras	Carga última (kN)	Diferencia (%)
Sin fibras	44.57	-
Tangenciales	62.79	40.9
Radiales	44.91	0.76
Axiales	44.62	0.11
Perpendiculares	53.8	20.7

En la Figura 5 pueden observarse las direcciones principales máximas y los valores de las deformaciones plásticas en un tubo sometido al ensayo de tres aristas.

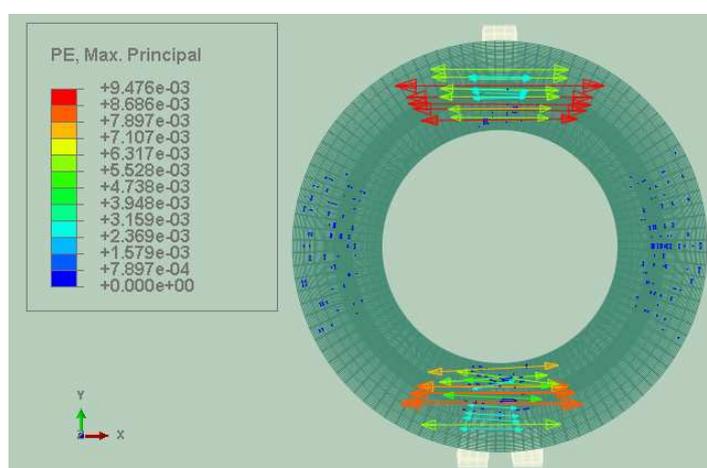


Figura 5: Tensiones principales máximas y deformaciones plásticas.

Como se observa, la dirección de las tensiones principales máximas coincide con la orientación tangencial de las fibras respecto al radio del tubo, y es para esta orientación que se espera que las fibras ofrezcan la máxima eficiencia, lo cual se condice con los resultados obtenidos numéricamente. Para las orientaciones axiales y radiales, las fibras no atraviesan el plano de fisura y su aporte a la resistencia mecánica del material es despreciable. Mientras que para la dirección perpendicular al radio, comparable con la dirección de las tradicionales barras de acero, se obtuvo un valor intermedio comparado con los máximos y mínimos.

6. ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL DOSAJE DE FIBRAS Y LA CLASE DE HORMIGÓN EN LA CAPACIDAD DE CARGA DEL TUBO

Continuando con el estudio paramétrico se consideraron en esta sección como variables la calidad de hormigón y el dosaje de fibras. Se analizaron cuatro clases de hormigón: C20, C25, C30 y C35 y cuatro dosajes de fibras: 15, 20, 25 y 30 kg/m^3 . Para llevar a cabo este estudio, se realizaron cinco simulaciones para cada caso, considerándose distribuciones y orientaciones aleatorias para las fibras. En primer lugar se realizó una comparación entre los casos con la misma clase de hormigón para estudiar la influencia del dosaje de fibras en la capacidad de carga de los tubos. Los resultados de las cinco simulaciones para cada dosaje estudiado se muestran en la Figura 6.

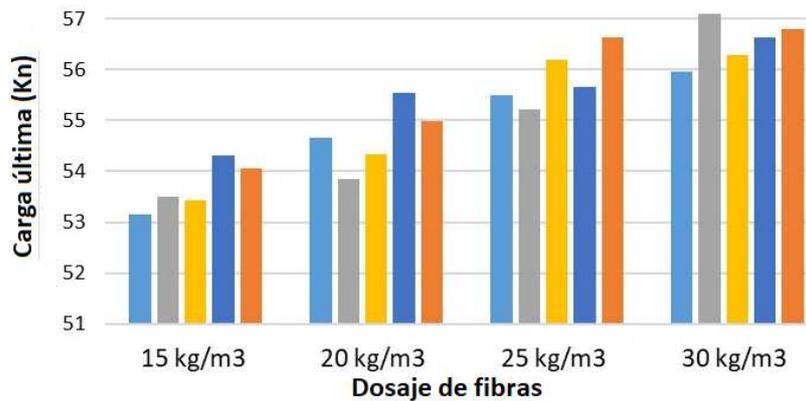


Figura 6: Cargas máximas para diferentes dosajes de fibra. (Hormigón C30. Fibra FF1)

Como se observa en la Figura, a mayor dosaje de fibras mayor carga última, observándose una diferencia del 5 % entre los valores de carga promedio para el dosaje de fibra mas bajo y el mas alto. Luego, para estudiar la clase de hormigón, se utilizan las mismas cinco nubes de fibras para todos los casos modificando únicamente la clase de hormigón. Los resultados de esta comparación se muestran en la Figura 7.

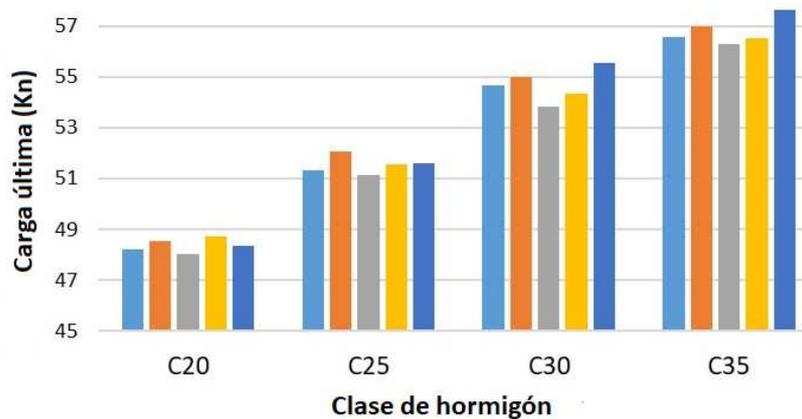


Figura 7: Cargas máximas para diferentes clases de hormigón. (Fibra FF1. Dosaje 20 kg/m³).

Para este caso se observó una diferencia entre valores promedio para la clase de hormigón C20 y la clase C30 de alrededor del 18 %, por lo que se concluye que la resistencia del tubo es mas susceptible a cambios en la calidad del hormigón en comparación a la cantidad de fibras.

7. ESTIMACIÓN TEÓRICA DE LA CAPACIDAD DE CARGA DEL TUBO BAJO EL ENSAYO DE TRES ARISTAS

Un tubo sometido al estado de carga impuesto en el ensayo de tres aristas fallará por flexión pura. Según la American Society of Civil Engineers (ASCE), el momento máximo a flexión que puede soportar un tubo de sección circular puede calcularse con la ecuación (1):

$$M_{SIDD} = \frac{D_m}{2} \cdot (C_{mp}W_p + C_{ml}W_l), \tag{1}$$

siendo M_{SIDD} el máximo momento teórico por unidad de longitud (KN*m/m), D_m es el diámetro medio del tubo, W_p son las cargas muertas y W_l las cargas vivas, mientras que C_{mp} y C_{ml}

son coeficientes adimensionales para cada sección crítica del tubo (base, corona y laterales) relacionados a lo que la norma llama “tipo de instalación” que depende del suelo circundante. Pero el objetivo es determinar mediante un procedimiento teórico la carga que soportaría el tubo bajo el ensayo de tres aristas (que se llama según la normativa norteamericana D-LOAD) y no la carga que soportaría el tubo en servicio. La norma ASCE da la expresión (2):

$$D - LOAD = \frac{W_L \cdot 12}{D_i} \text{ (kip/ft)}. \quad (2)$$

Peyvandi et al. (2013) desarrollaron una ecuación para determinar la resistencia a flexión en tubos de hormigón fibrado, bajo la hipótesis de que la pared del tubo se comporta como una sección rectangular equivalente (Ezeldin, 1990), la cual responde a la expresión (3):

$$M_n = \left[\sigma_t (d - c) b \left(c - \frac{a}{2} + \left(\frac{d - c}{2} \right) \right) \right], \quad (3)$$

El valor de a puede calcularse como:

$$a = \frac{\sigma_t h}{(0,85 f_c') + (\sigma_t / \beta_1)}, \quad (4)$$

donde:

M_n es el momento nominal a flexión .

f_c es la resistencia a compresión del hormigón en MPa.

a es la altura del bloque de compresión.

c es la altura del eje neutro.

σ_t es la resistencia a tracción del hormigón fibrado.

b es el ancho de la viga equivalente.

d es la distancia desde la fibra mas comprimida al centroide de las barras de acero.

h es la altura de la viga equivalente (igual al espesor de la pared del tubo).

β_1 es un factor entre 0.65-0.85 que depende de la resistencia del hormigón.

Se estima el momento nominal según la ecuación (3). Luego, el valor del momento nominal, se reemplaza en la ecuación (1) y de allí se despeja el valor de W_L para cada una de las secciones críticas. Finalmente el valor de D-LOAD se estima a partir de W_L mediante la ecuación (2). Para las 2 clases de hormigón estudiadas, los valores de D-LOAD en cada una de las secciones críticas se muestran en la Tabla 4.

D-LOAD (N/m)	
HRFA-20	
Sección	
Base	5435
Corona	5300
Laterales	8493
HRFA-25	
Sección	
Base	5460
Corona	5330
Laterales	8528

Tabla 4: Momentos nominales para secciones críticas.

Como era de esperarse, las cargas críticas corresponden a aquellas que actúan en la corona, que es el sector del tubo donde aparecen las fisuras principales al ser sometido al ensayo de tres aristas. En la Tabla 5 se muestran los valores de carga última P_{max} determinados experimental y numéricamente junto con los obtenidos teóricamente.

Hormigón (kg/m ³)	\bar{P}_{max} Exp. (kN)	\bar{P}_{max} Num. (kN).	\bar{P}_{max} Teórica. (kN)
HRFA-20	41.5	45.1	53
HRFA-25	39	46	53.3

Tabla 5: Cargas últimas promedio obtenidas de forma numérica, experimental y teórica.

Como se observa, los valores obtenidos con la aproximación teórica descrita en este apartado, sobrestiman los valores hallados experimentalmente. Esto puede explicarse en el hecho de que para el cálculo de la carga W_L se utilizan coeficientes que consideran el aporte del suelo lo cual contribuye a la capacidad resistente del tubo, mientras que en el ensayo de tres aristas el tubo no tiene ningún tipo de contención por parte del suelo.

CONCLUSIONES

En este trabajo se llevó a cabo un análisis de la capacidad resistente de tubos de HRFA a través de un estudio paramétrico considerando como variables al dosaje y orientación de fibras junto con calidad de hormigón. Para realizar dicho estudio, se simuló el ensayo de tres aristas normalizado por la norma IRAM 11503, a través del software ABAQUS®. Finalmente, se propuso un método analítico para estimar la capacidad de carga de los tubos.

Del estudio paramétrico se concluye que la carga última soportada por el tubo es mas sensible a cambios en la calidad de hormigón en comparación con la cantidad de fibras. En relación al estudio de casos ideales, se observó que la orientación de las fibras respecto al plano de fisura afecta significativamente la carga última que resisten los tubos, observandose la mayor eficiencia cuando las mismas se posicionan de forma perpendicular a dicho plano.

El método analítico presentado provee una herramienta sencilla y práctica para el cálculo de la resistencia del tubo, aunque tiende a sobreestimar los resultados experimentales ya que está basada en una herramienta desarrollada para tubos enterrados.

Como etapa futura se propone continuar estudiando la orientación de las fibras en tubos de HRFA mediante procesamiento de imágenes obtenidas con tomografía computada (rayos X).

REFERENCIAS

- Barros J. y Figueiras J. Flexural behavior of sfrc: Testing and modeling. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 4(11):331–339, 1999. doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1999\)11:4\(331\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1999)11:4(331)).
- Bentur A. y Mindess S. *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. Taylor & Francis, 2007. ISBN 978-0-415-25048-1.
- Boulekbache B., Hamrat M., Chemrouk M., y Amziane S. Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material. *Construction and Building Materials*, 24(9):1664–1671, 2010. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.025>.
- Buratti N., Mazzotti C., y Savoia M. Post-cracking behaviour of steel and macrosynthetic

- fibres-reinforced concretes. *Construction and Building Materials*, 34:243–248, 2011. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.022>.
- De la Fuente A., Escariz R., de Figueiredo A., Molins C., y Aguado A. A new design method for steel fibre reinforced concrete pipes. *Construction and Building Materials*, 30:547–555, 2012. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.015>.
- Dupont D. y Vandewalle L. Distribution of steel fibres in rectangle sections. *Cement and Concrete Composites*, 27:391–398, 2005. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.03.005>.
- Ezeldin A. Optimum design of reinforced fiber concrete subjected to bending and geometrical constraints. *Computers and Structures*, 41(5):1095–1100, 1990. doi:[https://doi.org/10.1016/0045-7949\(91\)90304-5](https://doi.org/10.1016/0045-7949(91)90304-5).
- Ferrado F. *Estudio numérico-experimental del comportamiento mecánico-estructural de tubos de hormigón reforzado con fibras de acero*. Tesis de Doctorado, Universidad Tecnológica Nacional, 2024.
- Ferrado F., Escalante M., y Rougier V. Modelo bi fase del hrfa para el estudio de la influencia de la orientación y distribución de fibras de acero en la resistencia mecánica de tubos de drenaje. *Mecánica Computacional*, 37(7):189–198, 2019.
- Kiranbala D. y Bishwotrij S. Effects of steel fibres in reinforced concrete. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2(10):2906–2913, 2013.
- Laranjeira F., Grunewald S., Walraven J., Blom C., Molins C., y Aguado A. Characterization of the orientation profile of steel fiber reinforced concrete. *Materials and Structures*, 44(6):1093–1111, 2011. doi:<https://doi.org/10.1617/s11527-010-9686-5>.
- Michels J., Christen R., y Waldmann D. Experimental and numerical investigation on post cracking behaviour of steel fiber reinforced concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, 98:326–349, 2013. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2012.11.004>.
- Mohamed N. y Nehdi M. Rational finite element assisted design of precast steel fibre reinforced concrete pipes. *Engineering Structures*, 124:196–206, 2016. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.06.014>.
- Ozyurt N., Mason T., y Shah S. Correlation of fiber dispersion, rheology and mechanical performance of frcs. *Cement and Concrete Composites*, 29(2):70–79, 2007. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.08.006>.
- Peyvandi A., Soroushian P., y Jahangirnejad S. Enhancement of the structural efficiency and performance of concrete pipes through fiber reinforcement. *Construction and Building Materials*, 45:36–44, 2013. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.084>.
- Song P. y Hwang S. Mechanical properties of high-strength steel fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 18(9):669–673, 2004. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.027>.
- Soulioti D., Barkoula M., Paipetis A., y Matikas T. Effects of fibre geometry and volume fraction on the flexural behaviour of steel-fibre reinforced concrete. *Strain*, 47:e535–e541, 2009. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2009.00652.x>.
- Svec O. y Zirgulis G. Influence of formwork surface on the orientation of steel fibers within self-compacting concrete and on the mechanical properties of casting structural element. *Cement and Concrete Composites*, 50:60–72, 2014. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.12.002>.
- Zandi Y., Husem M., y Pul S. Effect of distribution and orientation of steel fiber reinforced concrete. En *Proceedings of the 4th WSEAS international conference on Energy and development - environment - biomedicine*, páginas 260–264. 2011.