

## ANÁLISIS ESTOCÁSTICO DE TUBOS DE HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO: EFECTO DE LA DISTRIBUCIÓN Y ORIENTACIÓN DE LAS FIBRAS EN LA CAPACIDAD RESISTENTE DEL TUBO

Facundo L. Ferrado<sup>a</sup>, Mario R. Escalante<sup>a,b</sup> y Viviana C. Rougier<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>GIMCE, Facultad Regional Concepción del Uruguay, Universidad Tecnológica Nacional, Ing. Pereyra 676, 3260 Concepción del Uruguay, Argentina, ferradof@frcu.utn.edu.ar, rougierv@frcu.utn.edu.ar, escalantem@frcu.utn.edu.ar

<sup>b</sup>Facultad Regional Concordia, Universidad Tecnológica Nacional, Salta 277, 3200 Concordia, Argentina

**Palabras Clave:** hormigón reforzado con fibras de acero, tubos de drenaje, análisis estocástico, simulación numérica.

**Resumen.** El hormigón reforzado con fibras (HRF) se usa actualmente en una amplia rama de aplicaciones. Como material de refuerzo, el uso del HRF en tubos de drenaje como sustitución parcial o total de armaduras de acero podría tener un impacto positivo en la optimización del producto en la industria del prefabricado. Es conocido que la adición de fibras en el hormigón provee ventajas tanto desde el punto de vista técnico como económico. Desde el punto de vista técnico, se consigue una mejora sustancial de algunas de las propiedades del hormigón, especialmente con el agregado de fibras metálicas. El uso de fibras también contribuye económicamente, ya que permite ahorrar en operaciones de ensamble y colocación del refuerzo tradicional de armaduras y reduce también la mano de obra utilizada, uso de equipamientos y riesgos asociados. El principal efecto del agregado de fibras es el del control del proceso de fisuración, que resulta en un aumento significativo de la tenacidad del compuesto, así como también, en beneficios adicionales relativos a su resistencia. Sin embargo, la distribución y orientación de las fibras, en relación a un plano de fisura son importantes a los efectos de optimizar sus beneficios. En este trabajo, se utiliza un enfoque probabilístico para estudiar el efecto de la distribución y orientación de las fibras en la matriz de hormigón, sobre el comportamiento mecánico de los tubos de hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA). El HRFA es considerado un material compuesto con una matriz de hormigón y fibras cortas con diferentes orientaciones distribuidas en su volumen.

El modelo numérico, en el cual el HRFA se modela como un compuesto homogéneo equivalente (macro escala), se resuelve mediante el método de elementos finitos asociado con el método de Monte Carlo a fin de llevar a cabo un análisis estocástico. El efecto de distribución de las fibras se tiene en cuenta modificando las propiedades del compuesto homogéneo de acuerdo a la fracción de volumen de fibras en cada elemento finito. Un criterio similar se utiliza para tener en cuenta la orientación de las fibras. Finalmente, se discuten los resultados numéricos obtenidos para diferentes dosificaciones de fibras agregadas, los cuales se muestran a través de distintos gráficos y tablas comparativas.

## 1. INTRODUCCIÓN

La importancia de contar con modelos numéricos para el estudio del comportamiento mecánico del HRF en diferentes elementos estructurales, se refleja en la gran cantidad de publicaciones científicas que muestran los esfuerzos de los investigadores en las últimas décadas por estudiar el comportamiento fenomenológico de este material. Debido al considerable costo asociado a los requerimientos experimentales resulta de gran importancia realizar simulaciones numéricas que permitan un mejor entendimiento de su comportamiento. En particular, el HRFA se ha ido usando cada vez más en las últimas cuatro décadas en elementos estructurales que requieren buena tenacidad. En la literatura técnica se encuentran numerosos trabajos sobre campañas experimentales que permiten conocer mejor el comportamiento mecánico de este material.

En términos de modelado numérico, los variados modelos propuestos para simular el comportamiento mecánico del HRF se dividen en dos grandes grupos. En el primer grupo, el modelado se hace considerando al HRF como un compuesto de dos fases, en otras palabras, se realiza a través de propiedades micromecánicas de los componentes de este compuesto: la matriz de hormigón por un lado y las fibras por otro. El segundo grupo considera este material como de una única fase, siendo modelado a través de leyes constitutivas del grupo (teorías de homogenización). Todos ellos sin embargo, debido a la variedad de parámetros que afectan el comportamiento del HRF, como por ejemplo, la pérdida de adherencia en la interface entre los dos materiales (fibra – matriz), la orientación de las fibras y su distribución aleatoria, usan diferentes simplificaciones.

Una dificultad importante en la predicción del comportamiento postfisuración del HRFA es que el comportamiento del material en un ensayo de un espécimen puede diferir del comportamiento de un elemento de una estructural real. Está ampliamente descrito en la literatura que los procedimientos de colado y las formas estructurales particulares pueden resultar en orientaciones predominantes de fibras. Una orientación predefinida de las fibras de acero en un ensayo de un espécimen, puede resultar en una sobrestimación de las propiedades mecánicas post-fisuración del HRFA, comparado con especímenes con igual proporción de fibras pero con una orientación de fibras en forma aleatoria. Por esta razón, es aún necesario el desarrollo de nuevos modelos que puedan considerar y reproducir la influencia de los parámetros en el comportamiento del compuesto, y que tengan en consideración la forma particular del elemento estructural analizado.

Comúnmente, las fibras que se utilizan con fines estructurales son las de alto módulo de elasticidad (acero, vidrio, carbono) mientras que las de bajo módulo son usadas con otros fines. Las fibras estructurales más populares son las de acero (Zerbino, 2004; Vandewalle, 2006). Las mejoras mecánicas obtenidas con la incorporación de fibras están ligadas al proceso mediante el cual la carga es transmitida de la matriz a las fibras y el efecto de costura de fisuras, el mecanismo que contribuye principalmente es el de arrancamiento de las fibras. Este es el comportamiento deseado y se lo prefiere antes que la rotura de las fibras (Caverzan, et al., 2012).

En términos generales, los modelos constitutivos utilizados para HRF se pueden clasificar en macro-modelos y micro-modelos (Rougier y Luccioni, 2007; Luccioni et al., 2012; Luccioni y Rougier, 2010, 2011, 2013). En los macro-modelos se representa al material como un material homogéneo equivalente con propiedades promedio. Tienen la ventaja de que están desarrollados en una escala congruente con la escala de análisis estructural. En general, están basados en enfoques fenomenológicos en los que las leyes constitutivas se obtienen a partir de bases termodinámicas y/o ensayos de laboratorio. Muchos de los trabajos recientes presentan la modelación numérica de HRF utilizando modelos originalmente desarrollados para hormigón

como el modelo de micro-planos (Liu, et al., 2009), modelos multifisuras distribuidas (Chalioris y Karayannis, 2009), modelos de fisuras discretas, modelos plásticos como el modelo de Willam-Warnke (Özcan, et al., 2009), modelos de hormigón confinado (Tokgoz y Dunder, 2010), modelos no lineales calibrados con resultados experimentales de ensayos de compresión y tracción (Campione y Mangiavillano, 2008) u obtención del comportamiento uniaxial mediante análisis inverso (Santos, et al., 2008). En otros trabajos se desarrollan modelos de daño continuo simples basados en resultados experimentales con distintos volúmenes de fibras y velocidades de deformación (Wang, et al., 2008). En ningún caso, estos modelos incluyen la modelación explícita de la influencia de la adición de fibras, su proporción ni orientación.

Uno de los factores que mas influencia tiene en el comportamiento de un elemento estructural, es la distribución del refuerzo en el material. Si el HRFA es comparado con hormigón reforzado convencionalmente, la principal diferencia es la incertidumbre y la imprevisibilidad de la localización y la orientación del refuerzo en el mismo. De hecho, las fibras están distribuidas aleatoriamente en el hormigón y su posición espacial puede estar influenciada por numerosos factores. Estudios experimentales han mostrado que existe una fuerte conexión entre la distribución de las fibras, la trabajabilidad y las propiedades mecánicas del HRFA (Ferrara and Meda, 2006). A partir de un gran número de series de ensayos, se observó que la resistencia a la tracción por flexión equivalente es proporcional al número efectivo de fibras que atraviesan la fisura (Dupont, 2003).

La deformación y las propiedades resistentes de los elementos estructurales de HRFA fisurados y no fisurados están afectadas por la distribución de las fibras en términos de tres aspectos principales: 1) la cantidad de fibras que atraviesan un plano de fisura; 2) la uniformidad de la distribución de las fibras a través de la sección transversal; 3) la orientación de las fibras correspondientes al eje longitudinal del elemento. Aunque hay métodos analíticos para predecir el número de fibras por sección transversal de un elemento estructural, la mayoría de ellos están basados en la suposición de que la distribución de las fibras es homogénea, sin considerarse la segregación.

Además de la cantidad de fibras, la distribución a través de una sección particular es importante. La eficiencia de las fibras se reduce, si éstas no están distribuidas uniformemente o si están concentradas en ciertas regiones, donde no existen tensiones de tracción que necesiten ser transferidas. Por otro lado, Sthali, et.al (2008) observaron que la segregación de fibras conduce a una mucho mayor resistencia a la flexión que la esperada debida solamente al alineamiento de fibras, al menos en cuanto las fibras segregadas estén localizadas a lo largo de la parte traccionada de la viga.

La efectividad de las fibras en el plano de fractura es en gran parte influenciada por la orientación de las fibras. Existe una correlación entre la resistencia a la flexión y el alineamiento de las fibras: mejor alineamiento de fibras conduce a una mayor resistencia a la flexión (Stahli, et.al.,2008). El análisis de las propiedades de vínculo entre las fibras y el hormigón muestran que la máxima fuerza de arrancamiento tiene que ser aplicada a las fibras con un ángulo de inclinación de entre 0 y 20 grados (Robins, et. al., 2002). Además, las fibras orientadas casi paralelas al plano de fisura, no tienen contribución en la transmisión de tensiones. La orientación promedio de las fibras es comunmente caracterizada a través del llamado numero de orientación el cual varía de 0.0 a 1.0 para fibras paralelas y ortogonales a la sección transversal analizada respectivamente. Numeros de orientación grandes no solo proveen propiedades mejoradas, sino que inducen a una menor dispersión del desempeño, lo cual puede ser un aspecto de mayor importancia para los propósitos de diseño (Laranjeira et.al., 2011) .

## 2. USO DEL HRFA EN TUBOS DE HORMIGÓN

Los tubos de hormigón son el sistema más eficaz, económico y ecológico para las redes de sistemas sanitarios. Entre sus principales bondades como elemento estructural se puede enumerar su buena respuesta ante cargas dinámicas y de impacto, adecuada flexibilidad ante eventuales movimientos de terreno mediante el uso de juntas de dilatación y un mantenimiento mínimo una vez puestos en servicio.

La utilización de tubos de hormigón de entre 400 mm y 1200 mm de diámetro es la opción más difundida en obras de drenajes urbanos debido a su durabilidad y eficiencia estructural. De hecho, algunos acueductos de hormigón construidos por los Romanos hace unos 2000 años están todavía en uso, prueba de que la infraestructura de drenaje basada en hormigón reúne una durabilidad adecuada junto con una buena eficiencia estructural (Peyvandi et al, 2013).

La utilización de HRFA para la fabricación de tubos de hormigón implica una serie de mejoras relacionadas al desempeño de este nuevo material, además de la ventaja de reducción de costo y tiempo que se logra al suprimir o disminuir la utilización de mallas de acero las que requieren un doblado especial y uso de maquinaria específica para su colocación. (Mohamed et al, 2014).

El efecto más importante en el comportamiento mecánico del hormigón, debido a la presencia de las fibras, se manifiesta en la resistencia a la tracción post-fisura la cual, a su vez afecta a muchas otras propiedades mecánicas como la adherencia de armaduras, la resistencia al corte, la fatiga, etc. (Massicote, 2001). En relación al comportamiento a tracción del HRFA cabe remarcar que las fibras rigidizan sensiblemente la respuesta en fase pre-fisura respecto a un hormigón tradicional y, de forma destacada, aportan una capacidad de resistencia residual post-fisura debida al efecto de cosido que logran las fibras entre los labios de las fisuras (Mármol Salazar, 2010).

De hecho, si se adiciona un 1.5 % en volumen de fibras a hormigones o morteros se obtienen incrementos de entre un 30-40 % en la resistencia a la tracción (ACI 544.1R-96, 2009). En lo que respecta a la resistencia a flexión, el adicionar fibras de acero significa un aumento considerable e incluso mayor al experimentado en tracción debido al comportamiento dúctil del HRFA en la zona fisurada por tracción como consecuencia del desarrollo de resistencias residuales (Hannant, 1978).

Por el contrario, en general la adición de fibras al hormigón no acarrea un aumento de importancia en la resistencia a compresión del hormigón (Yazici et al, 2007).

## 3. MODELADO DEL MATERIAL COMPUESTO HRFA

A diferencia de lo que ocurre a compresión, el comportamiento a tracción del HRFA dista mucho en relación al del hormigón convencional. Es por ello, que uno de los retos más importantes es desarrollar un modelo de ecuación constitutiva que permita caracterizar adecuadamente el comportamiento a tracción de dicho material.

El HRFA debe ser entendido entonces como un hormigón que incluye en su composición fibras cortas y discretas, distribuidas aleatoriamente en su masa, lo cual confiere al material una gran anisotropía además de un comportamiento no lineal. Una vez que el hormigón ha fisurado, la pérdida de adherencia y el arrancamiento (pull-out) de las fibras disipa una mayor energía, lo que conduce a un importante incremento de la tenacidad (Barros and Figueiras, 1999).

A su vez se debe considerar por un lado al HRFA dentro del rango elástico de deformaciones y, de manera diferenciada, su comportamiento una vez superado el límite elástico. Las estructuras de HRFA se deben calcular mediante un análisis plástico que permita aprovechar la mayor

capacidad de redistribución de esfuerzos proporcionada por la contribución de las fibras. No obstante, no se conoce aún un modelo constitutivo relativo al comportamiento a tracción del HRFA que se imponga por sobre los demás. (Álvarez, et al 2010)

### 3.1. Modelo homogéneo equivalente

Una aproximación para la simulación del HRFA es considerar al mismo como un material homogéneo, lo que entre otras cosas reduce su costo computacional y la cantidad de variables involucradas en la formulación del modelo.

El modelo de material homogéneo equivalente que se utiliza es un modelo de hormigón con idénticas propiedades elásticas y no lineales de compresión que aquel que compone el HRFA pero con una curva de endurecimiento/ablandamiento en tracción modificada debido a la contribución de las fibras. La curva que representa el comportamiento a tracción del HRF se puede obtener de ensayos de tracción directa, indirectamente de ensayos de flexión o alternativamente en forma numérica. Para ello, se recurre a un "modelo de daño plástico", cuyos fundamentos básicos permiten simular el comportamiento multiaxial del hormigón considerando el fenómeno de degradación de rigidez producido a partir del comienzo del proceso de fisuración, con el objeto de reproducir con mejor aproximación el comportamiento inelástico del hormigón (Oller et. al, 1988).

### 3.2. Modelos de daño-plasticidad

Experimentalmente se ha observado que el mecanismo de colapso en materiales friccionales tales como hormigones, está precedido por un proceso disipativo no lineal caracterizado por la concentración de deformaciones en bandas de espesor muy pequeño en comparación con las dimensiones globales de la estructura. En ellas, se concentran procesos irreversibles de degradación y disipación de energía (daño-plasticidad) mientras que el resto del sólido experimenta descarga elástica. La aparición de este mecanismo de localización de deformaciones implica directa o indirectamente el inicio del proceso de falla del material, de allí la importancia de disponer de modelos numéricos capaces de simular eficientemente el fenómeno. Las bandas con deformaciones altamente localizadas pueden manifestarse bajo diversas formas entre las cuales se hallan los procesos de fisuración en estructuras construidas a base de morteros cementicios (Sanchez, 2006).

Un modelo constitutivo de daño-plasticidad para la modelación del hormigón reforzado con fibras permite tomar las cualidades de dos mecanismos de falla: por el lado del mecanismo de plasticidad permite almacenar deformaciones inelásticas (permanentes) asociadas a un proceso de carga o descarga del material, y por el lado del mecanismo de daño, permite que se genere un deterioro de las constantes elásticas con base en la ley de evolución de la variable de daño (Caicedo Silva, 2010).

En un trabajo anterior (Ferrado et al.,2015) los autores abordaron el problema del estudio del comportamiento mecánico de tubos de HRFA considerando un modelo de HRFA como un único material homogéneo equivalente, el cual sobreestima la capacidad resistente del tubo en mayor medida cuanto mayor es la cantidad de fibras incorporada. La simulación se llevó a cabo mediante la utilización de código de elementos finitos implícito "Plastic crack dynamic (PLCD)" (PLCD, 2015). En este trabajo se adopta el mismo enfoque de material homogéneo equivalente aunque diferenciando en el MEF las propiedades en cada elemento de la malla de acuerdo a la cantidad de fibras que lo atraviesan, es decir, la cuantía de fibras se obtiene para cada elemento y con ella se calculan las propiedades del material homogéneo equivalente.

En ambos trabajos, se utiliza para el hormigón el modelo de plasticidad modificado con daño (Luccioni, Rougier, 2005). El comportamiento plástico se obtiene como una generalización de la teoría clásica de la plasticidad. Como propiedades se utilizan las propiedades elásticas del hormigón de base y modificando solamente la curva de endurecimiento en tracción utilizada para definir el umbral plástico.

#### 4. DISTRIBUCIÓN Y ORIENTACIÓN DE LAS FIBRAS

En la presente sección se aborda el problema de la distribución y orientación de las fibras en la matriz de hormigón dentro del tubo. Sea

$$V = \{(\rho, \alpha, z) \in \mathbb{R}^3 / R_{int} \leq \rho \leq R_{int} + e, 0 \leq \alpha \leq 2\pi, 0 \leq z \leq L\}, \quad (1)$$

la región del espacio ocupada por el tubo de longitud  $L$ , radio interior  $R_{int}$  y espesor  $e$ . La ubicación de cada fibra de longitud  $l_f$  queda determinada por las coordenadas de su punto medio  $M_f$  y su vector dirección  $\vec{v}_f$ .

Las coordenadas del punto medio expresadas en coordenadas cilíndricas,  $(\rho, \alpha, z)$ , dan su posicionamiento en el tubo, y el par de ángulos  $(\Theta, \Phi)$ , con  $0 \leq \Theta \leq \pi$  y  $0 \leq \Phi < \pi/2$ , determinan la orientación de la fibra.

Sea  $(\Omega, \mathcal{F}, P)$  el espacio de probabilidades, donde  $\Omega$  es el espacio muestral,  $\mathcal{F}$  es una  $\sigma$ -álgebra sobre  $\Omega$  y  $P$  la medida de probabilidad. Se define la variable vectorial aleatoria  $\theta : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^5 \sim U(0, 1)$ . Luego, la posición y orientación de cada fibra  $(\omega)$  estará dada por  $(\rho, \alpha, z, \Theta, \Phi)_{(\omega)}$  con

$$\begin{aligned} \rho(\omega) &= R_{int} + e\theta_1(\omega), \\ \alpha(\omega) &= 2\pi\theta_2(\omega), \\ z(\omega) &= L\theta_3(\omega), \\ \Theta(\omega) &= \pi\theta_4(\omega), \\ \Phi(\omega) &= \pi\theta_5(\omega), \end{aligned} \quad (2)$$

para cada  $\omega \in \Omega$ .

##### 4.1. Distribución de las fibras

La distribución de cada fibra en el tubo se realiza mediante un sorteo aleatorio, realizaciones de la variable aleatoria  $\theta(\omega)$ . Sea  $P_{1f} = M_f + \frac{1}{2}\vec{v}_f l_f$  y  $P_{2f} = M_f - \frac{1}{2}\vec{v}_f l_f$  las coordenadas de los extremos de cada fibra, con  $l_f$  la longitud de la fibra; se sortea la ubicación de una fibra y se verifica que  $\{M_f, P_{1f}, P_{2f}\} \subset V$ , condición suficiente por ser  $V$  un dominio convexo. De no estar se descarta esa realización y se continua este proceso hasta sortear la totalidad de fibras correspondiente a la dosificación de fibras deseada.

Luego, a fin de determinar la cuantía de fibras, se considera una porción media del tubo de espesor 10mm y sección transversal correspondiente a la sección media del mismo.

En las figuras 1 y 2 se ilustra respectivamente, un ejemplo de distribución de las fibras en el tubo y la fracción del mismo correspondiente a la sección media considerada. Por otra parte, en la figura 3, se puede observar longitudes diferentes de fibras en la sección ejemplificada debido a las orientaciones de las fibras que están representadas en proyección sobre la sección transversal considerada.

Se tiene en cuenta únicamente las fibras que, total o parcialmente, están en el fragmento de tubo analizado; y de ellas, sólo la parte de la fibra de longitud  $l_f^c$  que está dentro del mismo. Luego, en cada elemento de la malla de elementos finitos se calcula la cantidad de fibras (en

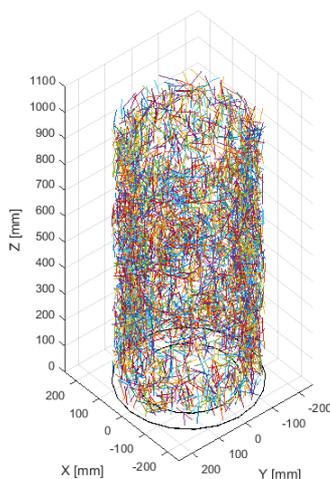


Figura 1: Distribución aleatoria de fibras en un tubo de hormigón

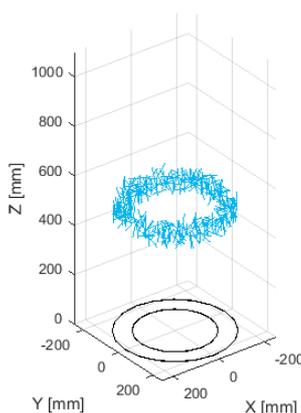


Figura 2: Fibras contenidas en una porción media de tubo analizada

volumen,  $vol_f^e$ ) que contienen y se determina la fracción de volumen de fibras en cada elemento  $10Area^e/vol_f^e$ . Finalmente, con la fracción de volumen de fibra aportado a cada elemento se obtienen las propiedades del material equivalente homogéneo correspondiente al elemento, aplicando la teoría clásica de mezclas.

La Fig. 4 muestra el mallado de elementos finitos y los segmentos de fibras localizados en el fragmento de tubo.

#### 4.2. Orientación de las fibras

Para analizar el efecto de la orientación de las fibras, se introduce el ángulo promedio de fibras por elemento  $\bar{\beta}^e$  dado por

$$\bar{\beta}^e = \frac{\sum_{i=1}^{N_f} \Theta_i^e l_i^e}{\sum_{i=1}^{N_f} l_i^e}, \quad (3)$$

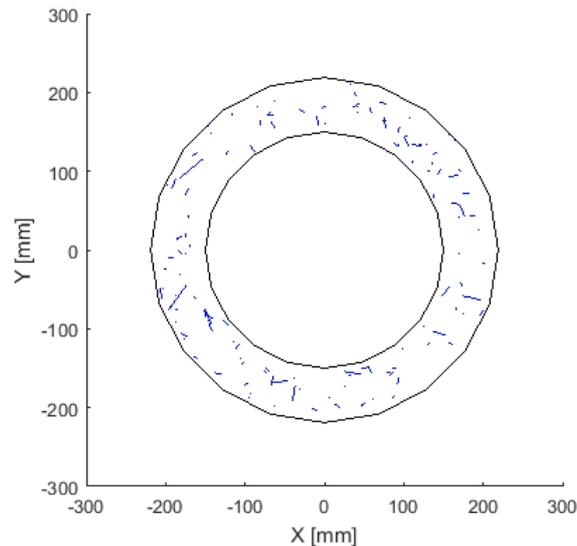


Figura 3: Distribución de fibras en la porción media del tubo.

en donde  $N_f$  es el número de fibras,  $l_i^e$  es la longitud de la fibra  $i$  en un elemento y  $\Theta_i^e$  la orientación correspondiente (en proyección).

A partir de estos ángulos promedios y con la cuantía de fibras de cada elemento obtenidas de acuerdo a lo explicado anteriormente, se define para cada elemento finito un material equivalente utilizando la teoría clásica de mezclas, y orientación  $\bar{\beta}^e$  con respecto al sistema de referencia global.

## 5. SIMULACIÓN NUMÉRICA

Se realizaron simulaciones numéricas del ensayo de tres aristas según los lineamientos de la norma ASTM C497. En la Figura 5 se muestra la disposición de los elementos para la ejecución del ensayo. Las dimensiones adoptadas son las siguientes:  $R_{int} = 150\text{mm}$ , espesor de pared tipo C según norma ASTM C76 ( $e = 69\text{mm}$ ).

En un trabajo anterior (Ferrado et al., 2015) se utilizó un macromodelo para el HRFA, donde se representó el material como un material homogéneo equivalente con propiedades promedio según sus componentes (hormigón y fibras). Dicho modelo fue implementado en el código de elementos finitos implícitos PLCD (PLCD,2015). Se utilizaron elementos finitos triangulares de tres nodos y seis grados de libertad en estado plano de deformaciones.

A los fines de analizar la influencia de la distribución aleatoria de las fibras, se utiliza el método de Monte Carlo realizándose 500 simulaciones. El procedimiento seguido para cada simulación comprende los siguientes pasos

- Se sortea una distribución aleatoria de las fibras.
- Se determinan las fibras que total o parcialmente están en el fragmento de tubo correspondiente a la sección media y espesor 10 mm y de ellas se considera sólo la parte, de longitud  $l_i$  que están dentro del fragmento de tubo.
- Para cada elemento de la malla de elementos finitos se calcula la cantidad de fibras (en volumen,  $\text{vol}_f^e$ ) que contienen y se determina la fracción de volumen de fibras en cada elemento  $\text{vol}_f^e/10\text{Area}^e$ .

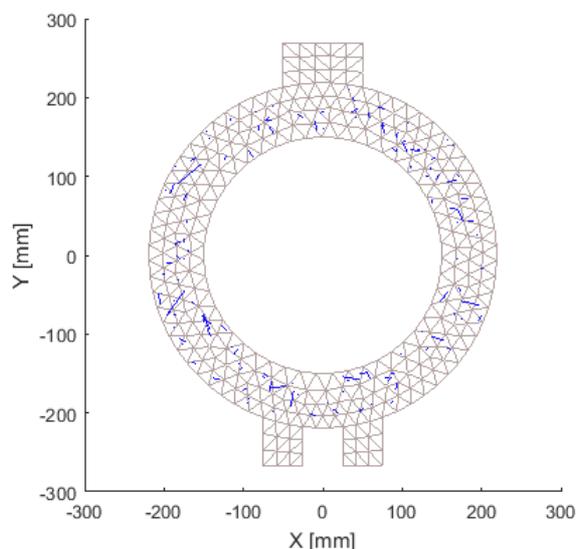


Figura 4: Malla de elementos finitos y distribución de fibras: sección transversal media.

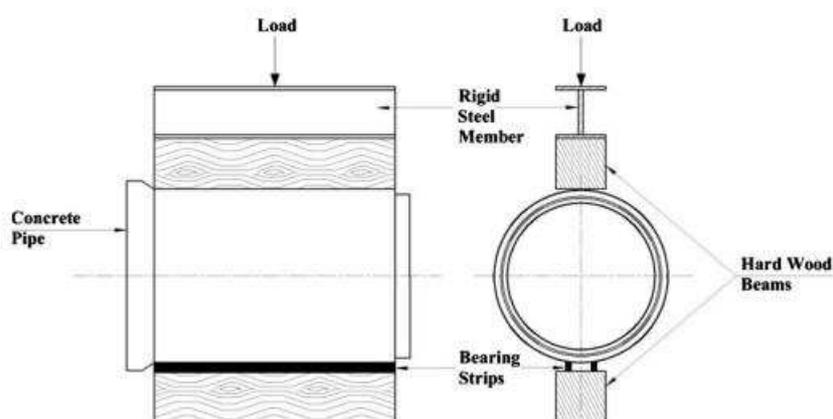


Figura 5: Disposición de Ensayo de Tres Aristas según ASTM C497

- Con la fracción de volumen de fibra aportado a cada elemento se calculan las propiedades del material equivalente homogéneo correspondientes al elemento aplicando teoría clásica de mezclas.

The strength and elastic properties of bricks, mortar and brick masonry panels were evaluated through testing (?) and they are also included in Table ??.

### 5.1. Resultados Numéricos

Se consideraron dos dosificaciones diferentes de fibras por  $m^3$  de hormigón:  $20 \text{ kg}/m^3$  y  $40 \text{ kg}/m^3$ . Las características de las fibras utilizadas en la simulación numérica están dadas en la Tabla ??

Por otra parte, a fin de contrastar los resultados numéricos con los de otros autores, se utilizó una matriz de hormigón de similares características a las utilizadas en el trabajo de Mohamed et. al (2014), las cuales se indican en la Tabla ??

En la figura 6 a) y b) se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones Monte Carlo.

Características	
Longitud (mm)	50
esbeltez	80
Módulo de elasticidad, (MPa)	210000
Coefficiente de Poisson,	0.3
Resistencia a tracción, (MPa)	155
Resistencia a compresión, (MPa)	155

Tabla 1: Propiedades mecánicas y geométricas de las fibras de acero.

Propiedades	
Módulo de Elasticidad, E (MPa)	35790
Coefficiente de Poisson, $\nu$	0.20
Resistencia última a tracción, $\sigma_{ut}$ (MPa)	0.54
Resistencia última a compresión, $\sigma_{uc}$ (MPa)	45.80
Tensión umbral de fluencia, $\sigma_{fc}$ (MPa)	34.35
Relación de resistencia inicial, $R_0^p$	8.20
Variable de endurecimiento plástico, $\kappa_{comp}^p$	0.20
Energía de Fractura, (N/mm)	6
Energía de Aplastamiento, (N/mm)	365.5
Criterio de Fluencia	Lubliner-Oller
Criterio de Potencial	Lubliner-Oller

Tabla 2: Propiedades mecánicas de la matriz de hormigón.

Los histogramas corresponden a la carga de falla del tubo, indicándose en cada caso además, sus respectivas medias y desviaciones estándar. Puede observarse, de estos gráficos, que la distribución de las fibras influye de manera significativa en la capacidad resistente del tubo.

Como se ve, este modelo aproxima mejor los resultados obtenidos previamente con un modelo de material único homogéneo equivalente.

La Figura 7 ilustra la convergencia de la media acumulada y desviación estándar acumulada. De ella puede observarse que 500 simulaciones alcanzan para obtener con suficiente aproximación los estadísticos de los resultados.

Finalmente, los valores numéricos de las cargas de falla obtenidos mediante el enfoque aquí presentado son contrastados con datos experimentales de otros autores (Mohamed et al., 2014) y con aquellos obtenidos previamente mediante un modelo de material único homogéneo equivalente (Ferrado et al., 2015). Ver Tabla 3.

En el modelo numérico se utilizaron las propiedades de las mezclas utilizadas por Mohamed et al. (2014).

## 6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se propuso una metodología para analizar el efecto de la distribución y orientación de las fibras de acero en el comportamiento mecánico de tubos de HRFA. Se utilizó el método de elementos finitos asociado al método de Monte Carlo para realizar un análisis estocástico de la respuesta mecánica.

La influencia sobre la carga de rotura, de la distribución de las fibras en la matriz de hor-

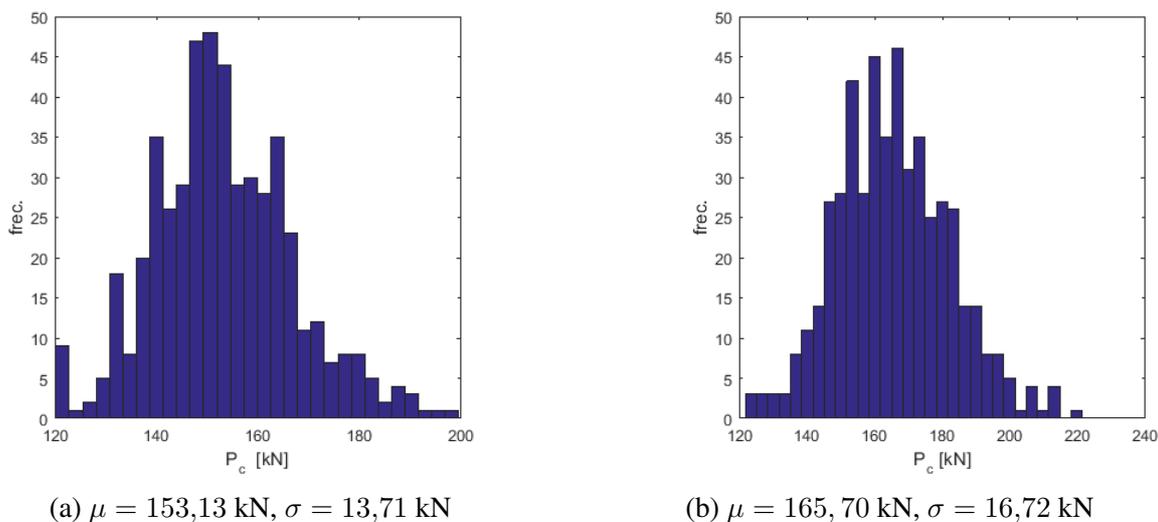


Figura 6: Histogramas correspondientes a la carga de rotura para dosificaciones de fibras de a)  $20 \text{ kg/m}^3$  y b)  $40 \text{ kg/m}^3$ .

Dosis de fibras	(a) $P_f$ Experim. (N/mm)	(b) $P_f$ Mod homog. (N/mm)	(c) $P_f$ Distr. Aleat. (N/mm)
$20 \text{ kg/m}^3$	151	160	153.13
$40 \text{ kg/m}^3$	160	171	165.70

Tabla 3: Tabla comparativa de cargas de falla: (a) Mohamed et al. (2014), (b) Ferrado et al. (2015), (c) Presente trabajo.

migón se tuvo en cuenta a partir de asignar, en el MEF, a cada elemento finito la cuantía de fibras de acuerdo a la distribución aleatoria de las mismas. Los resultados obtenidos mostraron una mejora en la aproximación, en relación al modelo de material único homogéneo equivalente. Además, se propuso para considerar el efecto de la orientación de las fibras, que las mismas en cada elemento finito están orientadas según un ángulo promedio ponderado, y con esa orientación dominante se obtienen las propiedades del material homogéneo equivalente. A la fecha del presente trabajo, los autores se encuentran abocados a la implementación y obtención de resultados de esta última alternativa. Como trabajos futuros, dentro de la presente investigación en curso, se pretende desarrollar un modelo 3d que tenga en cuenta estos factores y finalmente utilizar un micromodelo que considere explícitamente las fibras como entidades discretas e independientes de la pasta cementicia, teniendo en cuenta así su interacción con la matriz considerando fenómenos de arrancamiento y otros que se dan en el vínculo matriz-fibra.

## REFERENCIAS

- Álvarez A., Alvarez P., De la Fuente A., y Aguado de Cea A. Comparative analysis of constitutive models of fibre reinforced concrete. *Revista trimestral de Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural*, 61, 2010.
- Barros J. y Figueiras J. Flexural behavior of SFRC: testing and modeling. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 11(4):331–339, 1999.

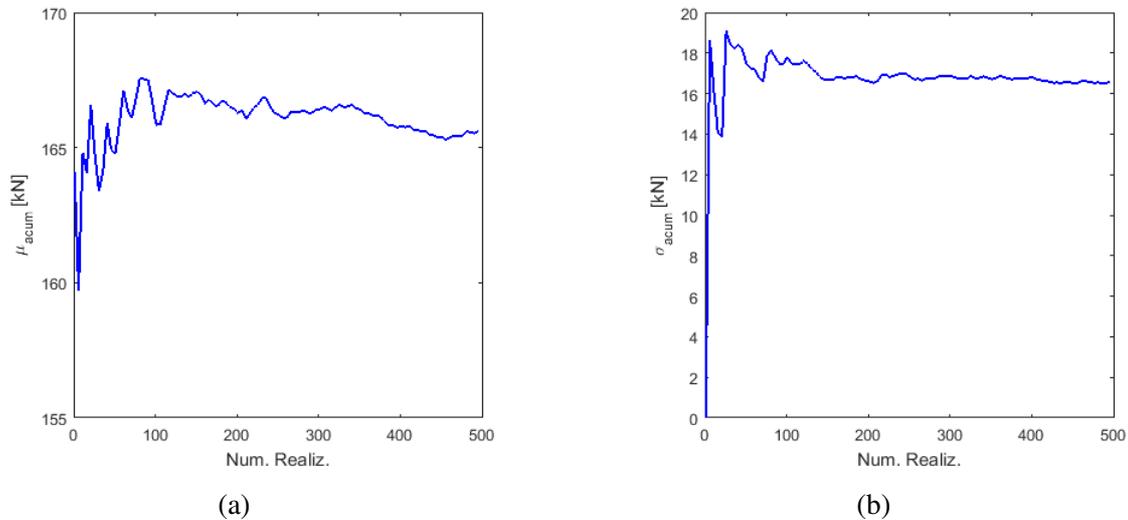


Figura 7: Diagramas (a) Num. Realiz. vs. media acumulada , (b) Num.de Realiz. vs. Desviación estándar acumulada

Caicedo Silva M. *Modelación numérica con elementos finitos del concreto reforzado con fibras cortas mediante un modelo constitutivo de daño-plasticidad*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, 2010.

Campione G. y Mangiavillano M. L. . Fibrous reinforced concrete beams in flexure: Experimental investigation, analytical modelling and design considerations. *Engineering Structures*, 30:2970–2980, 2008.

Caverzan A., Cadoni E., y di Prisco M. Tensile behaviour of high performance fibre-reinforced cementitious composites at high strain rates. *International Journal of Impact Engineering*, 45(28-38), 2012.

Chalioris C.E. y Karayannis C.G. Effectiveness of the use of steel fibres on the torsional behaviour of flanged concrete beams. *Cement & Concrete Composites*, 31:331–341, 2009.

Dupont D. *The use of steel fibres as reinforcement in structural concrete*. Tesis de Doctorado, Catholic University of Leuven, 2003.

Ferrado F., Escalante M., y Rougier V. Numerical modeling of the mechanical behaviour of steel fiber reinforced concrete pipes. En *XXXVI Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, CILAMCE 2015*. 2015.

Ferrara L. y Meda A. Relationships between fibre distribution, workability and the mechanical properties of sfrc applied to precast roof elements. *Materials and Structures*, 39(4):411–420, 2006.

Hannant D. *Fibre cements and fibre concretes*. John Wiley & Sons Ltd, 1978.

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.

Liu H., Xiang T., y Zhao R. Research on non-linear structural behaviors of prestressed concrete beams made of high strength and steel fiber reinforced concretes. *Construction and Building Materials*, 23:85–95, 2009.

International Center for Numerical Method in Engineering & Department of Structures Strength of Materials of the Technic University of Catalonia (UPC). C. Plastic crack dynamic (plcd).

- 1998.
- Luccioni B. y Rougier V. Shear behaviour of brick-mortar interface in cfrp retrofitted or repaired masonry. *International Journal of Mechanical Science*, 52:602–611, 2010.
- Luccioni B. y Rougier V. In-plane retrofitting of masonry panels with fiber reinforced composite materials. experimental results. *Construction and Building Materials*, 25:1772–1788, 2011.
- Luccioni B. y Rougier V. Behaviour of cfrp retrofitted or repaired masonry. *Engineering Structures*, 49:360–372, 2013.
- Luccioni B., Ruano Sandoval G., Isla F., Zerbino R., y Giaccio G. A simple approach to model sfrc. *Construction & Building Materials*, 37:111–124, 2012.
- Luccioni B. Rougier V. A plastic damage approach for confined concrete. *Computers & Structures*, 83:2238–2256, 2005.
- Mármol Salazar C. *Hormigones con Fibras de Acero Características Mecánicas*. Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Madrid, 2010.
- Massicote B. Fibre reinforced concrete: a structural perspective. En *PRO 15: 5th RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC) - BEFIB' 2000*. 2001.
- Mohamed N., Soliman A., y Nehdi M. Full-scale pipes using dry-cast steel fibre-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 72:411–422, 2014.
- Oller S., Oliver J., Lubliner J., y Oñante E. Un modelo constitutivo de daño plástico para materiales friccionales. parte II: Generalización para procesos con degradación de rigidez. ejemplos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 4:433–461, 1988.
- Özcan M., Bayraktar A., Sahin A., y Turker T. Experimental and finite element analysis on the steel fiber-reinforced concrete (sfrc) beams ultimate behavior. *Construction and Building Materials*, 23:1064–1077, 2009.
- 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.
- Robins P., Austin S., y Jones P. Pull-out behaviour of hooked steel fibres. *Materials and Structures*, 35(7):434–442, 2002.
- Rougier V. y Luccioni B. Numerical assessment of frp retrofitting systems for reinforced concrete element. *Engineering Structures*, 29:1664–1675, 2007.
- Sanchez P. *Desarrollos en mecánica computacional de falla material. Aplicación a modelos de plasticidad y daño*. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional del Litoral., 2006.
- Santos S.P., Barros J.A., y Lourenço L.A. Steel fibers for the shear resistance on high strength concrete beams. En *Proceedings of the 7th RILEM International Symposium on Fibre Reinforced Concrete: Design and Applications – BEFIB*, páginas 429–439. 2008.
- Stähli P., R. C., y van Mier J. On flow properties, fibre distribution, fibre orientation and flexural behaviour of frc. *Materials and Structures*, 2008.
- Tokgoz S. y Dundar C. Experimental study on steel tubular columns in-filled with plain and steel fiber reinforced concrete. *Thin-Walled Structures*, 48(6):414–422, 2010.
- Vandewalle L. *Hybrid fiber reinforced concrete. Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties*, capítulo 9, páginas 77–82. Springer Science & Business Media, 2006.
- Wang Z.L., Liu Y., y Shen R.F. Stress–strain relationship of steel fiber-reinforced concrete under dynamic compression. *Construction and Building Materials*, 22:811–819, 2008.
- Yazici S., Inan G., y Tabak V. Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC. *Construction and Building Materials*, 21:1250–1253, 2007.
- Zerbino R. *Hormigón reforzado con fibras: propiedades y aplicaciones estructurales*, capítu-

lo 5, páginas 143–181. E. Irassar, 2005.