

Propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras metálicas

Karen E. Caballero M.

Facultad de Ingeniería civil, Universidad Tecnológica de Panamá,
karen.caballero@utp.ac.pa

Resumen: El concreto es uno de los materiales que más se utiliza en la industria de la construcción, por ende, cada vez son más los estudios que se le realizan para mejorar sus propiedades tanto químicas como mecánicas. Éste último se diferencia en que al agregar adiciones a la masa del concreto, podemos mejorar tanto la capacidad resistente como de deformación. Es por ello que la introducción de las fibras metálicas, ha hecho un gran aporte al concreto mejorando la capacidad deformable en soportes que están sometidos a esfuerzos importantes.

Palabras claves: fibras metálicas, concreto reforzado, tenacidad, deformación, tracción.

Title: Study of the mechanical properties of concrete reinforced with metal fibers.

Abstract: Concrete is one of the materials that is most used in the construction industry, therefore, more and more studies are being done to improve its properties, both chemical and mechanical. The latter differs in that adding additions to the mass of the concrete, we can improve both strength and deformation capacity. It is for this reason that the introduction of the metal fibers has made a great contribution to the concrete by improving the deformable capacity in supports that are subjected under important stresses.

Keywords: metal fibers, reinforced concrete, toughness, deformation, traction.

Tipo de artículo: original

Fecha de recepción: 21 de junio de 2016

Fecha de aceptación: 3 de julio de 2017

1. Introducción

En los últimos años se ha incrementado el uso de diferentes tipos de concretos que buscan obtener una mayor resistencia a tracción y una mejor durabilidad. Esto se debe a que el empleo del concreto como material presenta una baja resistencia a la tracción y una gran fragilidad.

Para los concretos de alta resistencia por ejemplo, una posible alternativa a esta fragilidad es el uso del concreto con fibras de acero (figura 1). Es por ello por lo que en el presente estudio, se analizan las propiedades que aportan las fibras metálicas en la masa del concreto y la mejora en la capacidad tanto resistente como de deformación.

Tal y como indica la normativa americana ACI 116R-2000 [1], el concreto reforzado con fibras es un conglomerado



Figura 1. Fibras metálicas [12].

hidráulico, generalmente de cemento Portland, áridos finos y gruesos, agua y la adición de fibras discontinuas y discretas.

Por otro lado, la adición de fibras de acero al concreto proporciona las siguientes características [11]:

- Las fibras de acero cosen las fisuras del concreto formando un puente entre los áridos gruesos, permitiendo una formación controlada de las fisuras, y llevando al concreto a un comportamiento dúctil después de la fisuración inicial, evitando así la fractura frágil.
- Mejoran la resistencia a tracción, flexión y corte, produciendo un aumento de la capacidad portante.
- Proporcionan una capacidad adicional de resistencia, debido a la redistribución del momento plástico en caso de solicitaciones localizadas.

En los estudios recientes indican que el concreto reforzado con fibras de acero aporta mayores beneficios en cuanto a la capacidad de deformación en soportes; tanto para concreto normal como para concreto de alta resistencia (e.g., [20], [19], [28], [23]). Estos estudios muestran las típicas ecuaciones constitutivas tensión – deformación del concreto en compresión, donde la inclusión de fibras de acero en su masa supone un apreciable incremento en la deformación correspondiente a la tensión pico y un substancial incremento de la tenacidad; lo que refleja un leve incremento en la capacidad resistente. La resistencia a la tracción presenta ventajas especialmente después de producirse las primeras fisuras, alcanzándose valores altos de resistencia residual. Es decir, se produce un incremento de la energía total que absorbe el material antes de alcanzar la rotura.

También se ha demostrado que la presencia de fibras de acero, retrasa el salto del recubrimiento del concreto e incrementa la capacidad de deformación, y la ductilidad en columnas de concreto sometidas a compresión simple o a esfuerzos combinados de axil y excentricidad constante. (e.g., [21], [6], [14], [29], [11]).

Por otra parte, una posible ventaja del uso de fibras metálicas en la masa del concreto en combinación con la armadura transversal es la reducción de la cuantía de armadura requerida por los códigos de diseño (e.g., [30], [11]). Sin embargo, las expresiones propuestas por los códigos no tienen en cuenta este efecto favorable de las fibras de acero (e.g., [18], [2]).

2. Materiales y proporciones

Los componentes materiales que se utilizan para la fabricación del concreto reforzado con fibras de acero son los mismos que se utilizan para el concreto convencional, lo que diferencia es la adición de la propia fibra metálica y el uso de un aditivo súper plastificante, para mejorar la trabajabilidad y ayudar a redistribuir las fibras en la masa del concreto.

Igualmente, se ha observado que para mejorar la eficacia de las fibras metálicas; la relación entre el tamaño máximo del árido grueso y la longitud de las fibras es importante, según [7], las fibras deberán envolver al árido. Los estudios indican que los resultados óptimos se consiguen cuando el tamaño máximo del árido es aproximadamente igual a la mitad de la longitud de la fibra [22]. Sin embargo, el tamaño máximo de árido grueso empleado no debe ser superior a 20mm [4]. También es importante señalar que en las investigaciones realizadas, el porcentaje de fibras máximo en base al volumen de concreto, ha sido de 3% aproximadamente; y esto se debe a la densidad que aporta dichas fibras a la masa del concreto, ya que durante su fabricación, se debe tener especial cuidado a la hora de tener una masa homogénea y fácil en su colocación [12].

Por otro lado, en la fabricación del concreto reforzado con fibras metálicas, se sugiere que el porcentaje de árido fino debe incrementarse respecto del concreto convencional; aumentando la relación *árido fino/árido grueso*.

La incorporación de las adiciones provoca una mejora de la impermeabilidad del concreto y por tanto su durabilidad; aumenta la cohesión del material y en consecuencia, también se incrementa la adherencia fibra - matriz, disminuyendo el riesgo de segregación [7].

En la tabla 1 se muestra el rango de proporciones según el tamaño máximo de árido [25], para la fabricación de un concreto reforzado con fibras metálicas, este rango coincide con la recomendación de la normativa [3].

Tabla 1. Rango de proporciones de componentes para la fabricación de concreto con fibras metálicas [25]

Componentes de mezcla		Tamaño máximo de árido (mm)		
		10	20	40
Cemento		350-600	300-530	280-415
Agua/Cemento		0.35-0.45	0.35-0.50	0.35-0.55
Porcentaje de árido fino grueso		45-60	45-55	40-55
Porcentaje del contenido de aire		4-8	4-6	4-5
Porcentaje del contenido de fibras	Fibras deformadas	0.4-1.0	0.3-0.8	0.2-0.7
	Fibras lisas	0.8-2.0	0.6-1.6	0.4-1.4

3. Propiedades mecánicas

La calidad de un concreto se define por sus propiedades mecánicas y por su durabilidad. A continuación se describen brevemente las características principales:

3.1 Resistencia a la tracción

Existen ensayos experimentales que caracterizan este parámetro. Para el ensayo de flexotracción, según la Norma [36], se fabrican probetas prismáticas de 300x300x600 (en mm); midiéndose principalmente la resistencia a la primera

fisura, la resistencia máxima y la resistencia residual. El incremento de la resistencia a la primera fisura es mínimo, y depende principalmente de la matriz, pero muy poco del contenido de fibras, de su tamaño y de las formas de ésta, y del tipo de aditivo que se emplee.

La adición de fibras metálicas, tiene como objetivo incrementar la capacidad de resistencia a tracción del concreto tras la fisuración. Al producirse las fisuras en la sección, las fibras trabajan como una costura por lo que se incrementa la capacidad de absorción de energía (Ver figura 2). Este comportamiento genera que las fibras aumenten su resistencia a la adherencia y que puedan actuar en parte, como un armado transversal.

Cabe mencionar que el aporte que realiza la adición de fibras metálicas en las expresiones de la literatura técnica, lo define como el índice de cuantía volumétrica de fibras metálicas $RI_v = v_f \cdot L_f / \phi_f$, donde v_f es el porcentaje en volumen de fibras, y L_f / ϕ_f es la longitud y el diámetro de las fibras respectivamente.

La instrucción española [17] en el Anejo 14 sección 39.4; recoge recomendaciones específicas para el uso del concreto reforzado con fibras metálicas. No detalla el tipo de fibra, siempre que se trate de fibras estructurales.

En dicha norma se presentan dos diagramas de tensión-deformación, un diagrama rectangular (figura 3) y un diagrama multilíneal (figura 4), cuya aplicación dependerá de la situación a tratar. En el caso de cálculo en rotura (ELU) se aplica de manera general el diagrama rectangular y para casos particulares que requieran más precisión; como en el caso de pequeñas deformaciones en servicio (ELS), se utiliza el modelo simplificado bilineal (definidos por los puntos A-C-D-E). Este diagrama con la resistencia adicional que proporciona el pico A-B-C permite una mejor aproximación y mayor precisión. El diagrama de tensión (σ) - deformación (ϵ) de la figura 4 está definido por la resistencia a tracción de cálculo f_{ctd} y las resistencias residuales a tracción de cálculo $f_{ctR1,d}$ y $f_{ctR3,d}$ asociadas a las deformaciones ϵ_1 y ϵ_2 en el rango de postpico.

Por otra parte, la normativa americana ACI 544.4R-1999 [5]; propone una expresión para obtener la resistencia a tracción en función de las características geométricas y mecánicas de las fibras (1).

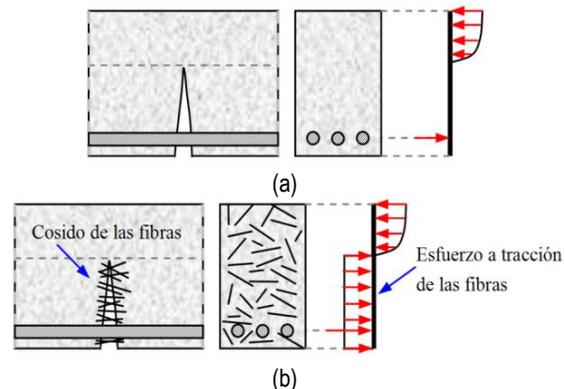


Figura 2. Distribución de tensiones [12]: (a) Concreto armado sin fibras de acero, (b) Concreto armado reforzado con fibras de acero.

$$\sigma_{cf} = 0.843f_m V_m + 425V_f / d_f \quad (1)$$

(Sistema inglés, Lb/plg²)

donde:

- σ_{cf} resistencia a tracción de la primera fisura,
- f_r esfuerzo a tracción (módulo de ruptura del mortero de concreto), se conoce también como f_L ,
- V_m volumen en fracción del concreto = $1 - V_f$,
- V_f volumen de la fracción de fibras = $1 - V_m$,
- l/d_f relación de la longitud y diámetro de la fibra.

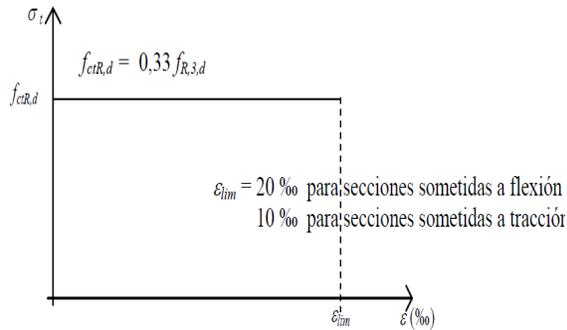


Figura 3. Diagrama de cálculo rectangular, [17].

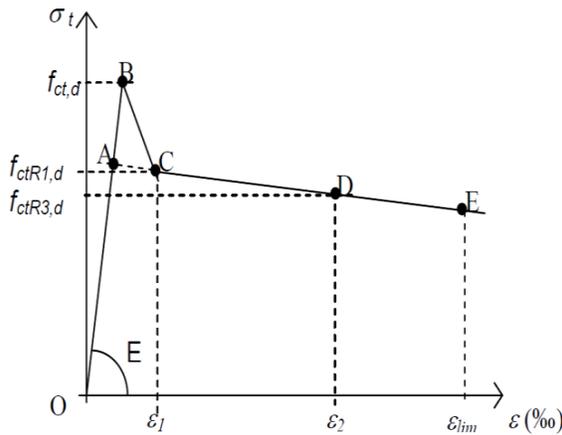


Figura 4. Diagrama de cálculo multilíneo, [17].

$$f_{ct,d} = 0,6 f_{ct,fl,d} \quad f_{ctR1,d} = 0,45 f_{R,1,d}$$

$$f_{ctR3,d} = k_1 (0,5 f_{R,3,d} - 0,2 f_{R,1,d}) \quad \epsilon_1 = 0,1 + 1000 * f_{ct,d} / E$$

$$\epsilon_2 = 2,5 / l_{cs}$$

donde:

- $f_{ct,d}$ resistencia a tracción de cálculo,
- f_L tensión correspondiente al límite de proporcionalidad,
- $f_{ct,fl,d}$ resistencia a tracción de cálculo correspondiente al límite de proporcionalidad,
- $f_{ctR1,d}$, $f_{ctR3,d}$ resistencias residuales a tracción de cálculo, asociadas a ϵ_1 y ϵ_2 en la rama post-pico.
- k_1 1 para secciones sometidas a flexión y 0.7 para secciones sometidas a tracción,
- ϵ_{lim} 20‰ para secciones sometidas a flexión y 10‰ para secciones sometidas a tracción,

l_{cs} longitud crítica (en metros) del elemento calculado, que puede determinarse por la expresión $l_{cs} = \min. (s_m, h - x)$; siendo x la profundidad del eje neutro y $h - x$ la distancia del eje neutro al extremo más traccionado, y s_m la distancia media entre fisuras. Salvo que se disponga de datos justificados se podrá utilizar para s_m los valores de la tabla A.14.1 del Anejo 14 sección 39.4.

Es importante mencionar que la expresión de [24], posteriormente modificada por [13], propone la descripción de una curva tensión- deformación a tracción del concreto con fibras (2 y 3). Dicha expresión consta de tres partes lineales; inicia con una rama ascendente hasta llegar a la tensión de tracción máxima (f_{ctf}), luego una segunda rama descendente conecta con el punto de tracción máxima hasta llegar a alcanzar una tensión residual que es constante (f_r); teniendo en cuenta que aumentará al incrementar el porcentaje de volumen de fibras metálicas en su masa. Para concretos sin fibras metálicas no existe esa tensión residual (figura 5).

$$\sigma_t = \begin{cases} \epsilon_t \cdot E_{ctf}; \epsilon_t < \epsilon_{ctf} \\ (f_{ctf} - f_r) \cdot \left[\frac{\epsilon_t - \epsilon_{ctf}}{\epsilon_{ctu} - \epsilon_t} \right] + f_r; \epsilon_{ctf} < \epsilon_t < \epsilon_{ctu} \\ f_r; \epsilon_t > \epsilon_{ctu} \end{cases} \quad (2)$$

$$\epsilon_{ctu} \cong 2 \cdot f_y \cdot \left(\frac{1}{E_s} + \frac{\rho_t}{E_0} \right) \quad (3)$$

donde:

- f_{ctf} resistencia a tracción máxima,
- f_r resistencia residual,
- ϵ_t deformación a tracción del concreto,
- ϵ_{ctf} deformación correspondiente a la resistencia de tracción máxima,
- ϵ_{ctu} deformación correspondiente a la resistencia residual,
- E_{ctf} es el módulo de deformación a tracción.

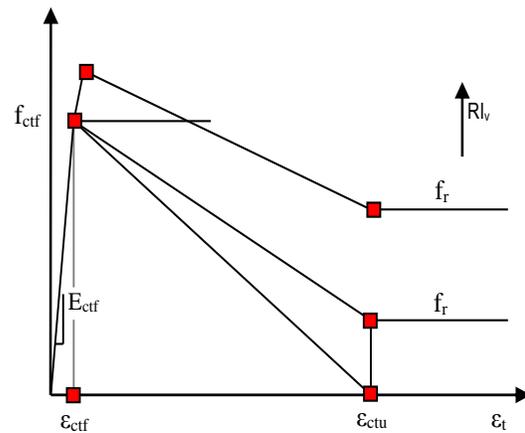


Figura 5. Curva tensión-deformación a tracción del concreto reforzado con fibras, [13].

Existen expresiones que calculan la f_r , (e.g., [13], [15]), en la que se determina una ecuación en función de las características de las fibras metálicas o la propuesta por [5].

$$f_r \cong 0.2 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot RI_v \quad (4)$$

$$f_r = 0.772 \cdot RI_v \quad (5)$$

Donde:

f_c resistencia a compresión del concreto,
 RI_v índice de cuantía volumétrica de fibras metálicas.

3.2 Resistencia a compresión

Se puede llegar a obtener un incremento de la resistencia a compresión entre un 0% y un 15%, con un volumen de 1.5% de fibras en la masa del concreto [3].

Durante las últimas décadas, se ha incrementado el estudio del concreto convencional con la adición de fibras de acero [10]. A partir del análisis experimental de ensayos de probetas cilíndricas sometidas a compresión; se obtienen las típicas ecuaciones constitutivas tensión – deformación del concreto en compresión, donde la inclusión de fibras de acero mejora el comportamiento tanto en los valores de tensión pico, como en la rama de descenso; esto se refleja en un incremento de la energía total que absorbe el material antes de alcanzar la rotura. (e.g., [20], [19], [28], [1]) (Tabla 2).

Se modifica la expresión propuesta [19] y proponen una nueva expresión que genera la curva de tensión-deformación para concreto con fibras de acero, para concreto normal y de alta resistencia [16]. Plantean expresiones que relacionan el aporte de las fibras metálicas con respecto a la resistencia a compresión del concreto, a la deformación ocurrida en la resistencia máxima a compresión y el módulo de elasticidad del concreto (6).

$$f_{cf} = f_c + 3.5 \cdot RI_w; \quad \epsilon_{of} = \epsilon_o + 446 \times 10^{-6} \cdot RI_w; \quad (6)$$

$$E_{cf} = E_c + 3.105 \cdot RI_w$$

Los autores señalados, definen como índice de cuantía volumétrica de fibras metálicas ($RI_w = w_f \cdot L_f / \phi_f$), en términos de fracción de peso en fibras (w_f), que es aproximadamente igual a 3.25 veces en función de la fracción en volumen de fibras en la masa de concreto (RI_v), ($RI_w \cong 3.25 \cdot RI_v$).

Por otra parte, [14] utiliza la expresión propuesta por [31] (7 y 8), para el diagrama tensión-deformación y propone dos expresiones para tener en cuenta el efecto de las fibras de acero, β y ϵ_o (9); que se reemplazarán directamente a la expresión 7. Dichas expresiones son de aplicación en un concreto de resistencia normal.

$$\frac{\sigma_c}{f_c} = \frac{\beta \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_o} \right)}{\beta - 1 + \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_o} \right)^\beta} \quad (7)$$

$$\beta = \frac{E_c}{E_c - \frac{f_c}{\epsilon_o}} \quad (8)$$

$$\epsilon_o = 0.0016 + 0.00002 \cdot f_c; \quad \beta = 1.4276 \cdot e^{(0.0247 \cdot f_c)} \quad (9)$$

Donde:

f_c resistencia a compresión del concreto,
 ϵ_c deformación del concreto,
 E_c módulo de deformación tangente inicial,
 $E_c = 6900 + 3320 \cdot \sqrt{f_c}$ (MPa), [32].

Para tener en cuenta en la expresión (8 y 9), el efecto de las fibras en la masa del concreto, se reemplaza en la ecuación de [31] los parámetros β por β_1 , f_c por f_{cf} y ϵ_o por ϵ_{of} , donde f_{cf} es la resistencia máxima a compresión del concreto reforzado con fibras metálicas y ϵ_{of} es la deformación correspondiente a la resistencia máxima a compresión.

En la tabla 2 se muestra un breve resumen de propuestas de algunos autores para caracterizar el concreto reforzado con fibras de acero para concreto convencional y de alta resistencia. Los autores modifican de la expresión principal propuesta por [31].

Tabla 2. Ecuaciones constitutivas en compresión sin confinar para hormigón reforzado con fibras de acero

Curva de hormigón	
$\frac{\sigma_c}{f_{cf}} = \frac{\beta_1 \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{of}} \right)}{\beta_1 - 1 + \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{of}} \right)^{\beta_1}} \quad \beta_1 = \frac{E_c}{E_c - \frac{f_{cf}}{\epsilon_{of}}}$	
Autores	Propuestas
* (HC y HAR) [19]	$f_{cf} = f_c + 3.5 (RI_w) \text{ (MPa)}$ $\epsilon_{of} = \epsilon_o + 446 \times 10^{-6} (RI_w)$ $\beta_1 = 1.093 + 0.7132 (RI_w)^{-0.926}$
* (HC y HAR) [28]	$f_{cf} = f_c + 2.1604 (RI_w) \text{ (MPa)}$ $\epsilon_{of} = \epsilon_o + 0.0006 (RI_w)$ $\beta_1 = 0.5811 + 1.93 (RI_w)^{-0.926}$
* (HC y HAR) [37]	$f_{cf} = f_c + 2.35 (RI_w) \text{ (MPa)}$ $\epsilon_{of} = \epsilon_o + 0.0007 (RI_w)$ $\beta_1 = 0.71 (RI_v)^2 - 2.00 (RI_v) + 3.05$
* (HC) [14]	$f_{cf} = f_c + 6.913 \cdot RI_v$ $\epsilon_{of} = \epsilon_o + 0.00192 \cdot RI_v$ $\beta_1 = \beta + 0.175 \cdot RI_v$
Curva de hormigón	
$\sigma_c = f_{cf} \frac{\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{of}}}{(1-p-q) + q \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{of}} \right) + p \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{of}} \right)^{(1-q)/p}}$ $q = 1 - p - \frac{E_f}{E_c} \quad p + q \in]0, 1[\quad \frac{1-q}{p} > 0$ $E_c = 21,500 \left(\frac{f_{cf}}{10} \right)^{1/3} \text{ (MPa)}$ $E_f = \frac{f_{cf}}{\epsilon_{of}}$	

*(HC y HAR) [1]	Para 05/30 de fibras:
	$\epsilon_{of} = \epsilon_o + 0.0002w_f$
	$\rho = 1.0 - 0.919\exp(-0.394w_f)$
	Para 08/60 de fibras:
	$\epsilon_{of} = \epsilon_o + 0.00026w_f$
	$\rho = 1.0 - 0.722\exp(-0.144w_f)$

*HC y HAR: Hormigón convencional y hormigón de alta resistencia respectivamente.

f_c y ϵ_o : Es la resistencia a compresión del hormigón y la deformación correspondiente. Los autores sugieren usar 0.002 excepto [1] que propone un valor de 0.0022.

RI_v y RI_w es el índice de cuantía de fibras en porcentaje de volumen y porcentaje en peso respectivamente.

3.3 Tenacidad

Esta propiedad depende principalmente de la adherencia de las fibras en la masa del hormigón. La tenacidad se define como el área bajo la curva de carga-flecha y está relacionada con la capacidad de absorber energía cuando el elemento está sometido a sollicitaciones de carga. A mayor tenacidad se tiene una mayor capacidad de disipar energía, es por ello que dependerá del contenido de fibras, tipo y esbeltez de estas.

3.4 Resistencia a cortante y torsión

La inclusión de fibras de acero puede mejorar la resistencia a cortante y torsión, aunque se indica que hay pocos datos referente a este tema al respecto [5]. Las fibras de acero en cantidad suficiente, dependiendo de la forma geométrica de la fibra, pueden aumentar la resistencia al cortante e impedir el fallo en la tensión diagonal forzando el fallo por flexión de la viga; lo cual se traduce en la posibilidad del empleo de las fibras de acero como elementos sustitutivos de estribos en vigas u otros elementos (e.g., [33]).

Por otro lado, [25] referencia que el comportamiento a cortante ha sido estudiado (e.g., [34], [8], [26], [27]). Además observa que en ensayos experimentales en vigas de hormigón reforzado en fibras de acero, se genera una fisuración más distribuida y además, se incrementa la capacidad de carga última a cortante.

Además, se indica que la resistencia por torsión crece de forma lineal en relación al porcentaje de fibras, dando como resultado un aumento considerable en la deformación por rotura [33]. Se da un efecto contrario si existe un menor volumen de fibras, ya que es inversamente proporcional al aumento de la resistencia. La influencia de la esbeltez de la fibra es fundamental, porque se ha observado que a mayor esbeltez la resistencia tiende a aumentar, al igual que se incrementa la deformación por rotura.

3.5 Módulo de elasticidad

Un volumen menor al 2% de fibras en la masa del hormigón, no presenta diferencia significativa, respecto a los hormigones que no contienen fibras metálicas [5].

3.6 Adherencia fibra matriz

Esta propiedad es fundamental para las fibras metálicas embebidas en el hormigón, ya que al producirse la fisuración; las fibras forman una especie de red, retrasando la rotura y haciendo más dúctil el agotamiento del material compuesto [25].

Por otro lado, se ha mostrado que existe una adherencia parcial de las fibras embebidas en la masa del hormigón; que se produce por la pérdida de la humedad durante la fabricación del hormigón, fraguado y retracción; así como también de las reacciones superficiales entre las fibras y la matriz; donde se generan tensiones internas del sistema [35].

Téngase en cuenta que existen dos tipos de adherencia: la física que consta de la combinación de adhesión, fricción y trabajo mecánico; y la química que se genera por reacciones superficiales entre la fibra y el hormigón. La primera se determina caracterizando la forma de la fibra, ya que puede aumentar la adherencia en el hormigón y así producir un fallo del material por rotura de la fibra y no por deslizamiento; tal como suele ocurrir en fibras lisas. Respecto a la adherencia química, se puede mejorar recubriendo la fibra con resina epoxi para poder evitar problemas de oxidación y galvanización.

Consideraciones finales

- El aporte de las fibras metálicas en la masa del concreto, se ha venido incrementando en los últimos años; y este aporte se ha caracterizado tanto para concreto de resistencia normal como de alta; así como también en pilas de puentes, columnas sobre cargadas, losas de puentes peatonales, entre otros.
- Es posible evaluar el comportamiento del concreto no confinado reforzado con fibras metálicas a través de los métodos simplificados que evalúan la curva de tensión-deformación.
- Es importante saber que la adición de fibras metálicas a la masa de concreto, aumenta la resistencia a flexión, sin embargo se mantiene cuasi constante para la resistencia a compresión.
- La adición de fibras metálicas en la ingeniería estructural es un gran aporte, ya que al tener un soporte tradicional sometido a altos esfuerzos, este requiere de mayor cuantía de acero, por ende se traduce en un problema a la hora de vaciar el concreto, es por ello que autores recomiendan el uso de concreto autocompactable, y reemplazar parte de la armadura transversal por la adición de fibras metálicas en su masa.

Referencias

- [1] ACI 116R-00, "Cement and Concrete Terminology," ACI Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- [2] ACI 318-2011, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete", American Concrete Institute, Detroit, 2011, pp 471.
- [3] ACI. 544.1R (1996). "State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concret.", Farmington Hills, MI.
- [4] ACI. 544.3R (2008). "Guide for specifying, proportioning, and production of fiber-reinforced concrete.", Farmington Hills, MI.
- [5] ACI. 544.4R (1999). "Design considerations for steel fiber reinforced concrete.", Farmington Hills, MI.
- [6] Aoude, H.; Cook, W.D.; Mitchell, D.: "Axial Load Response of Columns Constructed with Fibers and Self-Consolidating Concrete" " ACI Structural Journal, Volume 106, Issue 03, May 1, 2009, pp 349-357.
- [7] Asencio Cuenca, E.; "Comportamiento a cortante de elementos constructivos fabricados con hormigón autocompactante y hormigón reforzado con fibras". Tesis de Máster, Universidad Politécnica de Valencia, España, Noviembre, 2008.
- [8] Barragán, B., (2002): "Failure and toughness of steel reinforced concrete under tension and shear", Doctoral thesis, Universitat Politècnica de Catalunya.

- [9] Barros, J.A.O.; Figueiras, J.A. (1999). Flexural Behavior of SFRC: Testing and Modeling, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 11(4):331-339.
- [10] Bentur, A. and Mindess, S. (1990). Fiber reinforced cementitious composites. UK: Elsevier.
- [11] Caballero K.E -Morrison, Bonet J.L, Juan Navarro-Gregori, Martí J.R -Vargas. "Behaviour of steel-fibre-reinforced normal-strength concrete slender columns under cyclic loading", *Engineering Structures* 39, (2012) PP.162-175.
- [12] Caballero K.E -Morrison. "Estudio teórico-experimental de soportes esbeltos de hormigón armado con fibras de acero sometidos a compresión y carga lateral cíclica", Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Valencia, España, (2015).
- [13] Campione, G., Mangiavillano, M.L., (2008). "Fibrous reinforced concrete beams in flexure: Experimental investigation, analytical modelling and design considerations". *Engineering Structures*, pp 2970-2980.
- [14] Campione, G.; Fossetti, M.; Papia, M.: "Behavior of Fiber-Reinforced Concrete Columns under Axially and Eccentrically Compressive Loads" *ACI Structural Journal*, Volume 107, Issue 03, May 1, 2010, pp 272-281.
- [15] Campione, G.; La Mendola, L.; and Mangiavillano, M. L., "Steel Fiber Reinforced Concrete Corbels: Experimental Behavior and Shear Strength Prediction," *ACI Structural Journal*, V. 104, No. 5, Sept.-Oct. 2007, pp. 570-579.
- [16] Carreira, D.J.; Chu, K.H. Stress-strain relationship for plain concrete in compression. *ACI Journal* 1985;82(6):797-804.
- [17] Comisión Permanente del Hormigón "Code on Structural Concrete EHE-08" Ministerio de Fomento. (http://www.fomento.gob.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/ORGANOS_COLEGIADOS/CPH/instrucciones/EHE08_INGLES/)
- [18] European Committee for Standardization: "Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings" EN 1998-1:2004 pp 232.
- [19] Ezzeldin, A. S.; Balaguru, P.N.: "Normal and high strength fibre reinforced concrete under compression" *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 4, No. 4, November 1992, pp. 415-429.
- [20] Fanella, D.A.; Naaman, A.E.: "Stress – strain properties of fibre reinforced mortar in compression" *ACI Journal*, 82 (4), 1985, pp 475-483.
- [21] Foster, S.J.: "On behaviour of high-strength concrete columns: cover spalling, steel fibers and ductility" *ACI Structural Journal*, Volume 98, Issue 04, 2001, pp 583-589.
- [22] J. S. C. E. (Japan Society of Civil Engineers, Earthquake Engineering Committee). 1988. *Earthquake Resistant Design for Civil Engineering Structures in Japan*. Tokio, Japón.
- [23] Lee, Jong-Han.: "Influence of concrete strength combined with fiber content in the residual flexural strengths of fiber reinforced concrete", *Elsevier, Composite Structures*, May 2017, Pages 216–225.
- [24] Mansur, M.A.; Ong KCG. Behaviour of reinforced concrete deep beams in shear. *ACI Struct J* 1991;88(1):98–105.
- [25] Mármol, P.; "Hormigones con fibras de acero, características mecánicas". Tesis de Máster, Universidad Politécnica de Madrid, España, Noviembre, 2010.
- [26] Meda, A., (2005): " Shear behaviour of steel fibre reinforced concrete beams", *Material and Structures*, Vol. 38 (277), pp. 343-351.
- [27] Minelly, F., and Plizzari, G. A.; (2008). "Shear design of FRC members with little or no conventional shear reinforcement", *Concrete information: International FIB Symposium: Tailor made concrete structures: new solutions for our society*, pp. 139.
- [28] Nataraja, M.C.; Dhang, N.; Gupta, A. P.: "Stress – strain curves for steel fiber reinforced concrete under compression" *Journal of Cement and Composites*, 21, 1999, pp 383-390.
- [29] Paultre, P.; Eid, R.; Langlois, Y.; Lévesque, Y.: "Behaviour of steel fiber-reinforced high-strength concrete columns under uniaxial compression" *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 136, No. 10, October 1, 2010, pp. 1225-1235.
- [30] Paultre, P.; Legeron, F.; Mongeau, D.: "Influence of concrete strength and transverse reinforcement yield strength on behavior of high-strength concrete columns" *ACI Struct J* 2001;98(4):490-501.
- [31] Popovics, S.; 1973. A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete. *Cement and Concrete Research*, 3(5): 583–599.
- [32] Razvi, S. R. and Saatcioglu, M.; 1999, "Confinement Model for High-Strength Concrete," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V. 125, No. 3, pp. 281-289.
- [33] Rodríguez López, F. and Prado Pérez-Seoane, D.: "Hormigón con la incorporación de fibras". *Revista de Obras Públicas*, Octubre 1984, pp. 779-796.
- [34] Sema, P., (2008): "Evolution of the flexural behaviour of precracked SFRC in marine environment", *Seventh International RILEM Symposium in fibre reinforced concrete: Design and Application*, pp. 595-605.
- [35] Swamy, R. N.; Mangat, P. S. and Rao, C. V. S. K. (1974). "The Mechanics of Fiber Reinforcement of Cement Matrices", *Fiber Reinforced Concrete ACI SP-44*, American Concrete Institute, Detroit, MI, 1-28.
- [36] UNE-EN 14651:2007: "Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual". *Asociación española de normalización y certificación, AENOR*. Septiembre 2007.
- [37] Yu-Chen Ou, Mu-Sen Tai, Kuang-Yen Liu, and Kuo-Chun Chang: "Compressive Behavior of Steel-Fiber-Reinforced Concrete with a High Reinforcing Index". *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, February 2012, pp. 207-215.