

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ  
Colegio de Ciencias e Ingenierías

Ensayo experimental de la contribución de las fibras  
de acero al efecto de cortante en vigas de hormigón  
con refuerzo longitudinal

Proyecto de investigación

Santiago Nicolás Hinojosa Ortiz  
Ingeniería Civil

Trabajo de titulación presentado como requisito  
para la obtención del título de  
Ingeniero Civil

Quito, 18 de diciembre de 2018

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ  
Colegio de Ciencias e Ingeniería

**HOJA DE CALIFICACIÓN  
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

Ensayo experimental de la contribución de las fibras de acero al efecto de cortante en vigas de hormigón con refuerzo longitudinal

Santiago Nicolás Hinojosa Ortiz

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Eva Lantsoght, Ph.D.

Firma del Profesor

---

Quito, 18 de diciembre de 2018

## Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: \_\_\_\_\_

Nombres y apellidos: Santiago Nicolás Hinojosa Ortiz

Código: 00123050

Cédula de Identidad: 1716569395

Lugar y fecha: Quito, 18 de diciembre de 2018

## Resumen

En secuela al trabajo de titulación que analiza el efecto de las fibras de acero en el hormigón ante fuerzas cortantes, se han tomado las recomendaciones para el tamaño y cuantía de fibra de acero para un ensayo experimental. Se ha desarrollado un diseño de viga de hormigón con fibras de acero sin refuerzo transversal, de tal manera, que al ser sometida a flexión se obligue a que esta falle a cortante. Dentro del diseño de viga se hicieron predicciones de falla en función de la recopilación de expresiones matemáticas de contribución resistente por parte de la fibra de acero según su cuantía. Finalmente, se definieron los preparativos para las fundiciones de las vigas que van a ser ensayadas, se realizó una mezcla de prueba y se obtuvieron resultados preliminares.

Palabras claves: fibras de acero (SFRC), hormigón, cortante.

## Abstract

As a continuation of the previous thesis that analyzes the effect of steel fibers in the concrete under shear forces, recommendations have been taken for the dimensions and amount of steel fiber for an experimental test. A beam design of steel fiber reinforced concrete without transverse reinforcement has been developed, in such way, that under flexure, the beam design will fail by shear. Within the design of the beam, predictions of failure have been estimated according to a compilation of mathematical expressions of shear resistance by the steel fiber depending on its quantity. Finally, preparations for the mixing and casting for the beams being tested were set, a trial batch of the mix was done, and preliminary results were obtained.

Key Words: Steel Fibers, Steel Fiber Reinforced Concrete, concrete, shear.

## Tabla de Contenido

<b>Introducción (Capítulo 1)</b> .....	7
Importancia del estudio .....	7
Alcance .....	8
<b>Revisión de la Literatura (Capítulo 2)</b> .....	9
SFRC – Steel Fiber Reinforced Concrete (Hormigón Armado con fibras de Acero).....	9
Expresiones matemáticas para la estimación de capacidad resistente a Momento y Cortante	12
<b>Diseño de la viga SFRC (Capítulo 3)</b> .....	21
Limitaciones y diseño.....	21
Predicciones de falla.....	23
Determinación del desempeño a flexión de una viga SFRC .....	30
Diseño de mezcla .....	33
<b>Resultados Preliminares (Capítulo 4)</b> .....	36
<b>Discusión (Capítulo 5)</b> .....	44
<b>Resumen y conclusión (Capítulo 6)</b> .....	45
<b>Referencias</b> .....	47
ANEXO 1 Código de MATLAB para Predicciones de Falla de viga de diseño SFRC .....	49

## Introducción (Capítulo 1)

### Importancia del estudio

Cuando los esfuerzos principales de tensión dentro del vano de cortante en una viga de hormigón armado exceden la capacidad resistente del hormigón, se desarrollan fisuras diagonales en las almas causando eventualmente la falla (Narayanan; Darwish, 1985). Se conoce que la falla a cortante en el hormigón es de característica súbita y frágil, por lo tanto, es un comportamiento no deseado en las estructuras de hormigón porque produce un colapso súbito no controlado.

El hormigón armado con fibra (Fiber-Reinforced Concrete, FRC) es usado en muchas aplicaciones, como pavimentos, pistas de aeropuertos, líneas de túneles mediante *shotcrete*, losas de cimentación, y en puentes, cuando el refuerzo mínimo es necesario para elementos prefabricados de la superestructura (Carnovale; Vecchio, 2014). Se atribuye el poco uso de fibra en otros elementos estructurales a la limitada investigación con respecto a la fibra, y a la falta de implementación y desarrollo en códigos de diseño requeridos para especificar el material (Lee; Cho; Vecchio, 2013).

La adición de fibras de acero al hormigón ayuda a convertir el comportamiento frágil del hormigón en uno dúctil, las fibras son uniformemente distribuidas y orientadas aleatoriamente en todo el espacio volumétrico del hormigón. Como consecuencia, existe una mejora sustancial en la resistencia a la formación de grietas y en la resistencia a tensión en el hormigón (Narayanan; Darwish, 1985).

## Alcance

Lo que se pretende en este proyecto es obtener resultados que permitan ofrecer recomendaciones importantes para una futura optimización en el diseño de estructuras de hormigón armado.

Dentro de la importancia del uso de fibra de acero tenemos:

- Permitiría reemplazar parcialmente el refuerzo a cortante, es decir, los estribos en el hormigón armado.
- Construcción de losas de hormigón armado en puentes sin refuerzo a cortante.
- Necesidad de una teoría (que pueda ser normada) que tome en cuenta el efecto de las fibras en la resistencia a cortante.

El presente trabajo de titulación recopila ecuaciones que intentan estimar la contribución resistente al cortante por las fibras de acero. Estas ecuaciones son propuestas por algunos investigadores que han estudiado la interacción fibra de acero-hormigón, y han realizado ensayos en vigas pequeñas para basarse en sus propuestas.

Los ensayos consisten en someter a vigas de hormigón armado sin refuerzo transversal con fibras de acero a flexión mediante carga a cuatro puntos, lo que se pretende es lograr una falla a cortante antes que una por flexión y así estimar una capacidad resistente a cortante del hormigón con fibra de acero.

Se han tomado y combinado las ecuaciones propuestas para usarlas en un diseño de viga pequeña, y de esta manera, estimar la capacidad a cortante y flexión.

El procedimiento en continuación consiste en ensayar las vigas diseñadas y posteriormente, se analizarán las deformaciones, desplazamientos y fisuras según la

capacidad a cortante obtenida. Se pretende hacer un estudio de la cinemática de las fisuras a cortante mediante DIC (Digital Image Correlation). Sin embargo, el presente documento de titulación refleja la predicción de carga máxima de falla para el diseño de viga, los preparativos para el ensayo y los resultados preliminares en base a una fundición y mezcla de prueba.

## **Revisión de la Literatura (Capítulo 2)**

SFRC – Steel Fiber Reinforced Concrete (Hormigón Armado con fibras de Acero)

Como se introduce anteriormente, la adición de fibras incrementa el desempeño del hormigón en una manera más deseada. Además de brindar una resistencia diagonal en tensión post-fisuramiento en elementos de flexión de hormigón armado, las fibras ayudan al control de abertura en las grietas diagonales, de esta manera, se mejora el mecanismo de transferencia de cortante de trabazón de agregados (Dinh; Parra-Montesinos; Wight, 2011).

Las fuerzas de tensión transferidas a lo largo de la grieta inclinada mediante la tensión de las fibras dependen del ancho de grieta. Para poder estimar el valor de la fuerza, se suele emplear una constante de esfuerzo a tensión deseada, una de las distribuciones de las fibras se muestra en la Figura 1. Consiguientemente, esta transferencia de fuerzas de tensión genera un mecanismo de transferencia de cortante adicional en la viga de SFRC.

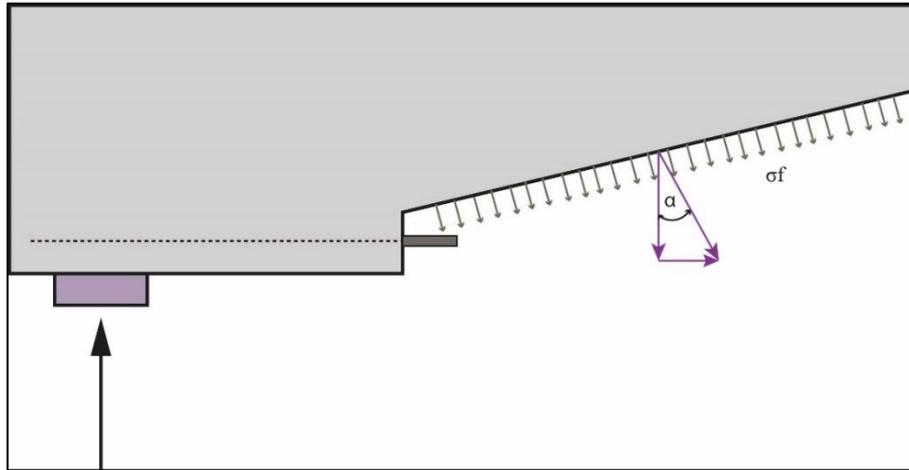


Figura 1: Representación de los esfuerzos de tensión por las fibras de acero en viga SFRC (Filián, 2017)

Se muestra que la distribución de esfuerzos es asumida a lo largo de la longitud del agrietamiento diagonal crítico. La distribución de esfuerzos de la fibra depende del número de fibras por unidad de área y de la fuerza pullout por fibra (Filián, 2017).

En la Figura 2 se observa una representación gráfica de la distribución de fuerzas y esfuerzos en una viga SFRC vista en corte:

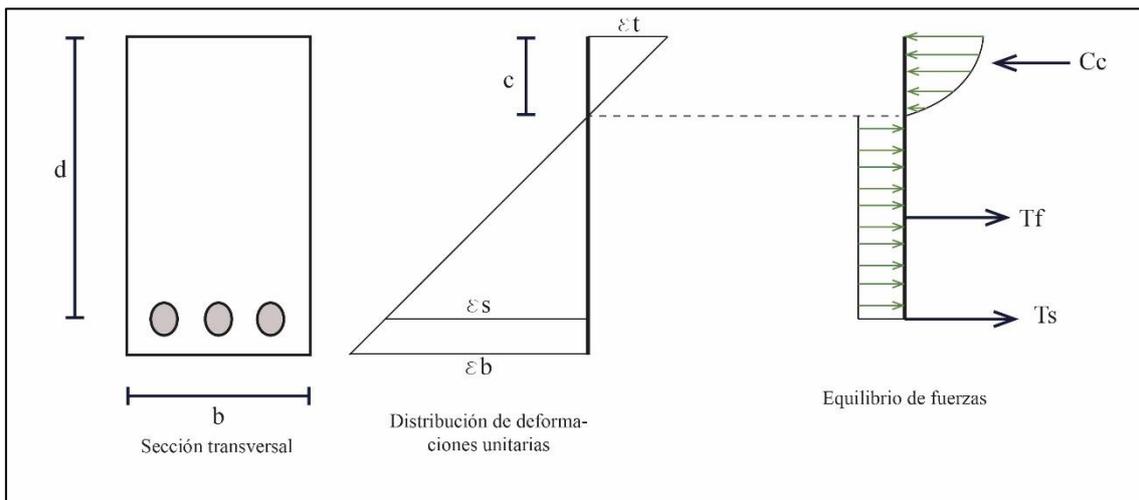


Figura 2: Distribución de deformación unitaria y equilibrio de fuerzas en vigas de hormigón reforzado con fibras de acero. (Filián, 2017)

Donde:

$d$ : Altura efectiva de la viga.

$b$ : base de la viga.

$c$ : Distancia del eje neutro al punto más extremo en compresión.

$\varepsilon_t$ : Deformación unitaria en la parte superior de la viga.

$\varepsilon_b$ : Deformación unitaria en la parte inferior de la viga.

$\varepsilon_s$ : Deformación unitaria del acero de refuerzo longitudinal.

$C_c$ : Fuerza en compresión por parte del hormigón.

$T_f$ : Fuerza en tensión por parte de la fibra de acero.

$T_s$ : Fuerza en tensión por parte del acero de refuerzo longitudinal.

La capacidad a cortante en SFRC depende de las propiedades geométricas y cuantía de las fibras de acero, a esta variable se la llama factor de fibra,  $F$ . Este concepto lo introdujeron y definen Narayanan y Palajian (Narayanan; Palajian, 1984). Se define el factor fibra a continuación:

$$F = V_f * L_f * \rho_f / D_f$$

Donde:

$V_f$  = Porcentaje de fibra

$L_f$  = Longitud de fibra

$\rho_f$  = Factor de adherencia, varía de 0.5 a 1.0 dependiendo del tipo de fibra.

para "hooked – end" = 1

$D_f$  = Diámetro de fibra

Este factor se mostrará en las expresiones matemáticas que se usaron para estimar la capacidad a flexión y cortante de la viga de diseño.

## Expresiones matemáticas para la estimación de capacidad resistente a Momento y Cortante

Se listan a continuación las expresiones matemáticas recopiladas de la literatura, se escogieron dichas expresiones que partieron de estudios y ensayos realizados en vigas pequeñas:

### Flexión

Se usaron tres ecuaciones cuyas estimaciones de flexión son cercanas entre sí:

1. Se realizó la siguiente asunción de esfuerzos:

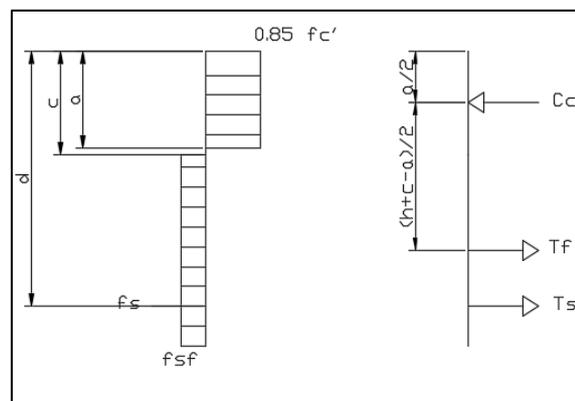


Figura 3: Asunción de diagrama de esfuerzos y fuerzas actuantes en viga SFRC

Donde:

$h$ : Altura de la viga.

$d$ : Altura efectiva de la viga.

$c$ : Distancia del eje neutro al punto más extremo en compresión.

$a$ : Distancia de la base del bloque de compresión.

$0.85f'_c$ : Esfuerzo en compresión en el hormigón.

$f_s$ : Esfuerzo en tensión en el acero de refuerzo longitudinal.

$f_{sf}$ : Esfuerzo en tensión en la fibra de acero.

$T_f$ : Fuerza en tensión por parte de la fibra de acero.

$C_c$ : Fuerza en compresión por parte del hormigón.

$T_s$ : Fuerza en tensión por parte del acero de refuerzo longitudinal.

La expresión para el cálculo de momento resistente se toma de la investigación de Lee et al (2017). Con lo que se obtiene la siguiente ecuación:

$$Mu = A_s * f_y * \left(d - \frac{a}{2}\right) + T_f * \left(\frac{h + c - a}{2}\right)$$

Donde:

$A_s$ : Area del acero de refuerzo longitudinal.

$$T_f = 0.772 * F * b * (d - c)$$

$f_y$ : Esfuerzo de fluencia en el acero de refuerzo longitudinal.

$$a = \frac{A_s f_y + 0.772 * F * b^2}{0.85 f'_c * b - \frac{0.772 * F * b}{\beta_1}}$$

$$\beta_1 = \begin{cases} 0.85 & \text{si } f'_c \leq 28 \text{ MPa} \\ 0.85 - 0.05 * \frac{f'_c - 28}{7} & \text{si } 28 \text{ MPa} < f'_c \leq 55 \text{ MPa} \\ 0.65 & \text{si } f'_c > 55 \text{ MPa} \end{cases}$$

2. Se usó la expresión proporcionada por Mansur (Mansur, 1986) que indica el siguiente diagrama de esfuerzos:

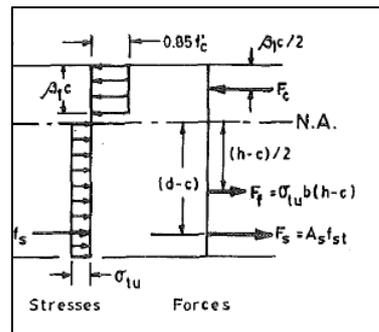


Figura 4: Diagrama de Esfuerzos y Fuerzas en viga SFRC (Mansur, 1986)

Donde  $F_f$  es la fuerza en tensión proporcionada por las fibras. Con esto se obtiene la siguiente expresión:

$$Mu = A_s * f_y * (d - c) + \sigma_{tu} * b * (h - c) * \frac{h - c}{2} + 0,85 * f'_c * \beta_1 c * b * (c - \frac{\beta_1 c}{2})$$

Donde:

$\beta_1 c$ : Distancia de la base del bloque de compresión.

Y del trabajo de titulación de Filián (2017), se toma la expresión para el esfuerzo residual de tensión en la grieta,  $\sigma_{tu}$ :

$$\sigma_{tu} = 0,41 * 0,68 * F * \sqrt{f'_c} \quad f'_c \text{ en [MPa]}$$

3. Se usó la expresión proporcionada por Imam et al (Imam;Vandewalle; Mortelmans; Van Gemert, 1997) que indica el siguiente diagrama de esfuerzos:

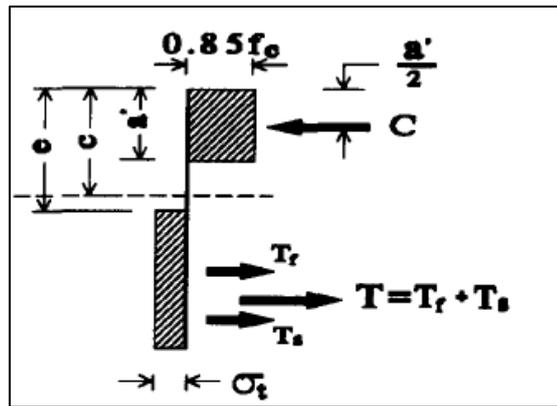


Figura 5: Diagrama de Esfuerzos y Fuerzas en viga SFRC (Imam et al, 1997)

Donde  $T_f$  es la fuerza en tensión proporcionada por las fibras. El autor proporciona la siguiente expresión para el cálculo de la capacidad a flexión:

$$Mu = \frac{1}{2}\rho f_y b d^2 (2 - \eta) + 0.83 F b d^2 (0.75 - \eta)(2.15 + \eta)$$

Donde  $\eta$  se calcula de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{\rho f_y + 2.32F}{0.85 f'_c + 3.08F}$$

$\rho$ : cuantía de refuerzo longitudinal.

$$\rho = \frac{A_s}{b d}$$

### Cortante:

Se usaron las expresiones proporcionadas por investigaciones previas de los siguientes autores, tomando en cuenta el aporte del hormigón ( $V_c$ ) y de las fibras ( $V_{sf}$ ) en la resistencia a cortante para obtener la capacidad total ( $V_n$ ). Las ecuaciones usadas fueron:

1. Lee et al. (2017):

$$V_{sf} = 0,41 * F * \tau_{max} * b * (d - c) \cot(45)$$

Donde:

$\tau_{max}$ : esfuerzo de enlace máximo

$c$ : altura de zona de compresión al momento de una falla por cortante.

$$c = 0.5d$$

Con  $\tau_{max} = 0,825\sqrt{f'_c}$  y  $\theta = 45^\circ$

$$V_{ci,cap} = v_{ci,cap} * b * (d - c)$$

$$v_{ci,cap} = \frac{0.18 \sqrt{f'_c}}{0.31 + 0.686w_s}$$

$$w_s = \eta \frac{f_y}{E_s} * 3 * (h - d)$$

$$\eta = \frac{0.47d}{(h - d)}$$

$$V_{cc} = 0,52\sqrt{f'_c} * b * c$$

$$V_c = \min(V_{ci,cap}, V_{cc})$$

Donde:

$V_{ci,cap}$ : Capacidad potencial a cortante en el lado de tensión.

$v_{ci,cap}$ : Capacidad potencial a cortante en la zona agrietada por tensión.

$w_s$ : ancho de la grieta de cortante.

$\eta$ : factor de concentración de fisura por cortante.

$V_{cc}$ : Capacidad potencial a cortante en el lado de compresión.

$V_c$ : Resistencia a cortante del hormigón.

2. Dinh et al. (2011)

$$V_{sf} = 0,50 * F * \tau_{max} * b * (d - c) \cot(30)$$

Donde:

$c$ : altura de zona de compresión al momento de una falla por cortante.

$$c = 0.5d$$

$$\text{Con } \tau_{max} = 0,85\sqrt{f'_c} \quad f'_c \text{ en [MPa]}$$

$$V_c = 0,11 * f'_c * \beta_1 c * b$$

3. Mansur et al. (1986)

$$V_{sf} = 0,41 * F * \tau_{max} * b * d$$

$$\text{Con } \tau_{max} = 0,68\sqrt{f'_c} \quad f'_c \text{ en [MPa]}$$

$$V_{c1} = 0,29\sqrt{f'_c}bd \quad f'_c \text{ en [MPa]}$$

$$V_{c2} = \left( (0,16\sqrt{f'_c} + 17,2 * \frac{\rho V d}{M}) \right) \quad f'_c \text{ en [MPa]}$$

$$\rho = \frac{A_s}{bd}$$

$$V_c = \min(V_{c1}, V_{c2})$$

Donde:

$\frac{Vd}{M}$ : Relación de cortante externo hacia el momento en la sección considerada

$\rho$ : Cuantía de refuerzo longitudinal

4. Arslan et al. (2017) entrega una expresión que combina el aporte de las fibras y el hormigón:

$$V_n = \left( 0,2 \sqrt[3]{f'_c \frac{c}{d}} + \sqrt{\rho(1 + 4F)f'_c} \right) \sqrt[3]{\frac{a}{d}} * bd \quad f'_c \text{ en [MPa]}$$

Donde:

$c$ : altura de zona de compresión al momento de una falla por cortante.

$$c = 0,5d$$

$a$ : tramo de cortante.

5. Yakoub (2011) entrega una expresión que combina el aporte de las fibras y el hormigón, está basada en el MCFT (Modified Compression Field Theory) por lo cual se realiza un proceso iterativo de cálculo. La expresión se encuentra en el código canadiense de diseño de estructuras de hormigón A23.3-04, 2004 (Canadian Standards Association, A23.3-04, 2004):

$$V_n = \beta \sqrt{f'_c} (1 + 0,70F) * bd \quad f'_c \text{ en [MPa]}$$

$$\beta = \frac{0.40}{(1 + 1500\varepsilon_x)} + \frac{1300}{(1000 + s_{xe})}$$

$$\varepsilon_x = \frac{\frac{M}{d_v} + V}{2E_s A_s}$$

$$s_{xe} = \max\left(\frac{35s_x}{16 + d_a}; 0.85s_x\right)$$

$$s_x = k\left(2\left(c_c + \frac{s}{10}\right) + \frac{0.25 * 0.4 * d_b}{\rho}\right) \quad s \text{ en [mm]}$$

$$k = \min\left(\frac{50}{L_f} / Df; 1\right)$$

Donde:

$\beta$ : factor que depende del espaciamiento de las fisuras,

tamaño máximo nominal del agregado y la deformación de la viga.

$M$ : Momento de falla externo.

$V$ : Fuerza cortante actuante en la sección.

$\varepsilon_x$ : es la deformación unitaria longitudinal en la altura media de la viga.

$c_c$ : recubrimiento de hormigón.

$s_{xe}$ : factor de espaciamiento de grieta equivalente.

$s_x$ : Parámetro de espaciamiento de grieta.

$d_b$ : diámetro de la varilla de refuerzo longitudinal.

$d_v$ : brazo de palanca de flexión;  $\max(0.9d; 0.72h)$ .

$d_a$ : tamaño máximo nominal de agregado.

$s$ : espaciamiento de refuerzo longitudinal.

$k$ : coeficiente de control de grietas.

6. Yakoub (2011) entrega otra expresión basada en principios de mecanismos de fractura que combina el aporte de las fibras y del hormigón. La expresión es tomada de Bažant & Kim (Imam et al. 1994):

$$V_n = 0.83\xi^3\sqrt{\rho} \left( \sqrt{f'_c} + 249.28 \sqrt{\frac{\rho}{(a/d)^5}} \right) + 0.162 * F * \sqrt{f'_c} \quad f'_c \text{ en [MPa]}$$

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{1 + d/(25d_a)}}$$

Donde:

$a$ : tramo de cortante.

$\rho$ : cuantía de refuerzo longitudinal.

$d_a$ : tamaño máximo nominal de agregado.

$\xi$ : factor de efecto por tamaño del agregado.

7. Imam et al. (1997) entrega una expresión que combina el aporte de las fibras y el hormigón:

$$V_n = 0.6\psi^3\sqrt{\omega} \left[ f'_c{}^{0.44} + 275 \sqrt{\frac{\omega}{(a/d)^5}} \right] bd \quad f'_c \text{ en [MPa]}$$

Donde:

$\psi$  = efecto del tamaño máximo nominal de agregado.

$\omega$  = factor de refuerzo.

$a$ : tramo de cortante.

$$\psi = \frac{1 + \sqrt{\frac{5.08}{(a/d_a)}}}{\sqrt{1 + d/(25d_a)}}$$

$$\omega = \rho(1 + 4F)$$

$d_a$  = tamaño máximo nominal de agregado.

Las expresiones matemáticas mostradas anteriormente estiman la capacidad cortante del hormigón SFRC. Pero la manera de llegar a dichas expresiones es diferente, unos de ellos realizan la estimación de la capacidad del hormigón,  $V_c$ , y la capacidad de la fibra,  $V_{sf}$ , de manera individual, otros, por el contrario, estiman la capacidad cortante del hormigón SFRC en una sola expresión matemática en donde se considera la contribución del hormigón y de la fibra de acero de manera combinada.

El concepto de aproximación a la capacidad también difiere entre los autores, algunos de ellos utilizan métodos iterativos para el cálculo de resistencia a cortante, como, por ejemplo, la estimación de Yakoub (2011) que está basada en MCFT.

## **Diseño de la viga SFRC (Capítulo 3)**

### Limitaciones y diseño

En función de las expresiones matemáticas para la resistencia a flexión y cortante en una viga SFRC, se procedió a realizar el diseño de las vigas que serán sometidas a pruebas de carga en cuatro puntos.

Se tomaron en cuenta las limitaciones de la máquina de ensayos disponible en el Laboratorio de Materiales de la USFQ:

- Capacidad de carga máxima: 100 kN
- Largo máximo de luz libre de la viga: 720 mm
- Luz entre puntos de aplicación de carga (fijo): 150 mm
- Ensayo a flexión de 3 o 4 puntos

Con estos factores condicionantes y un proceso iterativo se procedió a realizar el diseño de la viga para obtener una falla cortante. Se siguieron las relaciones dimensionales en la medida de lo posible de las vigas SFRC ensayadas y publicadas en el trabajo experimental de Mansur et al. (Mansur; Ong; Paramasivam; 1986), de esta manera, se puede tener una concordancia con las expresiones matemáticas recopiladas.

La Figura 7 y Figura 8 mostradas a continuación, representan el diseño de viga SFRC:

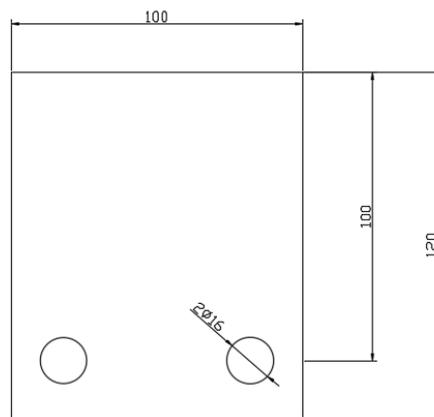


Figura 6: Sección Transversal de diseño de viga SFRC, medidas en mm

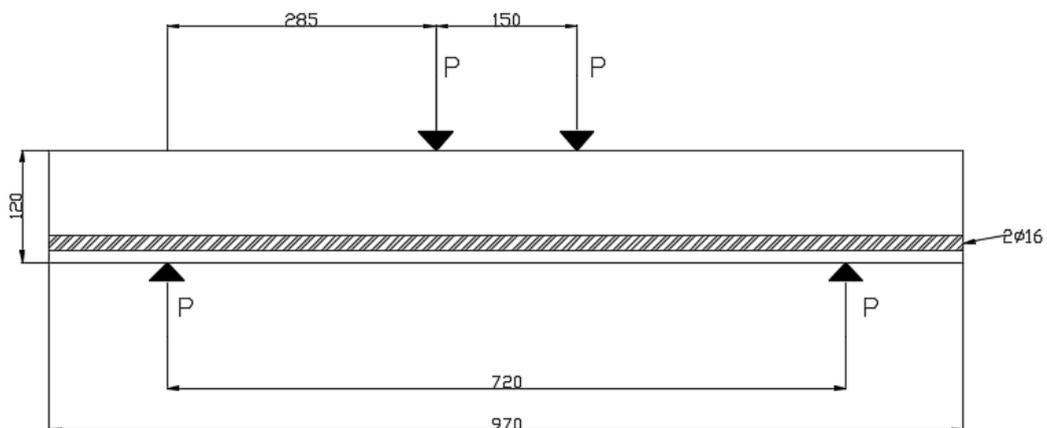


Figura 7: Vista Lateral y configuración de cargas en diseño de viga SFRC, medidas en mm

## Predicciones de falla

Para el diseño final mostrado anteriormente, se asume una resistencia a compresión del hormigón  $f'_c$  de 28 MPa y una resistencia a la fluencia del acero  $f_y$  de 420 MPa. Debido a las dimensiones del diseño de viga, se utilizará un tamaño máximo nominal de agregado de 9.5 mm. Se consiguió colaboración por parte de la empresa BEKAERT, donde se nos suministró la fibra de acero DRAMIX 3D, es de 60 mm de longitud y tiene un diámetro de 0.90 mm, *hooked-end*, con una resistencia a la tracción  $f_t = 1\ 160\ N/mm^2$ .

Se realizó un proceso iterativo de diseño en el cual se cambiaban las variables de porcentaje de fibra, las dimensiones viga tanto en longitud como base y altura, y el refuerzo longitudinal. Para poder realizarlo, se programó un código en el software MATLAB donde se incluían las expresiones matemáticas de resistencia a flexión y corte.

Como resultado, se entregan estimaciones cercanas entre sí para la capacidad de una sección a momento, mientras que las expresiones de resistencia a cortante varían entre un 15% a 20% en los resultados calculados. Finalmente, se define el diseño de viga SFRC que asegure una falla a cortante con una carga aplicada menor a 100 kN, para esto, de las estimaciones de falla se toma el menor valor de carga que falle a flexión y se toma el mayor valor de carga que falle a cortante.

Para las estimaciones en cortante, se han combinado las expresiones de capacidad resistente a cortante del hormigón y de la fibra de acero de los autores mostrados en el Capítulo 2, obteniendo así, trece ecuaciones que brindan la capacidad cortante del diseño de viga. Las combinaciones se muestran a continuación:

Ecuación V1L:

Suma la capacidad resistente por parte de la fibra y el mínimo de las capacidades resistentes por parte del hormigón de Lee et al. (2017):

$$V1L = 0,41 * F * \tau_{max} * b * (d - c) + \min(V_{ci, cap}, V_{cc})$$

Ecuación V1mans:

Suma la capacidad resistente por parte de la fibra propuesto por Lee et al. (2017) y el mínimo de las capacidades resistentes por parte del hormigón de Mansur et al. (1986):

$$V1mans = 0,41 * F * \tau_{max} * b * (d - c) + \min(V_{c1}, V_{c2})$$

Ecuación V1dinh:

Suma la capacidad resistente por parte de la fibra propuesto por Lee et al. (2017) y la capacidad resistente por parte del hormigón propuesta por Dinh et al. (2011):

$$V1dinh = 0,41 * F * \tau_{max} * b * (d - c) + 0,11 * f'_c * \beta_1 c * b$$

Ecuación V2dinh:

Suma la capacidad resistente por parte de la fibra y la capacidad resistente por parte del hormigón propuestos por Dinh et al. (2011):

$$V2dinh = 0,50 * F * \tau_{max} * b * (d - c) \cot(30) + 0,11 * f'_c * \beta_1 c * b$$

Ecuación V2mans:

Suma la capacidad resistente por parte de la fibra de Dinh et al. (2011) y el mínimo de las capacidades resistentes por parte del hormigón de Mansur et al. (1986):

$$V2mans = 0,50 * F * \tau_{max} * b * (d - c) \cot(30) + \min(V_{c1}, V_{c2})$$

Ecuación V2L:

Suma la capacidad resistente por parte de la fibra de Dinh et al. (2011) y el mínimo de las capacidades resistentes por parte del hormigón de Lee et al. (2017):

$$V_{2L} = 0,50 * F * \tau_{max} * b * (d - c) \cot(30) + \min(V_{ci, cap}, V_{cc})$$

Ecuación V3mans:

Suma la capacidad resistente por parte de la fibra y el mínimo de las capacidades resistentes por parte del hormigón de Mansur et al. (1986):

$$V_{3mans} = 0,41 * F * \tau_{max} * b * d + \min(V_{c1}, V_{c2})$$

Ecuación V3dinh:

Suma la capacidad resistente por parte de la fibra de Mansur et al. (1986) y la capacidad resistente por parte del hormigón propuestos por Dinh et al. (2011):

$$V_{3dinh} = 0,41 * F * \tau_{max} * b * d + 0,11 * f'_c * \beta_1 c * b$$

Ecuación V3L:

Suma la capacidad resistente por parte de la fibra de Mansur et al. (1986) y el mínimo de las capacidades resistentes por parte del hormigón de Lee et al. (2017):

$$V_{3L} = 0,41 * F * \tau_{max} * b * d + \min(V_{ci, cap}, V_{cc})$$

Ecuación V4:

Utiliza la expresión de capacidad resistente a cortante de Arslan et al. (2017):

$$V_4 = \left( 0,2 \sqrt[3]{f'_c \frac{c}{d}} + \sqrt{\rho(1 + 4F)f'_c} \right) \sqrt[3]{\frac{a}{d}} * bd \quad f'_c \text{ en [MPa]}$$

Ecuación V5A:

Utiliza la expresión de capacidad resistente a cortante presentada por Yakoub (2011) que utiliza principios de mecanismos de fractura:

$$V5A = 0.83\xi\sqrt[3]{\rho}\left(\sqrt{f'_c} + 249.28\sqrt{\frac{\rho}{(a/d)^5}}\right) + 0.162 * F * \sqrt{f'_c} \quad f'_c \text{ en [MPa]}$$

Ecuación V5B:

Utiliza la expresión de capacidad resistente a cortante presentada por Yakoub (2011) que realiza iteraciones para llegar a una respuesta:

$$V5B = \beta\sqrt{f'_c}(1 + 0,70F) * bd$$

Ecuación V6:

Utiliza la expresión de capacidad resistente a cortante presentada por Imam et al. (1197):

$$V6 = 0.6\psi\sqrt[3]{\omega}\left[f'_c{}^{0.44} + 275\sqrt{\frac{\omega}{(a/d)^5}}\right]bd \quad f'_c \text{ en [MPa]}$$

Para las estimaciones de capacidad a flexión no se realizaron combinaciones entre las expresiones mostradas en el Capítulo 2, por lo cual, se mantienen las tres ecuaciones de estimación. En función de los valores de fuerza cortante y de momento resistente proporcionados por las ecuaciones mencionadas, se ha calculado la capacidad máxima de carga para falla a cortante y momento para todos los porcentajes de fibra de acero que serán colocados en las vigas.

A continuación, se muestran los resultados donde se reflejan las estimaciones de carga máxima para falla según las expresiones matemáticas utilizadas y generadas en el código de MATLAB para cortante y para momento:

Tabla 1: Predicciones de falla a cortante según porcentaje de fibra

		Porcentaje de fibra de acero				
		0%	0.30%	0.60%	0.90%	1.20%
Estimación de carga máxima para falla a cortante (kN)	$P_{V1L}$	27.5	31.1	34.7	38.3	41.8
	$P_{V1mans}$	21.2	24.8	28.4	31.9	35.5
	$P_{V1dinh}$	26.2	29.8	33.3	36.9	40.5
	$P_{V2dinh}$	26.2	34.0	41.8	49.5	57.3
	$P_{V2mans}$	21.2	29.0	36.8	44.6	52.4
	$P_{V2L}$	27.5	35.3	43.1	50.9	58.7
	$P_{V3mans}$	21.2	27.1	33.0	38.9	44.8
	$P_{V3dinh}$	26.2	32.1	38.0	43.9	49.8
	$P_{V3L}$	27.5	33.4	39.3	45.2	51.1
	$P_{V4}$	38.7	45.8	51.4	56.1	60.4
	$P_{V5A}$	37.9	41.4	44.8	48.2	51.6
	$P_{V5B}$	30.1	33.0	35.8	38.5	41.0
	$P_{V6}$	25.9	31.6	35.9	39.8	43.4

Tabla 2: Predicciones de falla a flexión según porcentaje de fibra

		Porcentaje de fibra de acero				
		0%	0.30%	0.60%	0.90%	1.20%
Estimación de carga máxima para falla a flexión (kN)	$P_{M1}$	65.4	64.9	64.3	63.8	63.2
	$P_{M2}$	65.4	65.7	66.1	66.4	66.8
	$P_{M3}$	65.4	65.4	65.4	65.4	65.4

Tabla 3: Momento resistente, Carga máxima para falla a flexión, Altura del bloque de compresión asociados a  $P_{M1}$

	Porcentaje de fibra de acero				
	0%	0.30%	0.60%	0.90%	1.20%
Momento Resistente (kNm)	10.9	10.8	10.7	10.6	10.5
Altura del bloque de compresión $c$ (mm)	83.5	84.9	86.3	87.8	89.2
Carga máxima para falla a flexión $P_{M1}$ (kN)	65.4	64.9	64.3	63.8	63.2

En la Tabla 3 se puede observar cómo a medida que el porcentaje de fibra aumenta el valor de la altura de bloque de compresión  $c$  también aumenta, esto hace que el brazo interno de palanca de momento disminuya, por lo tanto, mientras el porcentaje de fibra de acero aumenta el momento resistente disminuye y la carga máxima para falla a flexión también.

A partir de los resultados mostrados en la Tabla 1 y Tabla 2, se puede observar que los valores de estimación de falla por flexión son más cercanos entre sí por cada porcentaje de fibra de acero, y también, que a medida que se aumenta el porcentaje de fibra de acero, el valor de predicción de falla tampoco varía con significancia. Por el contrario, las estimaciones de falla a cortante varían con mayor holgura tanto entre las estimaciones para un mismo porcentaje de acero, como también cuando el porcentaje de fibra de acero aumenta. Se muestran a continuación gráficas de los resultados mostrados, donde se observa el comportamiento de estimación de falla según el porcentaje de fibra:

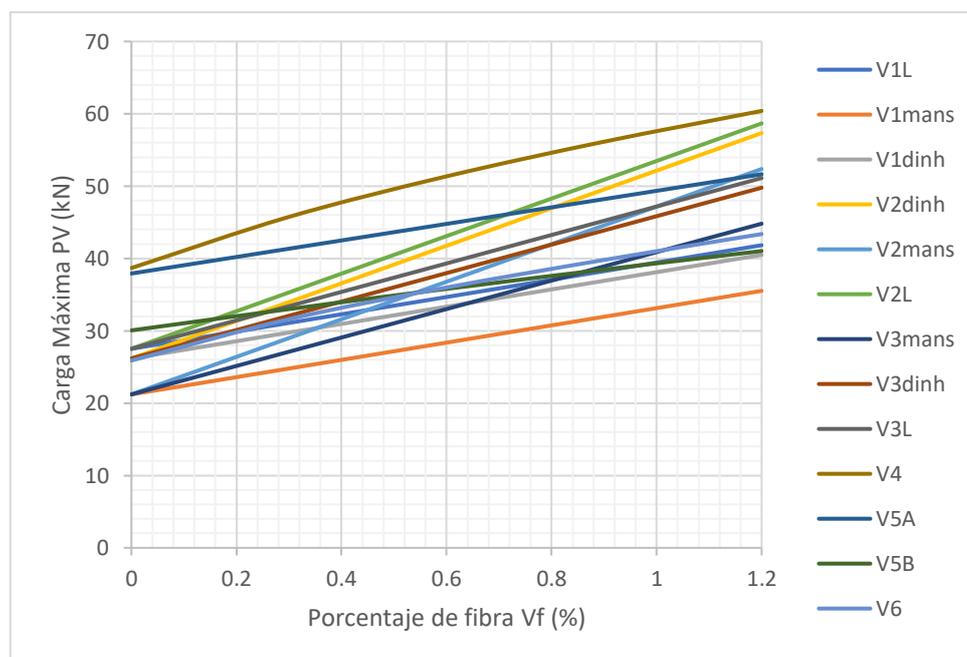


Figura 8: Predicciones de Falla por cortante según porcentaje de fibra de acero

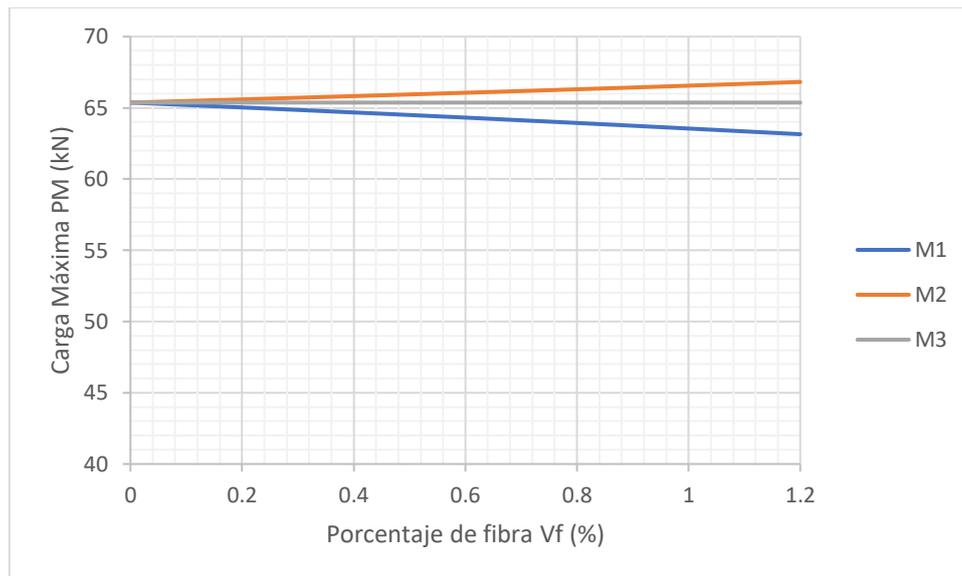


Figura 9: Predicciones de Falla por flexión según porcentaje de fibra de acero

Para asegurar una falla por cortante, en el diseño, se toma la estimación de falla con mayor valor de cortante y la estimación con menor valor de flexión para cada porcentaje de acero. Se muestra a continuación, un cuadro resumen de resultados, siendo  $P_V$  la predicción máxima de falla por cortante y  $P_M$  la predicción máxima de falla por flexión:

Tabla 4: Resultados de Predicción de Falla para Viga de Diseño SFRC

Identificación	Porcentaje de fibra (%)	$P_V$ (kN)	$P_M$ (kN)
VF0	0.0	38.7	65.37
VF03	0.3	45.75	64.86
VF06	0.6	51.36	64.32
VF09	0.9	56.15	63.75
VF12	1.2	60.40	63.15

Se puede observar en la tabla resumen de resultados que, para cortante, mientras el porcentaje de fibra de acero aumenta, la carga máxima a la cual va a fallar es mayor.

Para flexión, el aumento de fibra de acero no incide en la carga máxima para la falla. Se observa, además, que para los porcentajes de fibra de 0.9% y 1.2% las cargas máximas de falla para cortante y flexión tienen valores cercanos. Por lo tanto, para un porcentaje de fibra en el diseño de viga que sea menor al 0.9% se espera una falla por cortante, para 0.9% y 1.2% se podría esperar falla por flexión. Estos resultados son esperados, debido a que mientras hay más fibra de acero en el hormigón, esta contribuye más a la resistencia a cortante.

### Determinación del desempeño a flexión de una viga SFRC

Para poder determinar el desempeño a flexión de una viga SFRC, es decir su capacidad a flexión que está relacionado al módulo de ruptura en la zona de tensión de la viga, se seguirá la norma ASTM C 1609/C 1609M – 05 (ASTM Standards, C 1609/C 1609M – 05). El propósito del ensayo es determinar la capacidad resistente a tensión del hormigón SFRC, para esto, se ha realizado otro diseño de viga el cual no tiene refuerzo longitudinal y solo contiene la fibra como refuerzo. En el capítulo 7 de la norma ASTM C 1609/C 1609M – 05 (ASTM Standards, C 1609/C 1609M – 05) se establecen los requerimientos dimensionales de la viga a ensayar, la base como la altura de la viga deben tener al menos tres veces la longitud de la fibra y la longitud debe ser al menos 50 mm mayor de tres veces la altura de la viga.

Para cumplir dichos requerimientos, el diseño final de la viga para este ensayo es de 200x200x600 mm.

A continuación, una ilustración de la configuración del ensayo a flexión:

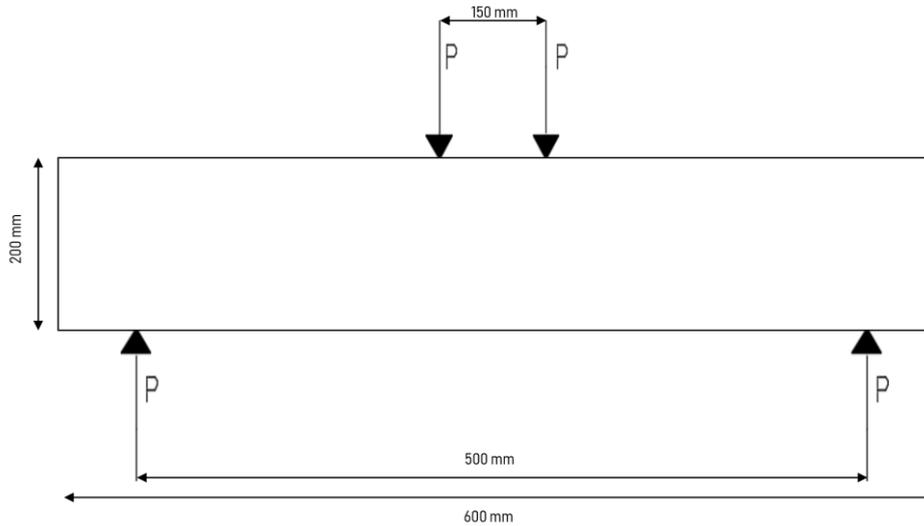


Figura 10: Ensayo a flexión en 4 puntos

Se han realizado además predicciones del esfuerzo a tensión de la viga SFRC para los diferentes valores de porcentaje de fibra de acero. Para ello, se ha tomado la siguiente ecuación de Thomas & Ramaswamy (2007):

$$f_{spcF} = 0.63(f'_{cu})^{0.5} + 0.288(f'_{cu})^{0.5}F + 0.052F \quad f'_{cu} \text{ en [MPa]}$$

$$f'_{cu} = \frac{f'_c}{0.8} \quad (\text{Neville, 1999})$$

Donde:

$f_{spcF}$ : esfuerzo a tensión de SFRC.

$F$ : factor fibra.

$f'_{cu}$ : esfuerzo de resistencia a compresión de cubo de hormigón.

$f'_c$ : esfuerzo de resistencia a compresión de cilindro de hormigón.

A continuación, se muestra una tabla con los resultados de predicción:

Tabla 5: Predicciones de esfuerzo a tensión de SFRC para cada porcentaje de fibra de acero

	Porcentaje de fibra de acero				
	0%	0.30%	0.60%	0.90%	1.20%
$f_{spcF}$ (MPa)	3.73	4.08	4.43	4.78	5.13

A partir de los esfuerzos máximos de tensión estimados y de la ecuación de esfuerzo máximo de la norma ASTM C 1609/C 1609M – 05 (ASTM Standards, C 1609/C 1609M – 05), se calcula la carga máxima estimada. La ecuación empleada se muestra a continuación:

$$P_{max} = \frac{f_{spcF} * b * d^2}{L}$$

Donde:

$b$ : ancho del espécimen.

$d$ : altura del espécimen.

$L$ : longitud del tramo.

Los resultados de predicción de carga máxima  $P_{max}$  se muestran a continuación:

	Porcentaje de fibra de acero				
	0%	0.30%	0.60%	0.90%	1.20%
$P_{max}$ (kN)	59.7	65.3	70.9	76.5	82.1

## Diseño de mezcla

Para el diseño de mezcla de hormigón se ha considerado diseñar un hormigón de resistencia estándar con fibra, para esto, se ha usado un programa de Excel desarrollado en la clase de Laboratorio de Hormigones basado en el diseño de mezcla constructivo (Neville, 1999) que se ha usado para los concursos internacionales de los *ACI Student Chapters*. Se ha creado una dosificación para cada viga de diseño según su cuantía y también para vigas sin refuerzo longitudinal.

A continuación, se muestra una tabla con las asunciones iniciales de aspectos técnicos para el diseño de mezcla, estos valores parten de mezclas y materiales usados previamente:

Tabla 6: Aspectos técnicos asumidos para el diseño de mezcla.

	Densidad ssd (g/cm <sup>3</sup> )	Absorción (%)
Agr. Grueso	2.7	1.5
Agr. Fino	2.75	1.8

Agua/Cemento (W/C)	0.45
Agregado/Cemento	2.5

Se fundirán un total de 20 vigas, dos de cada tipo según su porcentaje de fibra de acero de la viga de diseño SFRC (0%, 0.3%, 0.6%, 0.9%, 1.2%), y dos de cada tipo según su porcentaje de fibra de acero del diseño de viga para el ensayo según la norma ASTM C 1609/C 1609M – 05 (ASTM Standards, C 1609/C 1609M – 05). Adicionalmente, se fundirán tres cilindros de 10 x 20 cm por cada mezcla con diferente porcentaje de acero.

En función de las dimensiones de la viga de diseño y sus espaciamientos requeridos de acuerdo al refuerzo longitudinal (2 varillas de 16 mm), se utilizará un tamaño máximo nominal de agregado de 9.5 mm, por lo cual, se ha considerado como agregado grueso

el retenido en el tamiz 3/8' (9.5 mm) y el retenido en el tamiz No.4 (4.75 mm) lo demás pasante es considerado como agregado fino. El agregado fino no tiene la necesidad de clasificación ni tamización debido a que se pretende realizar una mezcla de hormigón común y comercial que no requiere de ello. Para el volumen total de hormigón a ser fundido ( $0.4872 \text{ m}^3$ ) se requiere de alrededor de 270 kg de agregado grueso, de 410 kg de agregado fino y 275 kg de cemento.

A continuación, se muestran las tablas de resultados de mezcla para cada diseño de mezcla:

Tabla 7: Resultados de Dosificación para 0% de fibra de acero

Elementos a fundir		Resultados Dosificación		Volumen de la mezcla	
Vigas reforzadas	2 [u]	Arena fina	81.65 [kg]	Arena fina	0.031 [m3]
Vigas no reforzadas	2 [u]	Grava	54.43 [kg]	Grava	0.020 [m3]
#Cilindros 4x8	3 [u]	Cemento	54.43 [kg]	Cemento	0.018 [m3]
Pérdidas	20%	Agua	26.70 [kg]	Agua	0.027 [m3]
Volumen total	0.096 [m3]	Fibras de acero	0.00 [kg]	Fibras de acero	0.000 [m3]
				TOTAL	0.096 [m3]

Tabla 8: Resultados de Dosificación para 0.3% de fibra de acero

Elementos a fundir		Resultados Dosificación		Volumen de la mezcla	
Vigas reforzadas	2 [u]	Arena fina	81.4 [kg]	Arena fina	0.0306 [m3]
Vigas no reforzadas	2 [u]	Grava	54.3 [kg]	Grava	0.0201 [m3]
#Cilindros 4x8	3 [u]	Cemento	54.3 [kg]	Cemento	0.0184 [m3]
Pérdidas	20%	Agua	26.6 [kg]	Agua	0.0266 [m3]
Volumen total	0.0960 [m3]	Fibras de acero	2.3 [kg]	Fibras de acero	0.0003 [m3]
				TOTAL	0.0960 [m3]

Tabla 9: Resultados de Dosificación para 0.6% de fibra de acero

Elementos a fundir		Resultados Dosificación		Volumen de la mezcla	
Vigas reforzadas	2 [u]	Arena fina	81.1 [kg]	Arena fina	0.0305 [m3]
Vigas no reforzadas	2 [u]	Grava	54.1 [kg]	Grava	0.0200 [m3]
#Cilindros 4x8	3 [u]	Cemento	54.1 [kg]	Cemento	0.0183 [m3]
Pérdidas	20%	Agua	26.5 [kg]	Agua	0.0265 [m3]
Volumen total	0.0960 [m3]	Fibras de acero	4.6 [kg]	Fibras de acero	0.0006 [m3]
				TOTAL	0.0960 [m3]

Tabla 10: Resultados de Dosificación para 0.9% de fibra de acero

Elementos a fundir		Resultados Dosificación		Volumen de la mezcla	
Vigas reforzadas	2 [u]	Arena fina	80.9 [kg]	Arena fina	0.0304 [m3]
Vigas no reforzadas	2 [u]	Grava	53.9 [kg]	Grava	0.0200 [m3]
#Cilindros 4x8	3 [u]	Cemento	53.9 [kg]	Cemento	0.0183 [m3]
Pérdidas	20%	Agua	26.5 [kg]	Agua	0.0265 [m3]
Volumen total	0.0960 [m3]	Fibras de acero	6.9 [kg]	Fibras de acero	0.0009 [m3]
				TOTAL	0.0960 [m3]

Tabla 11: Resultados de Dosificación para 1.2% de fibra de acero

Elementos a fundir		Resultados Dosificación		Volumen de la mezcla	
Vigas reforzadas	2 [u]	Arena fina	80.7 [kg]	Arena fina	0.0303 [m3]
Vigas no reforzadas	2 [u]	Grava	53.8 [kg]	Grava	0.0199 [m3]
#Cilindros 4x8	3 [u]	Cemento	53.8 [kg]	Cemento	0.0182 [m3]
Pérdidas	20%	Agua	26.4 [kg]	Agua	0.0264 [m3]
Volumen total	0.0960 [m3]	Fibras de acero	9.2 [kg]	Fibras de acero	0.0012 [m3]
				TOTAL	0.0960 [m3]

El material disponible en el Laboratorio de Materiales de la USFQ requiere de tamización para obtener el agregado grueso necesitado, la máquina tamizadora disponible es un limitante para la cantidad requerida; por lo tanto, se ha pedido colaboración a la cantera de Holcim Pifo y se ha recibido la donación de los 270 kg del agregado grueso necesitado. Todo el material que se necesita para la mezcla de vigas y cilindros ya se encuentra en el Laboratorio de Materiales de la USFQ listos para la fundición.

Para el procedimiento de mezcla en máquina del Laboratorio de Materiales de la USFQ, se seguirá la norma ASTM C192/C192M – 14 (ASTM Standards, C192/C192M – 14), en la sección 7.1.2 la norma especifica:

- Antes de empezar la rotación de la máquina, colocar el agregado grueso, algo del agua de la mezcla, y la solución de aditivo, de ser requerido.
- Encienda la mezcladora, luego añadir el agregado fino, el cemento y el agua con la mezcladora girando. Si no es práctico para una mezcladora particular o un ensayo particular añadir el agregado fino, cemento y agua mientras la mezcladora gira, los componentes se pueden añadir a la mezcladora parada después de haberla hecho girar pocas revoluciones con el agregado grueso y parte del agua.
- Después de que todos los componentes estén en la mezcladora, mezclar el concreto por 3 minutos. Seguido, descansar la mezcla por 3 minutos, seguido, mezclar por otros 2 minutos.

- Tapar la entrada de la mezcladora en el período de descanso para evitar evaporación.

Adicionalmente al proceso de mezcla, en la adición de los componentes de mezcla, la fibra de acero será añadida después del cemento y del agua, este procedimiento es recomendación por parte de BEKAERT para la mezcla.

Posteriormente, se continuará con la colocación y vibrado/varillado de los especímenes (vigas y cilindros) de acuerdo a las secciones 7.4.1, 7.4.2 y 7.4.3 de la norma ASTM C192/C192M – 14 (ASTM Standards, C192/C192M – 14).

Finalmente, se pondrán los especímenes en la piscina de curación del Laboratorio de Materiales de la USFQ, en curación estándar en agua a 23°C por 28 días para posteriormente ser ensayados.

## **Resultados Preliminares (Capítulo 4)**

El 19 de noviembre de 2018 se realizó una fundición de prueba con el propósito de confirmar y determinar una correcta dosificación en función de la trabajabilidad de la mezcla de hormigón con fibra. La fundición de prueba consideraba el volumen de 3 cilindros estándar de 10 cm de diámetro y 20 cm de profundidad con 5% en pérdidas para un diseño de mezcla con 1.2% de fibra. Se escogió el porcentaje de fibra de 1.2% porque mientras mayor cantidad de fibra se tenga en la mezcla de hormigón, mayor impacto va a tener en la trabajabilidad de la mezcla; por lo tanto, al ser 1.2% de fibra de acero el mayor porcentaje considerado en este estudio, este valor es el más crítico.

Se utilizaron los aspectos técnicos asumidos mostrados en el Capítulo 3, Diseño de Mezcla, y se obtuvieron los resultados de dosificación mostrados a continuación:

Tabla 12: Resultados de Dosificación para 3 cilindros 1.2% de fibra de acero.

Elementos a fundir		Resultados Dosificación		Volumen de la mezcla	
#Cilindros 4x8	3 [u]	Arena fina	4.157295 [kg]	Arena fina	0.00156 [m3]
Pérdidas	5%	Grava	2.77153 [kg]	Grava	0.00103 [m3]
Volumen total	0.0049 [m3]	Cemento	2.77153 [kg]	Cemento	0.00094 [m3]
		Agua	1.359436 [kg]	Agua	0.00136 [m3]
		Fibras de acero	0.4731 [kg]	Fibras de acero	0.00006 [m3]
				TOTAL	0.0049 [m3]

Una vez realizado el procedimiento de mezcla según la norma ASTM C192/C192M – 14 (ASTM Standards, C192/C192M – 14) mostrado previamente, en el momento de colocar el hormigón en los cilindros, se observa una mezcla muy poco trabajable. Adicionalmente, el volumen resultó menor que el calculado para los 3 cilindros, se obtuvo un volumen total de 2 cilindros y aproximadamente un tercio del tercero. En función a estos resultados, se concluye que los valores de porcentaje de absorción de los agregados asumidos inicialmente (1.5% y 1.8%) son menores a los reales, y el porcentaje de pérdidas utilizado de 5% fue insuficiente.

Se procede a realizar un ajuste en la dosificación del diseño de mezcla en donde los aspectos técnicos actualizados se muestran a continuación:

Tabla 13: Aspectos técnicos corregidos para el diseño de mezcla.

	Densidad ssd g/cm <sup>3</sup>	Absorción (%)
Agr. Grueso	2.7	2
Agr. Fino	2.75	4
Agua/Cemento (W/C)	0.55	
Agregado/Cemento	2.5	

Se realiza una nueva dosificación del diseño de mezcla, esta vez para un volumen de dos cilindros con 10% en pérdidas, se muestran los resultados:

Tabla 14: Resultados de Dosificación para 3 cilindros 1.2% de fibra de acero.

Elementos a fundir		Resultados Dosificación		Volumen de la mezcla	
#Cilindros 4x8	3 [u]	Arena fina	2.775 [kg]	Arena fina	0.00107 [m3]
Pérdidas	5%	Grava	1.85 [kg]	Grava	0.00069 [m3]
Volumen total	0.0035 [m3]	Cemento	1.85 [kg]	Cemento	0.00063 [m3]
		Agua	1.1655 [kg]	Agua	0.00117 [m3]
		Fibras de acero	0.315795 [kg]	Fibras de acero	0.00004 [m3]
				TOTAL	0.0035 [m3]

Para esta segunda prueba de mezcla se obtuvo el volumen de los 2 cilindros calculados satisfactoriamente, y se tuvo una mezcla de mejor trabajabilidad.

Para el procedimiento de colocar y consolidar el hormigón en los cilindros, se siguió la norma ASTM C192/C192M – 14 (ASTM Standards, C192/C192M – 14) secciones 7.3.2 y 7.4.2 en donde se especifica que para cilindros de 10x20 cm se deben verter dos capas y varillar 25 veces por capa a una profundidad de 25 mm, después de que cada capa sea varillada se deben realizar de 10 a 15 golpes en el molde para evitar huecos y que el aire salga de la mezcla.

Finalmente, se enrazan los cilindros de muestra y se los deja un día cubiertos con una tela húmeda para evitar evaporación temprana, y posteriormente se los sumerge en la piscina de curación a 23°C. Al momento de enrazar y uniformizar la superficie de los cilindros es importante recalcar que algunas fibras quedaban salidas, se tuvieron que retirar algunas de ellas y a otras se las podía insertar manual y cuidadosamente en la mezcla fresca, se recomienda utilizar cilindros estándar más grandes para evitar este inconveniente debido a las dimensiones de la fibra.

Este procedimiento se lo realizó para las dos pruebas de mezcla, a continuación, se muestra un cilindro de la Prueba 1:



Figura 11: Cilindro de Mezcla de Prueba 1

En la Figura 11 se puede observar el cilindro de la mezcla de Prueba 1, se muestran huecos de mala consolidación del hormigón, pese a que se siguió correctamente el procedimiento de la norma se obtuvo este resultado debido a que la mezcla era muy poco trabajable. Sin embargo, los huecos permiten ver la distribución aleatoria y uniforme deseada de las fibras de acero.

Se muestra a continuación, un cilindro de la Prueba de Mezcla 2:

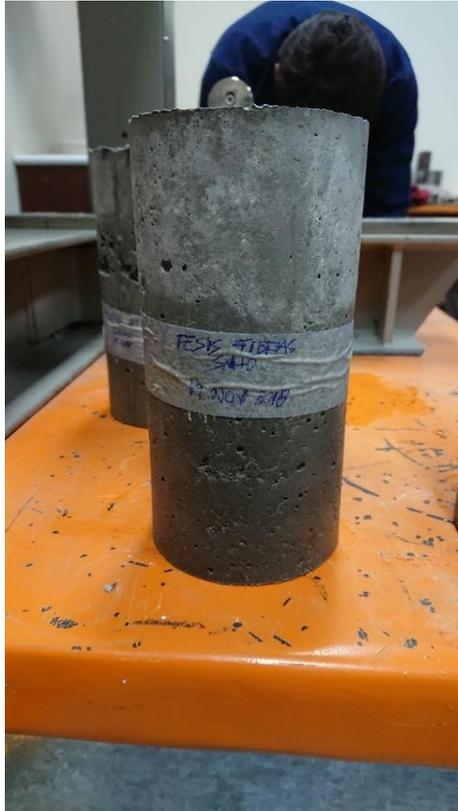


Figura 12: Cilindro de Mezcla de Prueba 2

En la Figura 12 se puede observar el cilindro de la mezcla de Prueba 2, esta fue más trabajable y al seguir la norma correctamente se obtuvo un buen resultado; sin embargo, se pueden observar aún pequeños huecos por aire encapsulado, por esto se recomienda que como proceso de consolidación no se usen varillas, sino, vibración. El Laboratorio de Materiales de la USFQ dispone de una mesa vibratoria, por lo tanto, se debe seguir la sección 7.4.3 y 7.4.4 de la norma ASTM C192/C192M – 14 (ASTM Standards, C192/C192M – 14).

El viernes 14 de diciembre se realizó la prueba de resistencia a compresión de los cilindros de la Prueba de Mezcla 2. Con una edad de 27 días y estando en curación en agua estándar en la piscina del Laboratorio de Materiales, se muestran los siguientes resultados:



Figura 13: Resistencia a compresión Cilindro 1 de Prueba de Mezcla 2

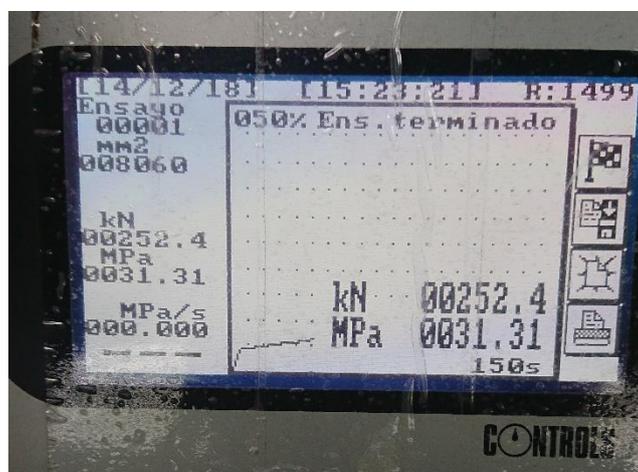


Figura 14: Resistencia a compresión Cilindro 2 de Prueba de Mezcla 2

Tabla 15: Resultados de Resistencia a Compresión de Cilindros de Prueba de Mezcla 2

	$f_{cr}$ (MPa)	Promedio (MPa)
Cilindro 1	31.47	31.43
Cilindro 2	31.39	

Pese a que el diseño de mezcla tuvo que ser alterada en su relación agua cemento por motivos de trabajabilidad, la resistencia a compresión del hormigón fue satisfactoria con

un promedio de 31.39 MPa, este valor de resistencia a compresión es concordante al asumido del de diseño de viga SFRC (28 MPa).

A continuación, se muestra la tabla actualizada de las estimaciones de carga máxima para falla a cortante y momento:

Tabla 16: Resultados de Predicción de Falla para Viga de Diseño Actualizada SFRC

<b>Identificación</b>	<b>Porcentaje de fibra (%)</b>	<b><math>P_V</math> (kN)</b>	<b><math>P_M</math> (kN)</b>
VF0	0.0	41.3	69.3
VF03	0.3	48.8	68.9
VF06	0.6	54.7	68.5
VF09	0.9	59.8	68.0
VF12	1.2	64.3	67.6

Tabla 17: Comparación de carga máxima para falla cortante entre valor de resistencia a compresión asumido y real

<b><math>P_V</math> (kN)</b> 28 MPa	<b><math>P_V</math> (kN)</b> 31.39 MPa	<b>Diferencia</b>
38.7	41.3	6.3%
45.75	48.8	6.2%
51.36	54.7	6.1%
56.15	59.8	6.1%
60.4	64.3	6.1%
		6.2% Promedio

Tabla 18: Comparación de carga máxima para falla a flexión entre valor de resistencia a compresión asumido y real

<b><math>P_M</math> (kN)</b> 28 MPa	<b><math>P_M</math> (kN)</b> 31.39 MPa	<b>Diferencia</b>
65.37	69.3	5.7%
64.86	68.9	5.9%
64.32	68.5	6.1%
63.75	68	6.3%
63.15	67.6	6.6%
		6.1% Promedio

Se puede observar que tanto para la falla cortante y la falla a flexión, las estimaciones de carga máxima tienen una diferencia de alrededor del 6% entre el valor de resistencia a compresión asumido versus el obtenido por el diseño de mezcla, por lo tanto es una mezcla de diseño aceptable.

Se proyecta que las fundiciones de las vigas diseñadas SFRC serán realizadas en enero del 2019, estas vigas posteriormente serán ensayadas para determinar su capacidad real y comparar los resultados con las estimaciones presentadas en este documento. Finalmente, se hará un estudio de la cinemática de las fisuras a cortante de las vigas ensayadas mediante DIC (Digital Image Correlation).

## Discusión (Capítulo 5)

Se han mostrado las estimaciones de capacidad de cortante y momento en función de las expresiones matemáticas recopiladas y mostradas en el Capítulo 2. Es importante mencionar y recalcar que las variables a considerar en las expresiones matemáticas se dividen en dos grupos, y así la estimación proviene de distintos conceptos de aproximación. Algunos de los autores (Lee et al. (2017), Dinh et al. (2011), Mansur et al. (1986)) estiman la capacidad cortante del hormigón SFRC considerando la contribución resistente del hormigón,  $V_c$ , y la contribución resistente de la fibra,  $V_{sf}$ , de manera independiente. Sin embargo, la contribución resistente al cortante,  $V_{sf}$ , depende también de la resistencia a compresión,  $f'_c$ , del hormigón, esto se debe a que la resistencia de la fibra de acero depende de su geometría y de la tensión transferida por parte del hormigón a través de la grieta. Por esta razón, pese a que se calculan la capacidad resistente del SFRC por expresiones distintas, en estas,  $V_{sf}$  depende de la capacidad resistente del hormigón.

Por otro lado, los demás autores recopilados en el presente trabajo (Arslan et al. (2017), Imam et al. (1997), Yakoub (2011)), utilizan una sola expresión para la estimación de capacidad cortante del SFRC, en la que el aporte de la fibra de acero, el hormigón y el refuerzo longitudinal están relacionados.

En función a las estimaciones mencionadas, se han hecho predicciones de carga máxima para falla a cortante, de ellas, la predicción que arroja valores más altos de carga máxima,  $P_v$ , para todos los porcentajes de fibra de acero en consideración, es la que parte de la estimación propuesta por Arslan et al. (2017), si se analiza esta expresión de resistencia a cortante, se toma en cuenta el efecto de esbeltez en la viga, es decir, su relación  $a/d$ , en las demás expresiones esto no es considerado. Es por esto que es

importante comparar los resultados de capacidad que se vayan a obtener de los ensayos, a las estimaciones realizadas para la viga de diseño SFRC desarrollada en este trabajo.

Es importante, además, tener una mezcla de hormigón SFRC según la dosificación diseñada. Pese a que las propiedades de absorción de los agregados que se usarán, y la relación Agua/Cemento han sido ajustados en función de las fundiciones prueba-error, se recomienda realizar el ensayo de determinación de densidad y absorción de los agregados según la norma ASTM C127 – 12 (ASTM Standards, ASTM C127 – 12), de esta manera se puede asegurar una mejor mezcla y se puede reducir el porcentaje de pérdida que se asume en el cálculo volumétrico inicial

## Resumen y conclusión (Capítulo 6)

Se ha desarrollado un diseño de viga de hormigón con fibras de acero sin refuerzo transversal, de tal manera, que al ser sometida a flexión se obligue a que esta falle a cortante. Dentro del diseño de viga se utilizarán distintos porcentajes de fibra (0, 0.3%, 0.6%, 0.9%, 1.2%) para los cuales, se han realizado estimaciones de capacidad cortante y momento en función de expresiones matemáticas recopiladas por estudios anteriores de vigas SFRC. A partir de estas estimaciones de capacidad resistente de la viga de diseño SFRC, se han realizado predicciones de carga máxima para falla cortante,  $P_V$ , y carga máxima para falla por flexión,  $P_M$ , se espera una falla por cortante en vigas de porcentaje de fibra de acero de 0% a 0.6%, y en vigas de 0.9% y 1.2% de porcentaje de fibra de acero se podría tener una falla por flexión.

Se realizó, además, otro diseño de viga SFRC sin refuerzo longitudinal para el ensayo de flexión ASTM C 1609/C 1609M – 05 (ASTM Standards, C 1609/C 1609M – 05), para determinar el desempeño a flexión de las vigas SFRC con porcentajes de fibra de acero de 0%, 0.3%, 0.6%, 0.9% y 1.2%.

Se ha hecho un diseño de mezcla para hormigón SFRC, y mediante fundiciones prueba-error, se ha definido una dosificación de mezcla para los todos los porcentajes de fibra de acero (0%, 0.3%, 0.6%, 0.9%, 1.2%) en función del porcentaje más crítico, 1.2%. Se determinó la resistencia a compresión de los cilindros SFRC obtenidos de la fundición de prueba con un valor promedio de 31.39 MPa.

## Referencias

- ACI Committee 318. (2014). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary. En A. C. Institute. Farmington Hills, MI.
- G. Arslan, R. Keskin, S. Ulusoy (2017). An experimental study on the shear strength of SFRC beams without stirrups. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics. Yildiz Technical University. Istanbul, Turkey.*
- ASTM Standards, ASTM C127 – 12. Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate.
- ASTM Standards, C 1609/C 1609M – 05. Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory.
- ASTM Standards, C192/C192M – 14. Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading).
- Carnovale, D., & Vecchio, F. (2014). Effect of Fiber Material and Loading History on Shear Behavior of Fiber-Reinforced Concrete. *ACI Structural Journal*, 1235-1244.
- Dinh, H. H., Parra-Montesino, J., & Wight, J. (2011). Shear Strength Model for Steel Fiber Reinforced Beams without Stirrup Reinforced . *ASCE Journal*.
- B. Filián (2017). Análisis del efecto de fibras de acero en vigas de hormigón ante fuerzas cortantes. *Universidad San Francisco de Quito*.
- M. Imam, L. Vandewalle, F. Mortelmans and D. Van Gemert (1997). Shear domain of fibre-reinforced high-strength concrete beams. Elsevier Science Ltd, *Engineering Structures*, Vol. 19, No. 9. pp. 738 747.
- Lee, S. C., Cho, J. Y., Vecchio, F. J., & . (2013). Simplified Diverse Embedment Model for SFRC Elements in Tension. *ACI Materials Journal*,, 110(4), 403-4012.
- Lee, D. H., Han, S. , Kim, K., & LaFave, J. M. (2017). Shear capacity of steel fiber-reinforced concrete beams. *Wiley fib*.
- Mansur, M. ASCE, Ong, K. C., & Paramasivam, P. (1986). Shear Strength of Fibrous Concrete Beams Without Stirrups. Technical Paper *ASCE*, 2066-2079.
- Narayanam , R., & Darwish, I. Y. (1985). The Effectiveness of Steels Fibers as Shear Reinforcement. *Concrete International*, 7(3), 35-40.
- Narayanan, R., & Kareem- Palanjian, A. S. (1984). Effect of Fiber Addition on Concrete Strengths. *Indian Concrete Journal*, 100-103.
- A. M. Neville (1999). Tecnología del Concreto. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.
- J. Thomas, A. Ramaswamy., (2007). Mechanical Properties of Steel Fiber-Reinforced Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering. ASCE*, 0899-1561

- Vandewalle L., Imam M., and Mortelmans F., “Shear Capacity of Steel Fiber High-Strength Concrete Beams”. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 149, October, 1994. pp. 227-242.
- H. Yakoub (2011). Shear Stress Prediction: Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams without Stirrups. *ACI Structural Journal. Technical Paper, 108-S29*
- Yang, Y. (2014). *Shear Behaviour of Reinforced Concrete Members without Shear reinforcement. A New Look at an Old Problem*. Netherlands: Optima.
- Yang, Y., Walraven, J., & Uijl, J. (2017). Shear Behavior of Reinforced Concrete Beams. *Journal Structural Engineering*, 10-24.

## ANEXO 1 Código de MATLAB para Predicciones de Falla de viga de diseño SFRC

```

function V = mShear(fc, Vf, d, As, bw, h, l, s, db)

%fc is the compressive strength of the concrete
%Vf is the percentage of fiber
%d is the effective depth
%As is the reinforcement area
%bw is the width of the beam
%h is the height of the beam
%l is the length of the beam
%s is the spacing between longitudinal bars
%db is the diameter of the bar

Lf = 60; %Length of fiber
df = 0.90; %diameter of fiber
rhof = 1; %bond factor = 1 because hooked end
fy = 420;
Es = 200e9;
da = 9.5; %maximum aggregate size in mm
Sts = fy/Es;
Cc = 20;
if fc <= 28

    B1 = 0.85;

elseif fc>28||fc<=55

    B1 = 0.85-0.05*(fc-28)/7;

else

    B1 = 0.65;

end

F1 = Vf*Lf*rhof/df;

ad = (l/3)/d

rratio = As/(bw*d)*100

%Flexure
a = (As*fy+.772*F1*bw^2)/(0.85*fc*bw-.772*F1*bw/B1);
c = a/B1;

Tf = 0.772*F1*bw*(d-c);
Sigt = 0.41*0.68*sqrt(fc)*F1;

Mn1 = As*fy*(d-a/2)+Tf*((h+c-a)/2);

Mn1 = Mn1/1000000

```

```

Mn2 = As*fy*(d-c)+Sigt*bw*(h-c)*(h-c)/2+0.85*fc*B1*c*bw*(c-a/2);

Mn2 = Mn2/1000000

%Imam
sf = (1+sqrt(5.08/da))/sqrt(1+d/(25*da));
w = rratio*(1+4*F1)/100;
ne = ((rratio/100)*fy+2.32*F1)/(.85*fc+3.08*F1);

Mn3 = (rratio/100)*fy*bw*d^2*(2-ne)/2+.83*F1*bw*d^2*(.75-ne)*(2.15-
ne);

Mn3 = Mn3/1e6

Pm1 = Mn1/(1/970/3)

Pm2 = Mn2/(1/970/3)

Pm3 = Mn3/(1/970/3)

%Shear
csimp = 0.5*d;
Vc1 = (0.16*sqrt(fc)+17.2*(rratio/100)/ad)*bw*d/1000;
Vc2 = 0.29*sqrt(fc)*bw*d/1000;
Vc =
min((0.16*sqrt(fc)+17.2*(rratio/100)/ad)*bw*d,(0.29*sqrt(fc))*bw*d);
%Mansur
Vcdinh = 0.11*fc*B1*csimp*bw/1000; %Dinh

%Lee
Tao = 0.825*sqrt(fc);
V1 = 0.41*F1*Tao*bw*(d-csimp);%using cot 45
Vcc = 0.52*sqrt(fc)*bw*csimp;
n = 0.47*d/(h-d);
ws = n*Sts*3*(h-d);
vci = 0.18*sqrt(fc)/(0.31+0.686*ws);
Vci = vci*bw*(d-csimp);
Vcl = min(Vcc,Vci);
V1L = V1/1000+Vcl/1000
V1mans = V1/1000+Vc/1000
V1dinh = V1/1000+Vcdinh

%Dinh
Tao2 = 0.85*sqrt(fc);
V2 = 0.5*Tao2*F1*bw*(d-csimp)*cotd(30); %using 30 degrees
V2dinh = V2/1000+Vcdinh
V2mans = V2/1000+Vc/1000
V2L = V2/1000 + Vcl/1000

%Mansur
Tao3 = 0.68*sqrt(fc);
V3 = 0.41*Tao3*F1*bw*d;
V3mans = V3/1000+Vc/1000
V3dinh = V3/1000+Vcdinh
V3L = V3/1000 + Vcl/1000

```

```
%Arslan
```

```
V4 = (0.2*(fc^(2/3)*csimp/d)+sqrt((rratio/100)
*(1+4*F1)*fc))*((3/ad)^(1/3));
V4 = V4*bw*d/1000
```

```
%Yakoub
```

```
xi = 1/sqrt(1+d/(25*da));
V5A =
.83*xi*(rratio/100)^(1/3)*(sqrt(fc)+249.28*sqrt((rratio/100)/ad^5))+0.
162*F1*sqrt(fc);
V5A = V5A*bw*d/1000
```

```
k = min(50/Lf/df,1);
Sx = k*(2*(Cc+s/10)+.25*0.4*db/(rratio/100));
Sxe = max((35*Sx)/(16+da),.85*Sx);
dv = max(0.9*d,.72*h);
```

```
Vtrial = 50;
dif = 1;
i = 1;
```

```
while dif > 0.0000001
```

```
    M = Vtrial*1/3;
    Ex = (M/dv+Vtrial)*1000^3/(2*Es*As);
    Beta = (.4/(1+1500*Ex))*(1300/(1000+Sxe));
```

```
    V5B = Beta*sqrt(fc)*(1+.7*F1)*bw*d/1000;
    dif = abs(Vtrial - V5B);
    Vtrial = V5B;
    i = i+1;
```

```
end
```

```
V5B
```

```
%Imam
```

```
V6 = 0.6*bw*d*sf*w^(1/3)*(fc^0.44+275*sqrt(w/ad)^5);
V6 = V6/1000
```

```
fcu= fc/0.8;
fspcF = 0.63*(fcu^0.5)+ 0.288*(fcu^0.5)*F1 + 0.052*F1
```