

# ALAMBRES DE ACERO LOCALES PARA PRODUCIR SFRC: ESTUDIO EXPERIMENTAL A FLEXIÓN

Alejandro Meza-de Luna\*, Rodolfo Benjamín Sierra Ortiz, Fernando Chávez Valdivia, Rafael Reyes Cortes, Sandra Paola Morales Martínez

*Cuerpo Académico Manufactura, Caracterización y Comportamiento Mecánico de los Materiales para una Ingeniería Verde, Tecnológico Nacional de México/IT de Aguascalientes, Av. Adolfo López Mateos No. 1801 Ote. Fracc. Bona Gens, Aguascalientes, Ags., México. C.P. 20256*

*Fecha de recepción: 11 de octubre de 2022 - Fecha de aceptación: 20 de junio de 2023*

## Resumen

El concreto reforzado con fibras de acero (SFRC) es un material compuesto, generalmente reforzado con fibras de acero de alta resistencia a la tracción. Sin embargo, la disponibilidad de fibras industriales, producidas por una marca comercial, es escasa en algunas regiones del mundo, lo que agrega un costo adicional al SFRC debido a las tarifas de transporte. Como alternativa a este inconveniente se proponen alambres locales recocidos y galvanizados para reforzar el concreto. Los alambres de acero fueron ondulados y cortados para producir fibras en diferentes longitudes, después mezclados con el concreto en varias dosis de fibras. En el presente trabajo se estudiaron la resistencia a la tensión y el comportamiento superficial de los alambres locales, y se correlacionaron con la trabajabilidad, la resistencia a la flexión y el costo relativo. Los resultados han demostrado una reducción de costos del 60% cuando se utiliza acero local, con un comportamiento a la flexión similar al de fibra industrial, pero con un bajo rendimiento de trabajabilidad de las fibras recocidas.

**Palabras claves:** SFRC; refuerzo alternativo; alambre galvanizado; alambre recocido; resistencia a flexión, costo.

## LOCAL STEEL WIRES TO PRODUCE SFRC: FLEXURAL EXPERIMENTAL STUDY

### Abstract

Steel fibers reinforced concrete (SFRC) is a composite material, reinforced usually with high tensile strength steel fibers. However, the availability of industrial fibers (produced by a trademark) is scarce in some regions of the world, adding an extra-cost to the SFRC due to transportation fees. As an alternative to this drawback, in this research, local annealed and galvanized wires are proposed to reinforce the concrete. The steel wires were crimped, cut to produce fibers in different longitudes, and mixed with the concrete in various fiber dose. Tensile strength and superficial behavior of the local wires were studied, and correlated with the workability, flexural strength, and relative cost. The results have demonstrated a cost reduction of 60% when using local steel, with similar flexural behavior to those with industrial fiber (produced by a trademark), but a low workability performance of annealed fibers.

---

\*alejandro.meza@mail.ita.mx

**Keywords:** SFRC; alternative reinforcement; galvanized wire; annealed wire; flexural strength; cost.

## Introducción

El concreto es uno de los materiales más utilizados en el mundo para construcciones estructurales, puede adoptar diferentes formas para generar formas complejas, con una capacidad mecánica considerable bajo carga de compresión (Fu *et al.*, 2019). Sin embargo, el concreto es débil bajo cargas de tensión. Según Woo *et al.* (2014) y Yoo & Banthia (2009) la falla del concreto se presenta en la región bajo tensión. Este problema generalmente se reduce utilizando refuerzo convencional (barras de refuerzo) para fortalecer la capacidad de tensión del concreto. Sin embargo, Chu *et al.* (2018) y Correal *et al.* (2018) indican que el refuerzo del concreto con barras de refuerzo tiene la desventaja del tiempo requerido en el montaje. Otra alternativa para reducir la debilidad del concreto bajo carga tensional es el uso de fibras de acero distribuidas al azar, para crear lo que se conoce como concreto reforzado con fibras de acero (SFRC). El tiempo necesario para generar una estructura con SFRC es una ventaja en comparación con el que esta armado con barras de refuerzo (Fu *et al.* 2019; Chu *et al.* 2018). Estudios han analizado las capacidades mecánicas del SFRC; Daud *et al.* (2020) y Bernard *et al.* (2019) evaluaron el comportamiento mecánico de SFRC bajo carga de flexión con estudios experimentales y numéricos; sus resultados destacan el efecto positivo de las fibras en el comportamiento mecánico del concreto reforzado con fibras, lo que conduce a una mayor ductilidad y resistencia posterior a la fisuración. Jangid *et al.* (2020), Iqbal *et al.* (2019) y Meza *et al.* (2014) señalan que la forma de las fibras es una consideración importante para mejorar el desempeño mecánico del SFRC, destacando las capacidades de la matriz de concreto con fibras con gancho en sus extremos. Marar *et al.* (2017) estudiaron la influencia de la fracción

de volumen de fibra y la relación de aspecto en el comportamiento al corte del SFRC; sus resultados mostraron que la resistencia al corte aumenta con la fracción de volumen, mientras que la relación de aspecto no tuvo un efecto claro en la respuesta.

Las principales desventajas del SFRC son la pérdida de trabajabilidad del concreto y el mayor costo causado por las fibras. Ragalwar *et al.* (2020) demostraron una reducción en la trabajabilidad de los lotes de SFRC debido a la incorporación de los elementos de refuerzo. Correa *et al.* (2018), Meza *et al.* (2014) y Dvorkin *et al.* (2011) señalaron que el costo de la fibra genera una disminución en la aplicación de estos elementos de refuerzo para aplicarlos en el sector de la construcción. Este efecto es mayor en las zonas donde se necesita importar las fibras industriales. Emón *et al.* (2017) indican que las fibras de acero en Bangladesh no están disponibles en el mercado local, y su adquisición requiere un costo extra debido al transporte desde el proveedor más cercano. Para superar este inconveniente, algunos investigadores han propuesto el uso de fibras alternativas. Zhong y Zhang (2020) estudiaron el SFRC con acero para neumáticos; los resultados mostraron una reducción en la contracción con un aumento de la resistencia a la flexión. Pajak (2019) probó el comportamiento a la fatiga por flexión del SFRC con varias cantidades de fibras de acero para neumáticos; sus resultados indicaron un aumento positivo en la resistencia a la flexión posterior al pico, que aumenta proporcionalmente con el número de elementos reforzados.

Otros estudios sugieren el uso de diferentes materiales metálicos para reforzar el concreto. Sabapatía *et al.* (2019) experimentó con chatarra de cables eléctricos de aluminio; sus datos mostraron que el SFRC con fibra de aluminio aumenta la resistencia a la

compresión y tensión, que dependen de la fracción de volumen de fibra. Emón *et al.* (2017) propusieron el uso de alambre de acero galvanizado adquirido en centros de distribución local para generar fibras rectas para reforzar el concreto; los resultados mostraron una mejora en la resistencia a la flexión y la resistencia residual en comparación con el concreto normal (sin fibras). Bhogayata y Arora (2017) estudiaron el SFRC con fibras de desecho plástico metalizado; los resultados de las pruebas demostraron un aumento en la resistencia a la tensión y la ductilidad debido a la adición de las fibras propuestas. Caggiano *et al.* (2017) analizaron la respuesta mecánica del SFRC con fibras de acero industrial y recicladas; sus datos confirmaron que las fibras industriales pueden ser reemplazadas por fibras recicladas sin un deterioro significativo en las propiedades mecánicas.

El alambre galvanizado y el recocido son dos aceros con aplicaciones comunes en el campo de la construcción, con alta distribución en ferreterías y almacenes. Estos materiales tienen propiedades mecánicas diferentes debido a su procedimiento de fabricación. El alambre de acero galvanizado está hecho de acero dulce, fabricado a partir de varillas de acero laminadas y cubierto con una fina capa de zinc que reduce su rugosidad superficial (Emon *et al.* 2017; Gelfi *et al.* 2017). Por otro lado, el alambre de acero recocido tiene una alta capacidad de deformación debido a su tratamiento térmico, que mejora la trabajabilidad en frío, que depende de varios parámetros del proceso como la temperatura de recocido esferoidizado y el tiempo de calentamiento (Yang y Lin, 2016; Yang *et al.*, 2008).

En este trabajo se propone el uso de aceros locales, alambre galvanizado y recocido, como materiales para la fabricación de fibras de refuerzo del concreto. Los alambres de acero fueron seleccionados por su disponibilidad en el estado de Aguascalientes, México. Se tiene

la hipótesis que sus capacidades mecánicas (ductilidad y resistencia) podrían generar una solución diferente como elemento de refuerzo. Para la mejor adherencia de las fibras a partir de los alambres, estos fueron deformados plásticamente para generar una forma ondulada y se cortaron en varias longitudes para estudiar el efecto de la relación de aspecto. Las muestras de SFRC con fibras alternativas en diferentes proporciones de fibra se probaron utilizando una disposición de carga de punto central para determinar la resistencia máxima a la flexión y su resistencia residual. Los resultados demuestran que existe un buen desempeño mecánico del SFRC con las fibras propuestas. Parámetros como la resistencia última y la resistencia residual, medidos con  $R_{e,3}$ ,  $R_{5,10}$  y  $R_{10,20}$  muestran un comportamiento similar al SFRC con fibras industriales, con una reducción su costo. El estudio es relevante para aquellas estructuras de SFRC que buscan un material local para reforzar el concreto.

## **Materiales y métodos**

### **Fibras onduladas generadas**

Los alambres galvanizado y recocido son las materias primas utilizadas para producir las fibras de refuerzo. Los alambres fueron adquiridos en ferreterías del estado de Aguascalientes, México. El alambre recocido tenía un diámetro de 1.78 mm y una composición de 0.1% de carbono, 0.04% de fósforo, 0.30 – 0.50% de magnesio y 0.05% de azufre. El alambre se fabricó de acuerdo con la norma ASTM-A-853, con una resistencia máxima a la tracción de 343.2 a 451.1 MPa (Deacero, 2020). Por otro lado, el alambre galvanizado tenía un diámetro de 1.2 mm y una composición de carbono 0.07%, fósforo 0.03-0.04%, magnesio 0.30-0.31%, azufre 0.035-0.045% y silicio 0.075-0.085%. El alambre galvanizado tiene una capa de zinc de 250 kg/m<sup>2</sup>; y se fabricó de acuerdo con la norma ASTM-A-641, con una resistencia máxima a la tensión de 620.5 a 758.4 MPa (Deacero, 2020).

La producción de las fibras a partir de alambres locales comenzó con un proceso de ondulado, procedimiento que se realizó en condiciones de trabajo en frío con un dispositivo manual, diseñado y fabricado por Meza y equipo de trabajo. El dispositivo tiene una guía, dos engranajes y una manivela; los dos engranajes, utilizados para producir la forma engarzada de los alambres, tienen un módulo de 2.5, con 22 dientes de 3.75 mm de altura. En la parte

trasera del dispositivo hay una manivela, que se utiliza para operarla manualmente. El dispositivo produjo un alambre rizado continuo, con una fuerza máxima para deformar el alambre de 18 a 25 N. Después del proceso de ondulado de los alambres, fueron medidos con un pie de rey digital, marcados y cortados para producir las fibras. La figura 1 muestra el mecanismo de ondulado utilizado para generar la ondulación de los alambres.



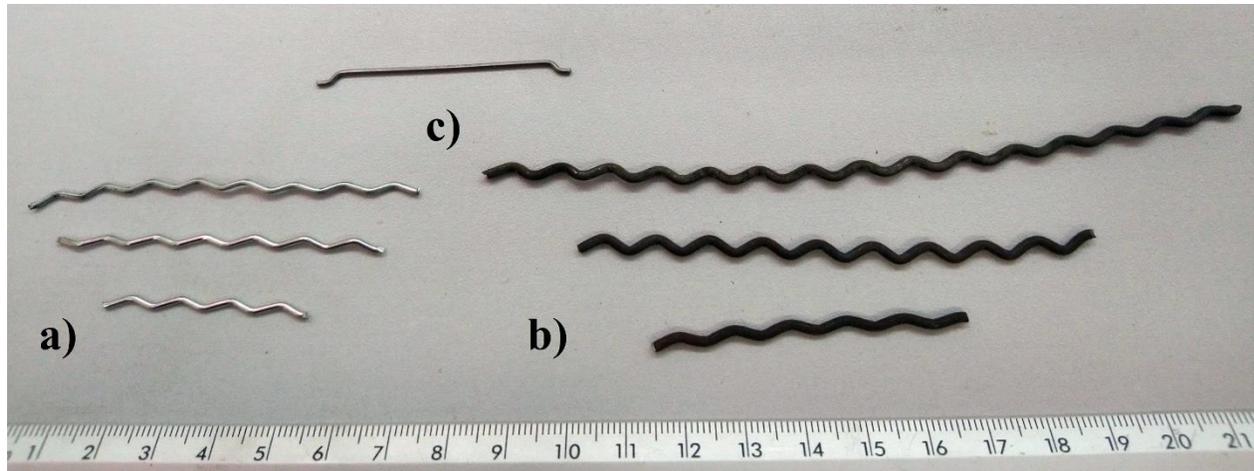
**Figura 1.** Mecanismo ondulator para alambre

## Materiales

Este estudio considera tres fibras, dos producidas con materiales locales (acero galvanizado y recocido), y una fibra de acero de marca registrada. Las fibras a partir de alambre galvanizado tienen tres relaciones de aspecto (30, 45 y 60 mm/mm) y los de alambre recocido (30, 55 y 80 mm/mm). Según el ACI (ACI, 2010), la relación de aspecto debe ser mayor a 20 para obtener un buen desempeño mecánico, por lo que las fibras producidas son adecuadas. Por otra parte, la fibra industrial fue Dramix con una longitud de 60 mm, un diámetro de 0.9 mm y una relación de aspecto de 64. Se seleccionó la fibra Dramix porque demostró un mejor desempeño que otras fibras

comerciales (Meza *et al.*, 2014). La figura 2 muestra las tres fibras de acero utilizadas en las pruebas experimentales.

En el diseño de mezcla se utilizaron tres dosis de fibras para estudiar su efecto sobre la trabajabilidad y la resistencia a flexión. Las muestras de SFRC con fibras galvanizadas se prepararon con dosis de 10, 25 y 40 kg/m<sup>3</sup>, y las muestras de SFRC con fibras recocidas se prepararon con dosis de 20, 35 y 50 kg/m<sup>3</sup>. Además, se utilizaron muestras de control (sin fibras) y con fibras comerciales en dosis de 20, 30 y 40 kg/m<sup>3</sup>. En total se ensayaron 42 muestras (15 con fibra galvanizada, 15 con elementos recocidos, 9 con fibras industriales y 3 sin elementos reforzados).



**Figura 2.** Fibras utilizadas en el estudio a) propuesta a partir de alambre galvanizado b) propuesta a partir de alambre recocido c) Dramix®

La matriz cementicia fue compuesta por cemento y dos agregados (arena natural y grava). El cemento fue Portland ordinario tipo I, con una densidad de  $3.15 \text{ g/cm}^3$ . La arena natural tenía densidad de  $2.5 \text{ g/cm}^3$ , tamaño máximo de  $4.75 \text{ mm}$  y absorción de agua del 3%. Mientras que la grava tenía tamaño máximo de  $20 \text{ mm}$ , densidad de  $2.68 \text{ g/cm}^3$  y absorción de agua de 1.1%. El concreto poseía las siguientes proporciones de mezcla: cemento  $383 \text{ kg/m}^3$ , arena natural  $672 \text{ kg/m}^3$ , grava  $1100 \text{ kg/m}^3$  y agua  $192 \text{ kg/m}^3$ ; con una relación agua/cemento de 0.5. La resistencia a la compresión promedio a los 28 días fue de  $40 \text{ MPa}$ , ensayada según la norma ASTM C39 (ASTM C39, 2018) en probetas cilíndricas de  $100 \times 200 \text{ mm}$  (diámetro y longitud, respectivamente).

### Método para la elaboración de la mezcla y ensayo

Para la elaboración de la mezcla se utilizó el siguiente procedimiento. Los constituyentes del concreto (arena, cemento, agregados y fibras) se mezclaron manualmente durante 3 min; a continuación, se dispensó el agua y se mezcló durante otros 3 min para obtener una mezcla homogénea. Con este procedimiento el concreto lució con homogeneidad en la distribución de los materiales. Siguiendo los

lineamientos de la norma ASTM C78 (ASTM C78, 2000), la mezcla se vertió en moldes prismáticos de dimensiones estándar  $150 \times 150 \times 500 \text{ mm}$ . El procedimiento de curado -a los 28 días- fue de acuerdo a la norma ASTM C192 (ASTM C192, 2000). En total se generaron 14 especímenes de concreto: 5 con fibras galvanizadas, 5 con fibras recocidas, 3 con fibras industriales y 1 sin fibras.

## Resultados y discusión

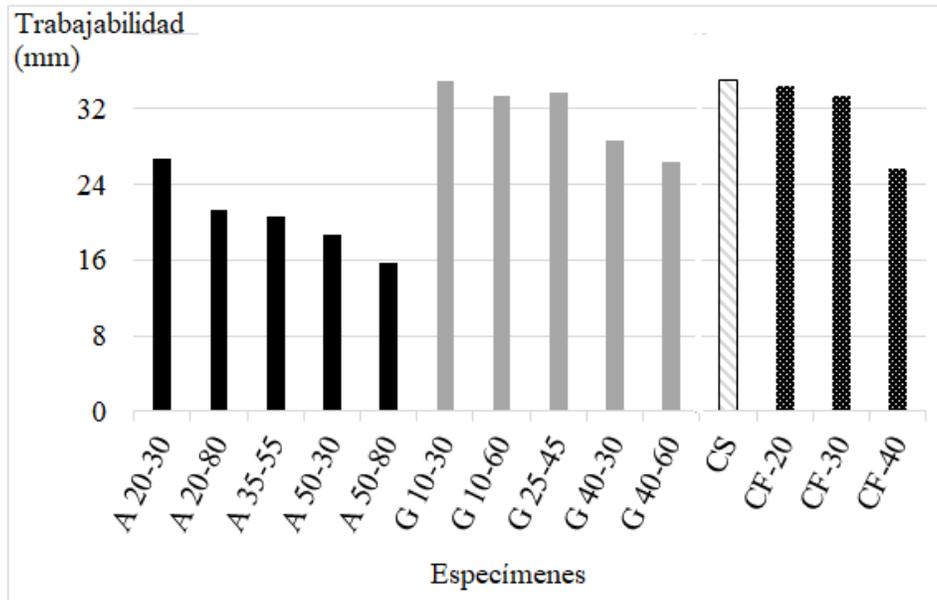
### Propiedades del concreto en estado fresco

La trabajabilidad de las matrices de concreto se realizó de acuerdo a la norma ASTM C143 (ASTM C143, 2000). La figura 3 ilustra el asentamiento promedio de las diferentes muestras de SFRC y aquellas sin fibras. Los resultados muestran una reducción de la trabajabilidad en SFRC en comparación con las muestras de control; sin embargo, dicho efecto es normal de acuerdo a lo reportado en diferentes especímenes de SFRC con fibras industriales (Chu *et al.*, 2018; Fancini *et al.*, 2018). Además, los resultados indican que la reducción de la trabajabilidad depende del material de fibra, la dosis de fibra y la relación de aspecto. Los lotes de SFRC con fibras industriales y aquellos con alambre de acero galvanizado local tienen escasa reducción en la trabajabilidad que el de control, teniendo una

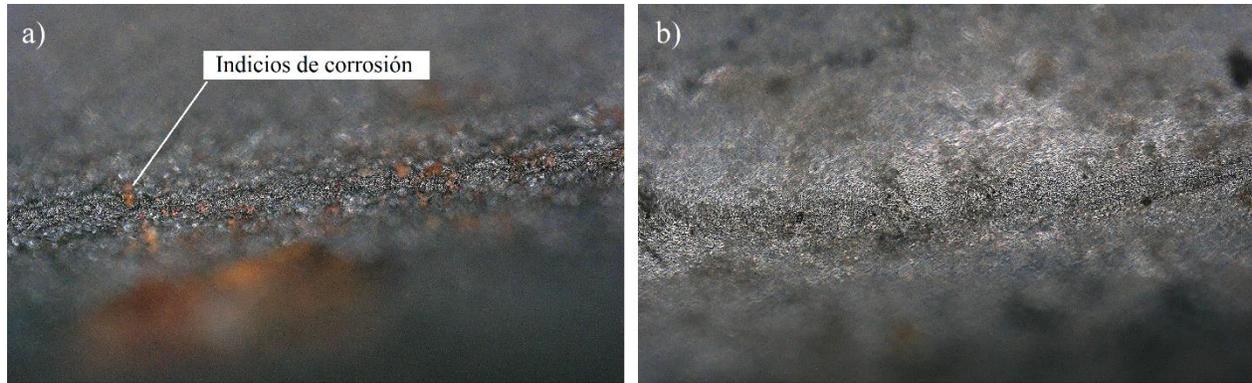
diferencia global del 11%, dependiendo de la dosis de fibra y la relación de aspecto. Sin embargo, los elementos SFRC que utilizan alambre recocado presentaron reducción máxima del 41%. La diferencia entre los resultados observados en SFRC con fibras recocidas está relacionada con la capacidad de atrapar agua en la superficie del alambre. La figura 4 muestra el estado de la superficie de los alambres galvanizados y recocidos, con un zoom de 300X. Se apreció mayor porosidad en la superficie del alambre recocado que en la superficie del alambre galvanizado; con indicios de corrosión en la superficie del alambre recocado, debido a la capacidad de atrapar la humedad del ambiente. Esta condición superficial del material produce una absorción de la humedad de la mezcla de concreto, generando una reducción de la trabajabilidad. En cambio, la capa de zinc, en la superficie del alambre galvanizado, provoca una superficie lisa sin estimulación para la

acumulación de agua en la superficie; la baja desviación superficial favoreció la fluidez de los lotes de SFRC.

La relación entre las características de las fibras inmersas en el concreto y su revenimiento indican que la combinación de dosis alta y alta relación de aspecto de fibras en el concreto generó una reducción en la trabajabilidad de la mezcla. La nomenclatura utilizada para identificar los especímenes relaciona el material de fibra (G para alambre de acero galvanizado local, A para alambre de acero recocado local, CF para fibras industriales y CS para el espécimen de control), seguido de la dosis de fibra (en  $\text{kg/m}^3$ ) y la relación de aspecto de la fibra (mm/mm). Por ejemplo, G 25-45 representa los especímenes de SFRC con fibras locales de acero galvanizado en dosis de fibra de  $25 \text{ kg/m}^3$  y relación de aspecto de fibra de 45 mm/mm.



**Figura 3.** Resultados de trabajabilidad de muestras SFRC con alambres locales y sus referencias comparativas (con fibras industriales y sin fibras)



**Figura 4.** Imágenes superficiales de los materiales locales de alambre de acero que se utilizaron para producir fibras: a) alambre recocido, b) alambre galvanizado

### Propiedades del concreto en estado endurecido

#### Resistencia a flexión

La capacidad a flexión de los especímenes se probó de acuerdo con ASTM C293 (ASTM C293, 2016), con carga en el punto central. Los

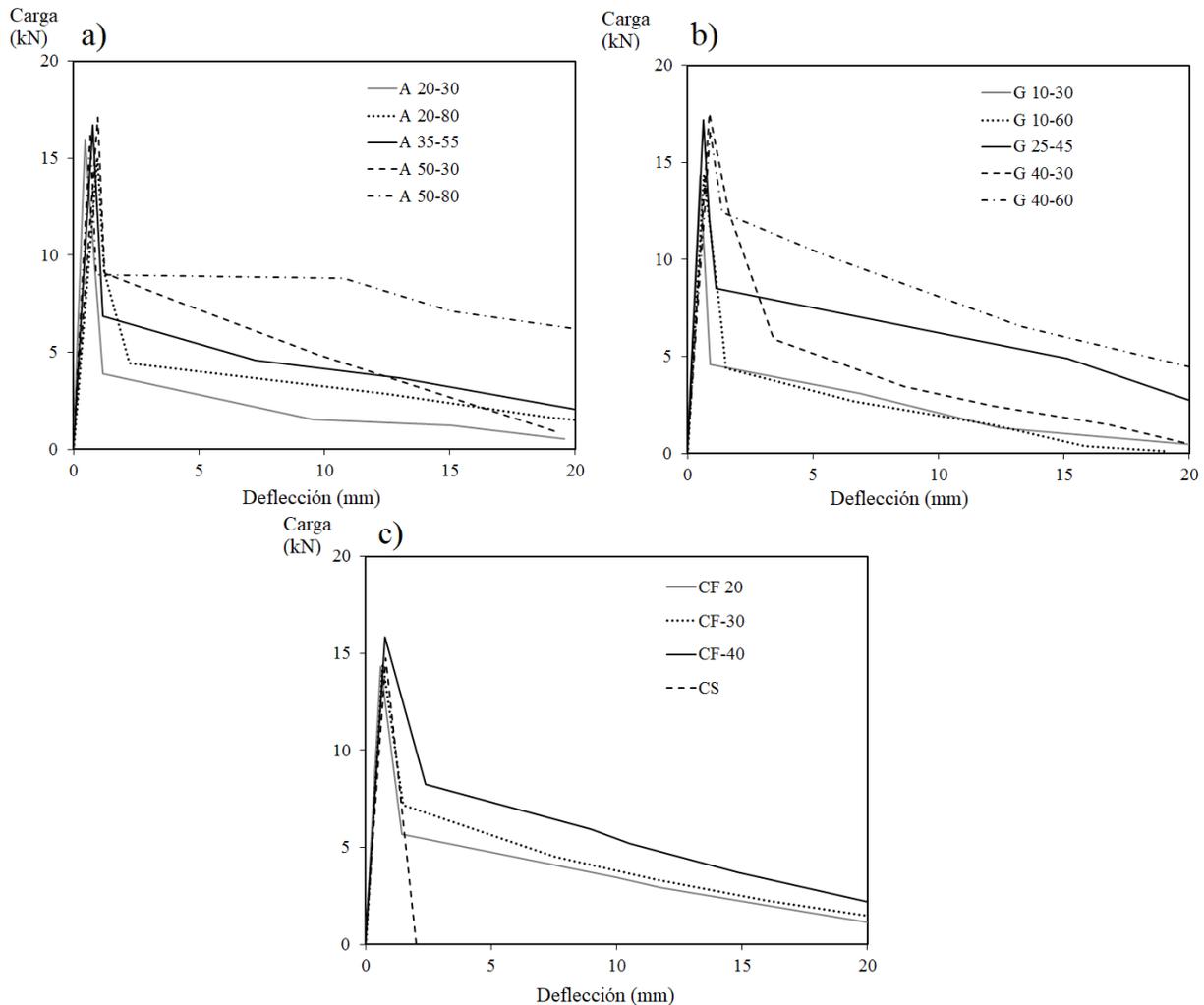
ensayos se realizaron con una máquina hidráulica Galdabini, con una capacidad de 98 kN y una velocidad de desplazamiento de 5 mm/min. La deflexión transversal fue medida con un reloj comparador de 25 mm, ubicado para medir la deformación central de la muestra. La figura 5 muestra una imagen de uno de los ensayos realizados.



**Figura 5.** Ensayo a flexión de especímenes prismáticos

La figura 6 muestra el comportamiento a la flexión de los especímenes con fibras y sin fibras. Las curvas muestran la deformación elasto-plástica del SFRC, seguida de la carga última y la resistencia residual. De acuerdo con Kaur *et al.* (2012), la carga última a flexión representa el agrietamiento de la matriz del concreto, y la sección posterior al

agrietamiento (curva después de la carga máxima) indica la tenacidad residual. La participación mecánica de las fibras como refuerzo se observa sobre la resistencia residual, generando ductilidad post-fisuración a la matriz del concreto, la cual depende del tipo de fibras y dosis.



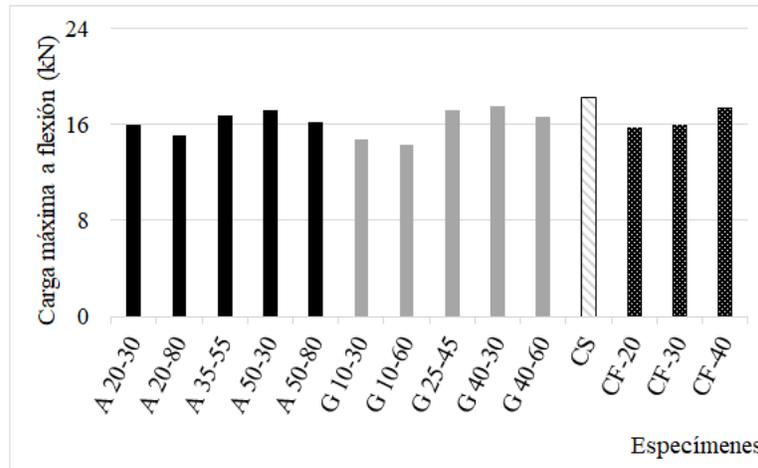
**Figura 6.** Comportamiento a la flexión de SFRC con: a) alambre de acero recocido local b) alambre de acero galvanizado local y c) fibras industriales y muestras de control

### Carga máxima a flexión

La figura 7 muestra la carga última de flexión registrada en las muestras de SFRC con alambres de acero locales, elementos comerciales y muestras de control sin fibras. Los resultados indican que las muestras de control (sin fibras) tienen una capacidad superior al concreto reforzado con fibras. Los SFRC con fibras industriales tuvieron una reducción global del 10%; mientras que los SFRC con acero local galvanizado 12% y los de acero local recocido 11%. La disminución de la capacidad de carga normal en SFRC es normal, debido a la incorporación de aire

encapsulado en el concreto en la interfaz entre el concreto y la fibra (Hongbo *et al.*, 2020; Ragalwar *et al.*, 2020; Iqba *et al.*, 2019; Pakravan y Ozbakkaloglu, 2019). Por otro lado, el efecto del cambio en las dimensiones de las fibras locales tiene poca influencia en la carga última a flexión; la diferencia es de 6% entre los especímenes de alambre recocido con RA de 30 (16 kN) y RA de 80 (15 kN). Además, las muestras de SFRC con alta dosis de fibra demostraron una carga última a flexión superior a aquellas con baja proporción de fibra, la diferencia fue entre 7 a 16%. Demostrando que el aumento en dosis en

especímenes SFRC tiene un efecto positivo en la capacidad de carga máxima.



**Figura 7.** Carga máxima de flexión del SFRC con alambres de acero locales, fibras industriales y muestras de control

### Tenacidad a flexión

La tenacidad a la flexión del SFRC depende de factores como la relación de aspecto, la geometría y el contenido de fibra (Borg et al., 2016; Kaur et al., 2012; Soutsos et al., 2012). En este artículo, la tenacidad a la flexión se evaluó de acuerdo con las normas ASTM C1018 (ASTM C1018, 2005) y JSCE (JSCE-SF4, 1984).

La norma ASTM C 1018 propone el estudio del comportamiento mecánico a flexión utilizando parámetros de tenacidad definidos en términos del área bajo la curva de carga-deflexión. La tenacidad depende de la capacidad de absorción de energía sobre valores de deflexión específicos y la correspondiente absorción de energía sobre la primera fisura que se considera que se ha producido en el SFRC bajo flexión. Los índices de tenacidad se calculan mediante la estimación del área hasta una deflexión de 3.0, 5.5 y 10.5 veces la deflexión correspondiente a la primera fisura. De acuerdo con la ASTM, los factores de resistencia residual  $R_{5,10}$  y  $R_{10,20}$  representan el nivel de resistencia posterior al agrietamiento del SFRC, los índices de tenacidad y los factores

de resistencia residual son parámetros adimensionales (Kaur et al., 2012). Las ecuaciones 1 y 2 muestran las relaciones para determinar los factores de resistencia residual  $R_{5,10}$  y  $R_{10,20}$ .

$$R_{5,10} = 20(I_{10} - I_5) \text{ ecuación 1}$$

$$R_{10,20} = 10(I_{20} - I_{10}) \text{ ecuación 2}$$

Donde:  $I_5$ ,  $I_{10}$ ,  $I_{20}$  = índices de tenacidad basados en el área bajo la curva hasta una deflexión de 3.0, 5.5 y 10.5 veces la deflexión correspondiente a la primera fisura.

El JSCE sugiere la evaluación del SFRC utilizando la relación de resistencia a la flexión equivalente  $R_{e,3}$ , que es la relación entre una resistencia a la flexión equivalente.  $R_{e,3}$  es proporcional al área bajo la curva carga-deflexión hasta 3 mm (para un ensayo de flexión con un claro entre apoyos de 450 mm);  $R_{e,3}$  se expresa en porcentaje (Kaur et al., 2012; Soutsos et al., 2012; Altoubat et al., 2008). Las ecuaciones 3 y 4 muestran las relaciones para determinar la resistencia residual  $f_{e,3}$  y la relación de resistencia residual equivalente  $R_{e,3}$ .

$$f_{e,3} = \frac{lP_{e,3}}{bh^2}$$

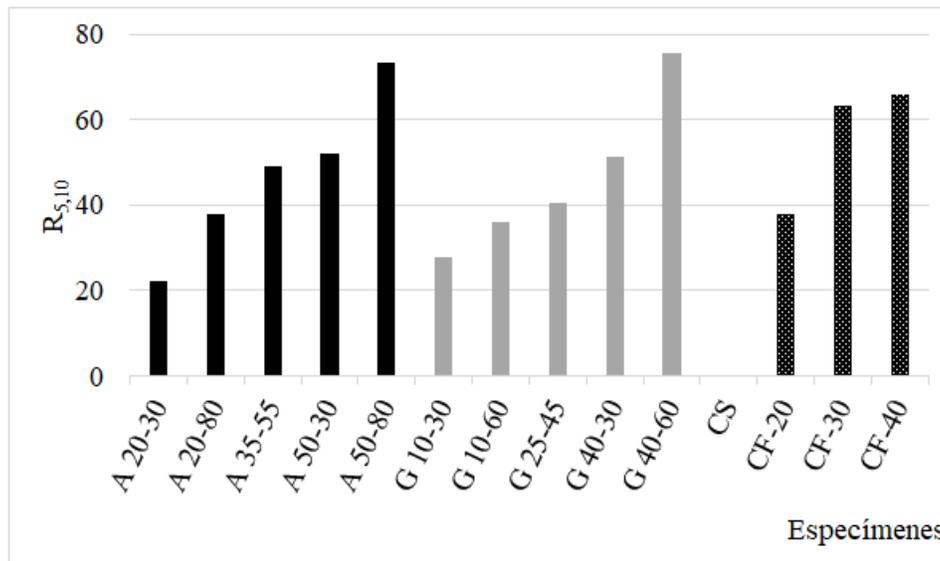
$$R_{e,3} = \frac{100f_{e,3}}{P_{max}}$$

Donde:  $f_{e,3}$ = resistencia residual,  $R_{e,3}$ = relación de resistencia residual equivalente,  $l$ = longitud de la muestra,  $P_{e,3}$ = carga equivalente residual,  $P_{max}$ = carga máxima,  $b$ = ancho de la muestra,  $h$ = altura de la muestra.

### Resultados de tenacidad $R_{5,10}$

La figura 8 muestra los resultados de la tenacidad  $R_{5,10}$  (las muestras de control tienen un  $R_{5,10}$  de cero debido a que este concreto carece de elementos armados). Los niveles promedio de  $R_{5,10}$  entre los especímenes SFRC con fibras de acero recocido y galvanizado son similares. Con un comportamiento que varía de

acuerdo a la cantidad y dimensiones de las fibras de refuerzo. Por ejemplo, el efecto del cambio de longitud evidenció diferencias de entre el 23% al 42%. Mientras que el cambio de dosis representó valores de 46% a 58%. En general, los resultados indican que el SFRC con fibras de acero recocido y galvanizado tuvieron un mejor valor  $R_{5,10}$  en especímenes con mayor dosis y relación de aspecto de fibras. Por otra parte, la comparación de los niveles globales de  $R_{5,10}$  entre los especímenes SFRC con fibras de acero recocido y galvanizado con respecto a los especímenes SFRC con fibras industriales mostraron un comportamiento similar, con una reducción promedio de 19% y 21% de los SFRC con fibra recocidas (con barras en color negro) y galvanizadas (con barras en color gris), respectivamente, con respecto a las que contienen fibras industriales (con barras en color negro y blanco).



**Figura 8.** Tenacidad  $R_{5,10}$  a la flexión de especímenes de SFRC con alambres de acero recocido, galvanizado, e industriales

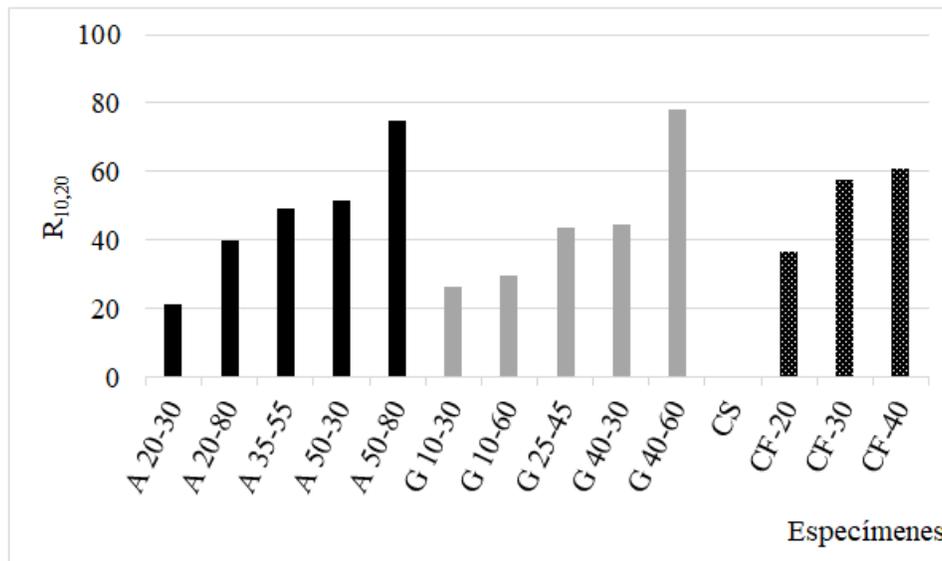
### Resultados de tenacidad $R_{10,20}$

La figura 9 muestra los resultados de los factores de resistencia residual  $R_{10,20}$  de los especímenes SFRC con fibras de acero recocido, galvanizado, e industriales. Estos

resultados evidencian que los SFRC con fibras industriales tuvieron mejor respuesta global que aquellos con elementos de acero recocido y galvanizado; sin embargo, la diferencia fue escasa, 8% para las fibras locales de acero recocido y 14% para las locales galvanizadas.

Asimismo, los resultados muestran un mejor comportamiento del SFRC con fibras de acero recocidas que aquellas con galvanizadas, fenómeno atribuido a la mayor ductilidad del material recocido. Por otro lado, la comparación entre SFRC con materiales industriales y locales mostró que los factores de resistencia residual  $R_{10,20}$  dependen de las dimensiones de las fibras; por ejemplo, A 20-30 presentó una reducción del 41% respecto al CF-20, mientras que el A20-80 tiene un

rendimiento superior en 9%. De la misma manera, las muestras G 40-30 tuvieron una reducción de 27%, respecto a CF-40; mientras que los especímenes G 40-60 es superior en un 22 %. Este efecto indica que la relación de aspecto de las fibras es un parámetro importante a considerar. En general, los especímenes SFRC con mayor dosis y relación de aspecto de fibras presentaron los mejores factores de resistencia residual  $R_{10,20}$ .



**Figura 9.** Tenacidad  $R_{10,20}$  a la flexión de especímenes de SFRC con alambres de acero recocido, galvanizado, e industriales

### Resultados de tenacidad $R_{e,3}$

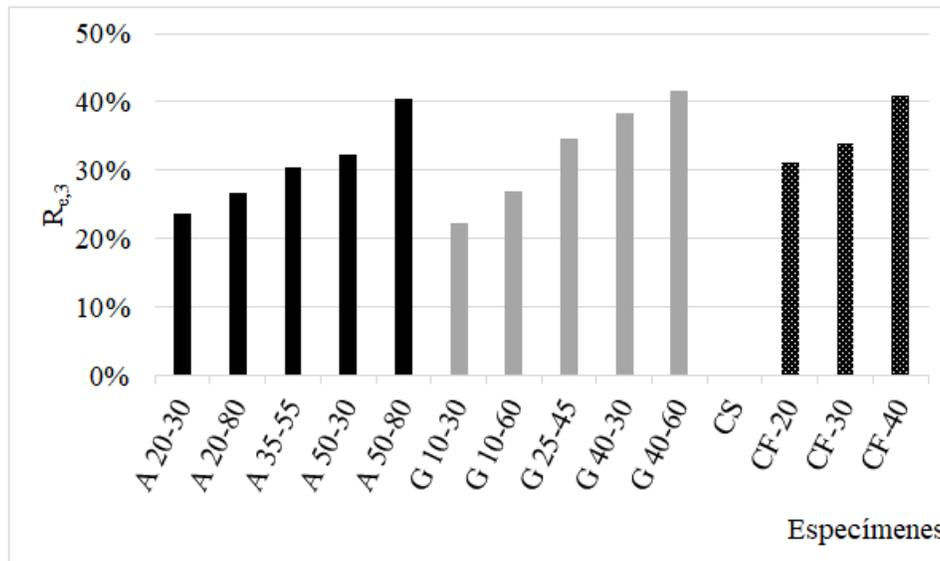
Algunos investigadores han informado que la tenacidad  $R_{e,3}$  del SFRC con elementos industriales es de alrededor del 30 % al 70 %, lo que depende de la dosis de fibra, la relación de aspecto y la geometría (Meza *et al.*, 2014; Turno *et al.*, 2008). La figura 10 muestra los resultados de los especímenes SFRC con fibras industriales y aquellas con alambres de acero recocido y galvanizado. El SFRC con fibras industriales tuvo valores  $R_{e,3}$  de 31% a 41%, mientras que el SFRC con fibras de acero recocido tuvo una capacidad de 24% a 40% y el SFRC con fibras de acero galvanizado tuvo una capacidad de 22% a 42%.

La comparación entre SFRC con fibras propuestas y las industriales apunta que el SFRC con acero recocido y galvanizado tuvieron un desempeño similar o mejor que los especímenes con fibras industriales. Por ejemplo, el promedio de SFRC con fibras recocidas tuvieron tenacidad  $R_{e,3}$  mayor que las que contenían fibras industriales, la diferencia fue de 13%; mientras que las que tenían fibras galvanizadas generaron un promedio global 7% mayor que los especímenes con fibras industriales.

Por otra parte, el cambio en las dimensiones de la fibra del SFRC con acero recocido y galvanizado demostraron un efecto escaso en el

$R_{e,3}$ , con valores que van del 8% al 20% debido al cambio de la relación de aspecto de las fibras. Sin embargo, el cambio de dosis de fibras recocidas y galvanizadas representó un

mayor efecto en el  $R_{e,3}$  con una diferencia de entre 27% y 42%, atribuido al cambio de cantidad de fibras en los especímenes.



**Figura 10.** Tenacidad  $R_{e,3}$  a la flexión de especímenes de SFRC con alambres de acero recocido, galvanizado, e industriales

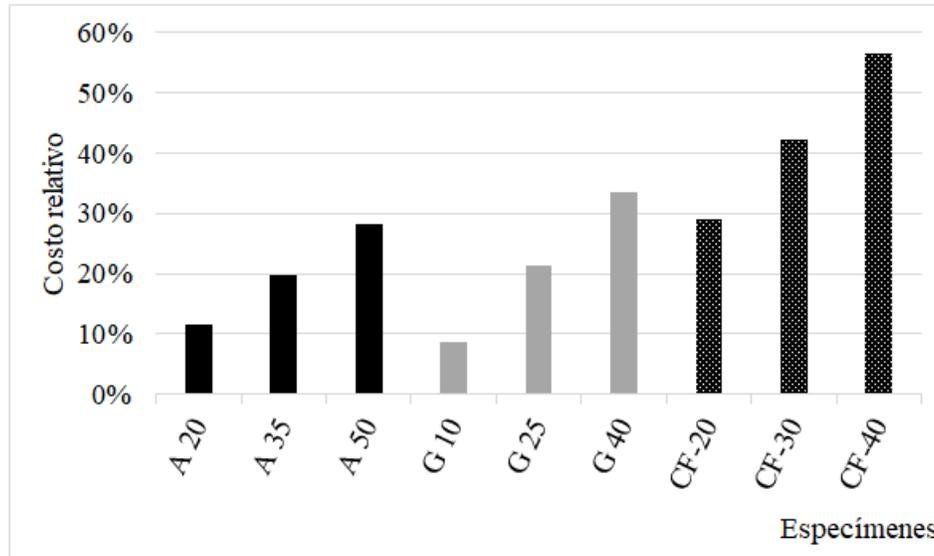
### Comparación de costo entre fibras propuestas e industriales

El costo relativo del refuerzo de fibra se puede determinar con la siguiente ecuación:

$$RC = \frac{f_c + T_c}{C_c}$$

Donde  $RC$  es el costo relativo (%),  $f_c$  es el costo de la fibra,  $T_c$  es el costo de transporte y  $C_c$  es el costo del concreto.  $f_c$  se basó en el costo de la fibra Dramix.  $T_c$  considera el costo de traslado de la fibra desde la ubicación del proveedor más cercano al centro de entrega (la distancia ponderada es de 221 km y un paquete de 20 kg que es el material mínimo que vende el proveedor).  $C_c$  incluye el costo del cemento y los agregados. La figura 11 muestra el costo relativo de SFRC con fibras industriales y los fabricados con acero recocido y galvanizado.

Los resultados muestran un incremento en el precio de la matriz de concreto que llega a ser mayor del 50% debido al costo del refuerzo de fibra industrial y su transporte desde el proveedor más cercano; un efecto que reduce la aplicabilidad del SFRC con fibras industriales en áreas donde las estas no están disponibles. El costo relativo indica que las muestras con fibras recocidas son alrededor de un 60% más económicas que aquellas con fibras comerciales (para una dosis de 20  $\text{kg/m}^3$ ), mientras que el SFRC con acero galvanizado puede reducir hasta un 41% el costo que los elementos con fibras comerciales (para una dosis de 40  $\text{kg/m}^3$ ). Sin embargo, es importante denotar que el costo relativo (sin el sobrecosto de transferencia) es similar entre las fibras industriales y las de acero recocido o galvanizado.



**Figura 11.** Costo relativo de SFRC con fibras industriales, acero recocido, y acero galvanizado

## Conclusiones

En este trabajo se ha propuesto el uso de fibras a partir de alambres de acero galvanizados y recocidos, como un enfoque alternativo al uso de fibras industriales para reforzar el concreto, las cuales pueden incrementar su costo por su no disponibilidad en algunas regiones.

Los resultados han demostrado que la trabajabilidad del SFRC con fibras de alambre galvanizado y con fibras industriales fue superior que el SFRC con fibras con alambre recocido. Este fenómeno se atribuye a la porosidad superficial del material recocido y a la capacidad de atrapar agua en su superficie. Además, los resultados muestran una reducción en algunos parámetros del comportamiento mecánico del SFRC con las

fibras propuestas. La carga última a flexión en los SFRC con las fibras propuestas mostró valores promedio que están por debajo del 12% respecto a las muestras de control (sin fibras). De la misma manera, la tenacidad  $R_{5,10}$  y  $R_{10,20}$  mostraron una reducción de hasta 21% y 14%, respectivamente, con respecto a SFRC con fibras industriales. Sin embargo, se observó un ligero aumento en la tenacidad medida en función de  $R_{e,3}$ , con valores que alcanzaron un aumento del 13% respecto a SFRC con elementos industriales.

Finalmente, se puede decir que el uso de fibras locales hechas de alambre recocido y galvanizado es factible y puede conducir a una reducción significativa de hasta un 60% del costo de SFRC hecho de fibras industriales.

## Referencias

Abdallah, S. and Rees, D.W.A. (2019) Comparisons Between Pull-Out Behaviour of Various Hooked-End Fibres in Normal-High Strength Concretes. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 13(27). <https://doi.org/10.1186/s40069-019-0337-0>

ACI. Guide to Design of Slabs on Ground. Detroit, MI: Reported by Committee 360 American Concrete Institute, ACI 360R-10; 2010.

Altoubat, S., Roesler, J.R., Lange, D.A., Rieder, K.A. (2008). Simplified method for concrete pavement design with discrete structural fibers. *Construction and Building Materials*, 22, 384-393. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.08.008>.

ASTM C1018 (2005). Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading). West Conshohocken, PA: ASTM International.

ASTM C143 (2000). Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. West Conshohocken, PA: ASTM International.

ASTM C192 (2000). Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. West Conshohocken, PA, United States: Annual Book of ASTM Standards.

ASTM C293/C293M (2016). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading). West Conshohocken, PA: ASTM International.

ASTM C39/C39M (2018), “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens”, West Conshohocken (PA): ASTM International.

ASTM C78 (2000). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). West Conshohocken, PA, United States, ASTM C78.

Bakhshi, M., Barsby, C., Mobasher, B. (2014). Comparative evaluation of early age toughness parameters in fiber reinforced concrete. *Materials and Structures*, 47, 853-872. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0098-1>

Bernard, E.S. (2019) Predicting crack widths in FRC/reinforced concrete members using small deformation post-crack parameters. *Structural Concrete*, 10(6), 2138-2149. <https://doi.org/10.1002/suco.201900083>

Bhogayata AC., and Arora NK. (2017) Fresh and strength properties of concrete reinforced with metalized plastic waste fibers. *Construction and Building Materials* 146 455–463. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.095>

Blanco, A., Pujadas, P., de la Fuente, A., Cavalaro, S., Aguado, A. (2013). Application of constitutive models in European codes to RC–FRC. *Construction and Building Materials*, 40, 246–259. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.096>

Borg, R.P., Baldacchino, O., Ferrara, L. (2016). Early age performance and mechanical characteristics of recycled PET fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 108, 29–47. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.029>.

Caggiano A, Folino P., Lima C., Martinelli E., Pepe M. (2017) On the mechanical response of Hybrid Fiber Reinforced Concrete with Recycled and Industrial Steel Fibers. *Construction and Building Materials* 147 286–295. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.160>

Chu, S.H., Li, L.G., Kwan, A.K.H. (2018). Fibre factors governing the fresh and hardened properties of steel FRC. *Construction and Building Materials*, 186, 1228-1238.

Correal, J.F., Herrán, C.A., Carrillo, J., Reyes, J.C., Hermida, G. (2018). Performance of hybrid fiber-reinforced concrete for low-rise housing with thin walls. *Construction and Building Materials*, 185, 519-529. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.048>.

Daud R.A., Daud S.A., Al-Azzawi A.A. (2020) Tension stiffening evaluation of steel fibre concrete beams with smooth and deformed reinforcement. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.03.00>

DEACERO (2020). Galvanized and annealed technical sheet. Consulted on December 12th 2020. [www.deacero.com](http://www.deacero.com)

Dramix (2020). “Steel fiber concrete reinforcement for industrial floors[online].” Available from: <<https://www.bekaert.com>> [Accessed 12 December 2020].

Dvorkin L., Dvorkin O., Zhitkovsky V., Ribakov Y. (2011) A method for optimal design of steel fiber reinforced concrete composition. *Materials and Design* 32, 3254–3262. doi:10.1016/j.matdes.2011.02.036

Emon, M.A.B., Manzur, T., Sharif, M.S. (2017). Suitability of locally manufactured galvanized iron (GI) wire fiber as reinforcing fiber in brick chip concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 7, 217-227.

Fantilli A.P., Kwon S., Mihashi H., Nishiwaki T. (2018) Synergy assessment in hybrid Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHP-FRC). *Cement and Concrete Composites* 86, pp. 19-29. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.10.012>

Fu C., Ye H., Wang K., Zhu K., He C., (2019) Evolution of mechanical properties of steel fiber-reinforced rubberized concrete (FR-RC). *Composites Part B: Engineering* 160, 158-166. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.10.045>

Gelfi, M., Solazzi, L., Poli, S. (2017). Influence of the Manufacturing Process on Defects in the Galvanized Coating of High Carbon Steel Wires. *Materials*, 10(3), 264-276. <https://doi.org/10.3390/ma10030264>.

Hongbo A., Haiyun A., Hongxiang G. (2020) Characteristics of ductility enhancement of concrete by a macro polypropylene fiber. *Materials*, 100087. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2020.100087>

Iqbal S., Ali I., Room S., Khan S.A., Ali A. (2019) Enhanced mechanical properties of fiber reinforced concrete using closed steel fibers. *Materials and Structures*, 52:56. <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1357-6>

Jangid A., Sharma A. (2020) Experimental study on the properties of steel fibre reinforced concrete. *Indian Journal of Engineering*, 17(47), 151-163.

JSCE-SF4 (1984). Standard for flexural strength and flexural toughness, method of tests for steel fiber reinforced concrete. Japan Concrete Institute, Concrete library of JSCE.

Kaur, G., Singh, S.P., Kaushik, S.K. (2012). Flexural performance of fibrous concrete with cement additions. *Construction Materials*, 167, 14-25.

Marar K., Eren Ö, Roughani H. (2017) The influence of amount and aspect ratio of fibers on shear behaviour of steel fiber reinforced concrete. *KSCCE Journal of Civil Engineering* 21, 1393–1399.

Meda A., Minelli F., Plizzari G.A. (2012) Flexural behaviour of RC beams in fibre reinforced concrete. *Composites: Part B*, 43 pp. 2930–2937. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.06.003>

Meza, A. (2015). Optimización del concreto reforzado con fibras de acero y polipropileno en pisos industriales, basado en análisis experimental y numérico (doctoral thesis). Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes, Ags., México.

Meza, A., Ahmed, F.U. (2020) Anisotropy and bond behaviour of recycled Polyethylene terephthalate (PET) fibre as concrete reinforcement. *Construction and Building Materials* 265 (2020) 120331. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120331>

Meza, A., Ortiz, J.A., Peralta, L., Pacheco, J., Soto, J.J. (2014). Experimental mechanical characterization of steel and polypropylene fiber reinforced concrete. *Revista Técnica Facultad Ingeniería Universidad Zulia*, 37, 106-115.

Pajak M. (2019) Concrete reinforced with various amounts of steel fibers reclaimed from end-of-life tires. *MATEC Web of Conferences* 262, 06008.

Pakravan H.R., Ozbakkaloglu T. (2019) Synthetic fibers for cementitious composites: A critical and in-depth review of recent advances. *Construction and Building Materials* 207, pp. 491–518. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.078>

Ragalwar K., Heard W.F., Williams B.A., Kumar D., Ranade R. (2020) On enhancing the mechanical behavior of ultra-high performance concrete through multi-scale fiber reinforcement. *Cement and Concrete Composites* 105, 103422. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103422>

Sabapathy Y.K., Sabarish, S., Nithish, C.N.A, Ramasamy S.M., Krishna G. (2019) Experimental study on strength properties of aluminium fibre reinforced concrete. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2019.12.004>

Soutsos, M.N., Le, T.T., Lampropoulos, A.P. (2012). Flexural performance of fibre reinforced concrete made with steel and synthetic fibres. *Construction and Building Materials*, 36, 704–710. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.042>.

Turno, J., Banthia, N., Gettu, R., Barragán, B. (2008). Study of the shear behaviour of fibre reinforced concrete beams. *Materiales de Construcción*, 58, 5-13. <https://doi.org/10.3989/mc.2008.40507>.

Woo SK, Kim KJ, Han SH (2014) Tensile cracking constitutive model of Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC). *KSCE Journal of Civil Engineering* 18:1446–1454.

Yang, C.C., Liu, C.L. (2016). Improvement of the Mechanical Properties of 1022 Carbon Steel Coil by Using the Taguchi Method to Optimize Spheroidized Annealing Conditions. *Materials*, 9, 693-702. <https://doi.org/10.3390/ma9080693>.

Yang, Y.S., Bae, J.G., Park, C.G. (2008). Improvement of the bending fatigue resistance of the hyper-eutectoid steel wires used for tire cords by a post-processing annealing. *Materials Science and Engineering: A*, 488, 554-561. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.11.048>

Yoo, D.Y., & Banthia, N. (2017). Experimental and numerical analysis of the flexural response of amorphous metallic fiber reinforced concrete. *Materials and Structures*, 50, 50-64. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0899-0>.

Zhong H., Zhang M. (2020) Experimental study on engineering properties of concrete reinforced with hybrid recycled tyre steel and polypropylene fibres. *Journal of Cleaner Production*, 259(20) 120914. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120914