

FIBRAS ONDULADAS CON ALAMBRE RECOCIDO Y GALVANIZADO PARA REFORZAR EL CONCRETO A FLEXIÓN

*CRIMPED FIBERS WITH ANNEALED AND GALVANIZED
WIRES TO REINFORCE THE CONCRETE
UNDER FLEXURAL LOAD*

Alejandro Meza de Luna

Tecnológico Nacional de México / IT de Aguascalientes, México
alejandro.ml@aguascalientes.tecnm.mx

Fernando Chávez Valdivia

Tecnológico Nacional de México / IT de Aguascalientes, México
fernando.cv@aguascalientes.tecnm.mx

Rodolfo Benjamín Sierra Ortiz

Tecnológico Nacional de México / IT de Aguascalientes, México
rodolfo.so@aguascalientes.tecnm.mx

Rafael Reyes Cortes

Tecnológico Nacional de México / IT de Aguascalientes, México
rafael.rc@aguascalientes.tecnm.mx

Alejandra Ibeth García Castañón

Tecnológico Nacional de México / IT de Aguascalientes, México
alejandra.gc@aguascalientes.tecnm.mx

Recepción: 11/febrero/2023

Aceptación: 25/marzo/2023

Resumen

Aunque el concreto reforzado con fibra ha demostrado tener una integridad estructural superior al concreto convencional, las fibras de acero comerciales para reforzar el concreto son de alto costo y de escasa o nula distribución en algunas ciudades de México. Como solución, en este trabajo se utilizaron elementos metálicos comerciales como alambre galvanizado y alambre recocado para producir fibras rizadas por medio de un mecanismo operado manualmente.

Las fibras propuestas se mezclaron con el concreto para producir especímenes basados en la norma ASTM C-78, utilizando tres dosis de fibra diferentes (20, 30 y 40 kg/m³). Además, se ensayaron elementos de control y de concreto con fibras

comerciales para fines comparativos. De la misma forma, se analizaron la trabajabilidad, carga máxima a la flexión y resistencia residual siguiendo las normas ASTM y JSCE. Posterior a los ensayos, se realizó la prueba de *pullout* y se realizó un conteo de la cantidad de fibras, para relacionarlas con los resultados. Los resultados muestran que a pesar que la relación de aspecto, el número de fibras y la resistencia a la tracción de las fibras propuestas es inferior a las fibras comerciales, los resultados indican que las muestras con fibras rizadas galvanizadas tienen una trabajabilidad y una resistencia a la flexión post-fisuración similares o superiores a aquellas con fibras comerciales.

Por otro lado, las probetas con fibras rizadas recocidas demostraron una buena resistencia post-fisuración, pero su comportamiento fue inferior al de otros concretos reforzados con fibras.

Palabras Clave: concreto reforzado con fibras, alambre galvanizado, alambre recocido, flexión, *pullout*, análisis experimental.

Abstract

Even though fiber reinforced concrete has shown superior structural integrity to conventional concrete, commercial steel fibers to reinforce concrete are expensive and have scarce or no distribution in some cities in Mexico. As a solution, in this paper, commercial metallic elements as galvanized and annealed wires were used to produce crimped fibers by means of a mechanism manually operated.

The proposed fibers were mixed with the concrete to produce test samples based on ASTM C-78 standard, using three different fiber dosages (20, 30 and 40 kg/m³). In addition, control and concrete with commercial fibers samples were tested for comparison purposes. Workability, flexural maximum load, and residual strength were analyzed following the ASTM and JSCE standards. Also, the pull-out test and amount of fibers were related with the results. In spite of the aspect ratio, the number of fibers and the tensile strength of the proposed fibers is lower than commercial fibers, the results indicate that the samples with galvanized crimped fibers have a similar or superior workability and post-cracking flexural strength than those with commercial fibers.

On the other hand, the specimens with annealed crimped fibers demonstrated good post-cracking strength, but their performance was lower than others fiber reinforced concrete tested.

Keywords: *fiber-reinforced concrete, galvanized wire, annealed wire, bending, pullout, experimental analysis.*

1. Introducción

El concreto es un material que ha permitido el desarrollo de diferentes edificaciones basado en su capacidad de soportar cargas a compresión. Sin embargo, el concreto tiene una baja resistencia a la tracción, agrietándose de manera repentina [1]. Como solución a esta problemática se ha propuesto el uso del concreto reforzado con fibra (FRC), el cual es un material compuesto en el que las fibras se distribuyen aleatoriamente en una matriz cementicia. El uso de elementos estructurales que contienen fibras se ha incrementado considerablemente en los últimos años, debido a su mayor resistencia a la flexión en la fase post-fisuración que aquellos sin fibras [2-7]. Las principales aplicaciones de FRC comprenden la construcción de losas de tierra, pisos industriales, revestimiento de túneles, tuberías y pavimentos de carreteras [8-11].

La disponibilidad de fibras comerciales en el mundo es un problema para su uso, se ha reportado que existen regiones donde no se pueden adquirir de manera directa, al no encontrarse de venta en los centros de venta local, requiriendo de un gasto adicional debido a su importación [11]. El problema de disponibilidad aunado con el alto costo de las fibras es una desventaja importante, que ha mermado la aplicación del concreto reforzado con fibras en México. Como alternativa se han utilizado materiales de diferente procedencia para reforzar el concreto. Zhong y Zhang [12] estudiaron el concreto reforzado con acero de llanta reciclada; los resultados indicaron una mejora en la resistencia a la flexión del concreto reforzado con fibras de acero (SFRC) respecto al concreto sin refuerzo. Pajak [13] y Mohammed et al. [14] señalaron que la resistencia a flexión aumentó con la relación de volumen de fibra de 0.25 a 1.5%, pero no tuvo un efecto significativo en la resistencia a la compresión. Además, existen estudios de SFRC con elementos de desecho

industrial y galvanizado. Emon et al. [11] analizaron el comportamiento de SFRC con acero galvanizado de bajo costo disponible localmente; los resultados muestran que las fibras tenían propiedades similares al SFRC con fibras de acero industrial y un costo menor (19% que el SFRC con fibras industriales). Meddah y Bencheikh [15] estudiaron especímenes de SFRC con fibras de desechos industriales; los resultados demostraron que la incorporación de fibras en el concreto reduce la resistencia a la compresión del SFRC en aquellos especímenes que contiene más del 2% de elementos de refuerzo.

En el presente estudio se propone el uso de material comercial que es distribuido comúnmente en ferreterías. El alambre de acero galvanizado es un acero dulce, que se fabrica a partir de varillas de acero laminadas y se cubre con una fina capa de zinc [11, 16]. Por otro lado, el alambre de acero recocido tiene un proceso que mejora su trabajabilidad en frío, característica que depende de varios parámetros de fabricación, como la temperatura de recocido esferoidizado y el tiempo prolongado de calentamiento [17,18]. Algunos estudios han demostrado que la capacidad de resistencia a la tracción del acero depende de la temperatura de recocido y del proceso de deformación plástica [19,20]. Los materiales, alambre galvanizado y recocido, se utilizaron como materia prima para generar fibras rizadas para reforzar una matriz cementicia. El proceso de ondulado se realizó mediante un mecanismo simple. Las fibras generadas se mezclaron con el concreto para producir especímenes de SFRC; además, se utilizaron especímenes de SFRC con fibras comerciales y concreto sin fibras como referencia comparativa, todas las muestras fueron ensayadas bajo normatividades. Los ensayos experimentales se realizaron variando la dosificación, y los resultados se analizaron en términos de trabajabilidad, comportamiento a la flexión, cantidad de fibras en la sección de fisuración y adherencia medida bajo ensayo de *pull-out*.

El artículo se estructuró de la siguiente manera: una descripción de los materiales y métodos utilizados en la campaña experimental, apoyados por imágenes que permiten observar caracterizaciones de las formas y elementos empleados. Posteriormente se muestran los resultados, acompañados de un análisis de los datos y su discusión. Finalmente, se indican las conclusiones.

2. Materiales y métodos

Los alambres utilizados para la producción de las fibras tienen las siguientes características. El alambre galvanizado tiene resistencia axial de 448 MPa, diámetro nominal de 1.2 mm y designación de calibre número 18. El alambre recocido fue de calibre 15.25, con diámetro nominal de 1.78 mm y resistencia axial de 395 MPa. Para la ondulación de los alambres galvanizado y recocido se diseñó y fabricó un mecanismo, los componentes principales de este dispositivo son una guía, dos engranajes y una manivela, el dispositivo obtenido se muestra en figura 1. En el dispositivo prensador, el alambre comercial se conduce a través de la guía en dirección a los engranajes, donde los dientes de los engranajes deforman plásticamente el alambre para generar la forma engarzada, en la parte trasera del dispositivo se encuentra una manivela accionada manualmente para proporcionar la fuerza de accionamiento. Los dos engranajes tienen un módulo de 2.5 con 22 dientes de 3.75 mm de altura.

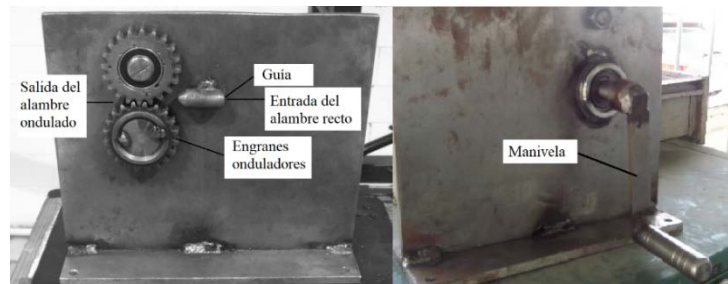


Figura 1 Mecanismo utilizado para la ondulación de alambres comerciales.

Después de engarzar los alambres, se midieron con un calibrador Vernier digital a una distancia de 42 mm, para ser marcados y cortados. La diferencia de diámetro entre los alambres galvanizados y recocidos generó diferente relación de aspecto (longitud/diámetro) de 35 y 23.6. Según el 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. La figura 2 muestra las dimensiones de las fibras producidas. Se utilizaron tres dosis diferentes de fibra para cada serie de SFRC (20, 30 y 40 kg/m³), las proporciones fueron elegidas debido a que las estructuras de SFRC han demostrado buena trabajabilidad y resistencia a la flexión [7].

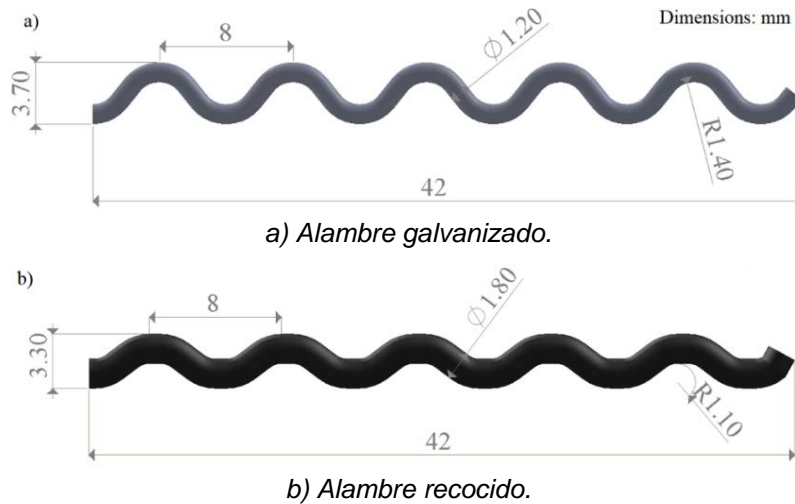


Figura 2 Dimensiones de las fibras producidas a partir de alambre comercial

Los materiales utilizados en la matriz cementicia fueron cemento Portland ordinario correspondiente a ASTM Tipo I, arena, árido medio y grueso, con relación agua/cemento en todas las muestras de 0.6. De acuerdo con la norma ACI 211.1 [21], la mezcla de hormigón se diseñó para tener resistencia a la compresión media de 28 días de 40 MPa, la dosificación se proporciona en la tabla 1.

Tabla 1 Tabla de proporciones usadas en el concreto.

Componente	Dosis (kg/m ³)
Cemento	308.0
Arena	673.4
Agregado medio (20 mm)	531.2
Agregado grueso (40 mm)	648.0
Agua	185.0

La mezcla se hizo de la siguiente manera. Primero, la arena, el cemento, los agregados y las fibras se mezclaron manualmente durante 4 min. Luego, el agua se dispensó y se mezcló durante otros 5 minutos para obtener una mezcla homogénea. A continuación, según la norma ASTM C-78 [22], la mezcla se vertió en moldes prismáticos de dimensiones estándar 150X150X500 mm. El procedimiento de curado -a los 28 días- fue de acuerdo a la norma ASTM C-192 [23]. Además, se realizaron especímenes de SFRC con fibras comerciales Dramix®. Estas fibras comerciales están fabricadas de acero con extremos en forma de gancho, longitud de 60 mm, diámetro de 0.9 mm, relación de aspecto de 64 y resistencia a la tracción

de 1800 MPa [24]. Se seleccionó este tipo de fibra porque demostró un mejor desempeño que otras fibras comerciales [7].

La base experimental consideró tres tipos de SFRC:

- Fibras de acero galvanizado (GFRC).
- Fibras de acero recocido (AFRC).
- Fibras comerciales Dramix ® (SFRC).

Con diferente contenido de fibra (20, 30 y 40 kg/m³), con un total de 18 elementos de SFRC. Además, se realizaron dos muestras de concreto sin fibras (C-0). En estado fresco el concreto se ensayó utilizando el ensayo de cono de asentamiento basado en la norma ASTM C143 [25]. En estado endurecido, el concreto se estudió de acuerdo con la norma ASTM C1018 [26], todas las muestras prismáticas se probaron utilizando un procedimiento de prueba de flexión de tres puntos, a un tiempo de curado de 28 días en una máquina de prueba hidráulica, que se ajustó a una carga máxima de 58.8 kN. La deflexión transversal se midió por medio de un indicador de carátula de 25 mm.

La tenacidad a la flexión se midió usando las recomendaciones emitidas por el JSCE [27], propuesta para analizar la respuesta a flexión del SFRC. De acuerdo con la normatividad, el comportamiento a flexión del SFRC se puede estimar por medio de la capacidad energética, evaluada por el área bajo la curva de carga-deflexión. La energía se basa en tres referencias: carga máxima (P_{Max}), resistencia a flexión equivalente ($f_{e,3}$) y relación de resistencia a flexión equivalente ($R_{e,3}$). La figura 3 ilustra el parámetro utilizado por el enfoque JSCE, y las ecuaciones 1 y 2 muestran la relación para calcular $f_{e,3}$ y $R_{e,3}$.

$$f_{e,3} = P_{e,3} \frac{L}{bh^2} \quad (1)$$

$$R_{e,3} = \frac{f_{e,3}}{P_{Max}} * 100 \quad (2)$$

Donde:

$P_{e,3}$ = Carga equivalente a una deflexión de 3 mm

L = Separación entre sujeciones de ensayo

b = Ancho de la sección transversal del espécimen

h = Peralte de la sección transversal del espécimen

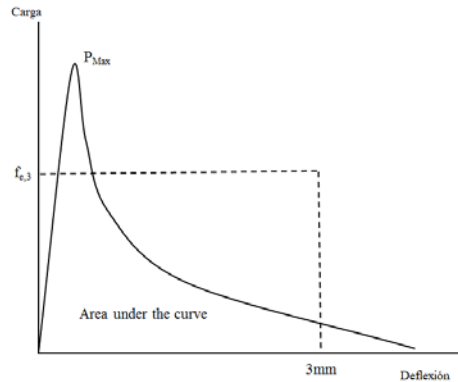


Figura 3 Parámetros para evaluar la tenacidad a la flexión del SFRC de acuerdo al JCSE.

3. Resultados y Discusión

Propiedades del concreto en estado fresco

Se sabe que el aumento de la dosis de fibra o relación de aspecto empeora la trabajabilidad de la mezcla de concreto reforzado con fibras [28-30]. Los resultados se muestran en figura 4, donde se observa que la trabajabilidad en todas las muestras fue bajo.

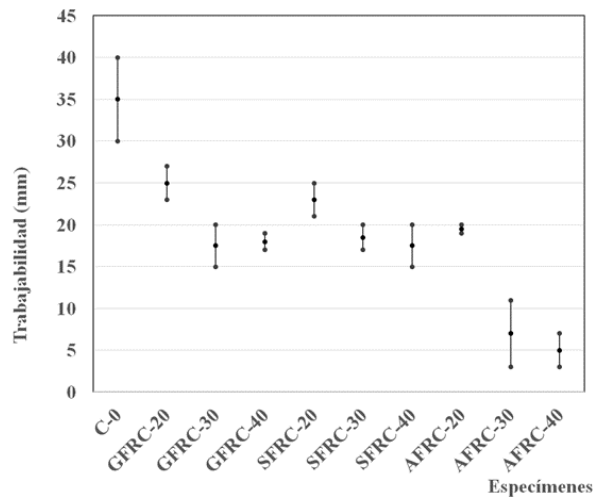


Figura 4 Resultados de trabajabilidad de muestras SFRC y de control.

Además, los datos muestran que las muestras de SFRC, GFRC y AFRC redujeron su capacidad de asentamiento con la dosificación; pero la dispersión de los

resultados de todas las muestras de FRC fue menor que las muestras de control (C-0), lo que indica que las fibras generaron uniformidad en el comportamiento de asentamiento de la matriz de concreto.

Por otra parte, los resultados del valor medio del GFRC en todas las proporciones demostraron una trabajabilidad similar o superior a las de las fibras comerciales; sin embargo, las muestras de AFRC mostraron un comportamiento más bajo que las de GFRC y SFRC. De acuerdo con ACI [31], el concreto reforzado con fibras de acero tiene una mejor trabajabilidad cuando la relación de aspecto de la fibra utilizada es baja; sin embargo, los resultados indican que, aunque las muestras de AFRC tienen una relación de aspecto de fibra más baja que las de GFRC o SFRC, presenta una baja trabajabilidad.

Resistencia a flexión

La resistencia a la flexión de una matriz de concreto generalmente se analiza por medio de una curva de carga-deflexión. En este gráfico, la carga máxima (P_{Max}) representa la fase en la que se agrieta la matriz cementicia. Otras investigaciones han demostrado que el concreto sin fibras y aquellos con fibras tienen un comportamiento similar hasta llegar a P_{Max} [32-34]. En este trabajo se utilizó la norma ASTM C-78 [22] para estudiar el desempeño a flexión del GFRC, AFRC, SFRC y C-0. Los resultados de se muestran en las figuras 5 y 6.

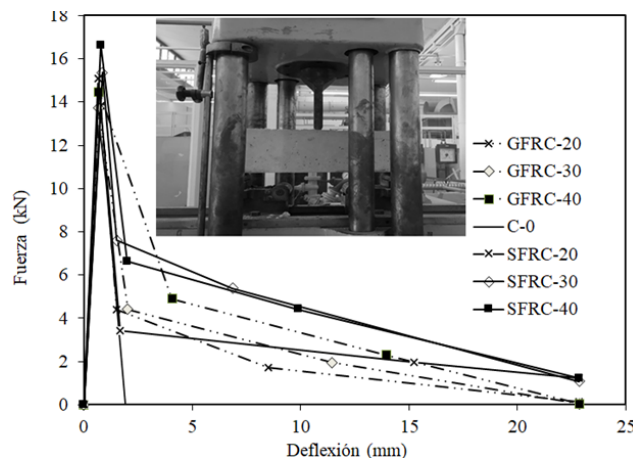


Figura 5 Resultados fuerza-deformación de muestras GFRC, SFRC y de control.

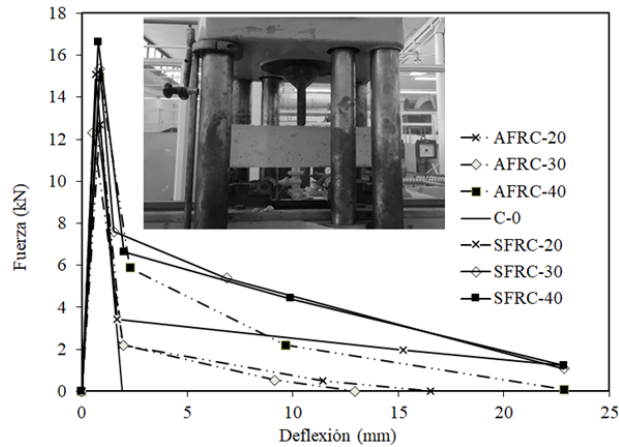


Figura 6 Resultados fuerza-deformación de muestras AFRC, SFRC y de control.

Las curvas ilustran que el comportamiento a la flexión entre las probetas C-0 y FRC es similar hasta alcanzar P_{Max} , mostrando que las fibras propuestas alteraron el comportamiento del concreto. Sin embargo, los resultados de P_{Max} indicados en figura 7, evidencian un mejor comportamiento del GFRC con respecto al AFRC o C-0, pero un desempeño más bajo que SFRC. La diferencia máxima fue de 2.2 MPa, registrada entre las muestras de GFRC-40 y SFRC-40. Por otro lado, las muestras de AFRC generaron una P_{Max} similar a la de C-0, pero un valor menor que los otros especímenes con fibras probados, la diferencia máxima del valor medio fue de 3.15 MPa, entre AFRC-40 y SFRC-40.

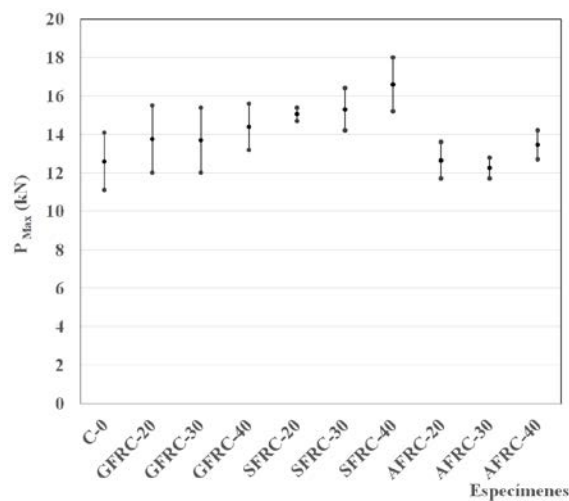


Figura 7 Resultados de fuerza máxima de especímenes GFRC, AFRC, SFRC y de control.

Resistencia post-agrietamiento

Una vez que la matriz de concreto alcanza la P_{Max} , las fibras le generan ductilidad (resistencia post-agrietamiento). Se ha informado que el comportamiento posterior al agrietamiento del SFRC depende de factores como la relación de aspecto, la geometría y el contenido de fibra [32-34]. Las figuras 5 y 6 muestran la capacidad posterior al agrietamiento de GFRC y AFRC, mediante la resistencia a la flexión equivalente ($f_{e,3}$) y la relación de resistencia a la flexión equivalente ($R_{e,3}$). Las figuras 8 y 9 indican los resultados de $R_{e,3}$ y $f_{e,3}$ de las muestras de FRC. Los valores de C-0 no se reportan, debido a que la ausencia de fibras produjo valores de cero en su comportamiento post-fisuración.

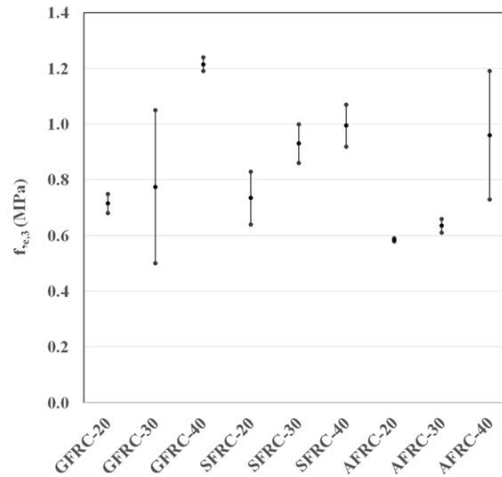


Figura 8 Resultados de resistencia residual equivalente $f_{e,3}$ para GFRC, AFRC y SFRC.

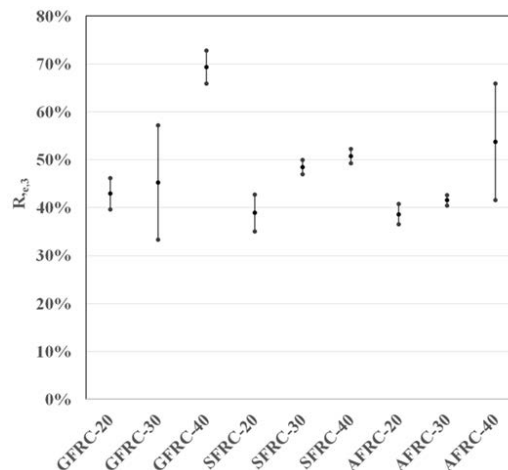


Figura 9 Resultados de relación de resistencia equivalente $R_{e,3}$ para GFRC, AFRC y SFRC.

Los resultados señalan que todas las muestras de SFRC mejoraron su rendimiento de $f_{e,3}$ y $R_{e,3}$ con el aumento de la cantidad de fibras, aunque la mejora no fue lineal, es decir, el aumento de fibras galvanizadas y recocidas de 20 a 30 kg/m^3 mostraron un valor medio similar; pero a una dosis de 40 kg/m^3 , las respuestas post-agrietamiento aumentaron significativamente. Por otro lado, en comparación entre muestras de FRC, las muestras de GFRC tienen un rendimiento posterior al agrietamiento similar o superior al de aquellas con fibras comerciales; mientras que las muestras de AFRC demostraron una capacidad más baja que las muestras de GFRC, la diferencia de valor medio máxima medida con $f_{e,3}$ y $R_{e,3}$ fue 0.26 MPa y 16%, respectivamente. Sin embargo, las muestras con fibras recocidas demostraron una buena resistencia post-fisuración, especialmente cuando la proporción fue de 20 y 40 kg/m^3 .

Cantidad de fibras

Posterior al ensayo de flexión, las fibras se contaron en la sección de agrietamiento en todos los especímenes. La figura 10 muestra el valor máximo, mínimo y medio del número de fibras contadas. Los resultados indicaron que la presencia de fibras en muestras de FRC aumenta con la dosificación, esto explica el aumento de la resistencia post-fisuración registrada en las muestras de FRC con alta proporción de fibras.

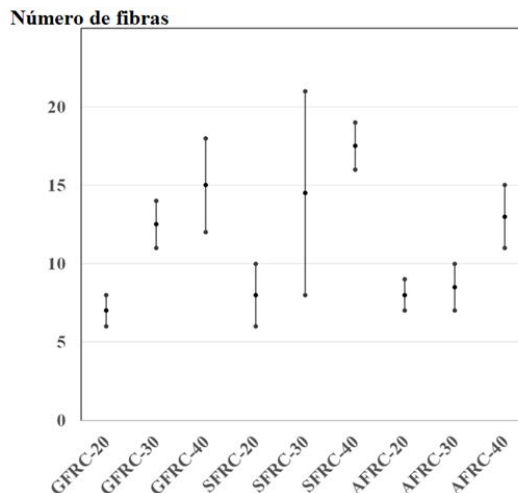


Figura 10 Número de fibras en el área de agrietamiento.

Además, el número de fibras contadas en la sección de craqueo ilustró un comportamiento diferente entre AFRC, GFRC y SFRC, que depende del cambio de dosificación; es decir, a una dosis de 20 kg/m^3 , el número de fibra fue similar entre ellos, esta propiedad está relacionada con las respuestas post-agrietamiento registradas. Sin embargo, a 30 y 40 kg/m^3 , las muestras de AFRC y GFRC tenían menor presencia de fibras que SFRC, este comportamiento se atribuyó a la diferencia de relación de aspecto (64, 35 y 23.6, para SFRC, GFRC y AFRC, respectivamente). A pesar de que el GFRC tuvo menor número de fibras que el SFRC, su resistencia post-fisuración fue similar o superior, indicando que la adherencia podría contribuir a esta respuesta. Además, los resultados de la cantidad de fibras se correlacionaron con la trabajabilidad, que disminuye con la cantidad de fibras contadas en la sección de agrietamiento en todos los especímenes de FRC.

Pullout

La adherencia entre la matriz de concreto y las fibras se puede evaluar mediante el ensayo de pullout, que consiste en medir la fuerza necesaria para extraer las fibras del concreto. El ACI [35] indica que las fibras con extremo con gancho y onduladas tienen buena adherencia. En este trabajo se probó la resistencia de la unión entre las fibras y la matriz de concreto utilizando un dispositivo especial, diseñado y fabricado por Meza y col., para extraer las fibras embebidas en la matriz cementosa, el dispositivo utilizado se muestra en la figura 11.

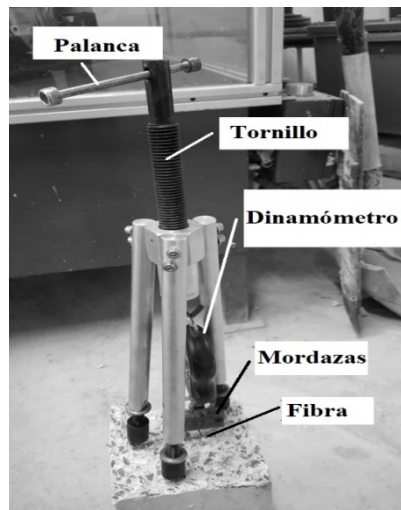


Figura 11 Dispositivo para el ensayo de pullout diseñado y fabricado por Meza y col.

Durante el ensayo de pullout, las fibras fueron sujetadas mediante una abrazadera y se extraían con un tornillo controlado por palanca. La fuerza máxima de extracción se midió con un dinamómetro digital con un rango de 1.47 kN. En cada muestra se realizó un ensayo, localizando una fibra perpendicular a la superficie.

La figura 12 muestra los resultados, los cuales revelan que la fibra galvanizada y la fibra recocida tienen una resistencia a la tracción superior a las fibras comerciales. Además, la buena capacidad de adherencia de las fibras galvanizadas explica que la resistencia post-agrietamiento entre GFRC y SFRC fueran similares. De la misma forma se observó que las fibras galvanizadas mostraron una mejor adherencia con el concreto que las fibras recocidas.

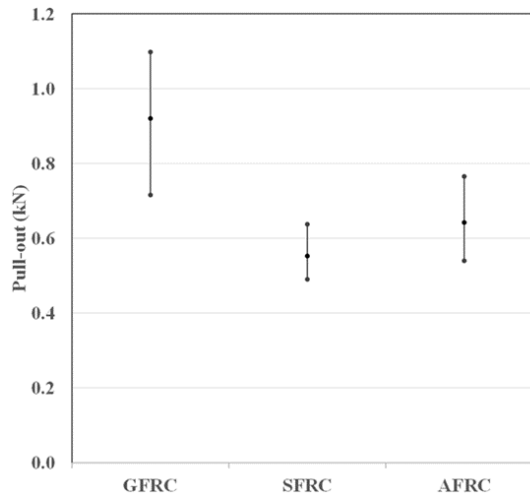


Figura 12 Resultados de pullout para el concreto reforzado con fibras.

4. Conclusiones

La disponibilidad de fibras de acero comerciales para reforzar el concreto es limitada, existen varias regiones donde las fibras de acero industriales aún no se comercializan. En esta investigación se produjeron fibras rizadas utilizando materiales comerciales como alambres galvanizados y recocidos, los cuales son de uso común en los sectores productivo e industrial. Además, se utilizaron como referencia fibras gancho comerciales y muestras de control (sin fibras) para evaluar el desempeño mecánico del concreto reforzado con las fibras galvanizadas propuestas. Los resultados indican pérdida de trabajabilidad de todas las muestras

de FRC que las muestras de control. Por otro lado, los datos muestran que las fibras propuestas apenas alteran la carga máxima de flexión en comparación con las muestras de control. Además, los resultados han demostrado que, si bien el alambre galvanizado y recocado tienen menor resistencia a la tracción que las fibras comerciales y su relación de aspecto y número de fibras fue menor, las muestras reforzadas con las fibras propuestas generaron una buena resistencia post-fisuración, y en algunas muestras su resistencia posterior al agrietamiento fue superior a la del SFRC; esta propiedad se atribuyó a la mayor adherencia entre el concreto y las fibras propuestas.

Este trabajo ha demostrado que los alambres galvanizados y recocidos representan una oportunidad para producir fibras para reforzar el concreto bajo cargas de flexión. El dispositivo de engarce luce como un mecanismo simple que podría reproducirse, en particular, en regiones donde las fibras no están disponibles. Futuros trabajos de investigación podrían estudiar su optimización y análisis de costos para analizar su pertinencia.

Reconocimientos

Los autores desean agradecer al Tecnológico Nacional de México/IT de Aguascalientes y al Conacyt por el financiamiento del proyecto de investigación.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Ding, Y., Zhang, F., Torgal, F., Zhang Y. (2012). Shear behaviour of steel fibre reinforced self-consolidating concrete beams based on the modified compression field theory. *Composite Structures*, 94(8), 2440–2449.
- [2] Meza, A., Pujadas, P., Meza, L.M., Pardo-Bosch, F., López-Carreño, R.D. (2021). Mechanical Optimization of Concrete with Recycled PET Fibres Based on a Statistical-Experimental Study. *Materials*, 14, 240.
- [3] Meza, A., Ortiz, J.A., Peralta, L., Pacheco, J., Soto, J.J. (2014). Experimental mechanical characterization of steel and polypropylene fiber reinforced concrete. *Revista Tecnica Facultad de Ingeniería Universidad Zulia*, 37, 106-115.

- [4] Meza-de Luna, A., Kaur, G., Preciado-Martínez, H. J., Gutiérrez-López, I. A. (2021). Desempeño a Flexión del Concreto Reforzado con Fibras Plásticas Recicladas. *Conciencia Tecnológica*, 61.
- [5] Meza, A., Ahmed, F. U. (2020). Anisotropy and bond behaviour of recycled Polyethylene terephthalate (PET) fibre as concrete reinforcement. *Construction and Building Materials*, 265, 120331.
- [6] Meza, A., Meza, L. M., Chávez, F., Medina, R. G., Esparza, A. A. (2019). Experimental evaluation of galvanized and annealed wires to produce hooked fibers as reinforcement of concrete under flexion. *Pistas Educativas*, 133.
- [7] Meza, A., Siddique, S. (2019). Effect of aspect ratio and dosage on the flexural response of FRC with recycled fiber. *Construction and Building Materials*, 213, 286–291
- [8] Carmona, S., Molins, C., Aguado, A., Mora, F., (2016). Distribution of fibers in SFRC segments for tunnel linings. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 51, 238-249.
- [9] Colombo, M., Martinelli, P., di Prisco, M., (2016). On the blast resistance of high performance tunnel segments. *Materials and Structures*. 49(1-2), 117-131.
- [10] Nehdi, M.L., Mohamed, N., Soliman, A.M., (2016). Investigation of buried full-scale SFRC pipes under live loads. *Construction and Building Materials*, 102, 733-742.
- [11] 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.
- [12] 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*.
- [13] Pajak, M. (2019). Concrete reinforced with various amounts of steel fibers reclaimed from end of life tires. *Matec web conferences*, 262, 06008.
- [14] ACI 211.1. (1991). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete. Farmington Hills, MI.

- [15] Bashar, S. Mohammed, V., Khed, C., Liew, M. S. (2018). Optimization of hybrid fibres in engineered cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 190, 24–37.
- [16] Meddah, M. S., Bencheikh, M. (2009). Properties of concrete reinforced with different kinds of industrial waste fibre materials. *Construction and Building Materials*, 23, 3196–3205.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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 & Engineering A*, 488, 554-561.
- [20] Prasad M.J.N.V., Reiterer M.W., Kumar K.S. Microstructure and mechanical behavior of annealed MP35N alloy wire. *Materials Science & Engineering*, A636, 340–351.
- [21] Liu, Y.D., Zhang, Y.D., Tidu, A., Zuo, L. (2012). Fiber Texture Evolution of Ferrite Wires during Drawn-torsion and Drawn-annealing-torsion Process. *Journal of Materials Science & Technology*, 28, 1010-1014.
- [22] ASTM-C78. (2000). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). West Conshohocken, PA, United States.
- [23] ASTM C-192. (2000). Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. West Conshohocken, PA, United States: Annual Book of ASTM Standards.
- [24] Dramix. (2023). Steel fiber concrete reinforcement for industrial floors[online]. Available from: <<https://www.bekaert.com>> [Accessed 4 January 2023].
- [25] ACI 544.1R-96. (2002). State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete. ACI Committee 544.

- [26] 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.
- [27] ASTM C1018. (2000). 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.
- [28] 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.
- [29] Dvorkin, L., Dvorkin, O., Zhitkovsky, V., Ribakov, Y. (2011). A method for optimal design of steel fiber reinforced concrete composition. *Materials and Design*, 32(6), 3254-3262.
- [30] Juarez, C., Valdez, P., Durán, A., Sobolev, K. (2007). The diagonal tension behavior of fiber reinforced concrete beams. *Cement & Concrete Composites*, 29, 402–408.
- [31] Khaloo, A., Raisi, E.M., Hosseini, P., Tahsiri, H. (2014). Mechanical performance of self-compacting concrete reinforced with steel fibers. *Construction and Building Materials*, 51, 179-186.
- [32] ASTM C143. (2000). Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [33] Abrishambaf, A., Barros, J.A.O., Cunha, V.M.C.F., Fraz, C. (2017). Time dependent behaviour of fibre pull-out in self-compacting concrete. *Cement and Concrete Composites*, 77, 14-28.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] ACI 360R-10. (2010). Guide to Design of Slabs on Ground. Detroit, MI: Reported by Committee 360 American Concrete Institute.