

# **POPOTE PLÁSTICO COMO REFUERZO MECÁNICO DEL CONCRETO BAJO CARGA DE FLEXIÓN**

## ***PLASTIC STRAW AS MECHANICAL REINFORCEMENT OF CONCRETE UNDER FLEXURAL LOAD***

**Alejandro Meza de Luna**

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

**Fernando Chávez Valdivia**

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

**Agustín Jaime Pedroza Herrera**

Tecnológico Nacional de México / IT de Aguascalientes, México  
*agustin\_jaime.ph@aguascalientes.tecnm.mx*

**Jaime Arturo García Silva**

Tecnológico Nacional de México / IT de Aguascalientes, México  
*jaime.gs@aguascalientes.tecnm.mx*

**Recepción:** 30/agosto/2025

**Aceptación:** 22/octubre/2025

### **Resumen**

El concreto es uno de los materiales predilectos en el sector de la construcción; sin embargo, es un material que presenta baja resistencia a tensión. Aunque el uso de fibras industriales de refuerzo ha sido una alternativa para solventar esta falencia, se han presentado ciertos inconvenientes; por ejemplo, su costo. Este parámetro limita su aplicabilidad en el campo de la construcción. Por otra parte, materiales desechados después de un corto tiempo de uso pueden ser utilizados como refuerzo. Este artículo estudia las propiedades mecánicas del concreto reforzado con popotes poliméricos bajo carga de flexión. De acuerdo con el ASTM C78, se

ensayaron 15 especímenes normalizados de concreto reforzado con fibras y 3 sin fibras para comparar el comportamiento. Los resultados mostraron una reducción de la trabajabilidad debido al número y dimensiones de los popotes. Sin embargo, las propiedades mecánicas del concreto reforzado mejoraron con la incorporación de popotes poliméricos. De la misma forma, se demostró que el material polimérico del popote tiene baja resistencia a tensión, pero gran ductilidad; sin embargo, estas propiedades mecánicas no afectaron de manera significativa la resistencia del concreto reforzado con fibras a flexión, por lo contrario, los popotes aumentaron la ductilidad de los especímenes.

**Palabras Clave:** concreto reforzado con fibras, propiedades mecánicas, popotes poliméricos, ensayo a flexión, resistencia a tensión.

## **Abstract**

*Concrete is one of the preferred materials in the construction sector; however, it is a material that has low tensile strength. Although using industrial fibers for reinforcement has been an alternative to solve this shortcoming, certain drawbacks, such as its cost, have been presented. This parameter limits its applicability in the construction field. On the other hand, materials discarded after a short time can be used as reinforcement. This article studies the mechanical properties of concrete reinforced with polymeric straws under flexural loading. According to ASTM C78, 15 standardized specimens of fiber-reinforced concrete and three without fibers were tested to compare the behavior. The results showed a reduction in workability due to the number and dimensions of the straws. However, the mechanical properties of the reinforced concrete improved with the incorporation of polymeric straws. Likewise, it was shown that the polymeric material of the straw has low tensile strength, but great ductility; However, these mechanical properties did not significantly affect the flexural strength of fiber-reinforced concrete; on the contrary, the straws increased the ductility of the specimens.*

**Keywords:** fiber-reinforced concrete, mechanical properties, polymeric straws, flexural test.

## **1. Introducción**

El concreto es uno de los materiales más utilizados en el mundo para construcciones estructurales, ya que puede adoptar diferentes formas complejas, con una capacidad mecánica considerable bajo compresión [Fu et al., 2019]. Sin embargo, el concreto es débil a tensión; por ejemplo, Woo et al. [2014] indican que la falla del concreto se presenta en la región donde el material se encuentra sometido a cargas de tensión; dicha falla comúnmente se reduce utilizando refuerzo convencional [barras de refuerzo]. Por otra parte, Chu et al. [2018] revelan que el tiempo necesario para la figuración y ubicación de las barras de refuerzo en una construcción con concreto es elevado, representando una desventaja de esta metodología. Otra alternativa para reducir la debilidad del concreto bajo carga tensional es el uso de fibras de refuerzo, las cuales son mezcladas con los agregados. A este material compuesto es conocido como concreto reforzado con fibras [FRC], por sus siglas en inglés fiber reinforced concrete. En este caso, el tiempo necesario para generar una estructura con FRC es una ventaja en comparación con el concreto con refuerzo convencional [Fu et al. 2019; Chu et al. 2018].

Diferentes estudios han analizado las capacidades mecánicas del FRC. Daud et al. [2021] evaluaron el comportamiento mecánico del FRC con fibras de acero bajo carga de flexión, utilizando estudios experimentales y numéricos. Los resultados reportados por estos autores mostraron el efecto positivo de las fibras en el comportamiento mecánico de la matriz cementicia, lo que conduce a mayor ductilidad y resistencia posterior a la fisuración. Jangid et al. [2020] señalaron que la forma de las fibras es una consideración importante para mejorar el desempeño mecánico del FRC, destacando las capacidades de la matriz de concreto con fibras de acero con gancho en los extremos. Marar et al. [2017] estudiaron la influencia de la fracción de volumen de fibra y la relación de aspecto sobre el comportamiento al corte del FRC; sus resultados ilustran 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. Por otra parte, las principales desventajas del FRC también han sido reportadas. Ragalwar et al. [2020] y Carrillo et al. [2013] demostraron una reducción

en la trabajabilidad del FRC debido a la incorporación de los elementos de refuerzo. Mientras que Dvorkin et al. [2011] señalaron que el costo de la fibra es una restricción en la aplicación de estos elementos de refuerzo en el sector de la construcción.

Emon et al. [2017] indicó que el refuerzo para el FRC es alto en zonas donde se necesita importar las fibras industriales. Para superar este inconveniente, algunos investigadores han propuesto el uso de fibras alternativas. Citando algunas investigaciones, Carrillo et al. [2020] y Carrillo y Díaz [2020] estudiaron el concreto reforzado con acero para neumáticos; los resultados muestran un aumento de la resistencia mecánica del concreto reforzado con dichos elementos. Pajak [2019] comprobó el comportamiento a la fatiga por flexión del concreto reforzado con varias cantidades de fibras de acero para neumáticos; sus resultados indican un incremento positivo en la resistencia residual, la cual aumenta proporcionalmente con el número de elementos. Otros estudios sugieren el uso de diferentes materiales reciclados. Meza y Pujadas [2024], Meza et al., [2024], Meza et al. [2021], Meza y Ahmed [2020] y Meza y Siddique [2019] proponen el uso de fibras de PET provenientes de botellas desechadas para reforzar el concreto; los resultados muestran una favorable capacidad mecánica, con una tendencia de reducción de trabajabilidad relacionada con las dimensiones y la dosificación de las fibras. Sabapathy et al. [2019] experimentaron con chatarra de cables eléctricos de aluminio; sus datos mostraron que el refuerzo mejoró la resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción del concreto, las cuales dependen de la fracción de volumen de fibra. Emon et al. [2017] propusieron el uso de alambre de hierro galvanizado local para generar fibras rectas para reforzar el concreto; las tendencias muestran una mejora en la resistencia a la flexión y la resistencia residual, en comparación con el concreto sin fibras. Bhogayata y Arora [2017] estudiaron el concreto armado con fibras de desecho plástico metalizado; los resultados demuestran una mejora en la resistencia a la tracción y la ductilidad del concreto debido a la adición de las fibras propuestas.

El uso de materiales reciclados contribuye a la reducción de la contaminación. Uno de mayor relevancia es la contaminación relacionada con el desecho plástico, la

cual se ha convertido en un tema ambiental de importancia para los sectores políticos, científicos y sociales. Los principales plásticos utilizados por la sociedad son el polietileno [PE], el polipropileno [PP] y el cloruro de polivinilo [PVC], debido a su rentabilidad, durabilidad y versatilidad [Viera et al., 2020]. Sin embargo, la mayoría de estos materiales se desechan poco después de su uso. Después de la eliminación, estos materiales a base de petróleo no son degradables en condiciones ambientales normales [Viera et al., 2020]. Estos problemas se han reflejado en desechos marinos; por ejemplo, durante el último evento internacional de limpieza realizado en 2017, los popotes de plástico se encontraban entre los diez elementos de desecho más comunes en las zonas costeras, representado aproximadamente el 8% de todos los materiales recolectados [Ocean Conservancy, 2020]. En tal escenario, se desataron movimientos a nivel mundial impulsados por las redes sociales, que llevaron a agencias ambientales y gobiernos de todo el mundo a proponer acciones para prohibir los popotes de plástico de un solo uso [Schnurr et al., 2018; Neto, 2021; Fanini and Guittard, 2021].

Por otra parte, el concreto reforzado con fibras es susceptible a variabilidad en su comportamiento mecánico, debido a la distribución no homogénea de las fibras. Una opción para el estudio experimental de los materiales es el uso de métodos estadísticos, los cuales permiten emitir juicios certeros basados en tendencias y rangos de variación que pueden confirmar o anular la hipótesis. Varios investigadores han adoptado este tipo de métodos para analizar el desempeño del concreto y concluir con base en técnicas matemáticas. Por ejemplo, de la Rosa et al. [2019] estudiaron el comportamiento a compresión del FRC con fibras acero, utilizando la metodología de superficie de respuesta. Ayan et al. [2011], Carrillo et al. [2021-1, 2021-2, 2021-3], emplearon el análisis de varianza [ANOVA] para investigar el comportamiento del FRC con fibras de acero.

En el presente artículo se evalúa el uso de los popotes para ser utilizados como refuerzo del concreto, abordando sus propiedades mecánicas mediante pruebas de tensión del refuerzo; así como trabajabilidad y flexión en especímenes de FRC con popotes. En el estudio, se ha elegido el ensayo de flexión para estudiar el comportamiento del material compuesto; con un total de 18 *especímenes* de acuerdo

con el ASTM C78 [2018], variando su dosificación de popotes de refuerzo de 2 a 10  $kg/m^3$  y cambiando su relación de aspecto de 70 a 130.

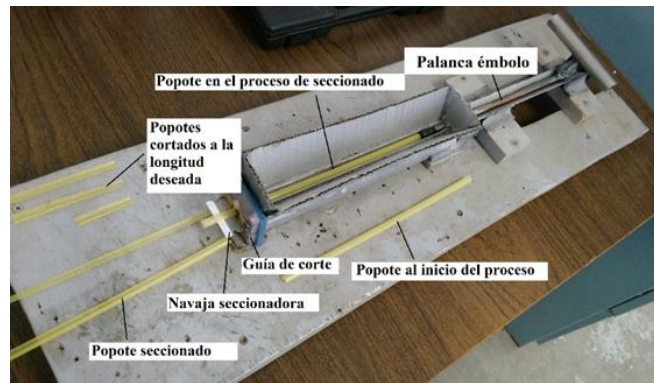
## 2. Materiales y métodos

La matriz cementicia está compuesta por cemento y dos agregados [arena natural y grava]. El cemento utilizado es Portland ordinario tipo I, con una densidad de 3150  $kg/cm^3$ . La arena natural tiene una densidad de 2500  $kg/cm^3$ , un tamaño máximo de 4.75 mm y absorción de agua del 3%. La grava tiene un tamaño máximo de 20 mm, una densidad de 2680  $kg/cm^3$  y absorción de agua de 1.1%. En cuanto a las proporciones de materiales en el concreto se tiene: cemento 383  $kg/cm^3$ , arena natural 672  $kg/cm^3$ , grava 1100  $kg/cm^3$  y agua 192  $kg/cm^3$ ; con una relación agua/cemento de 0.5. La resistencia nominal a la compresión a los 28 días fue de 40 MPa, verificada en probetas cilíndricas de diámetro 100 mm y longitud 200 mm, ensayadas de acuerdo con la norma ASTM C39 [2018].

Los popotes poliméricos utilizados para producir las fibras de refuerzo fueron adquiridos en tiendas comerciales de la ciudad de Aguascalientes, México; con longitud de 274 mm y diámetro de 7.12 mm. La producción de las fibras a partir de los popotes comenzó con un proceso de seccionamiento longitudinal para dividirlo en dos partes simétricas, para después ser cortado con tijera a la longitud deseada. Para el proceso de seccionado se utilizó un dispositivo diseñado por Meza y colaboradores, el cual consta de una palanca accionada manualmente que permite impulsar al popote hacia la zona de corte, lugar donde se alojó una navaja que es soportada en una base-guía de corte, para realizar un seccionamiento uniforme. En el proceso de corte, se observó que se requiere un buen afilado de la navaja para que no se produzca una falla por pandeo en el popote.

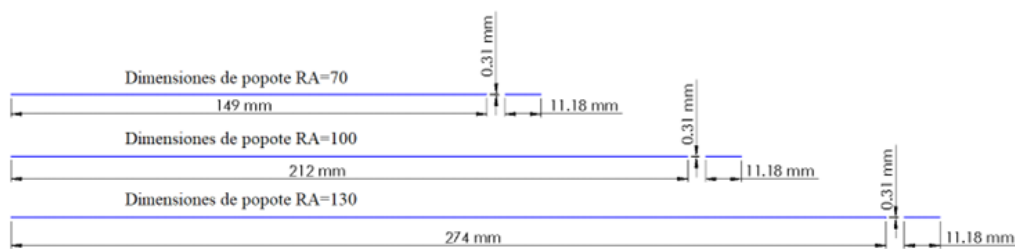
La Figura 1 muestra el dispositivo de corte del popote para la generación de las fibras. El estudio consideró tres longitudes de popote (149, 221 y 274 mm). La sección transversal tiene espesor de 0.31 mm y ancho de 11.18 mm, con diámetro equivalente de 2.1 mm y una relación de aspecto (*RA*) de 70, 100 y 130; la Figura 2 muestra un esquema de dimensiones y *RA* de los popotes utilizados. Las Ecuaciones 1 y 2 muestran las fórmulas utilizadas para determinar el diámetro

equivalente ( $d_e$ ) y la relación de aspecto ( $RA$ ), respectivamente, donde  $b$  el ancho de la sección transversal del popote,  $h$  el espesor de la sección transversal del popote y  $l$  la longitud del popote.



Fuente: elaboración propia

Figura 1 Dispositivo utilizado para el proceso de seccionado de popotes.



Fuente: elaboración propia

Figura 2 Dimensiones y RA de los popotes de refuerzo utilizados.

$$d_e = \sqrt{\frac{4bh}{\pi}} \quad [1]$$

$$RA = \frac{l}{d_e} \quad [2]$$

Los especímenes se reforzaron con tres dosis diferentes de fibras con 2,6 y 10  $kg/cm^3$  para estudiar su efecto sobre la trabajabilidad y el comportamiento a la flexión del FRC, la proporción de fibras son similares a otros estudios con fibras poliméricas vírgenes y recicladas [Meza et al., 2021; Meza y Siddique, 2019]. La nomenclatura utilizada para identificar el FRC comprende la dosis de fibra y sus dimensiones, basadas en la relación de aspecto. Por ejemplo, el espécimen 2 – 70

representa al FRC con popotes en dosis de  $2 \text{ kg/cm}^3$  y relación de aspecto de fibra de  $70 \text{ mm/mm}$ .

Para la elaboración de los especímenes de concreto, los materiales que lo constituyen [cemento, arena, agregados, y popotes] se mezclaron manualmente durante  $3 \text{ min}$ . A continuación, se dispensó el agua y se mezcló durante otros  $3 \text{ min}$  para obtener una mezcla homogénea. Con este procedimiento el concreto mostró una buena distribución de las fibras. Siguiendo los lineamientos de la norma ASTM C78 [2018], la mezcla de concreto se vertió en moldes prismáticos de dimensiones estándar  $150 \text{ mm}$  de ancho,  $150 \text{ mm}$  de peralte, y  $500 \text{ mm}$  de longitud. El procedimiento de curado (28 días) fue de acuerdo con la norma ASTM C192 [2018].

### **Ensayo a tensión de los popotes**

Uno de los objetivos de incorporar fibras de refuerzo al concreto es mejorar su desempeño a tensión, motivo por el cual el comportamiento mecánico de los popotes a tensión será un elemento por considerar. Para el ensayo de tensión se utilizaron probetas de popote seccionado. La dimensión de las probetas fue de  $274 \text{ mm}$  de largo, las cuales fueron sujetadas a fuerza de tensión en la máquina universal con una longitud  $25 \text{ mm}$  en cada extremo. En total, se ensayaron 3 elementos, utilizando una máquina de ensayo universal de  $98 \text{ kN}$  de capacidad, bajo control de desplazamiento con una velocidad de carga de  $20 \text{ mm/min}$ . Con excepción de la velocidad de desplazamiento del ensayo, el procedimiento fue similar a un estudio previo [Meza y Ahmed 2020].

### **Ensayo del concreto reforzado con popotes en estado fresco**

La caracterización de la matriz de concreto en estado fresco se realizó por medio de un ensayo de trabajabilidad mediante el cono de Abraham, tomando como referencia la norma ASTM C143 [2018] (Figura 3).

### **Ensayo del concreto reforzado con popotes en estado endurecido**

Los ensayos de flexión se realizaron mediante una máquina hidráulica Galdabini, con una capacidad de  $98 \text{ kN}$  y una velocidad de desplazamiento de  $5 \text{ mm/min}$ . La

medición de la deflexión transversal se realizó con un reloj comparador de 25 mm, el cual fue ubicado para registrar la deflexión central del espécimen (Figura 4).



*Fuente: elaboración propia*

Figura 3 Dimensiones y RA de los popotes de refuerzo utilizados.



*Fuente: elaboración propia*

Figura 4 Dimensiones y RA de los popotes de refuerzo utilizados.

### **Estudio de tenacidad a flexión del concreto reforzado con popotes**

La tenacidad a la flexión se evaluó de acuerdo con las especificaciones indicada por el JCI [Japan Concrete Institute]. El JCI, en su norma SF-4 [1984], sugiere el uso de la relación de resistencia a la flexión equivalente ( $R_{e,3}$ ), la cual es proporcional al área bajo la curva carga-deflexión hasta una deflexión correspondiente a 1/150 del claro del espécimen. El cálculo de tenacidad se basa en la resistencia a flexión correspondiente al inicio de la primera fisura del espécimen;  $R_{e,3}$  se expresa en porcentaje [Kaur et al., 2012; Soutsos et al., 2012]. La tenacidad a la flexión del FRC depende de factores tales como la relación de aspecto, la geometría y el contenido de fibra [Kaur et al., 2012; Soutsos et al., 2012]. Las Ecuaciones 3 y 4 indican las relaciones utilizadas para la determinación de la

fuerza residual equivalente ( $f_{e,3}$ ) y la relación de resistencia a la flexión equivalente ( $R_{e,3}$ ), respectivamente, donde  $P_{e,3}$  es la resistencia residual,  $L$  es el claro del espécimen,  $P_{max}$  es la carga máxima,  $b$  es el ancho del espécimen, y  $h$  es la altura del espécimen.

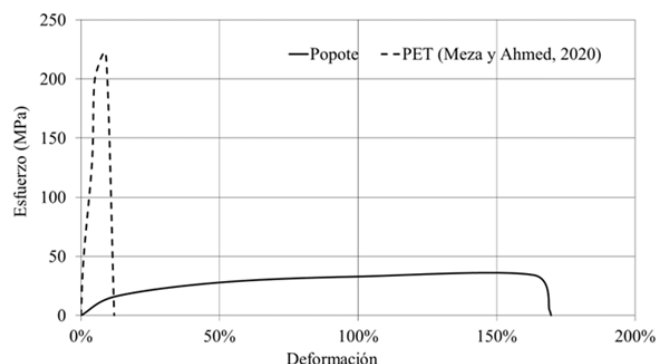
$$f_{e,3} = \frac{LP_{e,3}}{bh^2} \quad (3)$$

$$R_{e,3} = \frac{f_{e,3}}{P_{max}} * 100 \quad (4)$$

### 3. Resultados y Discusión

#### Comportamiento mecánico de los popotes poliméricos a tensión

La Figura 5 muestra el gráfico esfuerzo-deformación promedio de los popotes poliméricos a tensión en comparación con otro polímero expuesto en otra investigación [Meza y Ahmed, 2020]. Las curvas muestran una rigidez y capacidad de carga más baja que las observadas en PET [Meza y Ahmed, 2020]. El módulo de elasticidad se determinó acorde a la norma NMX-C-128-1997-ONNCCE [1997].



Fuente: elaboración propia

Figura 5 Comportamiento del popote plástico a tensión y su comparación con el PET.

La Tabla 1 muestra los resultados del presente estudio y la comparación con otro polímero reportado en otra investigación. Los datos ilustran que el popote plástico tiene el módulo de elasticidad más bajo que el PET, destacando que el popote plástico requiere de una baja carga para que el material se deforme; el módulo de elasticidad para el popote plástico llega a ser hasta 6 veces inferior que el PET. De la misma forma, el popote plástico tiene una baja resistencia a la fluencia,

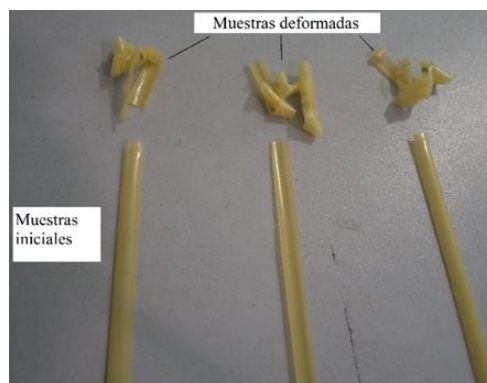
requiriendo de una carga baja para cambiar de un comportamiento elástico a plástico; de tal manera que el material estudiado adquiere deformación permanente cuando supera los 16 MPa, valor que está por debajo 3.8 veces que el PET.

La resistencia máxima a tensión es otra característica mecánica que se vio afectada en el material estudiado, con una reducción de hasta 7.5 veces la capacidad del PET. De igual manera, el material con el que está constituido el popote presenta una importante característica, que es su capacidad de deformación sin romperse, superando los valores mostrados en la Tabla 1; por ejemplo, el popote plástico puede deformarse hasta 10 veces la capacidad del PET. La Figura 6 muestra los especímenes antes y después del ensayo, donde se observa la gran deformación que permite el material acompañado de una gran distorsión. Este efecto también fue observado en los popotes que actuaron en la zona de contacto, encontradas en la zona de agrietamiento de los especímenes a flexión, después del ensayo.

Tabla 1 Comportamiento mecánico a tensión del popote plástico y el de PET.

| Fibra           | Módulo de elasticidad [MPa] | Esfuerzo de fluencia [MPa] | Esfuerzo último [MPa] | Deformación [%] | Referencia          |
|-----------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------|---------------------|
| Popote plástico | 137                         | 16                         | 34                    | 170             | Presente estudio    |
| PET             | 6800 – 8300                 | 43 – 60                    | 170 – 255             | 10 – 25         | Meza y Shaikh, 2020 |

Fuente: elaboración propia



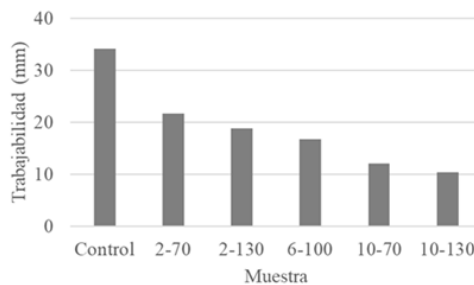
Fuente: elaboración propia

Figura 6 Popotes ensayados a tensión y probetas iniciales.

## Trabajabilidad del concreto

La Figura 7 muestra el asentamiento medio de los especímenes de FRC con popotes y las que no contienen fibras. Los resultados muestran una reducción de la

trabajabilidad en los especímenes FRC en comparación con las de control, con una reducción promedio de 18 mm. De la misma forma, los resultados revelan que la reducción de la trabajabilidad depende de la dosis de fibra y la relación de aspecto; por ejemplo, a mayor dosis y relación de aspecto, menor revenimiento.

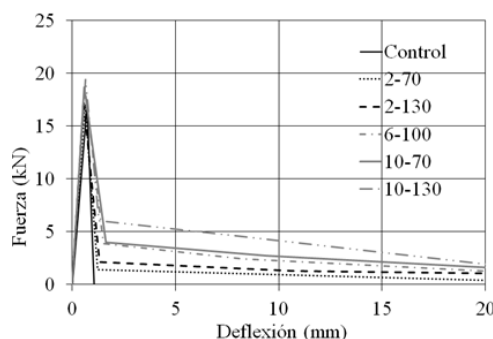


Fuente: elaboración propia

Figura 7 Trabajabilidad del concreto reforzado con popotes plásticos.

### Comportamiento mecánico a flexión

El comportamiento mecánico a flexión de los especímenes de concreto reforzado con fibras con popotes plásticos se muestra en Figura 8. Los resultados muestran que el promedio de la carga máxima de los especímenes de control es similar a los del concreto reforzado con popotes. La diferencia entre el promedio de la carga máxima de los especímenes FRC es de 1.2 kN respecto a las de control. La tendencia observada en los resultados muestra que los especímenes con poca dosis de popotes [ $2 \text{ kg/m}^3$ ] tienen un comportamiento similar a las de control. Si se aumenta el nivel de refuerzo, hasta  $10 \text{ kg/m}^3$ , la capacidad tiende a aumentar. La resistencia residual  $R_{e,3}$  se calculó utilizando la ecuación 4.



Fuente: elaboración propia

Figura 8 Flexión promedio de los especímenes FRC con popotes y de control.

Los resultados indican que los especímenes 10 – 130 alcanzan un valor de 44.0%, mientras que aquellos con la relación 2 – 70 tienen un promedio de 25.6%. El Concrete Society [2003] recomienda que la resistencia residual mínima sea de 30% para considerarse como un concreto reforzado. En este caso el promedio de los especímenes 2 – 70 no cumplen con dicho criterio y los especímenes 2 – 130 apenas superan dicho valor con  $R_{e,3}$  de 31%, mientras que las otras proporciones superan el criterio. Por lo que se puede concluir que el mejor desempeño se encontró con el concreto reforzado con popotes en alta dosis y relación de aspecto.

#### **4. Conclusiones**

Se analizó el comportamiento del concreto reforzado con popotes poliméricos a partir de ensayos de tensión en los elementos de refuerzo, así como trabajabilidad y flexión. Los resultados muestran que el concreto reforzado con popotes presentó una reducción en la trabajabilidad de hasta 23.8 mm, atribuido al cambio de dosis de popotes de 2 a 10 kg/m<sup>3</sup> y dimensiones de relación de aspecto de 70 a 130. Por otra parte, los ensayos a tensión aplicados a los popotes indican que tiene una baja resistencia para deformarse permanentemente (16 MPa), con poca rigidez (137 MPa) y reducido esfuerzo último (34 MPa). Sin embargo, se encontró una gran capacidad de deformación que alcanza 169%. Los resultados experimentales obtenidos muestran que sus características mecánicas, aunque los popotes tienen limitaciones mecánicas, fueron superiores a los especímenes sin fibras.

Efecto de dimensiones y dosis de popotes en las propiedades mecánicas del FRC:

- La carga máxima mostró su mejor comportamiento en los especímenes con la mayor cantidad de popotes y la mayor relación de aspecto.

Los especímenes con popotes con dosis de 10 kg/m<sup>3</sup> y relación de aspecto de 130 aumentó su carga máxima en 14% con respecto a aquellas con una relación de 2 kg/m<sup>3</sup> y relación de aspecto de 70.

- Los elementos FRC con popotes con dosis de 10 kg/m<sup>3</sup> y relación de aspecto de 130 demostraron mayor resistencia residual que los de menor dosis y relación de aspecto, la diferencia fue de 1.4 veces.

En general, se puede destacar que los popotes plásticos tienen viabilidad mecánica, económica y social considerando sus propiedades demostradas en este trabajo, así como que el hecho de ser utilizados como remplazo de materiales vírgenes favora la reducción de costos y materiales desechados contaminen nuestros ecosistemas.

## **Reconocimientos**

Los autores desean agradecer al Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Aguascalientes y Secihti por el financiamiento del proyecto de investigación a través de sus diferentes programas de fomento a la investigación.

## **6. Referencias y Bibliografía**

- [1] 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.
- [2] ASTM C-143 [2018]. C. ASTM, Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, West Conshohocken, PA, USA.
- [3] ASTM C-192. [2018]. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory; Annual Book of ASTM Standards; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
- [4] ASTM C39/C39M. [2018], Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, West Conshohocken [PA]: ASTM International.
- [5] ASTM C78/C78M. [2018]. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete [Using Simple Beam with Third-Point Loading]; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
- [6] Ayan E., Saatçiog Ö., Turanlı L. [2011]. Parameter optimization on compressive strength of steel fiber reinforced high strength concrete, *Construction and Building Materials*, 25, 2837–2844. <https://doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.12.051>.
- [7] Bhogayata A.C., Arora N.K. [2017]. Fresh and strength properties of concrete reinforced with metalized plastic waste fibers. *Construction and*

- BuildingMaterials, 146:455–463. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.095>
- [8] Carrillo J., Aperador W., González G. [2013]. Correlaciones entre las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras de acero. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, Vol. XIV, 3:435-450.
- [9] Carrillo J., Torres D., Guerrero H. [2021] Correlation between results obtained from four-point bending tests [4PBT] and double punch tests [DPT] in concrete reinforced with hooked-end steel fibers. *Engineering Structures*. 239:112353. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112353>.
- [10] Carrillo, J, Vargas, JD, Alcocer, SM. [2021] Model for estimating the flexural performance of concrete reinforced with hooked end steel fibers using three-point bending tests. *Structural Concrete*. 22:1760–1783. <https://doi.org/10.1002/suco.202000432>.
- [11] Carrillo, J., Díaz, C. [2020]. Propiedades mecánicas de las losas de concreto reforzadas con fibras de acero recicladas provenientes de llantas usadas en Bogotá, Colombia. *Ciencia E Ingeniería Neogranadina*, 30[2]:67-79. <https://doi.org/10.18359/rcin.4412>.
- [12] Carrillo, J., Lizarazo-Marriaga, J., Lamus, F. [2020]. Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete Using Either Industrial or Recycled Fibers from Waste Tires. *Fibers and Polymers* 21:2055–2067. <https://doi.org/10.1007/s12221-020-1076-1>.
- [13] Carrillo, J., Ortiz, J.A, Rueda, JG. [2021] Indirect Tensile Behavior of Hooked-End Steel Fiber- Reinforced Concrete under Double-Punch Tests. *Aci Materials Journal*, 118[5]:93-115. <https://doi.org/10.14359/51732932>.
- [14] 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.047>.
- [15] Concrete Society. [2003] *Concrete Industrial Ground Floors—A Guide to Design and Construction*, 3rd ed.; Technical Report 34; Concrete Society: Farmington Hills, MI, US.

- [16] Daud R.A., Daud S.A., Al-Azzawi A.A. [2021]. Tension stiffening evaluation of steel fibre concrete beams with smooth and deformed reinforcement. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 33, 147-152. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.03.002>.
- [17] de la Rosa A., Ruiz G., Poveda E. [2019]. Study of the Compression Behavior of Steel-Fiber Reinforced Concrete by Means of the Response Surface Methodology. *Applied Sciences*, 9, 5330. <https://doi.org/10.3390/app9245330>.
- [18] Dehghani A., Aslani F. [2021]. Effect of 3D, 4D, and 5D hooked-end type and loading rate on the pull-out performance of shape memory alloy fibres embedded in cementitious composites. *Construction and Building Materials*, Vol 273, 121742. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121742>.
- [19] 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.
- [20] 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. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.08.003>.
- [21] Fanini L., Guittard A. [2021]. On single use plastic straws: Pre-ban findings on touristic beaches in Crete *Marine Pollution Bulletin*, 171, 112790. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112790>.
- [22] 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>.
- [23] Jangid A., Sharma A. [2020]. Experimental study on the properties of steel fibre reinforced concrete. *Indian Journal of Engineering*, 17[47], 151-163.
- [24] JSCE-SF4. Standard for Flexural Strength and Flexural Toughness, Method of Tests for Steel Fiber Reinforced Concrete; Concrete Library of JSCE, Japan Concrete Institute [JCI]: Tokyo, Japan, 1984.
- [25] Kaur G., Singh S.P., Kaushik S.K. [2012]. Flexural performance of fibrous concrete with cement additions. *Construction Materials*, 167:14-25.

- [26] Marar K., Eren Ö., Roughani H. [2017]. The influence of amount and aspect ratio of fibers on shear behaviour of steel fiber reinforced concrete. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21:1393–1399. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-0787-2>.
- [27] 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120331>.
- [28] Meza A., Alonso E.M., Bonilla, A. [2024]. Experimental Study of Innovative FRC Dome-Shaped Structures with Industrial, Recycled, and Alternative Reinforcing under Compressive Load. *Ingeniería e Investigación*, 44[1]. DOI: <https://doi.org/10.15446/ing.investig.105266>.
- [29] Meza A., Pujadas P. [2024]. Breaking the plastic cycle: exploring the mechanical properties of PET fiber-reinforced concrete, Chapter book of Reuse of Plastic Waste in Eco-efficient Concrete, ELSEVIER.
- [30] 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. <https://doi.org/10.3390/ma14020240>.
- [31] 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.081>.
- [32] Neto A.M., Gomes T. S., Pertel M., Vieira L.A.V.P., Pacheco E.B.A.V. [2021] *Marine Pollution Bulletin*, 172, 112813. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112813>.
- [33] Ocean Conservancy. [2020]. Together We Are Team Ocean. [https://oceanconservancy.org/wp-content/uploads/2020/10/FINAL\\_2020ICC\\_Report.pdf](https://oceanconservancy.org/wp-content/uploads/2020/10/FINAL_2020ICC_Report.pdf).
- [34] Pajak M. [2019]. Concrete reinforced with various amounts of steel fibers reclaimed from end-of-life tires. *MATEC Web of Conferences*, 262:06008. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201926206008>.

- [35] 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>
- [36] 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*, 33[1]:23-29. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2019.12.004>.
- [37] Schnurr R.E.J., Alboiu V., Chaudhary M., Corbett R.A., Quanz M.E., Sankar K., Srain H.S., Thavarajah V., Xanthos D., Walker T.R. [2018]. Reducing marine pollution from single-use plastics [SUPs]: a review. *Marine Pollution Bulletin*. 137, 157–171. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.10.001>.
- [38] 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>.
- [39] Viera J.S.C., Marques M.R.C., Nazareth C.M., Jimenez P.C., Castro Í.B. [2020]. On replacing single-use plastic with so-called biodegradable ones: The case with straws. *Environmental Science and Policy*, 106, 177–181. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.02.007>.
- [40] Wiemer N., Wetzel A., Schleiting M., Kroob P., Vollmer M., Niendorf T., Böhm S., Middendor B. [2020]. Effect of Fibre Material and Fibre Roughness on the Pullout Behaviour of Metallic Micro Fibres Embedded in UHPC. *Materials*, 13, 3128. doi:10.3390/ma13143128.
- [41] Woo S.K., Kim K.J., Han S.H. [2014]. Tensile cracking constitutive model of Steel Fiber Reinforced Concrete [SFRC]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18:1446–1454. <https://doi.org/10.1007/s12205-014-0335-3>.