

Comportamiento mecánico de concreto elaborado con fibras de polipropileno Mechanical behavior of concrete made with polypropylene fibers

C. B. Dorantes-Ferrusquia ^a, D. E. Estrada-Hernández ^a, L. Z. Manrique-Mendoza ^a, L. D. López-León ^{a,*}

^a Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

Resumen

El presente estudio evalúa el efecto de la incorporación de fibras de polipropileno recicladas de la industria automotriz en las propiedades mecánicas del concreto. Se analizaron mezclas con diferentes contenidos de fibra, comparándolas con concreto convencional. Se realizaron ensayos de compresión y tracción indirecta en cilindros curados durante 28 días, siguiendo normativas internacionales. Los resultados mostraron una tendencia al aumento en la resistencia a la compresión respecto al concreto sin fibras. De forma similar, la resistencia a la tracción indirecta presentó una tendencia al incremento con la adición de fibras, lo que sugiere una mejor distribución de tensiones y control en la propagación de fisuras. El análisis cualitativo por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) mostró indicios de una mayor cohesión interna y una menor presencia de vacíos en los especímenes modificados. Se concluye que la reutilización de fibras de desecho podría contribuir a mejorar el desempeño del concreto y favorecer prácticas sostenibles dentro de la economía circular en la construcción.

Palabras Clave: Concreto, Polipropileno reciclado, Resistencia a la compresión, Resistencia a la tracción.

Abstract

This study evaluates the effect of incorporating recycled polypropylene fibers from the automotive industry on the mechanical properties of concrete. Mixtures with different fiber contents were analyzed and compared to conventional concrete. Compressive strength and indirect tensile tests were conducted on cylinders cured for 28 days, following international standards. The results showed a tendency toward increased compressive strength in the fiber-reinforced concrete mixtures. Similarly, indirect tensile strength tended to improve with fiber addition, suggesting better stress distribution and reduced crack propagation. The qualitative analysis using Scanning Electron Microscopy (SEM) indicated greater internal cohesion and a lower presence of voids in the modified specimens. It is concluded that the reuse of waste fibers may contribute to enhancing concrete performance and promote sustainable practices aligned with circular economy principles in the construction sector.

Keywords: Concrete, Recycled polypropylene, Compressive strength, Tensile strength.

1. Introducción

El concreto es uno de los materiales de construcción más utilizados y valorados a nivel mundial debido a su versatilidad, durabilidad y capacidad para adaptarse a diversas formas y aplicaciones. Estas características han llevado a su adopción masiva en la industria de la construcción, posicionándolo como un pilar fundamental en el desarrollo de infraestructura moderna. Sin embargo, este uso generalizado también genera importantes desafíos ambientales, derivados principalmente de la producción de su componente esencial: el cemento. Este proceso es responsable de una considerable emisión de dióxido de carbono (CO₂), que contribuye aproximadamente al 7% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (Habert

et al., 2020; Von et al., 2020). Como respuesta, se ha intensificado la búsqueda de alternativas sostenibles para mitigar el impacto ambiental asociado con la fabricación y el uso del concreto.

En México, los residuos de construcción y demolición (RCD) representan una problemática ambiental significativa. Según estudios recientes, más del 50% de los RCD generados en el país no se gestiona adecuadamente, lo que provoca que materiales como el concreto residual sean desechados en barrancas, tierras agrícolas y humedales, pese a la existencia de sitios autorizados para su disposición (Araiza et al., 2019). Este manejo inadecuado no solo afecta la calidad ambiental de los ecosistemas, sino que también evidencia la necesidad de estrategias innovadoras que prolonguen la vida útil del

*Autor para la correspondencia: luis_lopez@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: do441559@uaeh.edu.mx (Cintia Berenice Dorantes-Ferrusquia), es440133@uaeh.edu.mx (Dennis Elizeth Estrada-Hernández), ma319024@uaeh.edu.mx (Leslie Zuriali Manrique-Mendoza), luis_lopez@uaeh.edu.mx (Luis Daimir López-León)

Historial del manuscrito: recibido el 04/08/2025, última versión-revisada recibida el 25/10/2025, aceptado el 26/10/2025, publicado el 05/12/2025. DOI: <https://doi.org/10.29057/icbi.v13iEspecial3.15598>



concreto, mejorando su desempeño mecánico y reduciendo su desecho prematuro.

La incorporación de fibras en el concreto ha surgido como una solución efectiva para mejorar sus propiedades mecánicas y aumentar su durabilidad. Entre los diversos tipos de fibras utilizadas, las de polipropileno destacan por su alta resistencia a la tracción, estabilidad térmica y capacidad para actuar como refuerzo frente a la fisuración, el desgaste y los impactos (Yuan et al., 2021). Además, estas fibras se han convertido en una alternativa económica y sostenible en comparación con otras soluciones más costosas, como el uso de aditivos químicos.

Desde una perspectiva ambiental, el empleo de fibras de polipropileno recicladas en la producción de concreto ofrece beneficios adicionales al contribuir a la gestión de residuos plásticos. La contaminación por plásticos es una de las mayores crisis ambientales del siglo XXI, y su impacto en los ecosistemas terrestres y acuáticos ha generado un llamado global para promover su reutilización y reciclaje (Velasco y Cruz, 2023). La incorporación de estas fibras en el concreto no solo reduce la cantidad de residuos plásticos en el medio ambiente, sino que también disminuye la demanda de materiales vírgenes y las emisiones de CO₂ asociadas con su producción (Hosseinzadeh et al., 2023). Este enfoque está alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, que promueven la gestión responsable de los recursos y la minimización de desechos (Ahmad et al., 2022).

1.1. Aprovechamiento de Residuos Industriales: Fibras de Polipropileno de la Industria Automotriz

La industria automotriz genera grandes volúmenes de residuos plásticos, entre ellos fibras de polipropileno, utilizadas en componentes internos como alfombrados, tapicería y recubrimientos de vehículos. La gestión ineficiente de estos desechos representa un desafío ambiental, ya que, al no ser biodegradables, contribuyen a la contaminación de suelos y cuerpos de agua (Tran et al., 2022).

En este contexto, la incorporación de fibras de polipropileno recicladas en mezclas de concreto se presenta como una alternativa sostenible para reducir el impacto ambiental y mejorar las propiedades mecánicas del material. Según estudios recientes, las fibras recicladas no comprometen la resistencia del concreto y, en cambio, favorecen su desempeño mecánico al reducir la propagación de fisuras y mejorar la tenacidad del material (Yuan et al., 2021; Malek et al., 2021).

El uso de material reciclado en la construcción permite disminuir la demanda de fibras sintéticas vírgenes, reduciendo el consumo de recursos fósiles y las emisiones de CO₂ derivadas de su producción (Tran et al., 2022). Además, fortalece el concepto de economía circular, promoviendo la reutilización de materiales desechados en sectores productivos estratégicos.

Desde un enfoque técnico, la inclusión de fibras de polipropileno recicladas de la industria automotriz podría mejorar la resistencia al impacto y la durabilidad del concreto, además de aumentar su capacidad para resistir esfuerzos de tracción indirecta, como lo demostraron los ensayos presentados en esta investigación. Diversos estudios han reportado que las fibras de polipropileno pueden contribuir a mejorar el comportamiento del concreto bajo sollicitaciones

dinámicas, principalmente por su capacidad para absorber energía y limitar la propagación de fisuras, lo que se ha observado en curvas esfuerzo-deformación sometidas a cargas cíclicas o de impacto (Xu et al., 2018; Fallah y Nematzadeh, 2017). Aunque este estudio no evalúa directamente dicho comportamiento, se retoma esta evidencia como base para justificar su potencial aplicación en estructuras sujetas a este tipo de condiciones.

Estos hallazgos refuerzan la viabilidad del uso de fibras recicladas en la industria de la construcción, tanto desde una perspectiva ambiental como económica, ofreciendo una solución innovadora y sostenible para mejorar el desempeño del concreto sin incrementar significativamente los costos de producción.

En el estado de Hidalgo, la investigación sobre el uso de fibras de polipropileno en concreto es aún incipiente, lo que brinda una oportunidad única para explorar esta técnica innovadora. Evaluar el desempeño del concreto modificado con diferentes porcentajes de fibras de polipropileno permitirá determinar la dosificación óptima para maximizar sus propiedades mecánicas. Este enfoque no solo tiene el potencial de mejorar la calidad del concreto producido en la región, sino también de establecer un modelo replicable para la construcción sostenible a nivel nacional.

2. Estudios previos

2.1. Fibras de polipropileno

Las fibras de polipropileno se han incorporado en el concreto para mejorar su desempeño mecánico, particularmente en resistencia a la fisuración, durabilidad y comportamiento bajo carga (Ahmad et al., 2022; Xu et al., 2018). Estas fibras ofrecen ventajas como alta resistencia a ataques químicos, haciéndolas ideales para aplicaciones en ambientes industriales y marinos (Xu et al., 2018). Además, su baja absorción de agua garantiza una estabilidad dimensional incluso en condiciones de alta humedad (Malek et al., 2021). Una de las principales ventajas de las fibras de polipropileno es su capacidad para reducir la fisuración del concreto, actuando como un refuerzo que distribuye tensiones internas y previene la propagación de fisuras. Según Hosseinzadeh et al., (2023), estas fibras disminuyen significativamente las fisuras por retracción, especialmente durante las primeras etapas de curado. Adicionalmente, mejoran la resistencia a cargas cíclicas y reducen el riesgo de fracturas bajo condiciones extremas (Eidan et al., 2019).

Sin embargo, uno de los retos asociados a su uso es garantizar una distribución homogénea en la mezcla, ya que una mala dispersión puede comprometer su efectividad. Además, las fibras de polipropileno no incrementan significativamente la resistencia a la compresión del concreto, lo que limita su impacto en esta propiedad específica (Xu et al., 2018).

Las fibras de polipropileno pueden obtenerse a través de procesos de reciclaje, siendo la hidrólisis alcalina una técnica particularmente efectiva para mejorar su calidad. Este método permite eliminar impurezas, residuos orgánicos y cadenas degradadas del polímero, favoreciendo una mejor compatibilidad con la matriz cementante y un comportamiento mecánico más estable (Jameel et al., 2023). En México, de los

ocho millones de toneladas de plástico generadas anualmente, solo el 14% se reciclan, destacando la necesidad de mejorar las estrategias de recolección y reutilización (CONANP, 2018).

2.2. Impacto de las fibras de polipropileno en las propiedades mecánicas del concreto

La incorporación de fibras de polipropileno en el concreto ha demostrado mejoras en propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción, la durabilidad, la resistencia a la compresión y la tenacidad. Por ejemplo, Yao y Zhong (2007) reportaron un incremento del 23% en la resistencia a la tracción al añadir un 1% de fibras de polipropileno. Sin embargo, contenidos superiores al 1.5% no mostraron mejoras significativas.

La durabilidad del concreto también se ve favorecida por la presencia de fibras. Jameel et al. (2023) observaron que un contenido del 1% mejora la resistencia a la penetración de agua y reduce la extensión de fisuras. Además, estas fibras ofrecen protección contra daños por ciclos de congelación y descongelación, según Yao y Zhong (2007).

En términos de resistencia a la compresión, Yao y Zhong (2007) reportaron un incremento del 15% con un 1% de fibras. No obstante, Kumar y Rai (2023) concluyeron que el uso de fibras más largas (24 mm) mejora la resistencia a altas temperaturas en comparación con fibras más cortas.

2.3. Influencia de las fibras de polipropileno en la creación de fisuras en el concreto

Las fibras de polipropileno reducen las fisuras de retracción al actuar como una red interna que controla la propagación de fisuras dispersando las tensiones. Malek et al., 2021 demostraron que su incorporación disminuye significativamente las fisuras durante el curado inicial. Además, Xu et al., (2018) encontraron que el concreto reforzado con estas fibras responde mejor a cargas cíclicas, reduciendo el tamaño y la cantidad de fisuras.

Las fibras también mejoran la cohesión interna del concreto, previniendo la separación y el agrietamiento bajo cargas de tracción. Según Yao y Zhong (2007), la cantidad y tamaño de fisuras disminuyen con el incremento del contenido de fibras, aunque no se observan mejoras sustanciales más allá del 1.5%.

2.4. Relación óptima de fibras de polipropileno para maximizar las propiedades mecánicas del concreto

La proporción óptima de fibras de polipropileno en el concreto depende de variables como la longitud, la fracción de volumen y su adecuada dispersión en la matriz cementante. Malek et al. (2021) evidenciaron que al incrementar la longitud de las fibras de 6 mm a 12 mm, con una fracción volumétrica del 0.15 %, la contracción por secado se redujo entre un 30 % y un 60 %. Complementariamente, Yao y Zhong (2007) reportaron una disminución adicional del 7 % al emplear fibras de 20 mm con una dosis de 1.2 kg/m³. En cuanto al contenido volumétrico, el mismo estudio de Malek et al. (2021) demostró que una fracción del 0.35 % puede reducir la contracción hasta en un 70 %, lo que subraya la necesidad de equilibrar adecuadamente la longitud, el volumen y la distribución de las

fibras para optimizar el desempeño mecánico y la durabilidad del concreto.

2.5. Impacto ambiental y económico de la elaboración de concreto con fibras de polipropileno

El reciclaje de fibras de polipropileno en la construcción contribuye a la sostenibilidad al reducir residuos plásticos y disminuir la dependencia de materiales vírgenes (Tran et al., 2022). En Japón, se ha implementado con éxito el reciclaje de estas fibras en la industria automotriz y la fabricación de componentes para la construcción (Wan y Takahashi, 2021).

Aunque el costo inicial del concreto con fibras de polipropileno puede ser mayor, su durabilidad y menores requerimientos de mantenimiento hacen que sea económicamente viable en proyectos de gran escala (Wu et al., 2023). Además, la reducción de emisiones de CO₂ derivada de su uso refuerza su relevancia ambiental.

3. Materiales y métodos

3.1. Características de los materiales

Los materiales empleados en esta investigación se seleccionaron en función de su disponibilidad local y su cumplimiento con estándares internacionales de calidad. A continuación, se describen brevemente sus principales características:

- Agregado fino: Arena natural con un tamaño de partícula entre 0 y 0.0048 m obtenida de un banco de material de origen volcánico. El material cumple con los requisitos de calidad establecidos en la norma ASTM C33/C33M-23 (ASTM, 2023).
- Agregado grueso: Grava triturada con un tamaño nominal de 0.010 a 0.020 m, proveniente de una fuente de roca volcánica. El agregado fue procesado bajo controles estrictos para garantizar su calidad conforme a la norma ASTM C33/C33M-23 (ASTM, 2023).
- Cemento: El cemento utilizado fue un Cemento Portland Compuesto (CPC 30 R), conforme a la norma NMX-C-414-ONNCCE-2021 (ONNCCE, 2021).
- Fibras de polipropileno recicladas: Las fibras de polipropileno utilizadas provienen de residuos industriales generados durante la fabricación de componentes interiores de automóviles. Previo a su incorporación al concreto, las fibras fueron caracterizadas físicamente para determinar sus propiedades relevantes. Las fibras fueron seleccionadas manualmente, limpiadas y secadas a temperatura ambiente. Posteriormente se determinaron los siguientes parámetros promedio: Diámetro: 0.000040 ± 0.000005 m, módulo de elasticidad: 2.8 GPa, y densidad: 0.91 g/cm³.

Tratamiento previo: No se aplicaron procesos químicos. Solo se eliminaron residuos visibles mediante cepillado y se almacenaron en condiciones secas y tamizadas (0.3 mm) para eliminar finos. Las características geométricas se evaluaron conforme a las especificaciones de la norma ASTM D7508/D7508M-10(2020).

- Agua: Agua potable libre de impurezas, utilizada como componente de la mezcla, conforme a los lineamientos de la norma ASTM C192/C192M-24 (ASTM, 2024).

3.2. Diseño

3.2.1. Concreto convencional

El diseño de la mezcla se realizó para obtener un concreto con una resistencia a compresión de diseño (f'_c) de 25 MPa, utilizando el método de volumen absoluto en unidades del SI, conforme a las especificaciones de la norma ASTM C192/C192M-24 (ASTM, 2024) "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory", la cual establece los procedimientos para la elaboración de mezclas en condiciones controladas y sin aire incluido (Non-Air-Entrained Concrete). El diseño fue generado mediante el software "Concrete Mix Design", en el cual se introdujeron los parámetros de diseño como tipo de cemento, tamaño máximo del agregado, revenimiento deseado (entre 0.075 m y 0.100 m), exposición ambiental, y propiedades de los materiales. Este procedimiento arrojó una dosificación por metro cúbico de mezcla con los siguientes valores: agua = 205.00 kg/m³, cemento = 336.07 kg/m³, agregado grueso (grava 3/8") = 1024.00 kg/m³ y agregado fino (arena) = 776.45 kg/m³.

La relación agua-cemento (a/c) es de 0.61, valor adecuado para concreto de uso estructural sin aditivos, aunque con tendencia a una trabajabilidad media. El contenido de aire estimado por el software fue de 2.0%. En esta investigación no se utilizaron aditivos químicos, lo que permitió evaluar de forma aislada el efecto de las fibras de polipropileno reciclado en las propiedades mecánicas del concreto. Cabe señalar que, si bien el uso de fibras puede reducir la trabajabilidad del concreto, se mantuvo el mismo diseño de mezcla base para todos los sistemas evaluados (convencional y modificados), a fin de comparar el efecto directo del refuerzo fibroso.

Con el fin de caracterizar adecuadamente los materiales utilizados en la mezcla de concreto, se realizaron ensayos de granulometría para los agregados fino y grueso conforme a la norma NMX-C-077-ONNCCE-2019 (ONNCCE, 2019), obteniendo curvas bien gradadas dentro de los límites especificados por la ASTM C33/C33M-23 (ASTM, 2023). El agregado fino (arena) presentó un módulo de finura de 2.71, lo cual indica una granulometría media, adecuada para mezclas de consistencia plástica. La absorción del agregado fino, determinada según ASTM C128/C128M-22 (ASTM, 2022), fue de 2.6 %, mientras que su humedad superficial fue de 1.2 %, por lo que se realizó ajuste en el contenido de agua de mezcla.

El diseño de mezcla presentado en la Tabla 1 también se utilizó como base para la fabricación de los especímenes de concreto modificados con fibras de polipropileno. Este

enfoque garantiza la comparabilidad de los resultados obtenidos entre el concreto convencional y el concreto reforzado con fibras, permitiendo evaluar el impacto de las fibras en las propiedades mecánicas y de durabilidad.

La fabricación de cilindros de concreto es un procedimiento clave en la evaluación de la resistencia y el desempeño del material. Cada etapa, desde la dosificación precisa de los materiales hasta el proceso de curado, desempeña un papel fundamental en el desarrollo de la resistencia final del concreto, lo que a su vez impacta directamente en la seguridad, la durabilidad y la calidad de las estructuras construidas. La metodología para la fabricación de los especímenes siguió las especificaciones de la NMX-C-159-ONNCCE-2016 (ONNCCE, 2016), que regula las prácticas estándar para la producción de concreto hidráulico.

Para facilitar el control y la trabajabilidad de las muestras, estas se identificaron y etiquetaron de manera sistemática según su composición y contenido de fibras de polipropileno. Las muestras se nombraron de la siguiente manera (tabla 2):

Tabla 2: Nomenclatura de los cilindros

Tipo	Fibra (%)	Molde	Código
CONV	0	A	CONV-18/9/2024-0-A
CONV	0	B	CONV-18/9/2024-0-B
FPOL	0.1	A	FPOL-7/10/2024-0.1-A
FPOL	0.1	B	FPOL-7/10/2024-0.1-B
FPOL	0.2	A	FPOL-8/10/2024-0.2-A
FPOL	0.2	B	FPOL-8/10/2024-0.2-B
FPOL	0.3	A	FPOL-8/10/2024-0.3-A
FPOL	0.3	B	FPOL-8/10/2024-0.3-B

*CONV (Concreto convencional), FPOL (Concreto modificado con fibras de polipropileno).

Para los ensayos, se fabricaron especímenes cilíndricos en dos tamaños diferentes, con las medidas y volúmenes indicados en la Tabla 3. Estos tamaños corresponden a estándares comunes en la industria, y su elección asegura que los resultados de los ensayos sean representativos y comparables. Los moldes seleccionados corresponden a dimensiones estándar que permiten realizar pruebas mecánicas confiables, como resistencia a la compresión y tracción indirecta.

Tabla 3: Medida de moldes

Moldes	
Molde A	Molde B
Diámetro: 0.10 m	Diámetro: 0.15 m
Altura: 0.20 m	Altura: 0.30 m
Área= 0.007854 m ²	Área= 0.017670 m ²
Volumen= 0.0015708 m ³	Volumen= 0.00530144 m ³

El diseño presentado anteriormente es el mismo que se usó para fabricar los especímenes con fibras de polipropileno.

3.2.2. Procedimiento para elaboración de la mezcla

Para la elaboración de la mezcla se siguió el procedimiento que establece la Norma Mexicana

NMX-C-159-ONNCCE-2016 (ONNCCE, 2016), que se describe a continuación.

1. Inicialmente, se procedió a medir los materiales, tanto la arena como la grava, en conformidad con el diseño de la mezcla establecido.
2. Seguidamente, se procedió a preparar la cantidad necesaria de agua según lo indicado en el diseño de la mezcla.
3. Los agregados, tanto la arena como la grava, fueron esparcidos sobre una superficie de acero de manera uniforme.
4. Posteriormente, los agregados y el cemento se integraron mediante un proceso manual tipo “volcán”, en el cual los materiales fueron colocados en forma de pila cónica y mezclados desde el exterior hacia el centro, asegurando una incorporación gradual y homogénea de los componentes.
5. De manera gradual, se incorporó el agua a la mezcla seca, mezclando con palas desde el exterior hacia el interior, en la región donde se añadió el agua, hasta alcanzar una consistencia homogénea.
6. Finalmente, el contenido de la mezcla se vertió siguiendo el procedimiento especificado para la elaboración y curado de especímenes en el laboratorio.

Para la elaboración de las mezclas, se utilizó un método manual, debido a limitaciones de equipamiento. A fin de asegurar uniformidad y reproducibilidad, se siguió una secuencia estricta de mezclado: primero se incorporaron los agregados grueso y fino, seguidos del cemento, y posteriormente se añadió el agua de manera progresiva. Finalmente, se incorporaron las fibras de polipropileno distribuyéndolas gradualmente mientras se mezclaba continuamente durante 4 minutos adicionales. Se emplearon estrategias de homogeneización como el volteo manual repetido y la rotación del mezclado para evitar aglomeraciones de fibras. Este protocolo permitió asegurar una adecuada dispersión del refuerzo fibroso, reduciendo la variabilidad entre tandas.

3.2.2.1. Curado de los cilindros de concreto

El curado adecuado de los especímenes es fundamental para maximizar su resistencia y durabilidad. Se siguió un protocolo riguroso basado en normas internacionales, principalmente la ASTM C192/C192M-24 (ASTM, 2024), así como la ASTM C31/C31M-23 (ASTM, 2023), que establecen los procedimientos para la elaboración y desmoldeo de especímenes de concreto en condiciones controladas.

- Los cilindros de concreto fueron desmoldados tras 24 horas de fraguado inicial, siguiendo las especificaciones normativas.

- Inmediatamente después del desmolde, las muestras fueron sumergidas en agua a $23 \pm 2^\circ\text{C}$, asegurando condiciones óptimas para el desarrollo de la resistencia mecánica.
- El período de curado se extendió a 28 días, cumpliendo con los requisitos normativos para obtener resultados representativos de la resistencia final del material.

Para los ensayos de resistencia a compresión, se utilizaron especímenes cilíndricos de 0.10×0.20 m. Para los ensayos de resistencia a la tracción indirecta, se emplearon cilindros de 0.15×0.30 m.

3.2.3. Concreto con fibras de polipropileno

3.2.3.1. Elaboración de especímenes

Según lo reportado por Malek et al. (2021) y Raphael (2018), el comportamiento del concreto reforzado con fibras de polipropileno depende en gran medida del tratamiento superficial previo, así como de las características físicas de las fibras, como su tamaño y volumen, lo que impacta directamente en la mejora de sus propiedades mecánicas. Se observó que variaciones en estas características generan efectos distintos en las propiedades mecánicas del material.

Por su parte, Yao y Zhong (2007) coincide en que las fibras de polipropileno no deben exceder los 20 mm de longitud para lograr una incorporación óptima en la matriz del concreto. Con base en estos hallazgos, en el presente estudio se adaptaron las fibras utilizadas, limitando su tamaño a 20 mm, asegurando así su adecuada distribución en la mezcla y maximizando su efectividad en el refuerzo del material.

La cantidad de propileno agregada a cada espécimen se definió mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Fibra} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{\text{Cantidad de fibra (g)}}{50 \text{ kg}} \times \text{Cantidad de cemento} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \quad (1)$$

La elaboración de los especímenes se realizó de la misma manera que los convencionales, considerando el mismo diseño de mezcla. La diferencia es que al realizar la mezcla se le adiciono fibra de polipropileno. Para las tres mezclas con refuerzo de fibras, se incorporaron 50 g, 100 g y 150 g por cada 50 kg de cemento, equivalentes a 0.10 %, 0.20 % y 0.30 % en masa respecto al cemento. Considerando un contenido cementante de 336.07 kg/m^3 , las dosis correspondientes fueron 0.336 kg/m^3 , 0.672 kg/m^3 y 1.008 kg/m^3 , respectivamente.

Esta dosificación se alinea con estudios previos sobre concretos con fibras de polipropileno que exploran dosificaciones típicas entre 0.1 % y 0.35 % para evaluar efectos mecánicos y reológicos (Hosseinzadeh et al., 2023; Malek et al., 2021). Se elaboraron cilindros de concreto de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura, conforme a la norma ASTM C39/C39M-21 (ASTM, 2021). Todas las unidades se expresan en MPa para resistencia a compresión y tracción, y en gramos (g) para la masa de fibra.

La cantidad de fibra incorporada por lote se calculó con base en el porcentaje en peso respecto a la masa de cemento, siguiendo el criterio de dosificación propuesto por

investigaciones previas. La masa de fibra se determinó utilizando la siguiente expresión:

$$\text{Masa de fibra}(g) = \left(\frac{\% \text{ de fibra}}{100} \right) \times \text{masa de cemento} (g) \quad (2)$$

La fabricación de los especímenes siguió el mismo procedimiento empleado para el concreto convencional, manteniendo el diseño de mezcla establecido. La única diferencia radicó en la adición de fibras de polipropileno durante el proceso de mezclado, asegurando su distribución homogénea en la matriz del concreto (figura 1).



Figura 1: Mezcla de concreto con fibra de polipropileno

3.3. Pruebas mecánicas

Las pruebas mencionadas a continuación se realizaron a los 28 días para poder evaluar su máxima resistencia.

Previo a cada ensayo, se verificó la alineación axial de los especímenes conforme a los criterios establecidos en la norma ASTM C39/C39M-21 (ASTM, 2021), utilizando placas de asiento esférico para asegurar una distribución uniforme de carga.

La velocidad de aplicación de carga fue controlada electrónicamente por el sistema de la prensa hidráulica, y se mantuvo constante a un promedio de 0.25 MPa/s para los ensayos de compresión, valor dentro del rango especificado por la norma ASTM correspondiente.

Para los ensayos de tracción indirecta, se utilizó una velocidad de carga de 0.05 MPa/s, también validada por el sistema automático del equipo de prueba. Los registros fueron verificados por el operador antes de cada corrida para asegurar condiciones uniformes en todos los especímenes.

Para cada sistema (0 %, 0.1 %, 0.2 % y 0.3 % de fibras), se elaboraron cuatro especímenes para ensayos de compresión y cuatro para tracción indirecta, lo que permitió obtener valores promedio representativos por condición.

3.3.1. Resistencia a la compresión

El ensayo de compresión de los cilindros de concreto se realizó siguiendo (figura 2) las especificaciones establecidas en la norma ASTM C39/C39M-21 (ASTM, 2021), garantizando la confiabilidad y reproducibilidad de los resultados. El procedimiento consistió en los siguientes pasos:

- Cada cilindro fue colocado correctamente en la máquina de ensayos, asegurando una alineación adecuada para la aplicación de la carga axial.

- Se aplicó una carga axial de forma gradual y continua, respetando la velocidad de carga prescrita en la normativa.
- El proceso continuó hasta que el espécimen alcanzó su punto de falla.
- Se registró la carga máxima aplicada antes de la falla del cilindro.
- Los valores obtenidos fueron comparados entre los diferentes sistemas en estudio para evaluar el impacto de la incorporación de fibras de polipropileno en el concreto.



Figura 2: Ensayo a compresión.

3.3.2. Resistencia a la tracción

Para esta prueba se utilizaron especímenes cilíndricos de 0.15 m de diámetro y 0.30 m de altura (Molde B), moldeados y curados durante 28 días. El ensayo de tracción indirecta fue ejecutado siguiendo la norma ASTM C496/C496M-17 (ASTM, 2017), con el objetivo de evaluar la resistencia a la tracción diametral del concreto con y sin incorporación de fibras recicladas de polipropileno.

Los cilindros fueron posicionados horizontalmente en la prensa hidráulica, con la carga aplicada a través de dos almohadillas de neopreno de dureza media (tipo Shore A de 50 ± 10) para asegurar una distribución uniforme de la presión y evitar concentraciones de esfuerzos.

La carga fue aplicada a una velocidad controlada de 0.05 MPa/s, utilizando un sistema de adquisición automática, hasta la falla del espécimen. El procedimiento se desarrolló de la siguiente manera:

- Cada cilindro de concreto fue colocado en la celda brasileña (ver Figura 3), asegurando su correcta alineación.
- Se aplicó una carga axial de manera gradual y continua, conforme a la velocidad prescrita por la normativa.
- El ensayo continuó hasta la aparición de la falla por tensión diagonal.
- Se registró la carga máxima aplicada justo antes de la falla.
- Los valores obtenidos se analizaron para evaluar el impacto de la incorporación de fibras de polipropileno en el desempeño mecánico del concreto.

Se ensayaron tres cilindros por cada tipo de mezcla (0%, 0.1%, 0.2%, 0.3% de fibra), y los resultados fueron promediados para el análisis comparativo. Esta información

permite la reproducibilidad del ensayo en otros laboratorios y brinda solidez metodológica al presente estudio.

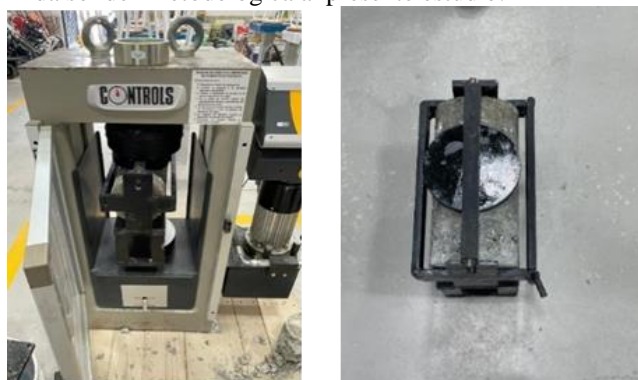


Figura 3: Prueba de tracción con celda brasileña

Para cada sistema en estudio, se ensayaron cuatro especímenes cilíndricos en compresión y cuatro en tracción indirecta, asegurando la representatividad y confiabilidad de los resultados.

El ensayo de compresión se llevó a cabo de acuerdo con la norma ASTM C39/C39M-21 (ASTM, 2021), utilizando una máquina de ensayos de carga controlada. Se aplicó una carga axial gradual y continua hasta la falla del espécimen, registrando la resistencia máxima alcanzada.

La resistencia a la tracción indirecta se determinó mediante el método de la celda brasileña, conforme a la norma ASTM C496/C496M-17 (ASTM, 2017). Se aplicó una carga axial gradual hasta la aparición de la falla por tensión diagonal, registrando la carga máxima aplicada en cada espécimen.

Cada prueba fue realizada en tres especímenes por cada sistema en estudio (concreto convencional, concreto con 0.1%, 0.2% y 0.3% de fibras de polipropileno), permitiendo obtener datos representativos del comportamiento mecánico del material.

4. Resultados y discusión

4.1. Resistencia a la compresión

Los ensayos de compresión permitieron evaluar el comportamiento mecánico del concreto convencional y del concreto reforzado con fibras de polipropileno. Para cada sistema en estudio, se ensayaron cuatro especímenes cilíndricos, garantizando la confiabilidad de los resultados obtenidos, siguiendo la normativa ASTM C39/C39M-21 (ASTM, 2021).

El concreto convencional (CONV, 0% de fibras de polipropileno) presentó una resistencia promedio a la compresión de 26.55 MPa. En contraste, los sistemas modificados con fibras de polipropileno mostraron un incremento en la resistencia a la compresión, con valores promedio presentados en la figura 4:

- Para el sistema con 0.1 % de fibras de polipropileno (FPOL 0.1 %), se obtuvo una resistencia promedio de 31.26 MPa.
- Para el sistema con 0.2 % de fibras de polipropileno (FPOL 0.2 %), la resistencia fue de 33.33 MPa.
- Finalmente, el sistema con 0.3 % de fibras (FPOL 0.3 %) alcanzó una resistencia promedio de 34.88 MPa.

Estos resultados son consistentes con estudios previos, como el de Yao y Zhong (2007), quienes reportaron un incremento del 23% en la resistencia a la tracción con la incorporación de fibras de polipropileno, así como el de Kumar y Rai (2023), quienes encontraron que contenidos moderados de fibra mejoran la resistencia a la compresión hasta en un 15%.

El incremento observado en la resistencia del concreto con fibras de polipropileno puede explicarse por la capacidad de estas fibras para distribuir tensiones y reducir la propagación de microfisuras (Ahmad et. al, 2022). Estudios como los de Hosseinzadeh et al. (2023) y Malek et al. (2021) han demostrado que la presencia de fibras en la matriz del concreto ayuda a reducir la formación de fisuras por retracción y mejora la cohesión interna del material.

A diferencia de estudios donde la sustitución de materiales en la matriz de cemento resultó en una disminución de la resistencia a la compresión (Ukpata et al., 2023), en este caso la adición de fibras de polipropileno actuó como un refuerzo interno, mejorando la integridad estructural del concreto. La evidencia sugiere que el uso de fibras de polipropileno representa una alternativa técnica viable para reforzar el concreto en aplicaciones estructurales, particularmente en condiciones donde se requiere una resistencia a la compresión elevada (Kumar et al., 2023; Raphael, 2018).

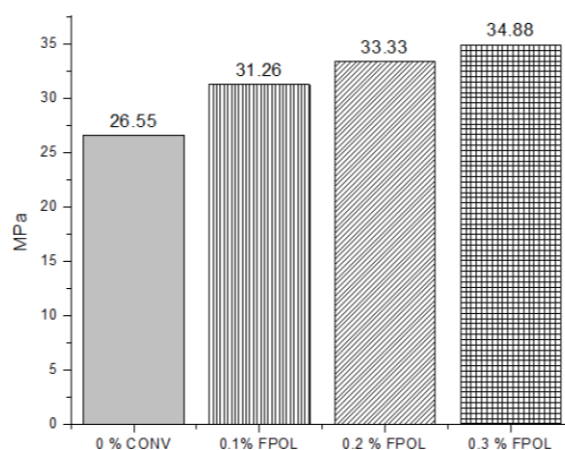


Figura 4: Promedio de resistencias a la compresión de los distintos sistemas de concreto con fibras de polipropileno.

4.2. Resistencia a la tracción indirecta

Los ensayos de resistencia a la tracción indirecta se realizaron siguiendo la metodología establecida en la norma ASTM C496/C496M-17 (ASTM, 2017), utilizando una prensa de compresión de cilindros marca Controls, modelo 50-C43C04. El ensayo se llevó a cabo a los 28 días de curado, garantizando que el concreto alcanzara su resistencia máxima según los estándares establecidos.

Para cada sistema en estudio, se ensayaron cuatro especímenes cilíndricos, asegurando la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Cada espécimen fue colocado en la celda brasileña, asegurando su correcta alineación, y se aplicó una carga axial de manera gradual y continua hasta la falla del cilindro. Se registró la carga máxima aplicada en el momento de la falla,

así como la resistencia máxima a la tracción indirecta obtenida para cada espécimen ver figura 5.

Los resultados promedio de resistencia a la tracción indirecta fueron los siguientes:

- 2.77 MPa para el concreto convencional (0% de fibras de polipropileno).
- 2.16 MPa para el concreto con 0.1% de fibras de polipropileno (FPOL 0.1%).
- 2.88 MPa para el concreto con 0.2% de fibras de polipropileno (FPOL 0.2%).
- 3.29 MPa para el concreto con 0.3% de fibras de polipropileno (FPOL 0.3%).

Estos resultados evidencian que la incorporación de fibras de polipropileno recicladas tiene un efecto positivo en la resistencia a la tracción indirecta del concreto. A diferencia de estudios previos, como el de Ahmad et al. (2022), en los que la sustitución de componentes en la matriz cementicia condujo a una reducción en dicha propiedad, en el presente trabajo se observó un incremento progresivo conforme aumentó el contenido de fibras en la mezcla. Esta tendencia sugiere que las fibras no solo contribuyen al control de fisuración, sino que también refuerzan la matriz de manera efectiva frente a esfuerzos de tracción indirecta, mejorando la cohesión interna y la distribución de tensiones dentro del material.

En el estudio de Yao y Zhong (2007), se observó una mejora en la resistencia a tracción con una adición de 1 % de fibras de polipropileno en volumen. Aunque en el presente trabajo se logró una mejora con una dosificación menor (0.3 % en masa respecto al cemento, equivalente a 1.008 kg/m³), esta diferencia puede atribuirse a la naturaleza del concreto utilizado ($f'c=25$ MPa) y al tipo de fibra reciclada empleada, la cual presentó buena dispersión y adherencia a la matriz. Es importante señalar que los incrementos observados aquí son relativos al control y no necesariamente comparables en magnitud absoluta con estudios previos. Sin embargo, el ligero decremento en la resistencia a la tracción para el sistema con 0.1% de fibras (2.77 MPa) puede deberse a una dispersión irregular de las fibras dentro de la mezcla, lo cual ha sido reportado en estudios previos como un factor que puede afectar la eficiencia del refuerzo (Xu et al., 2018).

Estos hallazgos indican que la incorporación de fibras de polipropileno recicladas en proporciones del 0.2 % al 0.3 % puede mejorar de forma apreciable la resistencia a la tracción indirecta del concreto. Este comportamiento resulta especialmente ventajoso en elementos sometidos a esfuerzos de tracción y flexión, como losas, pavimentos y elementos prefabricados delgados, donde la resistencia a fisuración temprana es crítica. Sin embargo, para maximizar la efectividad del refuerzo fibroso, futuros estudios deberán enfocarse en optimizar la dispersión de las fibras en la mezcla y evaluar su efecto sobre la trabajabilidad, utilizando ensayos normalizados de revenimiento y aire atrapado. Este enfoque permitirá una integración más eficiente del material en aplicaciones estructurales y no estructurales, con criterios de desempeño más robustos.

En el contexto de esta investigación, el término desempeño mecánico se refiere específicamente al comportamiento del concreto en términos de su resistencia a la compresión y a la tracción indirecta (ensayo brasileño), evaluadas a través de

pruebas normalizadas. Estas propiedades reflejan la capacidad del material para soportar esfuerzos antes de alcanzar la falla. Aunque el concepto de desempeño puede abarcar variables más complejas como la deformación, ductilidad o absorción de energía ante cargas cíclicas o dinámicas, en este estudio se enfoca en los parámetros estáticos derivados de los ensayos mencionados, por ser consistentes con el objetivo experimental planteado.

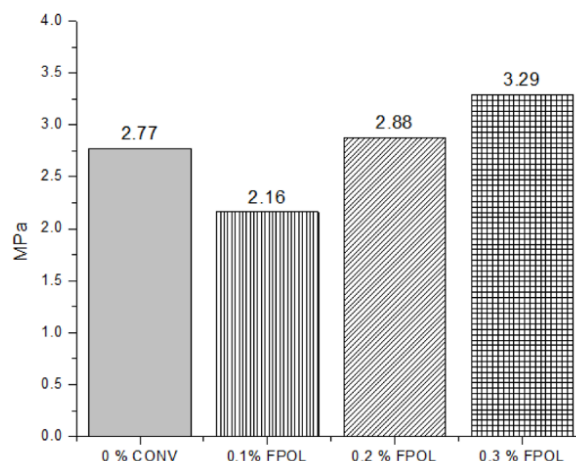


Figura 5: Promedio de resistencias a tracción indirecta de los distintos sistemas de concreto con fibras de polipropileno.

4.3. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

La evaluación microestructural de los sistemas de estudio, compuestos por concreto convencional y concreto modificado con fibras de polipropileno (en proporciones de 0.1%, 0.2% y 0.3% de fibra de polipropileno), se llevó a cabo mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).

Este análisis tuvo como objetivo principal identificar las características de la interfaz fibra-matriz, la propagación de fisuras y la homogeneidad de la distribución de las fibras en los especímenes sometidos a ensayos mecánicos de compresión. Las micrografías fueron obtenidas mediante un microscopio electrónico de barrido (SEM) marca JEOL, modelo JSM-6510LV, operando en modo alto vacío con un voltaje de aceleración de 15 kV.

4.3.1. Preparación de las muestras

1. Corte y acondicionamiento:

- Las muestras ensayadas a compresión fueron seleccionadas de manera representativa.
- Fueron cortadas en secciones planas en forma mecánica mediante impacto de forma controlada a baja energía, asegurando superficies paralelas y libres de partículas sueltas que pudieran interferir en el análisis.

2. Recubrimiento:

- Para garantizar conductividad eléctrica y evitar la acumulación de carga durante el análisis, las superficies expuestas de las muestras se recubrieron

con una fina capa de oro mediante pulverización catódica (sputtering).

3. Equipo y configuración:

- Se utilizó un microscopio electrónico, configurado con un voltaje de aceleración de 20 kV y se utilizó con una magnificación de 500x.
- Se realizaron observaciones en baja magnificación para analizar áreas específicas.

Los resultados obtenidos por el análisis MEB, este nos permitió identificar diferencias significativas entre el concreto convencional y los sistemas modificados con fibras de polipropileno (0.1%, 0.2% y 0.3%), especialmente en términos de adhesión fibra-matriz y distribución de fibras.

Concreto convencional:

- Se observaron fisuras radiales de tamaño considerable, especialmente en las zonas más afectadas por los esfuerzos de compresión.
- La matriz mostró una textura homogénea, aunque con una distribución irregular de los poros (figura 6 a).

Concreto con fibras de polipropileno:

1. Con 0.1% de fibras:

- Las fibras mostraron una integración moderada con la matriz, aunque se detectaron huecos en algunas interfaces fibra-matriz debido a compactación insuficiente (figura 6.b).
- Las fisuras fueron más pequeñas y distribuidas de forma controlada en comparación con el concreto convencional.

2. Con 0.2% de fibras:

- Mejor integración entre las fibras y la matriz, con menor cantidad de huecos en la interfaz (figura 6 c).
- Las fisuras mostraron un cambio en su propagación, ya que se detenían al encontrarse con las fibras.

3. Con 0.3% de fibras:

- La interfaz fibra-matriz fue uniforme y presentó una adhesión destacada.
- Las fibras actuaron como barreras efectivas contra la propagación de fisuras, distribuyendo de manera uniforme las tensiones en la matriz.
- Se observó una mayor densidad de la matriz, con una notable reducción de la porosidad (figura 6 d).

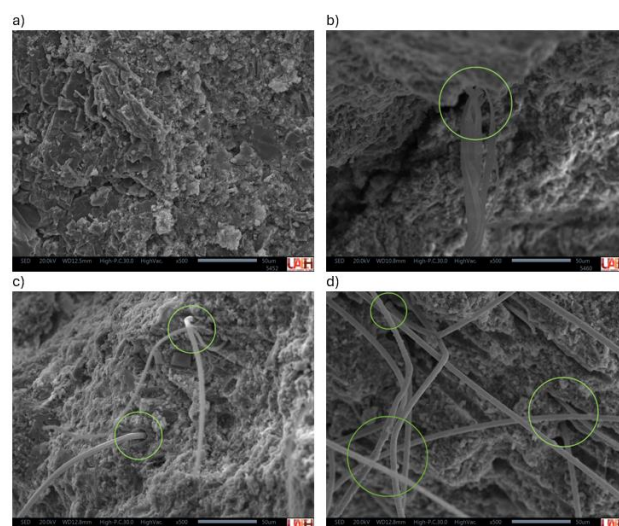


Figura 6. Comparación de micrografías: a) concreto convencional, b) concreto con 0.1 % de fibras, c) concreto con 0.2 % de fibras, d) concreto con 0.3 % de fibras.

Los resultados obtenidos mediante MEB confirman que la adición de fibras de polipropileno mejora significativamente las propiedades microestructurales del concreto en términos de cohesión interna, distribución de tensiones y resistencia a la propagación de fisuras.

En sistemas con 0.1% de fibras, la presencia de huecos en la interfaz evidenció la necesidad de un proceso de compactación más riguroso. En los sistemas con 0.2% y 0.3%, la adhesión fue más uniforme, mejorando la transferencia de esfuerzos entre las fibras y la matriz.

Las fibras actuaron como un refuerzo interno eficaz, distribuyendo las tensiones y limitando el crecimiento de fisuras. En el concreto con mayor contenido de fibras (0.3%), la matriz presentó una densidad notablemente superior, con una reducción de la porosidad y una distribución más homogénea del refuerzo.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

El presente estudio evaluó el impacto del uso de fibras de polipropileno recicladas de la industria automotriz en las propiedades mecánicas del concreto, particularmente en su resistencia a la compresión y a la tracción indirecta. Con base en los resultados obtenidos, se pueden destacar las siguientes conclusiones:

- La incorporación de fibras de polipropileno en porcentajes de 0.1%, 0.2% y 0.3% mostró un incremento en los valores de resistencia a la compresión, alcanzando hasta 34.89 MPa, en comparación con los 26.55 MPa del concreto convencional. Este comportamiento sugiere que la adición de fibras favorece la cohesión interna del material y la distribución de tensiones, lo cual puede contribuir a mejorar su desempeño estructural.
- Aumento en la resistencia a la tracción indirecta: Los ensayos de tracción indirecta mediante la celda

brasileña indicaron que los especímenes con fibras de polipropileno presentaron un incremento progresivo en la resistencia a medida que aumentaba la cantidad de fibra, alcanzando 1.146 MPa en comparación con los 0.736 MPa del concreto sin fibras.

- La incorporación de fibras de polipropileno recicladas mostró una tendencia favorable en el control de fisuración, lo cual puede atribuirse a la capacidad de las fibras para puentear microgrietas. Aunque no se realizaron ensayos específicos para cuantificar la ductilidad (como curvas esfuerzo-deformación), los incrementos observados en la resistencia a tracción indirecta y la evidencia microestructural sugieren un posible efecto positivo en la redistribución de esfuerzos.
- Sostenibilidad y aprovechamiento de residuos industriales: El uso de fibras recicladas de la industria automotriz representa una solución viable y sostenible para la industria de la construcción. La reutilización de estos materiales contribuye a la reducción de residuos plásticos, alineándose con estrategias de economía circular y mitigación del impacto ambiental.
- Óptima dosificación de fibras: Aunque todas las mezclas con fibras mostraron mejoras en comparación con el concreto convencional, la dosificación de 0.3% de fibras de polipropileno presentó los mejores resultados en términos de resistencia mecánica. Sin embargo, la dispersión de las fibras en la mezcla sigue siendo un aspecto crítico por optimizar, para evitar heterogeneidades en la distribución.

5.2. Recomendaciones

- Validación en aplicaciones estructurales reales: Es necesario realizar estudios adicionales para evaluar el desempeño del concreto reforzado con fibras en elementos estructurales a escala real, considerando condiciones de carga y exposición ambiental.
- Análisis de durabilidad a largo plazo: Se recomienda llevar a cabo estudios que evalúen la resistencia del material ante agentes externos, como ciclos de congelación y descongelación, humedad y ataques químicos, para determinar su comportamiento en diferentes ambientes.
- Evaluación económica y ambiental: Se sugiere realizar un análisis de costo-beneficio del uso de fibras recicladas en comparación con otras estrategias de refuerzo, así como un análisis del impacto ambiental mediante metodologías como la evaluación del ciclo de vida (LCA).
- Se recomienda realizar convenios de colaboración con universidades, centros de investigación o empresas que cuenten con equipo especializado para ensayos bajo control de desplazamiento, lo cual permitirá obtener curvas completas de esfuerzo-deformación unitaria en tensión. A partir de estos ensayos se podrá calcular la resistencia residual y la capacidad de absorción de energía del concreto reforzado con fibras, lo cual es esencial para

establecer criterios técnicos sobre su uso estructural o no estructural, de acuerdo con lo indicado en la NMX-C-535-ONNCCE-2017 y el inciso 2.3.4.3.3.2 de las NTC-Estructuras de Concreto-2023.

- Para estudios posteriores se sugiere incluir la caracterización del concreto en estado fresco mediante pruebas de revenimiento (ASTM C143), contenido de aire (ASTM C231/C173) y densidad (ASTM C138), a fin de evaluar de forma integral los efectos de las fibras en la trabajabilidad, porosidad y desempeño mecánico del material.

5.3. Limitaciones

Este trabajo representa una fase exploratoria sobre el uso de fibras recicladas de polipropileno en concreto. Las principales limitaciones son:

- Escala experimental: Los ensayos se realizaron en laboratorio y en especímenes cilíndricos, por lo que no se incluyen aplicaciones a escala real ni condiciones de servicio.
- Número de especímenes: Se emplearon cuatro cilindros por condición, suficientes para verificar reproducibilidad, pero limitados para análisis estadísticos más robustos.
- Alcance mecánico restringido: El estudio se centró en propiedades básicas (compresión y tracción indirecta), sin evaluar ductilidad, energía de deformación o comportamiento a largo plazo.
- Caracterización microestructural limitada: Las micrografías se emplearon con fines cualitativos. No se realizó cuantificación de porosidad ni longitud de fisura.
- Sin análisis de durabilidad: No se evaluó el desempeño ante ciclos térmicos, humedad o agentes agresivos.

Estas limitaciones abren la puerta para investigaciones futuras con mayor profundidad y alcance estructural.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) por las facilidades brindadas para el uso de sus laboratorios y equipos durante el desarrollo experimental de esta investigación.

Referencias

- Ahmad, J., Burduhos-Nergis, D. D., Arbili, M. M., Alogla, S. M., Majdi, A., & Deifalla, A. F., 2022. A review on failure modes and cracking behaviors of polypropylene fibers reinforced concrete. *Buildings*, 12(11), 1951. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings12111951>
- Araiza-Aguilar, J. A., Gutiérrez-Palacios, C., Rojas-Valencia, M. N., Nájera-Aguilar, H. A., Gutiérrez-Hernández, R. F., & Aguilar-Vera, R. A., 2019. Selection of sites for the treatment and the final disposal of construction and demolition waste, using two approaches: an analysis for Mexico City. *Sustainability*, 11(15), 4077. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11154077>
- ASTM International, 2017. ASTM C496/C496M, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- ASTM International, 2020. ASTM D7508/D7508M-20, Standard Specification for Polyolefin Chopped Strands for Use in Concrete.

- ASTM International, 2021. ASTM C39/C39M-21, Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens.
- ASTM International, 2023. ASTM C128-22, Método de prueba estándar para la densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino.
- ASTM International, 2023. ASTM C31/C31M-23, Práctica Estándar para la Preparación y Curado de Especímenes de Ensayo de Concreto.
- ASTM International, 2023. ASTM C33/C33M-23, Especificaciones estándar para agregados de concreto.
- ASTM International, 2024. ASTM C192/C192M-24, Práctica estándar para la fabricación y el curado de probetas de hormigón en el laboratorio.
- Eidan, J., Rasoolan, I., Rezaeian, A., & Poorveis, D., 2019. Residual mechanical properties of polypropylene fiber-reinforced concrete after heating. *Construction and Building Materials*, 198, 195-206. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.209>
- Fallah, S., & Nematzadeh, M., 2017. Mechanical properties and impact resistance of high-strength concrete containing polypropylene and steel fibers. *Construction and Building Materials*, 134, 116–129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.075>
- Habert, G., Miller, S. A., John, V. M., Provis, J. L., Favier, A., Horvath, A., & Scrivener, K. L., 2020. Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(11), 559-573. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>
- Hosseinzadeh, H., Salehi, A. M., Mehraein, M., & Asadollahfardi, G., 2023. The effects of steel, polypropylene, and high-performance macro polypropylene fibers on mechanical properties and durability of high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, 386, 131589. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131589>
- Jameel, M. S., Raza, A., El Ouni, M. H., & Alashker, Y., 2023. The compressive and tensile behavior of polypropylene fibers and activated fly ash incorporated concrete at elevated temperatures. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 27(2), 794-811. DOI: <https://doi.org/10.1080/19648189.2022.2066183>
- Kumar, S., & Rai, D. C., 2023. Development of engineered cementitious composite with moderate tensile properties using polyester fibers. *Construction and Building Materials*, 404, 133158. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133158>
- Małek, M., Jackowski, M., Łasica, W., & Kadela, M., 2021. Influence of polypropylene, glass and steel fiber on the thermal properties of concrete. *Materials*, 14(8), 1888. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14081888>
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J., 2006. *Concrete microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill, New York.
- Minde, P., Kulkarni, M., Patil, J., & Shelake, A., 2024. Comprehensive review on the use of plastic waste in sustainable concrete construction. *Discover Materials*, 4(1), 58. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43939-024-00126-1>
- Neville, A. M., 1995. *Properties of concrete* (Vol. 4). Longman, London.
- NMX-C-077-ONNCCE, 2019, *Agregados para concreto – Análisis granulométrico – Método de ensayo*.
- NMX-C-159-ONNCCE, 2016. *Industria de la Construcción - Concreto - Elaboración y Curado de Especímenes en el Laboratorio*.
- NMX-C-414-ONNCCE, 2014. *Cementantes Hidráulicos*.
- Structures and Materials*, 12(1), 68. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0302-3>
- Tran, N. P., Gunasekara, C., Law, D. W., Houshyar, S., Setunge, S., & Cwirzen, A., 2022. Comprehensive review on sustainable fiber reinforced concrete incorporating recycled textile waste. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 11(1), 28-42. DOI: <https://doi.org/10.1080/21650373.2021.1875273>
- Ukpata, J. O., Ewa, D. E., Liwhuliwe, J. U., Alaneme, G. U., & Obeten, K. E., 2023. Effects of elevated temperatures on the mechanical properties of laterized concrete. *Scientific Reports*, 13(1), 18358. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45591-5>
- Von Greve-Dierfeld, S., Lothenbach, B., Vollpracht, A., Wu, B., Huet, B., Andrade, C., ... & De Belie, N., 2020. Understanding the carbonation of concrete with supplementary cementitious materials: a critical review by RILEM TC 281-CCC. *Materials and Structures*, 53(6), 136. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01558-w>
- Wan, Y., & Takahashi, J., 2021. Development of carbon fiber-reinforced thermoplastics for mass-produced automotive applications in Japan. *Journal of Composites Science*, 5(3), 86. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcs5030086>
- Wu, J., Hu, L., Hu, C., Wang, Y., Zhou, J., & Li, X., 2023. Impact of polypropylene fiber on the mechanical and physical properties of pervious concrete: an experimental investigation. *Buildings*, 13(8), 1966. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13081966>
- Xu, L., Li, B., Ding, X., Chi, Y., Li, C., Huang, B., & Shi, Y., 2018. Experimental investigation on damage behavior of polypropylene fiber reinforced concrete under compression. *International Journal of Concrete*.
- Xu, L., Shi, X., & Liu, M., 2018. Experimental investigation on damage behavior of polypropylene fiber reinforced concrete under compression. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 12(1), 15. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0302-3>
- Yao, W., & Zhong, W., 2007. Effect of polypropylene fibers on the long-term tensile strength of concrete. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 22(1), 52-55. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11595-005-1052-z>
- Yuan, Z., & Jia, Y., 2021. Mechanical properties and microstructure of glass fiber and polypropylene fiber reinforced concrete: An experimental study. *Construction and Building Materials*, 266, 121048. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121048>