

Concreto permeable con fibras de acero como soporte estructural para pavimentos de tránsito ligero

Permeable concrete with steel fibers as structural support for light traffic pavements

A. H. Mendoza-Pacheco ^a, L. D. López-León ^{a,*}

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

Resumen

El concreto permeable es una alternativa sostenible en la construcción, destacando por su capacidad de infiltración y su contribución a la gestión del agua pluvial. No obstante, su baja resistencia mecánica limita su aplicación estructural. Este estudio evalúa el efecto de fibras de acero recicladas (2 %, 3 % y 5 %) en la resistencia a la compresión y la permeabilidad. Se alcanzó una resistencia máxima de 11.47 MPa con 5 % de fibras. Sin embargo, esta mezcla presentó una permeabilidad de 868.7 L/min·m², superior al límite normativo ACI 522R. La microscopía electrónica reveló una distribución homogénea de fibras en las mezclas con 2 % y 3 %, y ligera aglomeración en la de 5 %. Se observó que la fracción más alta de fibras puede aumentar la conectividad de vacíos. Por tanto, la incorporación controlada de fibras mejora el desempeño estructural del concreto permeable, siendo viable para pavimentos de bajo tránsito, siempre que el contenido de fibras se mantenga dentro de límites que no comprometan su funcionalidad hidráulica.

Palabras Clave: Concreto permeable, fibras de acero, permeabilidad, compresión.

Abstract

Pervious concrete is a sustainable alternative in construction due to its infiltration capacity and contribution to stormwater management. However, its low mechanical strength limits structural applications. This study evaluates the effect of recycled steel fibers (2 %, 3 %, and 5 %) on compressive strength and permeability. A maximum strength of 11.47 MPa was reached with 5 % fiber content. However, this mixture exhibited a permeability of 868.7 L/min·m², exceeding the ACI 522R upper limit. Scanning electron microscopy revealed a homogeneous fiber distribution in the 2 % and 3 % mixtures and slight agglomeration in the 5 % mixture. It was observed that higher fiber content may increase void connectivity. Therefore, the controlled incorporation of steel fibers enhances the structural performance of pervious concrete, making it suitable for low-traffic pavements, provided the fiber dosage remains within limits that do not compromise hydraulic performance.

Keywords: Permeable concrete, steel fibers, permeability, compression.

1. Introducción

El concreto permeable es un material fabricado de manera similar al concreto regular, pero con una composición que incluye menos cemento y pocos o ninguno agregado fino, generando espacios vacíos entre sus partículas que permiten el paso del agua (Muda et al., 2023). Esta característica lo convierte en una opción clave para la construcción sostenible, especialmente en entornos urbanos donde la gestión de aguas pluviales y la reducción de la escorrentía superficial son desafiantes (Haselbach, 2009).

El concreto permeable destaca por su estructura altamente porosa, permitiendo que el agua de lluvia se infiltre

directamente a través de su superficie. Esto contribuye a la recarga de acuíferos y reduce el riesgo de inundaciones en zonas urbanas (Haselbach, 2009). Sin embargo, su resistencia mecánica inferior en comparación con el concreto convencional ha limitado su uso en aplicaciones estructurales más exigentes, como bases de carreteras o estructuras de carga (Aguilar, 2021).

Desde su introducción, el desarrollo del concreto permeable ha estado enfocado en maximizar su permeabilidad manteniendo una resistencia aceptable para aplicaciones de bajo tráfico, como pavimentos ligeros y aceras (ACI Committee 522, 2010). La búsqueda de un equilibrio entre estas propiedades ha impulsado la investigación sobre aditivos

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

Correo electrónico: me44053@uaeh.edu.mx (Arnaldo Hituriel Mendoza-Pacheco), luis_lopez@uaeh.edu.mx (Luis Daimir López-León)

Historial del manuscrito: recibido el 04/08/2025, última versión-revisada recibida el 14/10/2025, aceptado el 26/10/2025, publicado el 05/12/2025.
DOI: <https://doi.org/10.29057/icbi.v13iEspecial3.15600>



y refuerzos que mejoren su rendimiento sin comprometer su funcionalidad hidráulica.

El uso de fibras metálicas, en particular fibras de acero, es una extensión natural de su aplicación en concreto convencional. Estudios han demostrado que estas fibras mejoran propiedades como la resistencia a la tracción, flexión y compresión, además de aumentar la durabilidad y resistencia a la fisuración (Madandoust et al., 2019; Mindess et al., 2003). En el caso del concreto permeable, las fibras también influyen en la conectividad de los poros y la distribución de vacíos, lo que impacta tanto la resistencia como la capacidad de infiltración del material (Yang & Jiang, 2019).

La reutilización de fibras de acero como subproductos del proceso de fresado representa una estrategia sostenible que alinea la construcción con los principios de economía circular. Este enfoque reduce la disposición de residuos industriales y disminuye la demanda de materias primas vírgenes (Akbulut et al., 2025). Estudios recientes destacan que la adición de fibras puede mejorar significativamente el rendimiento mecánico sin sacrificar la permeabilidad del concreto (Shen et al., 2020).

Si bien las fibras de acero han mostrado beneficios en la mejora de las propiedades mecánicas del concreto permeable, también plantean desafíos como la aglomeración y el control preciso de su distribución en la mezcla. Investigaciones futuras deben centrarse en optimizar las técnicas de mezclado y evaluar el comportamiento a largo plazo de estas mezclas en condiciones reales de uso (Rambabu et al., 2023).

Con mejoras en la resistencia, el concreto permeable reforzado con fibras de acero podría ser utilizado en aplicaciones estructurales exigentes como estacionamientos, muros de contención y bases de carreteras. Además, su resistencia mejorada al desgaste y la erosión lo hace adecuado para entornos con condiciones climáticas adversas y tráfico vehicular intenso (Li, 2019).

Esta investigación tiene como objetivo evaluar el desempeño del concreto permeable con la adición de diferentes proporciones de fibras de acero, analizando tanto sus propiedades mecánicas como su capacidad de infiltración. A través de ensayos experimentales, se busca determinar la proporción óptima de fibras que permita mejorar la resistencia del material sin comprometer su funcionalidad hidráulica.

Los resultados obtenidos contribuirán al desarrollo de directrices para la aplicación del concreto permeable reforzado con fibras de acero en pavimentos y otras estructuras de baja carga, proporcionando una base técnica y científica para su implementación en proyectos de construcción sostenible.

2. Materiales y Métodos

2.1. Concreto permeable

El concreto permeable, también conocido como concreto "sin finos" o concreto poroso, se compone de agregado grueso, cemento, agua y, en algunos casos, cantidades mínimas de arena fina. Esta mezcla específica genera una estructura con células abiertas, que permite la infiltración eficiente del agua de lluvia hacia el suelo subyacente, simulando el

comportamiento de una superficie natural de tierra (Akkaya y Çağatay, 2021).

2.1.1. Composición típica del concreto permeable

- Cemento: Cemento portland compuesto es comúnmente utilizado debido a su accesibilidad y buen desempeño en estructuras de baja carga. En aplicaciones especializadas, puede incluirse cemento con propiedades adicionales, como resistencia a sulfatos.
- Se utilizaron agregados gruesos con tamaños comprendidos entre 4.75 mm (tamiz #4) y 19.0 mm (tamiz 3/4"), conforme a la gradación típica recomendada para concreto permeable. La adecuada selección del tamaño de partículas influye directamente en la porosidad y permeabilidad del sistema cementante.
- Agua: La relación agua/cemento (A/C) utilizada en el diseño de mezcla fue de 0.45, obtenida a partir de una dosificación de 191.25 kg de agua por 425 kg de cemento. Este valor, aunque ligeramente superior al rango tradicional de mezclas de concreto estructural, es apropiado para concretos permeables que requieren una trabajabilidad adecuada sin el uso de aditivos. Una relación A/C más alta puede facilitar la compactación y distribución de los agregados gruesos sin comprometer significativamente la permeabilidad, siempre que se mantenga una porosidad interconectada. Estudios recientes también respaldan el uso de relaciones A/C entre 0.35 y 0.50 para lograr un equilibrio entre resistencia mecánica y permeabilidad en este tipo de concreto (Yang & Jiang, 2003; Singh y Yadav, 2024).
- Aditivos: En algunos diseños, se incluyen aditivos plastificantes o retardantes para mejorar la trabajabilidad y el tiempo de fraguado, respectivamente.
- Arena (opcional): La adición de arena fina, si bien es mínima, puede ayudar a mejorar la cohesión de la mezcla en aplicaciones específicas.

2.1.2. Propiedades Físicas y Mecánicas

- Porosidad: El contenido de vacíos varía entre 15% y 30%, lo que permite tasas de infiltración de hasta 720 L/min/m² según la densidad de la mezcla (ACI 522R, 2010).
- Resistencia a compresión: Aunque es inferior al concreto convencional, los valores típicos oscilan entre 2.8 MPa y 28 MPa dependiendo del diseño y los materiales utilizados.
- Densidad: El concreto permeable tiene una densidad reducida en comparación con el concreto convencional, lo que facilita su manipulación y transporte.

2.1.3. Usos y Aplicaciones

El concreto permeable es especialmente útil en aplicaciones urbanas donde la gestión del agua pluvial es crucial. Sus principales usos incluyen:

- Pavimentos ligeros: Calles de bajo tráfico, aceras y senderos.
- Estacionamientos: Ayuda a reducir la acumulación de agua superficial y la formación de charcos.
- Sistemas de drenaje sostenible: Infraestructura verde que permite la recarga de acuíferos.
- Control de erosiones: En zonas con alto riesgo de escurrimientos superficiales.

2.2. Fibras de acero

Las fibras de acero utilizadas en esta investigación son un subproducto generado durante el proceso de fresado en la industria metalmecánica. Este proceso produce residuos metálicos que, en lugar de desecharse, se recuperan y preparan para su integración en materiales de construcción como el concreto permeable, contribuyendo así a una economía circular y reduciendo el impacto ambiental asociado a su disposición (Siddique et al., 2020).

El acero utilizado corresponde a la especificación ASTM A-36, una aleación de hierro y carbono ampliamente empleada en diversas aplicaciones estructurales por sus excelentes propiedades mecánicas y facilidad de fabricación (Valdivia et al., 2022). Además de los elementos principales, este acero contiene pequeñas cantidades de manganeso, fósforo, azufre y silicio, cuidadosamente regulados para garantizar su calidad según los estándares establecidos (tabla 1).

Tabla 1: Composición Química Acero A-36

Elemento	Porcentaje (%)
Carbono (C)	0.29
Manganeso (Mn)	1.20
Silicio (Si)	0.40
Fósforo (P)	0.04
Azufre (S)	0.05

Fuente: (Valdivia et al., 2022)

Las fibras de acero utilizadas en este estudio fueron obtenidas a partir del proceso de fresado de residuos industriales conformados con acero al carbono ASTM A36. Debido al método de obtención, las fibras presentan geometrías irregulares, con una longitud promedio de 30 ± 5 mm y un diámetro aproximado de 0.5 ± 0.1 mm, lo que genera una relación de aspecto promedio de 60. Estas dimensiones se encuentran dentro del rango funcional para aplicaciones en concreto reforzado con fibras (FRC), favoreciendo una buena adherencia mecánica con la matriz cementante. Las fibras muestran una rugosidad superficial elevada, derivada del proceso de fresado, que puede contribuir a un mayor anclaje mecánico en el interior del concreto.

2.2.1. Ventajas del Uso de Fibras de Acero en Concreto Permeable:

- Mejoras en Propiedades Mecánicas: Incrementa la resistencia a la compresión, tracción y flexión del

concreto, contribuyendo a un mejor desempeño estructural (Madandoust et al., 2019).

- Control de Fisuración: Ayuda a minimizar la propagación de fisuras y mejora la durabilidad del material (Mindess et al., 2003).
- Sostenibilidad: Al ser un residuo industrial reciclado, reduce la necesidad de producir fibras nuevas y disminuye la disposición de residuos metálicos (Akbulut et al., 2025).

La integración de fibras de acero provenientes de la industria metalmecánica en el concreto permeable representa una solución innovadora y sostenible para mejorar tanto las propiedades mecánicas como el impacto ambiental del material, alineándose con los principios de construcción sostenible y economía circular (Nobili y Tarantino, 2013).

2.3. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión del concreto es un parámetro clave para evaluar su calidad y verificar el cumplimiento de los estándares de seguridad y durabilidad estructural. Este ensayo no solo permite determinar la capacidad del material para soportar cargas axiales, sino que también es fundamental en la optimización de las mezclas y la mejora del desempeño estructural. Asimismo, sus resultados proporcionan información valiosa para el diseño y la planificación de edificaciones y otras aplicaciones arquitectónicas (Yu y Liang, 2023).

Este ensayo permite determinar la resistencia a la compresión simple del concreto hidráulico, con valores esperados inferiores a 51 MPa (500 kg/cm²), utilizando especímenes cilíndricos moldeados con una relación altura/diámetro de 2:1. Sin embargo, este método no es aplicable a núcleos de concreto endurecido ni a morteros con diámetros menores a 100 mm (SCT, 2004).

El ensayo consiste en la aplicación de una carga axial sobre especímenes cilíndricos mediante una prensa, que puede ser mecánica o hidráulica, hasta alcanzar su fractura. Este procedimiento permite determinar la resistencia a la compresión del concreto. La normativa aplicable para esta prueba es la ASTM C39 (2021).

2.4. Permeabilidad

La permeabilidad se define como la capacidad de un medio poroso para permitir el movimiento de un fluido a través de su estructura. En términos hidráulicos, puede expresarse como la velocidad de flujo generada por un gradiente hidráulico unitario. El coeficiente de permeabilidad (k) se emplea como un indicador de la resistencia al flujo ofrecida por el material (Bárcena et al., 2011).

En el caso del concreto poroso, la determinación de la permeabilidad se realiza mediante permeámetros de carga variable. Uno de los métodos más utilizados es el basado en permeámetros LCS (Sistema de Recolección de Lixiviados), donde se mide el tiempo requerido para que el nivel de agua descienda entre dos puntos de referencia mientras fluye a través de un orificio de dimensiones controladas (Yu y Liang, 2023).

De acuerdo con la norma (ACI 522R, 2010), el concreto permeable es un material de estructura abierta y revestimiento nulo, compuesto por cemento Portland, agregado grueso, una cantidad mínima o nula de finos, agua y aditivos. La combinación de estos materiales da lugar a una matriz endurecida con poros interconectados, cuyo tamaño oscila entre 2 y 8 mm, permitiendo el paso del agua. El contenido de vacíos en este tipo de concreto varía entre el 15 % y el 35 %, mientras que su resistencia a la compresión suele situarse en el rango de 2.8 a 28 MPa. La velocidad de drenaje depende tanto del tamaño del agregado como de la densidad de la mezcla, con valores generalmente comprendidos entre 81 y 730 L/min/m² (Debnath y Sarkar, 2020).

2.5. Microscopia electrónica de barrido

El análisis por microscopía electrónica de barrido (MEB) se realizó con una magnificación de 500x para evaluar la distribución, morfología y la interacción de las fibras de acero con la matriz del concreto permeable. Las fibras se obtuvieron como subproducto de la industria metalmecánica y se incorporaron en proporciones de 2%, 3% y 5% en peso respecto al agregado grueso. Las muestras analizadas fueron previamente sometidas a pruebas de compresión y permeabilidad según las normativas ASTM C39 y ACI 522R, respectivamente, fueron cortadas en secciones planas en forma mecánica mediante impacto, asegurando superficies paralelas y libres de partículas sueltas que pudieran interferir en el análisis.

Para la preparación de las muestras destinadas al análisis por microscopía electrónica de barrido (MEB), se recubrieron con una capa conductora de oro mediante pulverización catódica (sputtering), con el objetivo de asegurar una adecuada conductividad eléctrica y evitar cargas superficiales durante la observación. Las micrografías fueron obtenidas utilizando un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-6510LV, operando en modo de alto vacío con un voltaje de aceleración de 15 kV y detector secundario (SE). Las observaciones se realizaron en secciones representativas de la microestructura de los especímenes, haciendo énfasis en las zonas de contacto entre las fibras de acero y la matriz cementante, así como en la caracterización de los poros interconectados característicos del concreto permeable. Se analizaron al menos tres campos visuales por muestra, y todas las imágenes incluyen barras de escala para su adecuada interpretación.

3. Diseño de mezcla

En esta investigación se emplearon fibras de acero provenientes de la industria metalmecánica como subproducto, sustituyendo el 0 %, 2 %, 3 % y 5 % del agregado grueso en peso y adicionando la cantidad equivalente en fibras de acero (Tabla 2). El objetivo fue alcanzar una resistencia a la compresión superior a $f'_c = 9.8$ MPa (100 kg/cm²). Para el agregado grueso, se utilizó el material retenido entre el tamiz de 4.75 mm (tamiz #4) y 19.0 mm (tamiz 3/4").

Se fabricaron un total de 20 especímenes, de los cuales 12 fueron cilindros de concreto con un diámetro de 0.10 m y una altura de 0.20 m, destinados a ensayos de resistencia a la compresión. Adicionalmente, se elaboraron 8 cilindros de

0.10 m de diámetro y 0.20 m de altura para la evaluación de la permeabilidad.

Para la incorporación de las fibras de acero, estas fueron añadidas de forma gradual al mezclador, mientras se realizaba el mezclado en seco de los agregados y el cemento. Este procedimiento permitió evitar la formación de aglomeraciones o "bolas" de fibras, promoviendo una distribución más homogénea. Posteriormente se añadió el agua de amasado de forma continua, manteniendo la mezcla en operación por al menos 3 minutos adicionales. Durante el proceso, se realizaron inspecciones visuales constantes para verificar la adecuada dispersión del refuerzo fibroso y corregir cualquier indicio de acumulación localizada.

Tabla 2: Dosificación de materiales para la elaboración de 1 m³ de concreto permeable con una relación agua/cemento (A/C) de 0.45.

Sistema	Diseño de mezcla para $f'_c=100$ kg/cm ²			Fibras de acero (Kg)
	Cemento (Kg)	Agregado Grueso (Kg)	Agua (Kg)	
0%	425.00	1900.00	191.25	--
2%	425.00	1862.00	191.25	38.00
3%	425.00	1843.00	191.25	57.00
5%	425.00	1805.00	191.25	95.00



Figura 1: Diseño y fabricación de especímenes de concreto permeable con adición de fibras de acero.

3.1. Curado de especímenes

Los cilindros de concreto fueron curados durante un periodo de 28 días bajo condiciones estándar, sumergidos completamente en agua potable a temperatura ambiente, conforme a las especificaciones de la norma ASTM C192/C192M. Este procedimiento asegura una hidratación adecuada de la pasta cementante y permite el desarrollo óptimo de las propiedades mecánicas antes de la realización de los ensayos de compresión y permeabilidad.

4. Resultados y discusiones

4.1. Resistencia a la compresión

Las pruebas de resistencia a la compresión se llevaron a cabo utilizando una prensa hidráulica marca Controls, modelo 50-C43C04 (Figura 2). La determinación de la resistencia a la

compresión se realizó conforme a la metodología establecida en la norma ASTM C39 (2005), evaluando tres especímenes por cada mezcla analizada (ver Tabla 3).



Figura 2: Prueba de resistencia a la compresión de especímenes de concreto permeable con adición de fibras de acero.

Tabla 3: Parámetros de resistencia a la compresión de especímenes de concreto permeable con adición de fibras de acero.

Sistema	Espécimen 1 (MPa)	Espécimen 2 (MPa)	Espécimen 3 (MPa)	Promedio (MPa)
0%	10.11	9.24	9.67	9.67
2%	10.71	7.96	10.31	9.66
3%	9.99	11.15	10.52	10.55
5%	11.29	11.41	11.73	11.47

La Figura 3 presenta los resultados de la prueba de compresión en muestras de concreto permeable con adiciones del 0 %, 2 %, 3 % y 5 % de fibras de acero.

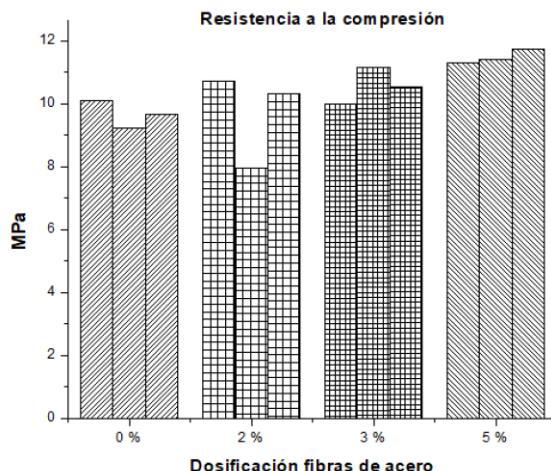


Figura 3: Resistencia a la compresión de especímenes de concreto permeable con adición de fibras de acero.

El gráfico muestra que la resistencia a la compresión más alta se obtuvo en los especímenes con un mayor porcentaje de fibras de acero. En particular, las mezclas con 3 % y 5 % de fibras de acero presentaron los mejores resultados, alcanzando valores promedio de 10.55 MPa y 11.47 MPa, respectivamente. Esto sugiere que, a medida que aumenta el porcentaje de adición de fibras de acero en el concreto permeable, se logra una mejora significativa en su resistencia a la compresión (Abbas et al., 2018).

4.2. Prueba de permeabilidad

El concreto permeable, como su nombre lo indica, es un material diseñado para permitir la filtración del agua a través de su estructura, siendo esta su característica principal. De acuerdo con la norma ACI 522R (2010), los valores esperados de permeabilidad para un concreto permeable se encuentran en un rango de 81 a 730 L/min/m².

Para la caracterización hidráulica del concreto permeable se utilizó un permeámetro de carga variable, siguiendo el enfoque del ACI 522R (2010) para reportar tasas de infiltración. En lugar de calcular directamente el coeficiente de permeabilidad (k en m/s), se determinó la tasa de flujo superficial (Q, L/min·m²), obtenida a partir de la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{V}{A * t} \quad (1)$$

Donde Q es la tasa de flujo superficial (L/min·m²), V el volumen drenado (L), A el área transversal de la probeta (m²) y t el tiempo de drenaje (min).

Se ensayaron dos especímenes cilíndricos de 10 cm de diámetro × 20 cm de altura (A = 0.00785 m²) por cada mezcla, realizando tres mediciones consecutivas por espécimen y reportando el promedio de las mediciones para cada mezcla. Las condiciones de borde se controlaron manteniendo una altura inicial de agua de 0.10 m y final de 0.02 m en el permeámetro, con un volumen drenado fijo de aproximadamente 2.0 L.

Este procedimiento permite una comparación coherente con las tasas de infiltración referidas en ACI 522R, y proporciona un indicador práctico del desempeño hidráulico del concreto permeable reforzado con fibras de acero recicladas.



Figura 4: Permeámetro de carga variable para la obtención del gasto promedio en especímenes de concreto permeable con adición de fibras de acero.

En la Tabla 4 se presentan los resultados promedio de la prueba de permeabilidad realizada en especímenes de concreto permeable con adiciones del 0 %, 2 %, 3 % y 5 % de fibras de acero.

Tabla 4: Prueba de permeabilidad promedio en especímenes de concreto permeable con adición de fibras de acero.

Fibras de Acero (%)	Gasto promedio (l/min/m ²)	Tiempo estimado (min)
0 %		

0	677.00	0.376
2	606.60	0.420
3	603.60	0.422
5	868.70	0.293

Se observa que la permeabilidad varía según la composición de cada mezcla ensayada. La muestra con 5 % de fibras de acero presentó el mayor grado de permeabilidad (868.7 L/min·m²), superando el límite superior del rango establecido por la norma ACI 522R (2010), que establece valores esperados entre 81 y 730 L/min·m². Este resultado sugiere que una adición excesiva de fibras puede generar mayor conectividad entre los vacíos o aumentar canales de flujo preferente. Las demás mezclas con 0 %, 2 % y 3 % de fibras permanecen dentro del rango normativo.

La adición de fibras de acero recicladas en proporciones controladas (hasta 3 %) permite mantener las características de permeabilidad requeridas para concreto permeable. Sin embargo, el incremento observado en la mezcla con 5 % de fibras indica la necesidad de realizar estudios adicionales para comprender mejor su efecto sobre la red de poros y el desempeño hidráulico general.

El incremento observado en la mezcla con 5 % de fibras (868.7 L/min·m²) respecto a la mezcla de control (677 L/min·m²) sugiere un efecto no lineal del contenido de fibras sobre la permeabilidad. Este aumento podría explicarse por la reorganización granular durante el mezclado, así como por la formación de canales preferenciales adyacentes a las fibras de acero, lo cual puede facilitar la conducción del agua a través de trayectorias menos obstruidas. Aunque este comportamiento resulta atípico en comparación con tendencias documentadas donde las fibras reducen la permeabilidad, es posible que en proporciones elevadas las fibras introduzcan vacíos adicionales o dificulten una compactación uniforme. Estos hallazgos ameritan un análisis más profundo en futuras investigaciones para establecer el umbral óptimo de adición de fibras sin comprometer la eficiencia hidráulica ni la resistencia estructural del concreto.

Cabe señalar que el rango de valores de infiltración mencionado en la norma ACI 522R (2010) corresponde a ensayos realizados en pavimentos colocados en campo bajo condiciones de carga real, mientras que en este estudio los valores reportados fueron obtenidos mediante pruebas de laboratorio en especímenes cilíndricos sometidos a carga hidráulica vertical controlada. Por tanto, aunque ambas métricas utilizan unidades de L/min·m² y pueden ser comparables en orden de magnitud. Esta comparación debe considerarse con carácter referencial y no como validación directa frente a la norma.

4.3. Análisis de microscopía electrónica de barrido

Es importante señalar que las micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) fueron realizadas sobre secciones de los especímenes posteriores al ensayo de compresión, por lo que algunas micro fisuras observadas podrían estar asociadas al proceso de carga y no necesariamente a la microestructura original del concreto. Esta consideración es relevante, ya que la fisuración inducida podría afectar la topografía superficial sin haber influido en

los resultados de permeabilidad, los cuales fueron medidos en especímenes sin dañar. Por ello, cualquier inferencia sobre la relación entre micro fisuras y flujo de agua debe ser interpretada con cautela.

- Distribución de fibras y matriz:

Las imágenes de MEB mostraron que la distribución de las fibras de acero es homogénea en las mezclas con 2% y 3% (figura 5b y 5c), mientras que en la mezcla con 5%, se observó una ligera aglomeración. Estas aglomeraciones podrían generar concentraciones de esfuerzos, afectando la resistencia mecánica localmente.

Las observaciones por MEB se centraron en la caracterización cualitativa de la porosidad interconectada y las zonas de contacto fibra-matriz a nivel microestructural. No se evaluó la distribución global de las fibras en la mezcla, ya que ello requiere análisis macroscópico o tomográfico.

- Interacción fibra-matriz:

Se observó una buena adherencia entre las fibras de acero y la matriz de concreto, lo que respalda el incremento en la resistencia a la compresión reportado. En las mezclas con mayor porcentaje de fibras (5%), se identificaron microfisuras circundantes a algunas fibras (figura 5d), lo que podría estar asociado a la reducción parcial de permeabilidad y a esfuerzos internos generados durante el curado.

- Porosidad y conectividad:

Las imágenes evidenciaron una red de poros interconectados que se preserva incluso en las mezclas con 5% de fibras (figura 5d). Sin embargo, se observó una disminución en el tamaño de algunos poros en estas mezclas, lo que podría explicar la ligera disminución en la permeabilidad respecto a las mezclas con 0% y 2% de fibras (figura 5a y 5b).

La inclusión de fibras de acero en el concreto permeable mejoró su resistencia a la compresión, alcanzando valores de hasta 11.47 MPa con 5% de fibras. Este aumento está relacionado con la capacidad de las fibras para redistribuir esfuerzos y limitar la propagación de fisuras, como también lo reportan Shen et al. (2020).

Las micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (MEB), utilizando el detector de electrones secundarios, revelan una topografía superficial con características que varían entre mezclas. En las muestras con 5 % de fibras se observa una mayor profundidad en la textura superficial, lo que sugiere que las fibras metálicas actúan como un esqueleto interno que facilita la formación de vacíos interconectados o canales de drenaje. Esta hipótesis coincide con el incremento en la tasa de permeabilidad registrado en esta mezcla (868.7 L/min·m²).

Por otro lado, en la mezcla con 3 % de fibras, los productos de hidratación visibles en la microestructura presentan una morfología más densa y poros más pequeños, de formas curvas y parcialmente cerradas. Esta microestructura más compacta podría estar asociada con la ligera disminución de permeabilidad observada en esta mezcla, y sugiere que existe un efecto no lineal del contenido de fibras sobre la red de poros del concreto permeable.

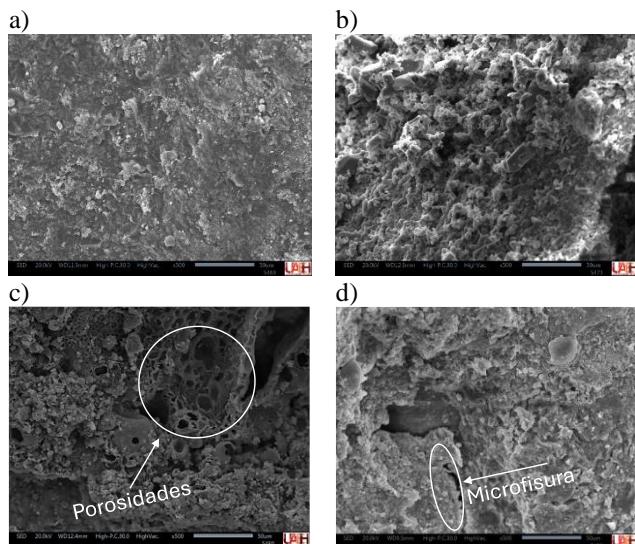


Figura 5: Comparativa de la microestructura entre: a) concreto convencional, b) concreto con 2 % fibras de acero, c) concreto con 3 % fibras de acero y d) concreto con 5 % fibras de acero.

5. Conclusiones

La incorporación de fibras de acero recicladas en concretos permeables permite mejorar la resistencia a la compresión promedio, alcanzando hasta 11.47 MPa con un contenido de 5 % de fibras, lo que representa un incremento respecto a la mezcla sin refuerzo. Esta mejora se atribuye al efecto de puenteo de grietas y al anclaje mecánico proporcionado por las fibras de geometría irregular y superficie rugosa.

En cuanto a la permeabilidad, se observó un comportamiento dependiente del contenido de fibras. Las mezclas con 0 %, 2 % y 3 % de fibras presentaron valores dentro del rango especificado por la norma ACI 522R (81–730 L/min·m²), mientras que la mezcla con 5 % de fibras alcanzó 868.7 L/min·m², superando dicho límite. Este aumento inusual podría explicarse por la reorganización granular durante el mezclado o la formación de canales preferenciales junto a las fibras, lo cual facilita el flujo de agua a través de trayectorias menos obstruidas.

Estos resultados indican que una adición controlada de hasta 3 % de fibras permite mantener un equilibrio adecuado entre resistencia mecánica y eficiencia hidráulica, mientras que contenidos mayores pueden alterar el desempeño hidráulico del sistema.

El análisis por MEB evidenció una distribución homogénea de fibras en mezclas con 2 % y 3 %, mientras que en la mezcla con 5 % se detectaron ligeras aglomeraciones, lo que podría afectar su desempeño estructural a largo plazo.

Las micrografías obtenidas revelan una red de huecos interconectados característicos del concreto permeable. Dichos huecos, localizados entre partículas de agregado, se observan parcialmente recubiertos por productos de hidratación de la pasta cementante, lo cual indica un grado moderado de penetración y formación de geles en las zonas porosas. Asimismo, en las mezclas con fibras de acero se identifican trayectorias de poro más homogéneas y bordes más definidos, lo que sugiere un efecto estabilizador en la morfología interna del concreto.

La adición de fibras de acero recicladas representa una alternativa viable y sostenible para mejorar el rendimiento del concreto permeable, contribuyendo a la reducción de residuos industriales y alineándose con los principios de economía circular.

Se recomienda realizar estudios adicionales en condiciones de servicio para evaluar la durabilidad del concreto permeable con fibras de acero, así como optimizar las técnicas de mezclado para evitar la aglomeración de fibras en proporciones elevadas.

5.1. Limitaciones del estudio y trabajo futuro

Si bien los resultados experimentales permiten identificar tendencias relevantes sobre el efecto de las fibras de acero recicladas en concretos permeables, este estudio presenta algunas limitaciones inherentes a su alcance exploratorio.

Entre ellas destacan:

- La ausencia de ensayos de contenido de vacíos y densidad aparente en estado fresco y endurecido, parámetros clave en concretos permeables.
- Las observaciones mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) fueron de tipo cualitativo, sin cuantificación de características microestructurales ni análisis estadístico de campos visuales.

En futuras investigaciones se propone:

- Ampliar la cantidad de réplicas por mezcla para fortalecer el análisis estadístico.
- Incluir ensayos normalizados de contenido de vacíos, densidad, módulo de rotura y resistencia a flexión (por ejemplo, ASTM C1609).

Profundizar en el análisis microestructural con técnicas de impregnación al vacío, pulido, y cuantificación de interfaces fibra-matriz mediante MEB y EDS.

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. Asimismo, se expresa un especial agradecimiento a la empresa Fabricación Metálica y Servicios (FAMyS) por proporcionar el residuo metálico empleado y por su apoyo en la formación de recursos humanos de calidad, fortaleciendo la colaboración entre el sector académico e industrial.

Referencias

- Abbass, W., Khan, M. I., & Mourad, S., (2018). Evaluation of mechanical properties of steel fiber reinforced concrete with different strengths of concrete. *Construction and Building Materials* 168, 556–569. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.164
- ACI Committee 522, (2010). Report on Pervious Concrete (Reapproved 2011). ACI 522 R10.
- Aguilar Gomez, D. A., & Dipaz Gamboa, Y. J., (2021). Efecto de la incorporación de fibras de acero reciclado de neumáticos y microsilice en el concreto para el uso en pavimento rígido en la av. Javier Pérez de Cuéllar, Ayacucho, 2021. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/11468>
- Akbulut, Z. F., Tawfik, T. A., Smarzewski, P., & Guler, S., (2025). Advancing Hybrid Fiber-Reinforced Concrete: Performance, Crack Resistance

- Mechanism, and Future Innovations. *Buildings* 15(8), 1247. DOI: 10.3390/buildings15081247
- Akkaya, A., & Çağatay, İ. H., (2021). Investigation of the density, porosity, and permeability properties of pervious concrete with different methods. *Construction and Building Materials* 294, 123539. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123539
- ASTM International (2021). ASTM C39/C39M-21, Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens.
- Bárcenas, Y. A., & Hurtado, J. E. A., (2011). *Ensayos de permeabilidad en materiales de baja de permeabilidad compactados*.
- Debnath, B., & Sarkar, P. P., (2020). Pervious concrete as an alternative pavement strategy: A state-of-the-art review. *International Journal of Pavement Engineering* 21(12), 1516–1531. DOI: 10.1080/10298436.2018.1554217
- Haselbach, L., (2009). *The Engineering Guide to LEED-New Construction: Sustainable Construction for Engineers*. McGraw Hill Professional
- Li, V. C., (2019). Sustainability of engineered cementitious composites (ECC) infrastructure. In: *Engineered Cementitious Composites (ECC) Bendable Concrete for Sustainable and Resilient Infrastructure*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, Ch. 8, pp. 261–312. DOI: 10.1007/978-3-662-58438-5_8
- Madandoust, R., Kazemi, M., Talebi, P. K., & de Brito, J., (2019). Effect of the curing type on the mechanical properties of lightweight concrete with polypropylene and steel fibres. *Construction and Building Materials* 223, 1038–1052. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.08.006
- Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D., (2003). *Concrete*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River.
- Muda, M. M., Legese, A. M., Urgessa, G., & Boja, T., (2023). Strength, porosity and permeability properties of porous concrete made from recycled concrete aggregates. *Construction Materials* 3(1), 81–92. DOI: 10.3390/constrmater3010006
- Nobili, A., Lanzoni, L., & Tarantino, A. M., (2013). Experimental investigation and monitoring of a polypropylene-based fiber reinforced concrete road pavement. *Construction and Building Materials* 47, 888–895. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.077
- Rambabu, D., Sharma, S. K., & Akbar, M. A., (2023). A review on suitability of roller-compacted concrete for constructing high traffic resisting pavements. *Innovative Infrastructure Solutions* 8(1), 20. DOI: 10.1007/s41062-022-00989-4
- SCT, (2004). *Resistencia a la Compresión Simple de Cilindros de Concreto (M-MMP-2-02-058/04)*. <https://normas.imt.mx/normativa/M-MMP-2-02-058-04.pdf>
- Shen, A., Wu, H., Yang, X., He, Z., & Meng, J., (2020). Effect of different fibers on pavement performance of asphalt mixture containing steel slag. *Journal of Materials in Civil Engineering* 32(11), 04020333. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003427
- Siddique, R., Singh, M., & Jain, M., (2020). Recycling copper slag in steel fibre concrete for sustainable construction. *Journal of Cleaner Production* 271, 122559. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122559
- Singh, A., & Yadav, B. P., (2024). Sustainable innovations and future prospects in construction material: a review on natural fiber-reinforced cement composites. *Environmental Science and Pollution Research* 31(54), 62549–62587. DOI: 10.1007/s11356-024-35236-z
- Valdivia, M. R., Urday, E. J. U., Gómez, E. E. P., & Tacca, C. A. A., (2022). Evaluación de propiedades mecánicas de un acero estructural a-36 en la formación de ferritas. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica* 26(2), 47–59.
- Yang, J., & Jiang, G., (2003). Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. *Cement and Concrete Research* 33(3), 381–386. DOI: 10.1016/S0008-8846(02)00966-3
- Yu, H., Zahidi, I., & Liang, D., (2023). Sustainable porous-insulation concrete (SPIC) material: recycling aggregates from mine solid waste, white waste and construction waste. *Journal of Materials Research and Technology* 23, 5733–5745. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.02.181