









## Desempeño de concreto permeable con refuerzo de fibras de acero para pavimentación de tránsito ligero.

A. Mendoza<sup>1</sup> , F. J. Olguin<sup>1,3</sup> , I. E. Catañeda<sup>1</sup> ,  
A. L. López<sup>2</sup> , M. Lopez Juarez<sup>3</sup> , L. D. López<sup>1\*</sup> .

\*Autor de Contacto: [luis\\_lopez@uaeh.edu.mx](mailto:luis_lopez@uaeh.edu.mx)

### RESUMEN

El concreto permeable es una opción sostenible por su capacidad de infiltración y manejo de agua pluvial, aunque su baja resistencia mecánica limita su uso estructural. Este estudio evaluó el impacto de fibras de acero recicladas (2 %, 3 % y 5 %) en su resistencia a la compresión y permeabilidad. Se observó un aumento en la resistencia, alcanzando 109 kg/cm<sup>2</sup> con 5 % de fibras, sin afectar significativamente la permeabilidad conforme a ACI 522R. El análisis mediante MEB reveló buena distribución de fibras en 2 % y 3 %, mientras que en 5 % hubo ligera aglomeración. Los resultados sugieren que la incorporación de fibras de acero recicladas mejora el desempeño estructural del concreto permeable para pavimentos de tránsito ligero.

**Palabras Clave:** concreto permeable; fibras de acero; permeabilidad; compresión.

**Citar como:** Mendoza, A., et. al. (2025). “Desempeño de concreto permeable con refuerzo de fibras de acero para pavimentación de tránsito ligero.”. Editado por: Ángel Castillo Talavera, José Luis García Calvo, Enio J. Pazini Figueiredo y Pedro Castro Borges (Eds.), Memorias del XVIII Congreso Iberoamericano de Patología de la Construcción y XX Congreso de Control de Calidad en la Construcción, CONPAT 2025. Madrid, España, (pp. 516-528). DOI: <https://doi.org/10.21041/CONPAT2025/V1CC187>

<sup>1</sup> Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca, México.

<sup>2</sup> Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

<sup>3</sup> Tecnológico Nacional de México, Campus Pachuca, Pachuca, Hidalgo, México.

## **Performance of pervious concrete reinforced with steel fibers for light traffic pavement.**

### **ABSTRACT**

Pervious concrete is a sustainable alternative due to its infiltration capacity and contribution to stormwater management; however, its low mechanical strength limits its structural applications. This study evaluated the effect of recycled steel fibers (2%, 3%, and 5%) on the compressive strength and permeability of pervious concrete. An increase in strength was observed, reaching 109 kg/cm<sup>2</sup> with 5% fiber content, without significantly affecting permeability within the ACI 522R standard range. SEM analysis revealed good fiber distribution at 2% and 3%, while slight agglomeration was observed at 5%. The results suggest that the inclusion of recycled steel fibers enhances the structural performance of pervious concrete, making it more suitable for light traffic pavement applications.

**Keywords:** pervious concrete; steel fibers; permeability; compression.

## **Desempenho do concreto permeável reforçado com fibras de aço para pavimentação de tráfego leve.**

### **RESUMO**

O concreto permeável é uma alternativa sustentável devido à sua capacidade de infiltração e contribuição para o manejo de águas pluviais. No entanto, sua baixa resistência mecânica limita seu uso estrutural. Este estudo avaliou o efeito de fibras de aço recicladas (2%, 3% e 5%) na resistência à compressão e na permeabilidade do concreto permeável. Observou-se um aumento na resistência, atingindo 109 kg/cm<sup>2</sup> com 5% de fibras, sem afetar significativamente a permeabilidade, dentro dos limites normativos da ACI 522R. A análise por MEV revelou uma boa distribuição das fibras nas dosagens de 2% e 3%, enquanto, com 5%, foi observada leve aglomeração. Os resultados indicam que a incorporação de fibras de aço recicladas melhora o desempenho estrutural do concreto permeável, favorecendo seu uso em pavimentações de tráfego leve.

**Palavras-chave:** concreto permeável; fibras de aço; permeabilidade; compressão.

## **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 ningún agregado fino, generando espacios vacíos entre sus partículas que permiten el paso del agua (Patiño, 2013). 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 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 (Soroushian et al., 1992; 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 (Huang et al., 2020). Estudios recientes destacan que la adición de fibras puede mejorar significativamente el rendimiento mecánico sin sacrificar la permeabilidad del concreto (Shen et al., 2018).

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 (Coronel, 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 (Cerdán, 2016).

#### 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.
- **Agregado grueso:** Se utilizan agregados con tamaños en el rango de 9.5 mm a 19 mm, retenidos en tamices #4 a 3/4". La selección de agregados afecta directamente la porosidad y permeabilidad del concreto.
- **Agua:** La relación agua/cemento (A/C) generalmente se mantiene entre 0.27 y 0.34 para equilibrar la hidratación y mantener la resistencia mecánica deseada.
- **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/m<sup>2</sup> 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 metalmeccánica. 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 (Cajahuaman, 2023).

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 (Aceros Torices, 2023). 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

### 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 (Soroushian et al., 1992).
- **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 (Huang et al., 2020).

La integración de fibras de acero provenientes de la industria metalmeccánica 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 (Blas et al., 2024).

### 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 (González et al., 2024).

Este ensayo permite determinar la resistencia a la compresión simple del concreto hidráulico, con valores esperados inferiores a 51 MPa (500 kg/cm<sup>2</sup>), 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 (2005).

### 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 (González et al., 2024).

De acuerdo con la norma (ACI 522R, 2010), el concreto permeable es un material de estructura

abierta y revenimiento 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/m<sup>2</sup> (Jiménez et al., 2019).

### 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 metalmeccánica 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 preparar las muestras para el MEB, se recubrieron con una capa fina de oro utilizando un recubridor de sputtering, asegurando una buena conductividad eléctrica. Las observaciones se realizaron en zonas representativas de la microestructura, destacando las áreas de contacto fibra-matriz y los poros interconectados característicos del concreto permeable.

## 3. DISEÑO DE MEZCLA

En esta investigación se emplearon fibras de acero provenientes de la industria metalmeccánica 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  $F'c = 100 \text{ kg/cm}^2$ . Para el agregado grueso, se utilizó material retenido entre las mallas #4 y 1/2".

Se fabricaron un total de 20 especímenes, de los cuales 12 fueron cilindros de concreto con un diámetro de 10 cm y una altura de 20 cm, destinados a ensayos de resistencia a la compresión. Adicionalmente, se elaboraron 8 cilindros de 5 cm de diámetro y 15 cm de altura para la evaluación de la permeabilidad.

Tabla 2. Dosificación de materiales para la elaboración de 1 m<sup>3</sup> de concreto permeable con una relación agua/cemento (A/C) de 3.5

Diseño de mezcla para $f'c=100 \text{ kg/cm}^2$				
Sistema	Cemento (Kg)	Agregado Grueso (Kg)	Agua (Kg)	Fibras de acero (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.

Como se muestra en (1), encierre el número de la ecuación entre paréntesis redondos y ubíquelo en la parte derecha de la columna. Cuando se refiera a una ecuación en el texto escriba (1). Cuando se refiera a varias ecuaciones consecutivas en el texto escriba (1)-(3).

## 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 (kg/cm <sup>2</sup> )	Espécimen 2 (kg/cm <sup>2</sup> )	Espécimen 3 (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio (kg/cm <sup>2</sup> )
0%	103.12	94.25	98.69	98.69
2%	109.26	81.19	105.23	98.56
3%	101.91	113.80	107.86	107.86
5%	115.17	116.38	119.69	109.00

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.

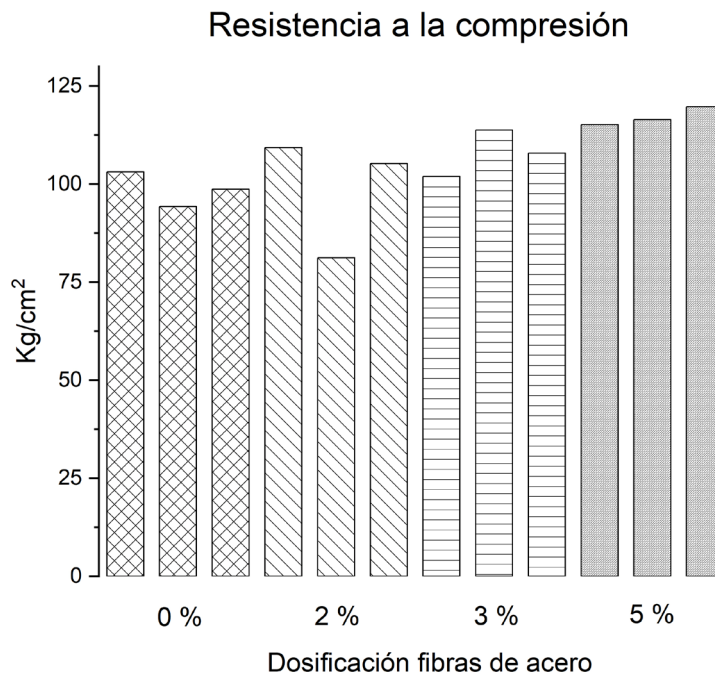


Figura 3. Resistencia a la compresión de especímenes de concreto permeable con adición de fibras de acero.

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 107.86 kg/cm<sup>2</sup> y 109.00 kg/cm<sup>2</sup>, 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 (Mármol, 2009).

#### 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/m<sup>2</sup>.

Para la determinación de los coeficientes de permeabilidad, se utilizó un permeámetro de carga variable (véase Figura 4), permitiendo el flujo de agua a través de los especímenes de concreto permeable. Se realizaron tres mediciones por espécimen, obteniendo un valor promedio del tiempo requerido para el drenaje del agua a través del cilindro de concreto. El coeficiente de permeabilidad se calculó utilizando la ecuación (1):

$$K = \frac{(A_1 L)}{(A_2 T)} * \text{Log} \left( \frac{H_2}{H_1} \right) \quad (1)$$

Donde:

$K$  = Coeficiente de permeabilidad

$A_1$  = Área de la muestra

$A_2$  = Área de la sección transversal

$L$  = Longitud de la muestra

$T$  = Tiempo de percolación

$H_2$  y  $H_1$  = Alturas de agua inicial y final



Figura 4. Permeámetro de carga constante para la obtención del coeficiente de permeabilidad 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 <sup>2</sup> )
0	677.00
2	606.60
3	603.60
5	868.70

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; sin embargo, todas las mezclas evaluadas cumplen con los parámetros establecidos en la norma ACI 522R.

Los resultados obtenidos indican que la adición de fibras de acero en el concreto permeable mantiene los valores de permeabilidad dentro del rango permisible especificado en la normativa. Por lo tanto, se concluye que las mezclas desarrolladas no afectan la principal característica del concreto permeable.

#### 4.3 Análisis de microscopía electrónica de barrido

- 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.

- 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 significativamente su resistencia a la compresión, alcanzando valores de hasta 109 kg/cm<sup>2</sup> 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. (2018).

No obstante, la adición de fibras también impactó la permeabilidad del material. Aunque todas las mezclas cumplieron con los rangos normativos establecidos por ACI 522R (81-730 L/min/m<sup>2</sup>), la mezcla con 5% de fibras presentó una disminución de permeabilidad promedio del 10,8% respecto a la mezcla sin fibras. Esto coincide con investigaciones previas que señalan que la presencia de fibras puede obstruir parcialmente los poros interconectados (Yang & Jiang, 2019).

Además, las imágenes de MEB revelaron que la distribución homogénea de fibras es crucial para mantener un balance adecuado entre resistencia y permeabilidad. Las aglomeraciones observadas en mezclas con 5% (figura 5d) de fibras podrían ser mitigadas mediante técnicas de mezclado más avanzadas o un control más preciso en la dosificación de fibras.

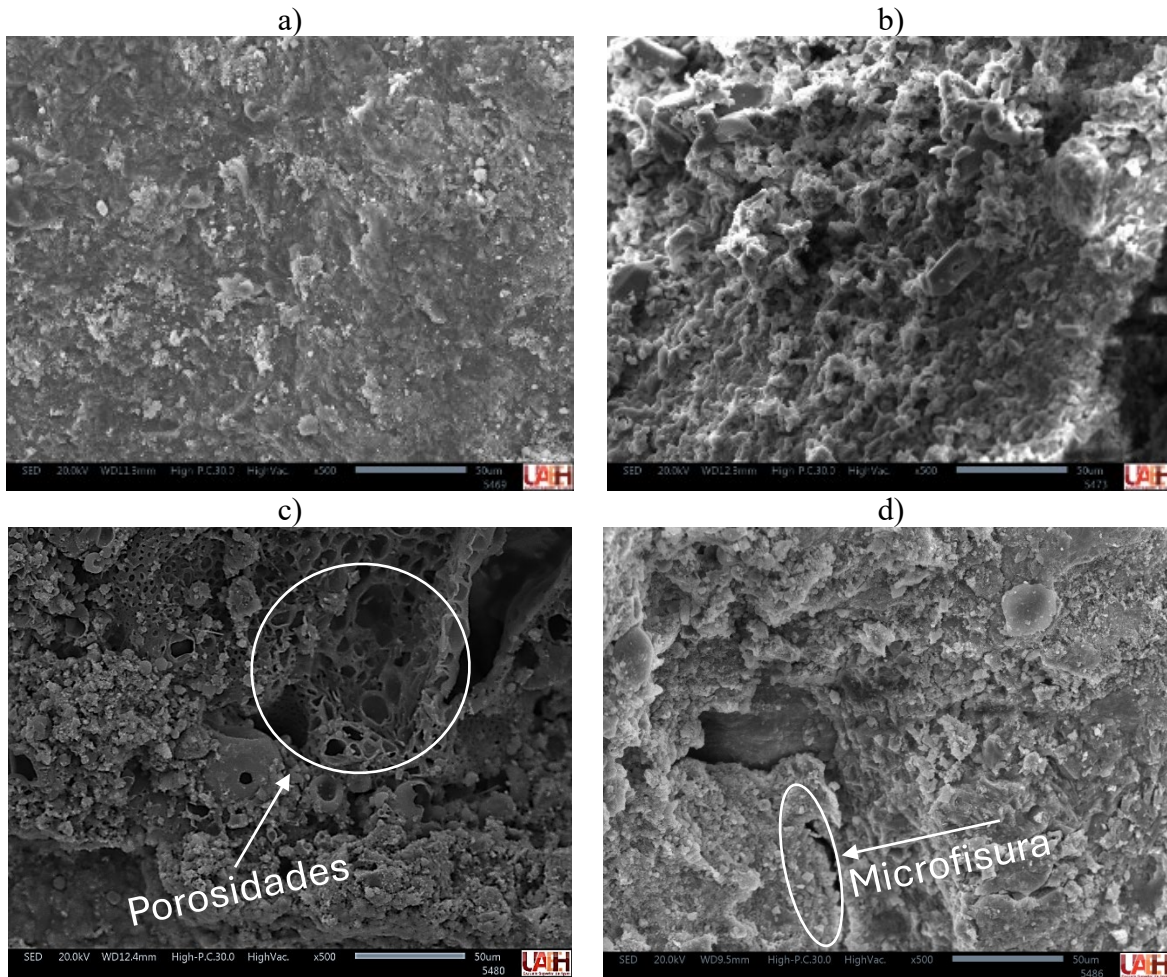


Figura 5: Comparativa de la microestructura entre: a) concreto convencional, b) concreto con 0.2 % fibras de acero, c) concreto con 0.3% fibras de acero y d) concreto con 0.5% fibras de acero.

## 5. CONCLUSIONES

La incorporación de fibras de acero en el concreto permeable mejora significativamente su resistencia a la compresión, alcanzando valores de  $109 \text{ kg/cm}^2$  en la mezcla con 5 % de fibras, lo que representa un incremento respecto a la mezcla sin fibras.

A pesar del aumento en la resistencia mecánica, la permeabilidad del concreto permeable con fibras se mantiene dentro del rango normativo establecido por ACI 522R ( $81\text{-}730 \text{ L/min/m}^2$ ), aunque se observa una ligera reducción en la mezcla con 5 % de fibras debido a la posible obstrucción parcial de los poros interconectados.

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.

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.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Se agradece sinceramente a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) por brindarme el acceso y uso del equipo necesario para llevar a cabo la investigación.

## 7. REFERENCIAS

- Aceros Torices (2023). *Propiedades y especificaciones del acero A-36*.
- ACI Committee 522 (2010). *Report on Pervious Concrete*. American Concrete Institute.
- Aguilar Dipaz, J. (2021). *Efecto de la incorporación de fibras de acero reciclado de neumáticos en las propiedades mecánicas del concreto*. Universidad Continental.
- ASTM (2005). *C39/C39M Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Annual Book of ASTM Standards*.
- Bárceñas, Y. A., Hurtado, J. E. A. (2011). *Ensayos de permeabilidad en materiales de baja permeabilidad compactados*.
- Blas Cano, J., González-de-la-Fuente, A., Volpi-León, V., Correa-Castro, Y. P., Lizárraga-Mendiola, L., Castañeda-Robles, I. E. (2024). *Compendio de investigaciones sobre concreto en estructuras de pavimento rígido reforzadas con fibras de polipropileno*. Aporte Santiaguino, 17, 133–144.
- Cajahuaman Gamarra, H. J. (2023). *Influencia de propiedades del concreto adicionando fibras de acero y escoria de cobre reciclados en pavimento rígido permeable, Lima 2023*. Universidad César Vallejo.
- Cerdán, M. (2016). *Análisis de permeabilidad en concretos porosos*. Revista de Ingeniería Civil, 12, 45–56.
- Coronel Díaz, J. A. (2023). *Influencia de las fibras de acero trefilado de alta calidad en las propiedades del concreto permeable para pavimentos rígidos*. Universidad de Piura.
- González-de-la-Fuente, A., Volpi-León, V., Correa-Castro, Y. P., Lizárraga-Mendiola, L., Castañeda-Robles, I. E. (2024). *Utilización de residuos mineros en concreto permeable como alternativa de construcción sostenible*. Pádi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI.
- Haselbach, L. (2009). *The Engineering Guide to LEED-New Construction: Sustainable Construction for Engineers*. McGraw Hill Professional.
- Huang, Y., Birgisson, B. (2020). *Advancements in the use of fiber-reinforced concrete for sustainable construction*. Journal of Sustainable Materials, 12, 345–359.
- INGIRUM. (2023). *Composición química del acero A-36*.
- Jimenez Pesantes, H. J. (2019). *Evaluación del concreto permeable como una alternativa sostenible para el control de las aguas pluviales en la ciudad de Castilla, provincia Piura y departamento de Piura*.
- Li, V. C. (2019). *Engineered Cementitious Composites (ECC) for sustainable infrastructure systems*. International Journal of Concrete Structures and Materials, 13, 1–12.
- Mármol Salazar, P. C. (2009). *Hormigones con fibras de acero: Características mecánicas*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Mindess, S., Young, J. F., Darwin, D. (2003). *Concrete*. Prentice Hall.
- Patiño, O. (2013). *El concreto permeable: uso y estándares*. Mente & Materia, 4, 22–23.
- 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, W., Du, S., Liu, Y., Zhou, M., Wu, H. (2018). *Mechanical and durability properties of porous asphalt pavement materials reinforced with fibers*. Construction and Building Materials, 183, 49–58.
- Soroushian, P., Bayasi, Z., Mirza, F. (1992). *Reinforced concrete with polypropylene fibres under various curing conditions*. Cement and Concrete Composites, 14, 237–245.
- Yang, J., Jiang, G. (2019). *Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials*. Cement and Concrete Research, 125, 105809.