

Fibras de acero trefilado de alta resistencia en el concreto permeable para infraestructura vial rural

High-strength drawn steel fibers in pervious concrete for rural road infrastructure

Coronel-Díaz, Juan Antonio^{1,2*} ; Aguirre-Camacho, Marco Antonio² ; Coronel-Delgado, José Antonio³ 

¹Universidad Nacional de Jaén, Jaén, Perú

²Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Intercultural “Fabiola Salazar Leguía” de Bagua, Bagua, Perú

³Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca, Perú

Recibido: 05/03/2026 | Aceptado: 26/06/2026 | Publicado: 06/07/2026

Correspondencia*: jcoronel@unibagua.edu.pe

RESUMEN

La infraestructura vial rural del norte peruano enfrenta problemas críticos de drenaje superficial que afectan la conectividad de zonas agropecuarias y el acceso a mercados. El concreto permeable representa una alternativa sostenible; sin embargo, su baja resistencia mecánica limita su aplicación en pavimentos rígidos rurales. El objetivo fue determinar la influencia de las fibras de acero trefilado de alta resistencia (SIKA FIBER CHO 80/60 NB) en las propiedades del concreto permeable para infraestructura vial rural. Se trabajó con agregados de la cantera «Arenera Jaén» y cemento Portland Pacasmayo Ico en dos etapas: selección de mezcla patrón base y adición de fibras en proporciones de 25, 35 y 45 kg/m³. La mezcla patrón registró $f'_c = 256.88 \text{ kg/cm}^2$, $M_r = 37.81 \text{ kg/cm}^2$ y $k = 0.31 \text{ cm/s}$. Con 45 kg/m³ de fibra se obtuvieron incrementos de 21.73% en resistencia a la compresión, 36.93% en módulo de rotura y 13.73% en permeabilidad. La incorporación de fibras de acero trefilado mejora significativamente las propiedades del concreto permeable, siendo su efecto proporcional a la dosis aplicada.

Palabras clave: Concreto ecológico; caminos agropecuarios; conductividad hidráulica; resistencia a la flexión

ABSTRACT

Rural road infrastructure in northern Peru faces critical surface drainage problems that affect connectivity of agricultural areas and market access. Pervious concrete represents a sustainable alternative; however, its low mechanical resistance limits its application in rural rigid pavements. The objective was to determine the influence of high-strength drawn steel fibers (SIKA FIBER CHO 80/60 NB) on the properties of pervious concrete for rural road infrastructure. Aggregates from the «Arenera Jaén» quarry and Pacasmayo Ico Portland cement were used in two stages: base control mix selection and fiber addition at 25, 35 and 45 kg/m³. The control mix recorded $f'_c = 256.88 \text{ kg/cm}^2$, $M_r = 37.81 \text{ kg/cm}^2$ and $k = 0.31 \text{ cm/s}$. With 45 kg/m³ of fiber, increases of 21.73% in compressive strength, 36.93% in modulus of rupture and 13.73% in permeability were obtained. The incorporation of drawn steel fibers significantly improves the properties of pervious concrete, with its effect proportional to the applied dose.

Keywords: Agricultural roads; ecological concrete; flexural strength; hydraulic conductivity

Cómo citar este artículo: Coronel-Díaz, J. A., Aguirre-Camacho, M. A. & Coronel-Delgado, J. A. (2026). Fibras de acero trefilado de alta resistencia en el concreto permeable para infraestructura vial rural. *Revista Científica Dékamu Agropec*, 7(1), 72-91. <https://doi.org/10.55996/dekamuagropec.v7i1.377>

1. INTRODUCCIÓN

La conectividad vial rural es un factor determinante para el desarrollo agropecuario del norte peruano. Los caminos de acceso a zonas de producción agrícola, las vías de penetración hacia comunidades rurales y las plataformas de acopio de productos agropecuarios demandan infraestructura resistente que, a la vez, permita la gestión sostenible del agua pluvial. El pavimento rígido permeable emerge como una solución técnica que integra ambas exigencias, permitiendo la infiltración del agua a través de su superficie porosa mientras soporta cargas vehiculares (American Concrete Institute, 2010).

La ciudad de Jaén, ubicada en la región Cajamarca a 729 m.s.n.m., constituye un nodo articulador del corredor agroproductivo Cajamarca-Amazonas, donde la infraestructura vial rural es vital para la comercialización de productos como el café, el cacao y el arroz. El análisis de datos históricos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI, 2023), correspondientes a 29 años de registro, evidencia precipitaciones de alta intensidad que generan escorrentías sobre las superficies pavimentadas, deteriorando la infraestructura vial rural y limitando el acceso a los mercados agropecuarios (De Abreu et al., 2022). Esta situación se agrava porque la infraestructura convencional impide la infiltración natural del agua y la recarga de acuíferos que abastecen zonas agrícolas de la región.

El concreto permeable también denominado concreto ecológico o poroso, se caracteriza por su estructura porosa interconectada con vacíos que oscilan entre el 15% y el 35%, lo que permite la infiltración del agua, la reducción de la escorrentía superficial y la recarga freática (American Concrete Institute, 2010). Su aplicación en pavimentos rígidos rurales resulta especialmente pertinente en zonas agropecuarias donde la gestión hídrica sostenible es crítica para la productividad agrícola. No obstante, la reducción en la resistencia mecánica inherente a su alta porosidad limita su implementación en vías con tránsito vehicular de carga, como las que conectan zonas de producción agropecuaria con centros de acopio (Guzmán, 2016; Akkaya & Çağatay, 2021). Tang et al. (2022) y Tamimi et al. (2023) documentaron el diseño de mezclas de concreto permeable reforzado con fibras, confirmando la viabilidad técnica de esta solución en pavimentos. En el contexto peruano, los estudios sobre concreto permeable con materiales locales son escasos, y su aplicación en infraestructura vial rural es prácticamente inexistente (Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, 2010).

Una estrategia para superar esta limitación es la incorporación de fibras de acero en la mezcla. Las fibras de acero trellado de alta resistencia (resistencia a la tracción $f_t = 1\,225$ MPa; relación de aspecto $L/d = 80$), conformes a ASTM A820, actúan como refuerzo distribuido tridimensionalmente en la matriz cementante, mejorando la ductilidad, la capacidad de absorción de energía y la resistencia a la fisuración (Li et al., 2023; Altamirano Pérez et al., 2023). Investigaciones recientes en concreto permeable reforzado con fibras metálicas reportan incrementos simultáneos en resistencia a la compresión y módulo de rotura, proporcionales a la relación de aspecto y dosificación de fibra empleada (Lee et al., 2022; Lee et al., 2023). En particular, Koo et al. (2023) demostraron que fibras con relación de aspecto $L/d = 80$ exhiben mayor tenacidad a la fractura respecto a fibras de menor relación de aspecto, sustentando la selección de la fibra SIKA FIBER CHO 80/60 NB en el presente estudio. Guzmán (2016) demostró que la adición de fibras SIKA FIBER CHO 65/35 NB con microsilíce incrementa la resistencia a la flexión del concreto ecológico hasta 5.44 MPa a los 28 días con agregados de Cajamarca. Sin embargo, el uso de fibras de mayor longitud (60 mm) y relación de aspecto ($L/d = 80$), como la SIKA FIBER CHO 80/60 NB, en concreto permeable para infraestructura vial rural no ha sido evaluado con agregados de la región, constituyendo la brecha de conocimiento que el presente estudio aborda.

La hipótesis establece que la incorporación de fibras de acero trefilado de alta resistencia a un concreto permeable incrementará su resistencia mecánica y su permeabilidad, ampliando su viabilidad de aplicación en pavimentos rígidos para infraestructura vial rural. El objetivo general fue determinar la influencia de las fibras de acero trefilado de alta resistencia en las propiedades del concreto permeable, evaluando su aptitud para aplicación en pavimentos rígidos rurales conforme a los requerimientos de la NTE CE.010 Pavimentos Urbanos (MVCS, 2010) y el Manual EG-2013 (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2013).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Diseño y tipo de investigación

La investigación fue de tipo aplicada, con nivel explicativo, enfoque cuantitativo y diseño experimental puro. La unidad de análisis fueron los especímenes de concreto permeables fabricados con y sin adición de fibras de acero trefilado de alta resistencia, evaluados a los 28 días de curado. El tamaño muestral total fue de 81 especímenes: 54 en la Etapa I y 27 en la Etapa II.

2.2. Materiales

Se emplearon agregados de la cantera «Arenera Jaén», ubicada en el sector Shanango, ciudad de Jaén, región Cajamarca, a aproximadamente 10 km del área urbana, tal como se ilustra en la Figura 1. El agregado grueso correspondió al huso granulométrico N° 67 (9.5 mm a 19.0 mm), con peso específico de masa de 2.75 g/cm³, absorción de 1.13%, peso unitario compactado de 1,603 kg/m³, porcentaje de caras fracturadas del 88% (una cara) y 76% (dos caras), y partículas chatas y alargadas del 6.38% y 6.36%, respectivamente, tal como se aprecia en la Figura 2. La caracterización se realizó conforme a NTP 400.012, NTP 400.019, NTP 400.021 y la Tabla 403.A-02 del Manual EG-2013 (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2013). El agregado fino presentó módulo de finura de 3.19, peso específico de 2.67 g/cm³, absorción de 1.21% y peso unitario compactado de 1,844 kg/m³, tal como se muestra en la Figura 3, caracterizado según NTP 400.022. El cemento fue Portland Tipo Ico Extra-Forte Pacasmayo, densidad de 3.0 g/cm³, conforme a NTP 334.009. El agua fue potable conforme a NTP 339.088. Las fibras de acero SIKA FIBER CHO 80/60 NB, ilustradas en la figura 4, presentaron longitud de 60 mm, diámetro de 0.75 mm, relación de aspecto (L/d) de 80 y resistencia a la tracción de 1,225 MPa, conformes a ASTM A 820 (Coronel, 2023).

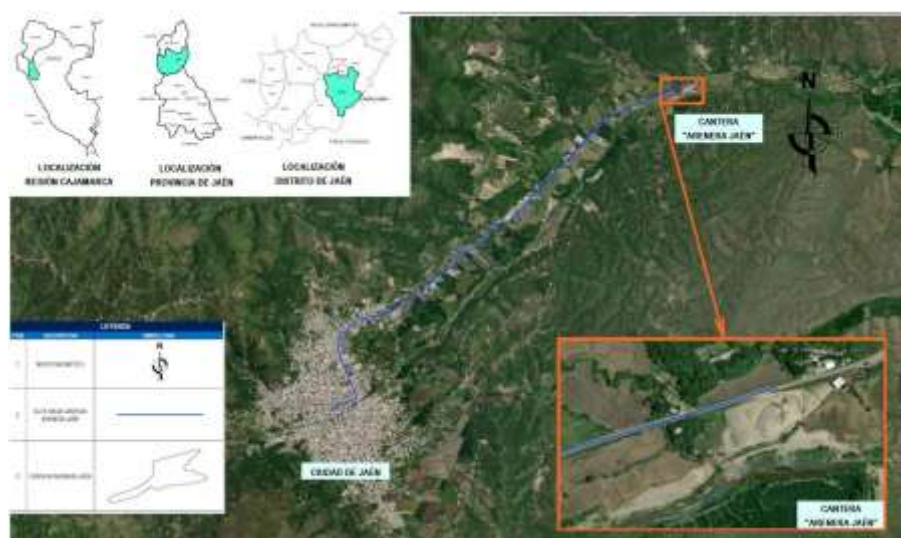


Figura 1. Ubicación de la cantera Arenera Jaén, sector Shanango, ciudad de Jaén, región Cajamarca



Figura 2. Agregado grueso de cantera «Arenera Jaén», huso granulométrico N° 67 (escala 1:1)



Figura 3. Agregado fino de cantera «Arenera Jaén» (escala 1:1)



Figura 4. Fibra de acero trellado de alta resistencia SIKA® FIBER CHO 80/60 NB (escala 1:1)

2.3. Diseño de mezcla — Etapa I

Se formularon seis diseños de mezcla de concreto permeable sin adición de fibras siguiendo la metodología del ACI 211.3R-97 y los lineamientos del ACI 522R-10 (ACI, 1997, 2010). Los especímenes cilíndricos ($\varnothing$ 150 mm $\times$ 300 mm) y prismáticos (150 mm $\times$ 150 mm $\times$ 500 mm) fueron curados en agua a temperatura ambiente durante 28 días. La selección de la mezcla patrón base consideró los requerimientos mínimos de la NTE CE.010 (MVCS, 2010): módulo de rotura $\geq$ 34 kg/cm², resistencia a la compresión $\geq$ 210 kg/cm² y permeabilidad $\geq$ 0.20 cm/s.

2.4. Diseño de mezcla — Etapa II

A partir de la mezcla patrón base seleccionada (I-Ico-AG-AF-3), se formularon tres diseños incorporando fibras de acero trellado en proporciones de 25 kg/m³ (FA25), 35 kg/m³ (FA35) y 45 kg/m³ (FA45), conforme al rango especificado por el fabricante (SIKA Perú S.A., 2022). La dosificación de componentes cementantes y pétreos se mantuvo constante, tal como se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1. Dosificaciones de mezcla de concreto permeable — Etapas I y II

Identificación	Cemento (kg/m ³)	A. Fino (kg/m ³)	A. Grueso (kg/m ³)	Agua (L)	Fibra (kg/m ³)
I-Ico-AG-AF-3 (Patrón)	363.05	236.00	1562.91	105.28	0
II-Ico-AG-AF-3-FA25	363.05	236.00	1562.91	105.28	25
II-Ico-AG-AF-3-FA35	363.05	236.00	1562.91	105.28	35
II-Ico-AG-AF-3-FA45	363.05	236.00	1562.91	105.28	45

Nota. A. Fino = agregado fino; A. Grueso = agregado grueso.

2.5. Ensayos de laboratorio

Para cada diseño de la Etapa II se fabricaron tres especímenes por propiedad evaluada (27 en total). Este tamaño muestral ($n = 3$ por propiedad y tratamiento) se adoptó conforme a la práctica habitual de laboratorio para la caracterización mecánica del concreto y a los lineamientos del ACI 522R-10, asegurando la trazabilidad de los ensayos ejecutados según NTP 339.034 (compresión) y NTP 339.078 (módulo de rotura). Los ensayos se realizaron con equipos calibrados por INDECOPI. La resistencia a la compresión se determinó sobre especímenes cilíndricos conforme a NTP 339.034; el módulo de rotura sobre especímenes prismáticos conforme a NTP 339.078; y la permeabilidad mediante un permeámetro de carga variable construido en el marco de la investigación, referenciado en el ACI 522R-10 (American Concrete Institute, 2010). El equipo está constituido por un cilindro acrílico graduado de 95 mm de diámetro interno (área de tubería de carga $a = 70.88 \text{ cm}^2$) acoplado a una base de tubería de PVC de 4" que aloja la probeta cilíndrica ($\varnothing 95 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$; área de la muestra $A = 70.88 \text{ cm}^2$), un sistema de drenaje de PVC de 3/4" con válvula de control y una estructura metálica de soporte nivelada en ambas direcciones. Las uniones críticas se sellaron con látex para garantizar la estanqueidad, y los especímenes se impermeabilizaron lateralmente con silicona translúcida de 1.5 mm (dureza 55 Shore A) para asegurar flujo vertical saturado unidireccional. El esquema, los componentes y las dimensiones del equipo se presentan en la Figura 5. La conductividad hidráulica se calculó aplicando la ley de Darcy para condición de carga variable, $k = (a \cdot L) / (A \cdot t) \cdot \ln(h_1/h_2)$, donde a es el área de la tubería de carga (70.88 cm^2), L la longitud de la probeta (15 cm), A el área de la sección de la muestra (70.88 cm^2), t el tiempo de descenso (s) y h_1 , h_2 las cargas hidráulicas inicial (29 cm) y final (7 cm). Dado que las características geométricas del equipo son constantes ($a = A$; L y cargas fijas), el término geométrico se consolidó en una constante propia del instrumento, $C = (a \cdot L / A) \cdot \ln(h_1/h_2) = 15 \cdot \ln(29/7) = 21.32 \text{ cm}$, reduciendo la ecuación operativa a $k = C/t = 21.32/t \text{ [cm/s]}$, donde t es el tiempo de descenso del nivel de agua de 290 mm a 70 mm sobre la muestra. La constante $C = 21.32 \text{ cm}$ constituye la ecuación de calibración específica del permeámetro construido, derivada analíticamente de sus dimensiones medidas. La validación del instrumento se sustenta en la trazabilidad analítica de dicha ecuación: al derivarse la constante C directamente de la geometría medida del equipo, el coeficiente de permeabilidad resulta independiente de calibraciones empíricas externas. No fue posible la comparación directa con el prototipo original de Neithalath por su disponibilidad restringida; no obstante, la concordancia entre el modelo de flujo de Darcy y la geometría del dispositivo, junto con la reproducibilidad de las mediciones (coeficiente de variación inferior al 0.2 % entre réplicas), respalda la fiabilidad del equipo. La Figura 6 presenta la curva de calibración $k = C/t$, que delimita el umbral normativo mínimo de 0.20 cm/s (NTE CE.010) entre las condiciones de concreto permeable y no permeable.

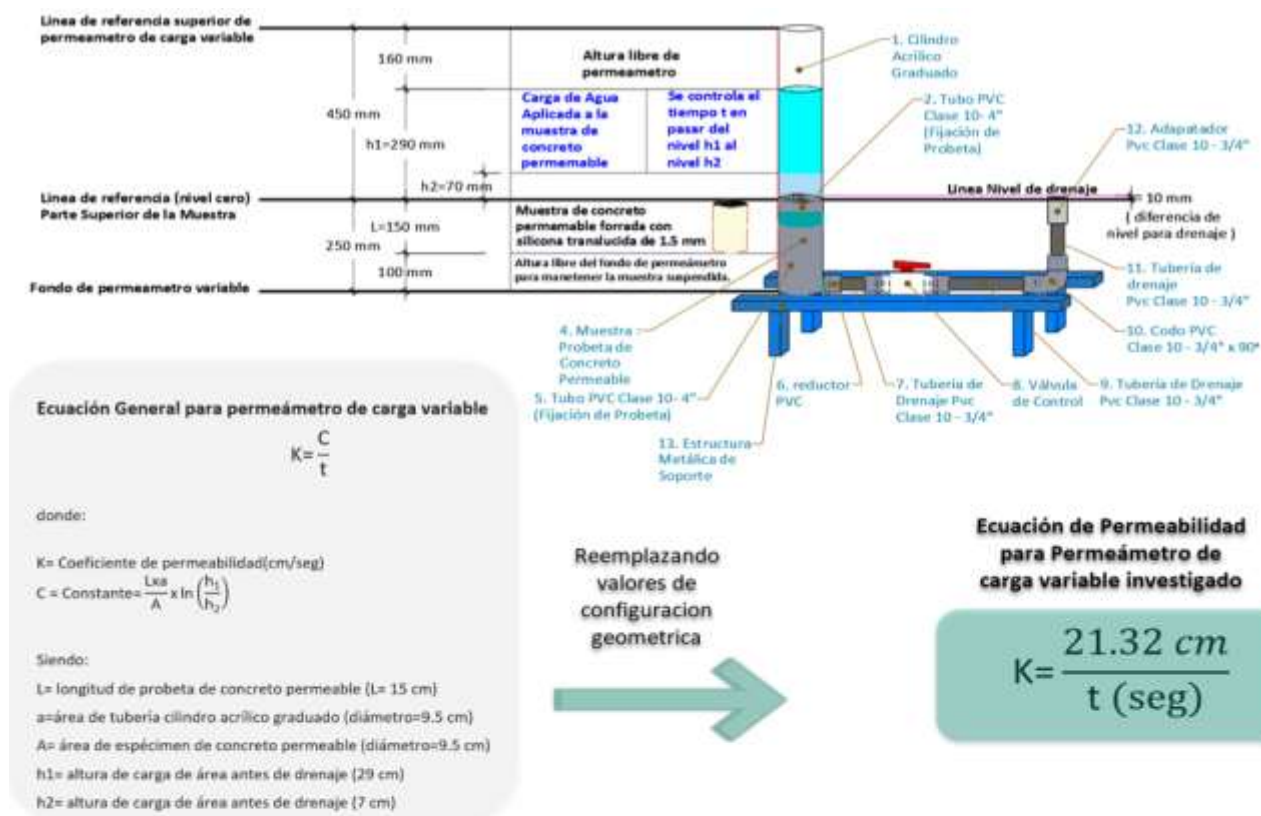


Figura 5. Permeámetro de carga variable: (a) esquema, componentes y configuración geométrica con la ecuación de calibración derivada ($k = C/t$; $C = 21.32 \text{ cm}$); (b) equipo construido durante el ensayo de permeabilidad

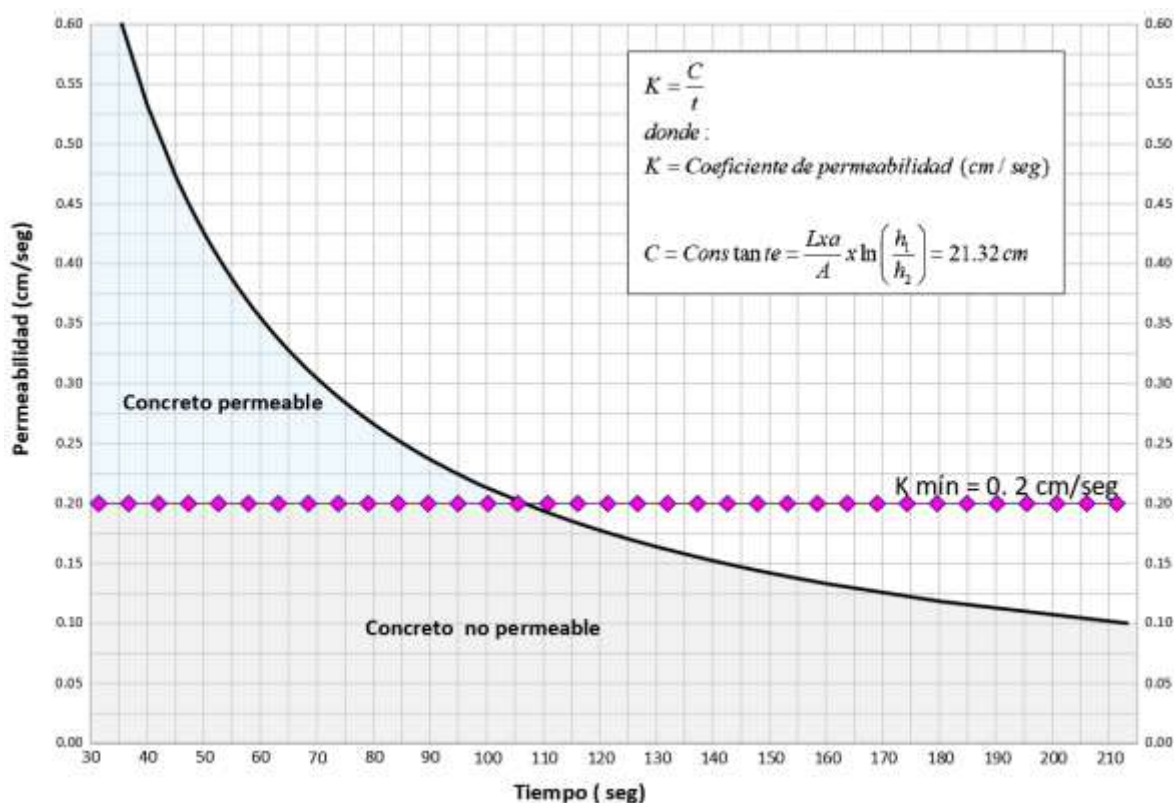


Figura 6. Curva de calibración del permeámetro de carga variable ($k = C/t$; $C = 21.32 \text{ cm}$), con el umbral normativo mínimo de 0.20 cm/s

2.6. Análisis estadístico

Los datos se procesaron mediante estadística descriptiva (media aritmética y desviación estándar, $n = 3$ por propiedad y tratamiento) e inferencial. La verificación de los supuestos paramétricos se realizó con la prueba de Shapiro-Wilk para la normalidad de los residuos y la prueba de Levene para la homogeneidad de varianzas ($\alpha = 0.05$). Para evaluar el efecto de la dosificación de fibra sobre la resistencia a la compresión (f'_c), el módulo de rotura (M_r) y la permeabilidad (k) se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía, complementado con la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis como verificación de robustez. Las diferencias entre pares de dosificaciones se identificaron mediante la prueba post-hoc de Tukey HSD ($\alpha = 0.05$) y el tamaño del efecto se cuantificó mediante el estadístico eta cuadrado (η^2). El procesamiento estadístico se efectuó con el software R versión 4.3 e IBM SPSS Statistics versión 27, con un nivel de significancia del 5%.

3. RESULTADOS

3.1. Selección de la mezcla patrón base — Etapa I

Los seis diseños evaluados en la Etapa I presentaron resistencias a la compresión entre 194.91 y 287.65 kg/cm^2 , módulos de rotura entre 22.72 y 39.04 kg/cm^2 , y permeabilidades entre 0.13 y 0.45 cm/s . Los valores numéricos de las tres propiedades para los seis diseños, junto con su cumplimiento de los criterios normativos, se detallan en la Tabla 2. La Figura 7 muestra las propiedades de todos los diseños con sus valores mínimos normativos.

Tabla 2. Propiedades mecánicas e hidráulicas de los seis diseños evaluados — Etapa I

Diseño de mezcla	f'_c (kg/cm ²)	M_r (kg/cm ²)	k (cm/s)	Cumplimiento NTE CE.010
I-Ico-AG-AF-5	194.91 ± 7.95	22.72 ± 3.91	0.445 ± 0.001	No (f'_c , M_r)
I-Ico-AG-AF-4	216.21 ± 2.86	25.91 ± 4.35	0.403 ± 0.001	No (M_r)

Diseño de mezcla	f'c (kg/cm²)	Mr (kg/cm²)	k (cm/s)	Cumplimiento NTE CE.010
I-Ico-AG-AF-1	227.84 ± 6.42	31.32 ± 4.00	0.344 ± 0.001	No (Mr)
I-Ico-AG-AF-3 (Patrón)	256.88 ± 2.57	37.81 ± 3.59	0.307 ± 0.001	Sí (cumple los 3)
I-Ico-AG-AF-6	273.24 ± 3.19	38.56 ± 5.88	0.195 ± 0.001	No (k)
I-Ico-AG-AF-2	287.65 ± 7.18	39.04 ± 2.37	0.128 ± 0.001	No (k)
Mínimo normativo	≥ 210	≥ 34	≥ 0.20	—

Nota. Valores expresados como media ± desviación estándar (n = 3). El diseño I-Ico-AG-AF-3 fue el único que satisfizo simultáneamente los tres criterios mínimos de la NTE CE.010 (MVCS, 2010): $f'c \geq 210$ kg/cm², $Mr \geq 34$ kg/cm² y $k \geq 0.20$ cm/s. Se observa la relación inversa característica entre resistencia mecánica y permeabilidad: los diseños de mayor $f'c$ (AF-6, AF-2) incumplen el mínimo de permeabilidad, mientras que los de mayor k (AF-5, AF-4) incumplen el módulo de rotura. $f'c$ = resistencia a la compresión; Mr = módulo de rotura; k = permeabilidad.

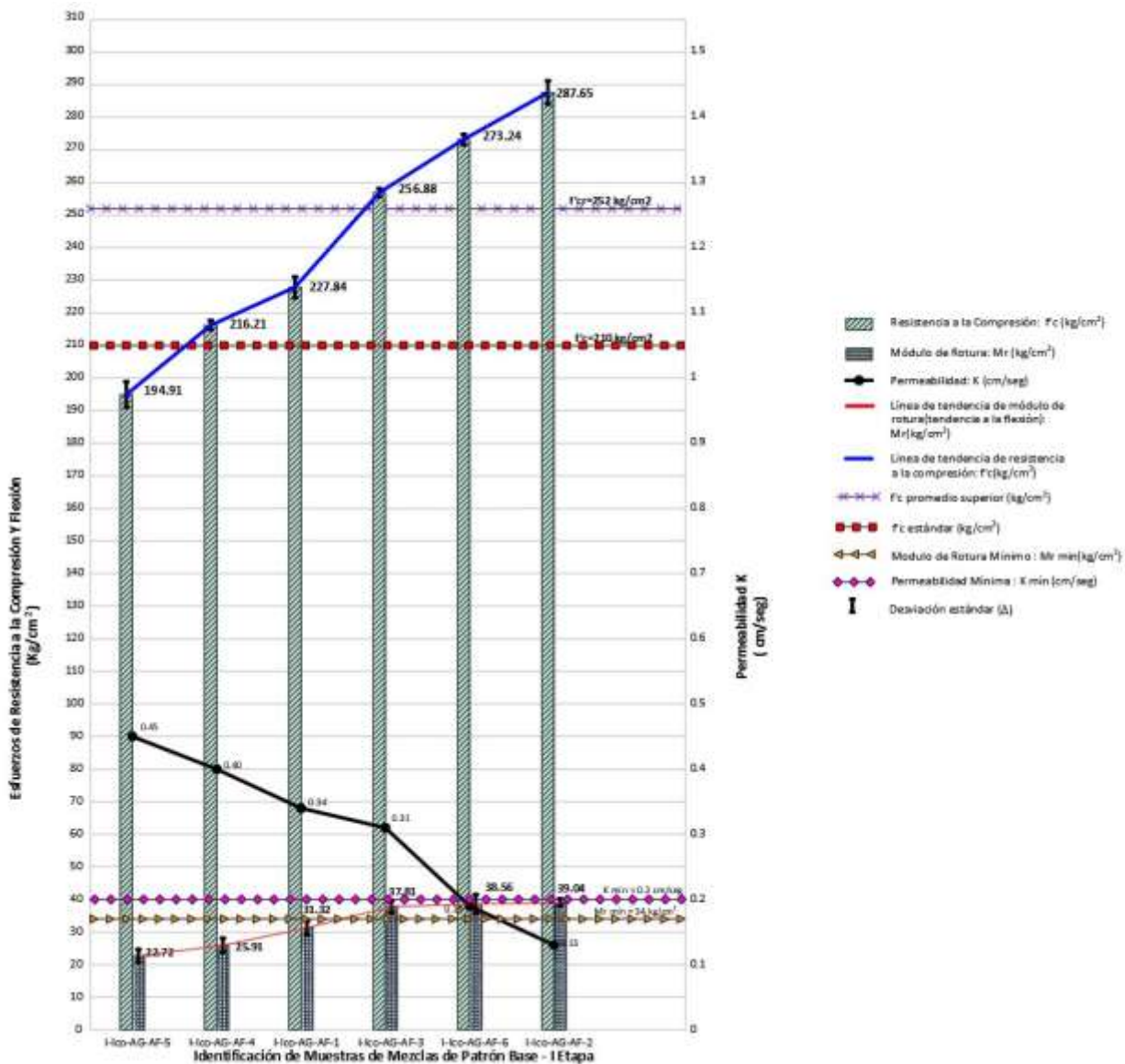


Figura 7. Propiedades mecánicas y de permeabilidad de los seis diseños de concreto permeable — Etapa I. La mezcla I-Ico-AG-AF-3 fue la única que cumplió simultáneamente los tres criterios normativos mínimos, registrando $f'c = 256.88$ kg/cm², $Mr = 37.81$ kg/cm² y $k = 0.31$ cm/s, superando los valores mínimos de la NTE CE.010 (MVCS, 2010). La Figura 8 detalla estas propiedades.

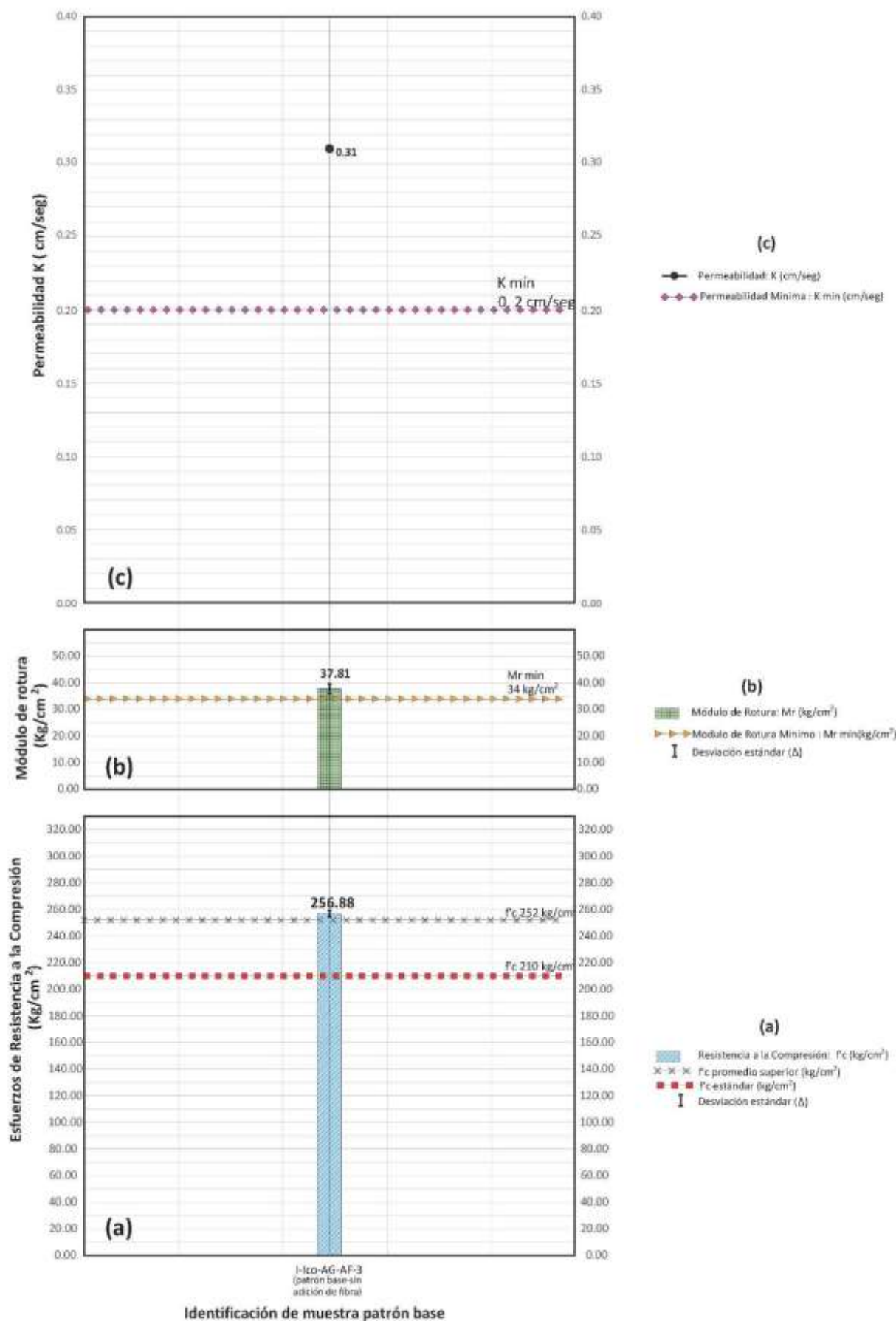


Figura 8. Propiedades de la mezcla patrón base I-Ico-AG-AF-3 con valores mínimos normativos

3.2. Propiedades con adición de fibras — Etapa II

La incorporación de fibras produjo incrementos sistemáticos en las tres propiedades evaluadas. Los resultados consolidados se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Resultados de propiedades mecánicas e hidráulicas — Etapa II

Diseño de mezcla	Fibra (kg/m ³)	f _c (kg/cm ²)	Var. f _c (%)	Mr (kg/cm ²)	Var. Mr (%)	k (cm/s)	Var. k (%)
I-Ico-AG-AF-3 (Patrón)	0	256.88	—	37.81	—	0.31	—
II-Ico-AG-AF-3-FA25	25	287.19	+11.80	48.91	+29.36	0.33	+7.64
II-Ico-AG-AF-3-FA35	35	299.96	+16.77	50.98	+34.82	0.34	+10.61
II-Ico-AG-AF-3-FA45	45	312.70	+21.73	51.77	+36.93	0.35	+13.73

Nota. f_c = resistencia a la compresión; Mr = módulo de rotura; k = permeabilidad; Var. = variación porcentual respecto al patrón base. Valores expresados como media ± desviación estándar (n = 3): f_c = 256.88 ± 2.57^a, 287.19 ± 4.49^b, 299.96 ± 2.39^c y 312.70 ± 3.07^d kg/cm²; Mr = 37.81 ± 3.59^a, 48.91 ± 4.57^b, 50.98 ± 1.83^b y 51.77 ± 1.54^b kg/cm²; k = 0.3065 ± 0.0005^a, 0.3303 ± 0.0006^b, 0.3427 ± 0.0006^c y 0.3489 ± 0.0006^d cm/s, para el patrón, FA25, FA35 y FA45, respectivamente. Letras distintas (^{a b c d}) indican diferencias estadísticamente significativas entre dosificaciones según la prueba de Tukey HSD (p < 0.05)

El análisis de varianza confirmó que la dosificación de fibra ejerció un efecto estadísticamente significativo sobre las tres propiedades evaluadas: resistencia a la compresión [F (3,8) = 163.94; p < 0.001; η² = 0.984], módulo de rotura [F (3,8) = 12.78; p = 0.002; η² = 0.827] y permeabilidad [F(3,8) = 3136.26; p < 0.001; η² = 0.999]. Los valores de η² superiores a 0.82 indican que la dosificación de fibra explica más del 82 % de la variabilidad observada en cada propiedad. La prueba de Kruskal-Wallis corroboró estos resultados (f_c y k: p = 0.016; Mr: p = 0.089), confirmando la robustez del hallazgo pese al tamaño muestral reducido. Los resultados del ANOVA se resumen en la Tabla 4.

La prueba post-hoc de Tukey HSD reveló que, para la resistencia a la compresión y la permeabilidad, todas las dosificaciones difirieron significativamente entre sí (p < 0.05), evidenciando un efecto dosis-dependiente continuo. En contraste, para el módulo de rotura, las tres dosificaciones con fibra superaron significativamente al patrón (p < 0.05), pero no se hallaron diferencias significativas entre FA25, FA35 y FA45 (p > 0.69). Este resultado sustenta estadísticamente el comportamiento asintótico del módulo de rotura y respalda la selección de 35 kg/m³ como dosificación óptima desde la perspectiva costo-beneficio.

Tabla 4. Análisis de varianza (ANOVA) de una vía para las propiedades evaluadas — Etapa II

Propiedad	gl entre	gl intra	F	p	η ²	Sig.
Resistencia a la compresión (f _c)	3	8	163.94	< 0.001	0.984	**
Módulo de rotura (Mr)	3	8	12.78	0.002	0.827	**
Permeabilidad (k)	3	8	3136.26	< 0.001	0.999	**

Nota. gl = grados de libertad; η² = eta cuadrado (tamaño del efecto). ** p < 0.01

La resistencia a la compresión incrementó progresivamente: FA25 alcanzó 287.19 kg/cm² (+11.80%), FA35 registró 299.96 kg/cm² (+16.77%) y FA45 obtuvo 312.70 kg/cm² (+21.73%), con desviaciones estándar de 4.49, 2.39 y 3.07 kg/cm², respectivamente, tal como se ilustra en la Figura 9.

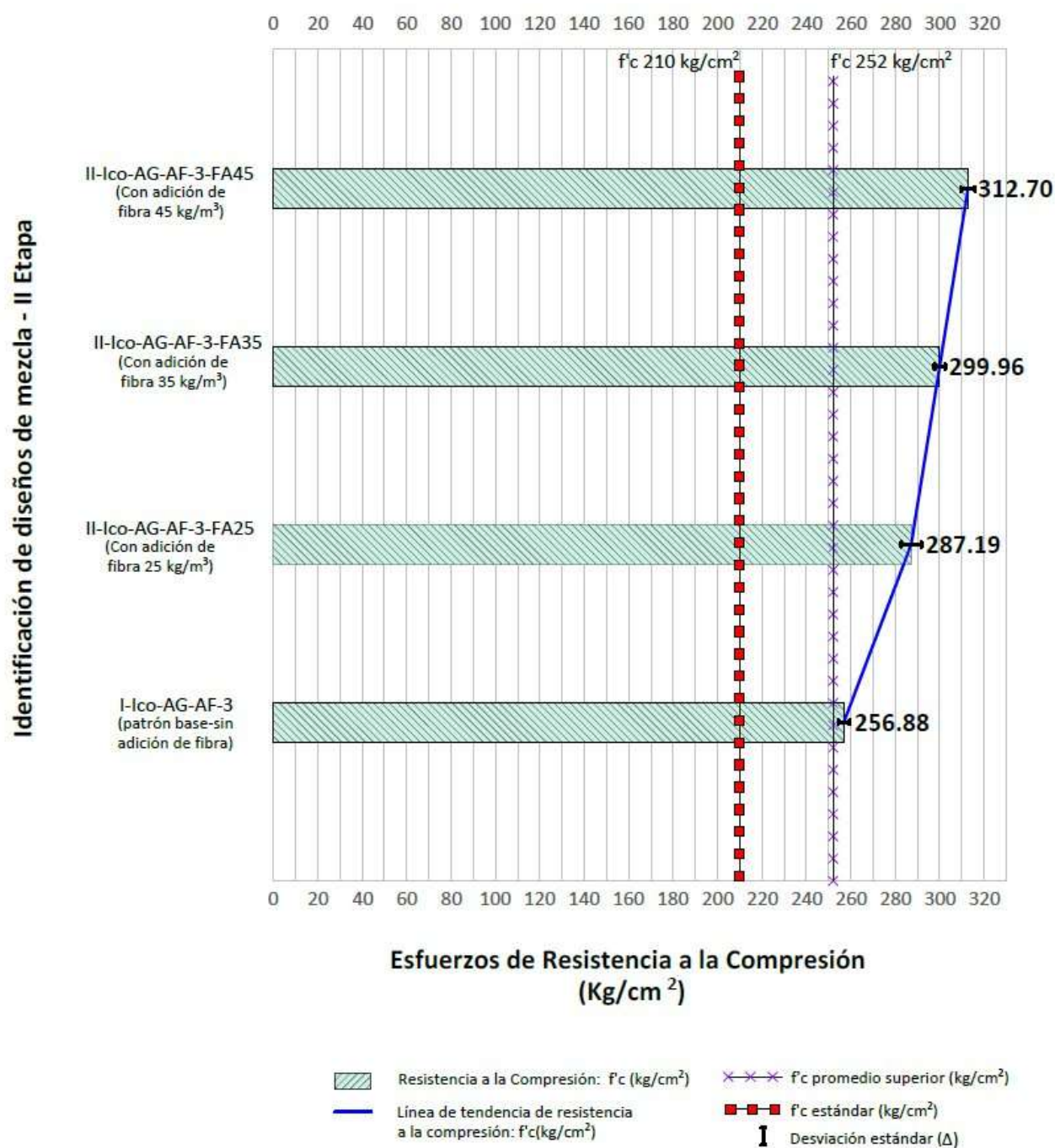


Figura 9. Resistencia a la compresión a 28 días de los diseños con adición de fibras — Etapa II

La figura 10 ilustra la textura superficial de los especímenes cilíndricos, evidenciando el efecto de la distribución tridimensional de las fibras sobre la cohesión de la matriz cementante respecto al patrón base.



Figura 10. Textura de especímenes cilíndricos — Etapa II: (a) sin fibras, (b) con fibras, (c) proceso de llenado

El módulo de rotura presentó los mayores incrementos relativos: FA25 alcanzó $M_r = 48.91 \text{ kg/cm}^2$ (+29.36%), FA35 registró $M_r = 50.98 \text{ kg/cm}^2$ (+34.82%) y FA45 obtuvo $M_r = 51.77 \text{ kg/cm}^2$ (+36.93%), evidenciando comportamiento asintótico a partir de los 35 kg/m^3 , tal como se muestra en la figura 11.

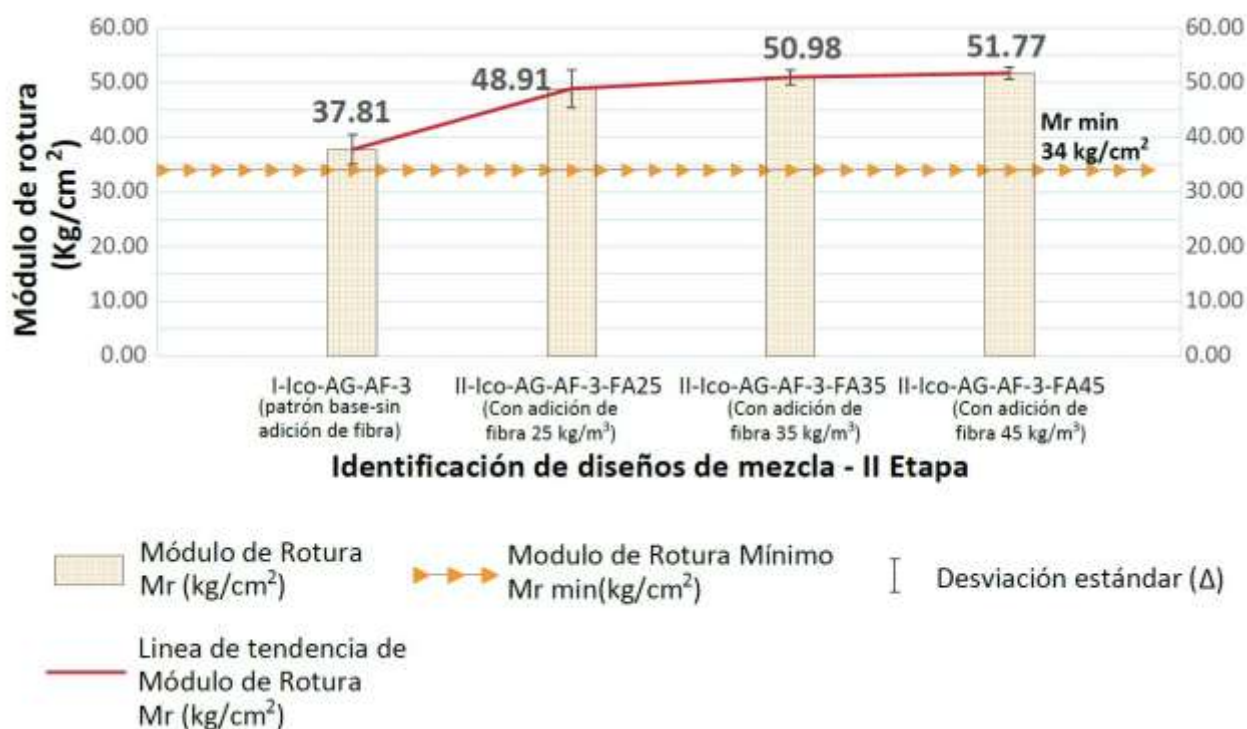


Figura 11. Módulo de rotura a 28 días de los diseños con adición de fibras — Etapa II

La figura 12 ilustra la textura superficial de los especímenes prismáticos, donde se aprecia la reducción en la apertura de fisuras en la zona de falla de los diseños con fibra respecto al patrón base.

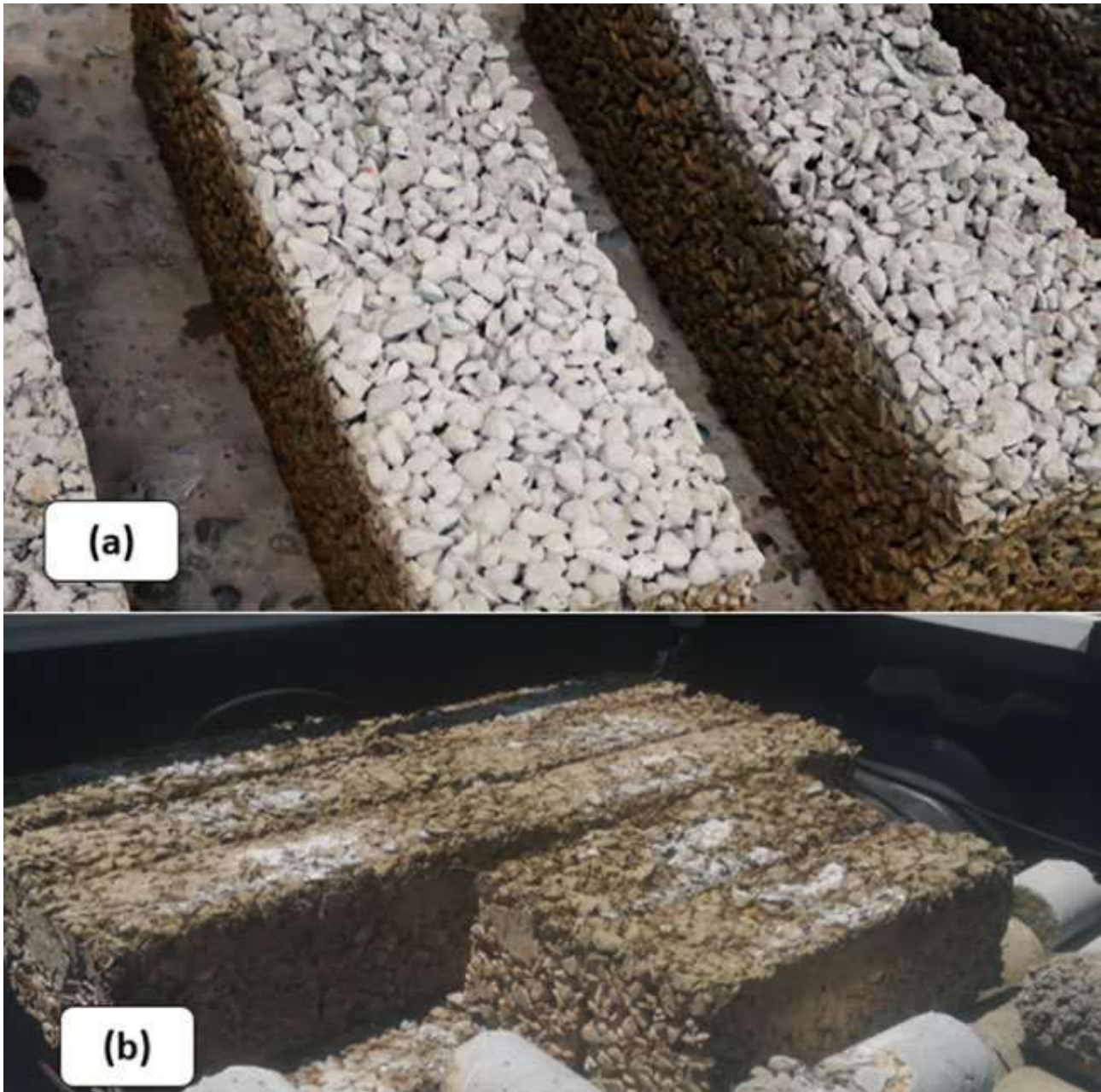


Figura 12. Textura de especímenes prismáticos — Etapa II: (a) sin fibras, (b) con fibras

La permeabilidad mostró incrementos consistentes: $k = 0.33 \text{ cm/s}$ (+7.64%) para FA25, $k = 0.34 \text{ cm/s}$ (+10.61%) para FA35 y $k = 0.35 \text{ cm/s}$ (+13.73%) para FA45, superando todos los diseños el mínimo normativo de 0.20 cm/s , tal como se presenta en la Figura 13.

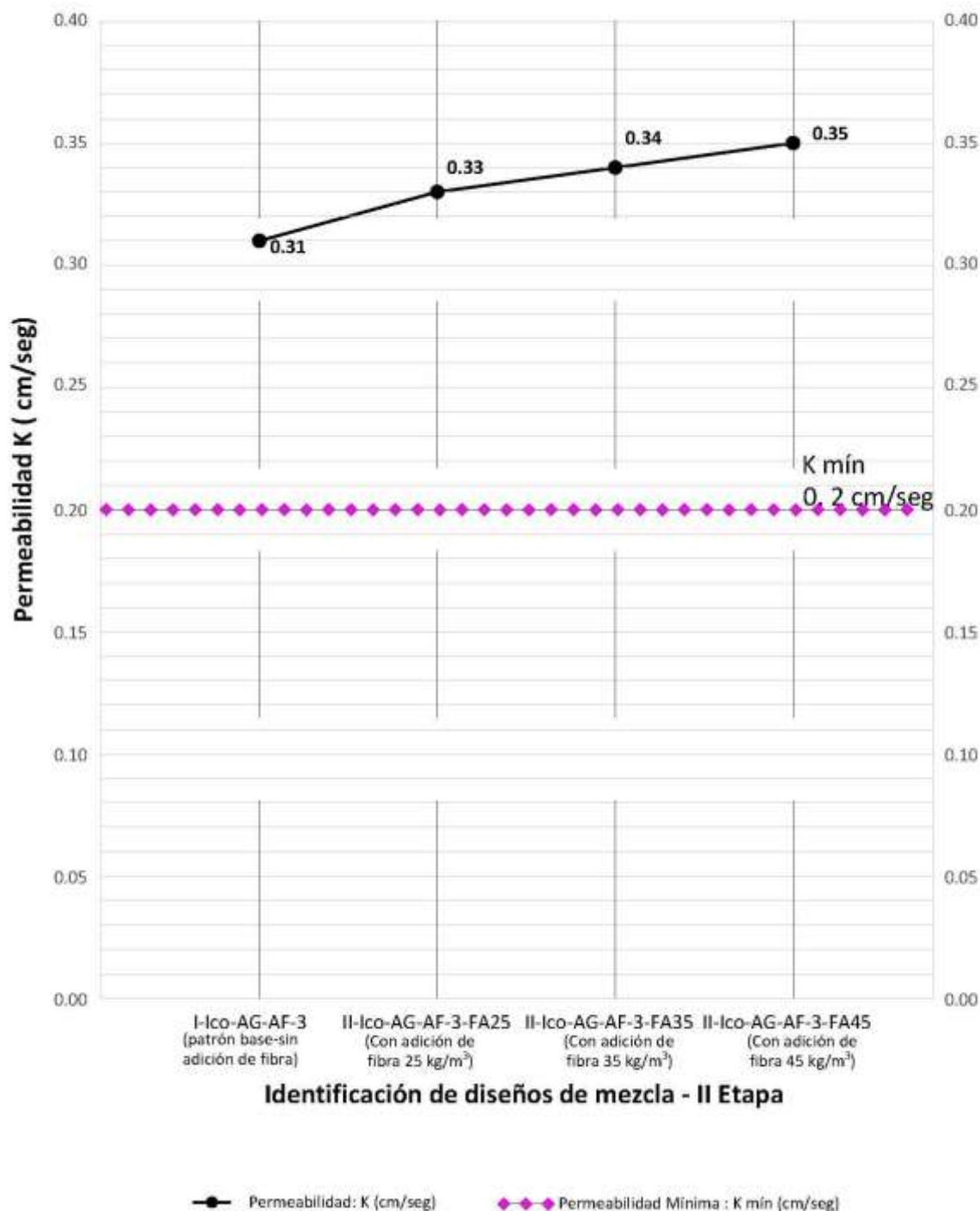


Figura 13. Permeabilidad a 28 días de los diseños con adición de fibras — Etapa II

El análisis microestructural comparativo entre el concreto patrón y los diseños con fibras reveló que la incorporación de fibras de acero genera microespacios adicionales entre las partículas de agregado, impidiendo el sellado parcial de la porosidad por la pasta cementante, tal como se observa en la Figura 14. En los diseños FA25, FA35 y FA45 se aprecia mayor interconexión de la red de canales de flujo respecto al patrón base, explicando mecánicamente los incrementos de conductividad hidráulica registrados en la tabla 3. La Figura 15 ilustra la microestructura del concreto permeable sin incorporación de fibras, evidenciando el sellado parcial de los vacíos por la pasta cementante. La Figura 16 muestra la microestructura con incorporación de fibras, donde las fibras actúan como separadores locales que preservan la continuidad de la red porosa.

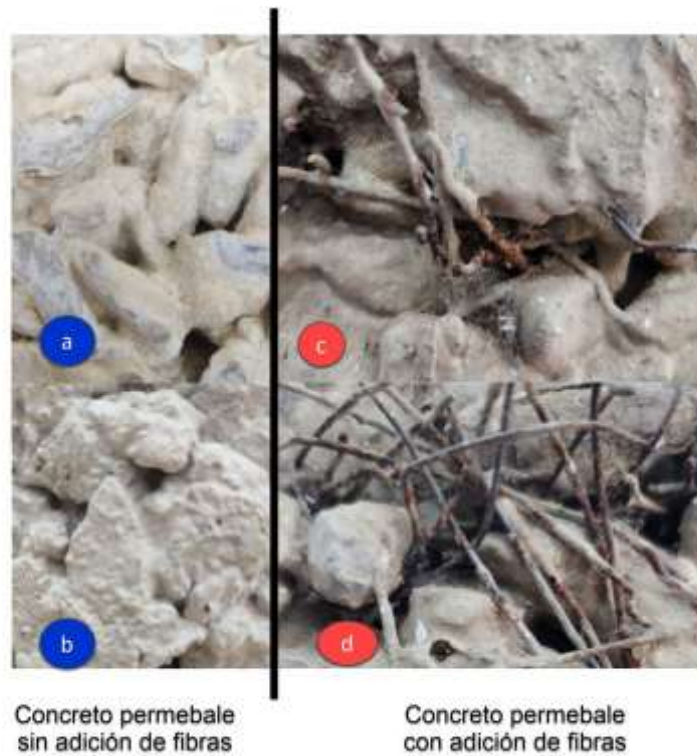


Figura 14. Distribución de vacíos en concreto permeable: (a)(b) sin fibras; (c)(d) con fibras mostrando microespacios adicionales

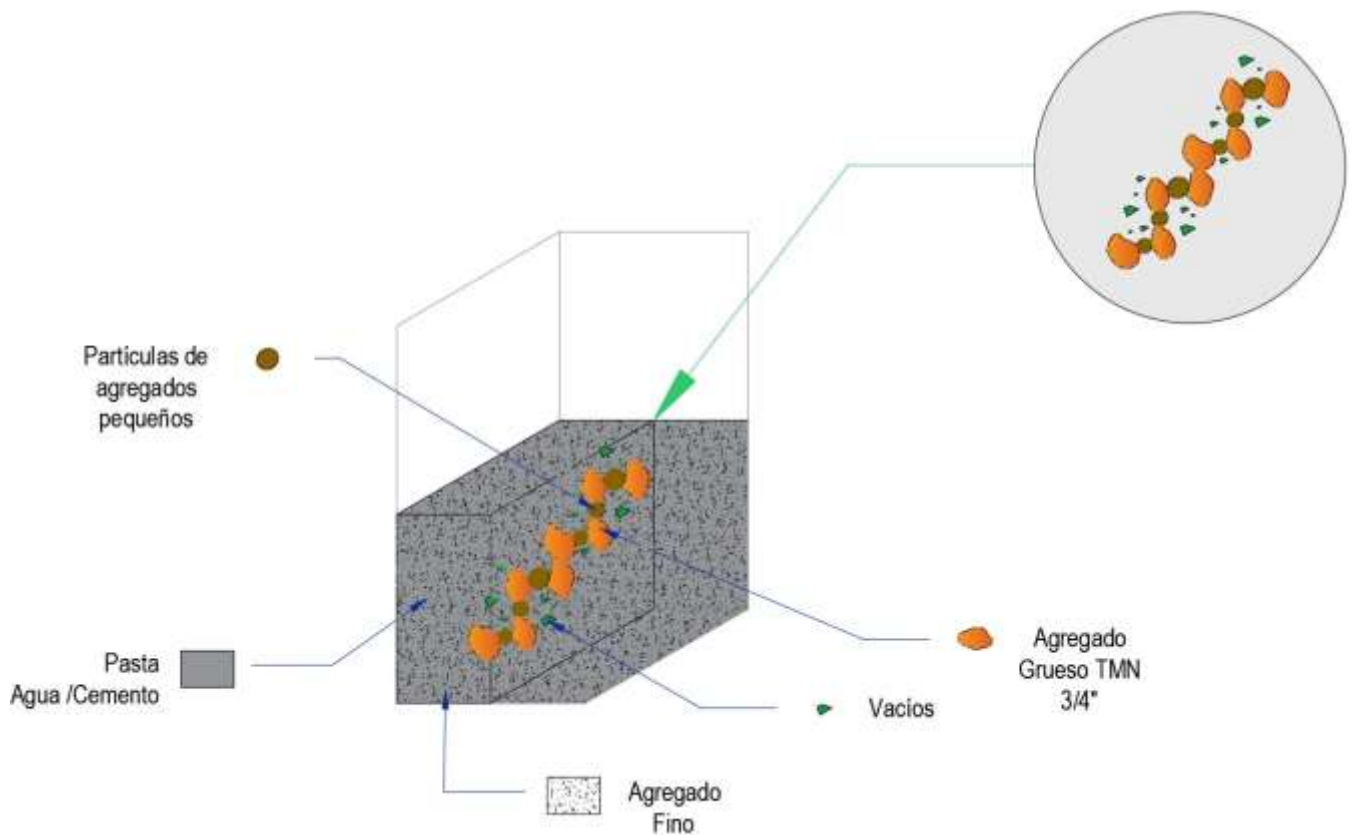


Figura 15. Microestructura del concreto permeable sin incorporación de fibras

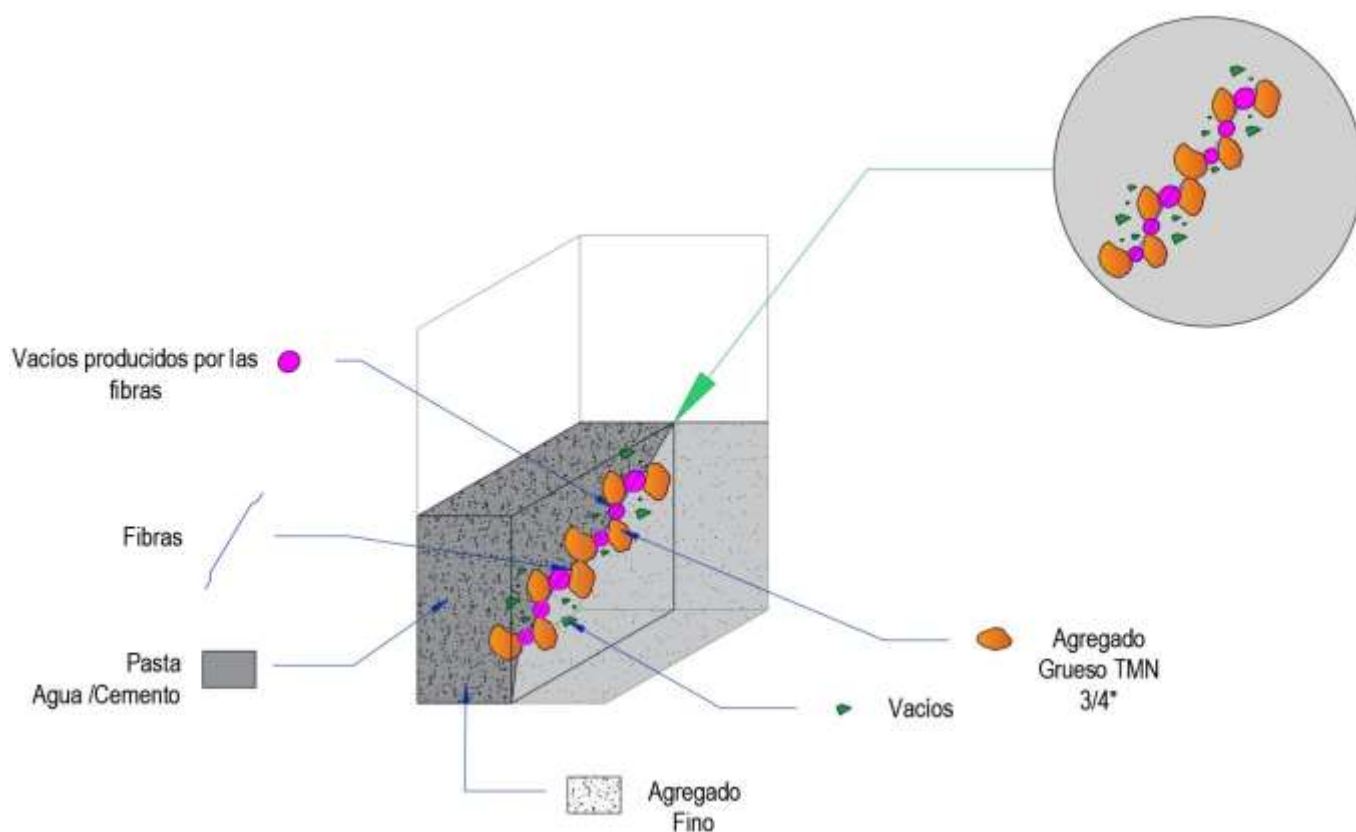


Figura 16. Microestructura del concreto permeable con incorporación de fibras

4. DISCUSIÓN

Los resultados del presente estudio son consistentes con investigaciones recientes sobre concreto permeable reforzado con fibras de acero. Lee et al. (2024) y Lee et al. (2023) reportaron incrementos en resistencia a la compresión y módulo de rotura proporcionales a la dosificación de fibra metálica empleada, hallazgos concordantes con los obtenidos en los diseños FA25, FA35 y FA45. Guzmán (2016), empleando fibras SIKA FIBER CHO 65/35 NB con microsilíce, obtuvo $M_r = 5.44$ MPa (55.47 kg/cm²), superior al alcanzado por FA45 (51.77 kg/cm²); la diferencia es atribuible a la acción sinérgica del microsilíce. No obstante, el presente estudio demuestra que la fibra SIKA FIBER CHO 80/60 NB, de mayor relación de aspecto ($L/d = 80$) y mayor longitud (60 mm) disponible en el mercado peruano conforme a ASTM A 820 (SIKA Perú S.A., 2022), alcanza los requerimientos normativos de la NTE CE.010 (MVCS, 2010) sin necesidad de aditivos complementarios, lo que representa una ventaja técnica y económica significativa para su implementación en infraestructura vial rural.

La mejora en ductilidad y el control de la propagación de fisuras observados en los especímenes del presente estudio son consistentes con los mecanismos descritos por Li et al. (2023), quienes señalan que las fibras metálicas actúan como puentes de transferencia de carga en la matriz cementante, incrementando la tenacidad a la fractura. Este comportamiento es también documentado por Yun et al. (2023), quienes evaluaron comparativamente la tenacidad a flexión de vigas de concreto reforzado con fibras de acero, confirmando el incremento en capacidad de absorción de energía con el aumento de la dosificación.

El comportamiento asintótico del módulo de rotura a partir de los 35 kg/m³ es atribuible a la saturación de la matriz cementante: más allá de una dosificación crítica, las fibras adicionales tienden a aglutinarse, reduciendo su distribución homogénea (Guzmán, 2016). La diferencia entre FA35 y FA45 es de apenas 0.79 kg/cm², frente a 2.07 kg/cm² entre FA25 y FA35, lo que sitúa la

dosificación óptima en torno a 35 kg/m^3 desde la perspectiva de eficiencia costo-beneficio. Koo et al. (2023) corroboran que para fibras con relación de aspecto $L/d = 80$, el incremento de tenacidad tiende a estabilizarse a partir de dosificaciones superiores a 35 kg/m^3 , resultado consistente con el comportamiento asintótico observado en el presente estudio.

El incremento de permeabilidad con la adición de fibras, documentado microestructuralmente en la sección de resultados, contrasta con lo reportado por Bright Singh & Madasamy (2022); Wu et al. (2022), quienes registraron decrementos de conductividad hidráulica en concreto permeable reforzado con fibras de basalto y carbono. La diferencia es atribuible al efecto físico de separación de partículas que ejercen las fibras metálicas, que preserva la interconexión porosa frente a la densificación de pasta que ocurre al incorporar otros tipos de materiales de refuerzo. Akkaya & Çağatay (2021) señalaron además que la viabilidad del concreto permeable en vías de carga depende del equilibrio entre resistencia mecánica y conductividad hidráulica, equilibrio que los diseños FA35 y FA45 demuestran alcanzar con materiales locales de la región Cajamarca.

Desde la perspectiva de la ingeniería aplicada al desarrollo rural, los resultados tienen implicancias directas para la infraestructura vial del corredor agroproductivo Cajamarca-Amazonas. El diseño FA45, con $f'c = 312.70 \text{ kg/cm}^2$, $Mr = 51.77 \text{ kg/cm}^2$ y $k = 0.35 \text{ cm/s}$, resulta técnicamente apto para pavimentos rígidos en caminos de acceso a zonas de producción de café, cacao y arroz, donde la gestión de escorrentías pluviales es crítica para la conservación de la vía y la conectividad con los mercados de acopio. La viabilidad técnica demostrada con materiales locales de Jaén sienta las bases para la implementación de esta tecnología en proyectos de infraestructura rural del norte peruano

CONCLUSIONES

La mezcla patrón base I-Ico-AG-AF-3 elaborada con materiales locales de Jaén alcanzó $f'c = 256.88 \text{ kg/cm}^2$, $Mr = 37.81 \text{ kg/cm}^2$ y $k = 0.31 \text{ cm/s}$, cumpliendo los requisitos mínimos de la NTE CE.010 para pavimentos rígidos permeables, lo que confirma la viabilidad técnica del concreto permeable con materiales del corredor agroproductivo Cajamarca-Amazonas.

La incorporación de fibras SIKA FIBER CHO 80/60 NB en proporciones de 25, 35 y 45 kg/m^3 mejoró significativamente las tres propiedades evaluadas respecto al patrón base: resistencia a la compresión hasta +21.73%, módulo de rotura hasta +36.93% y permeabilidad hasta +13.73%, manteniéndose el cumplimiento normativo en todos los casos y ampliando la aplicabilidad del concreto permeable en infraestructura vial rural de la región norte del Perú.

El análisis comparativo evidencia que la dosificación óptima de fibras se sitúa en 35 kg/m^3 , punto a partir del cual la tasa de mejora del módulo de rotura disminuye significativamente. Este hallazgo es clave para optimizar la relación costo-beneficio en el diseño de pavimentos rígidos permeables aplicados a caminos rurales agropecuarios en la región Cajamarca.

Entre las limitaciones del estudio se reconoce que el tamaño muestral de tres especímenes por propiedad y tratamiento, si bien cumple el mínimo de la práctica habitual de laboratorio y los lineamientos del ACI 522R-10, confiere una potencia estadística limitada. No obstante, la magnitud de los efectos observados ($\eta^2 > 0.82$) y la concordancia entre las pruebas paramétricas (ANOVA, Tukey HSD) y no paramétricas (Kruskal-Wallis) respaldan la solidez de las conclusiones. Se recomienda que investigaciones futuras amplíen el número de réplicas para robustecer la inferencia estadística y evaluar el desempeño a largo plazo bajo cargas cíclicas de tránsito.

FINANCIAMIENTO

Los autores no recibieron patrocinio externo. El estudio fue financiado con recursos propios de los investigadores.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe ningún tipo de conflicto de interés relacionado con la materia del presente trabajo.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: Coronel-Díaz, J. A., Aguirre-Camacho, M. A.

Curación de datos: Coronel-Díaz, J. A., Coronel-Delgado, J. A.

Análisis formal: Coronel-Díaz, J. A., Coronel-Delgado, J. A.

Investigación: Coronel-Díaz, J. A., Coronel-Delgado, J. A.

Metodología: Coronel-Díaz, J. A., Aguirre-Camacho, M. A.

Supervisión: Aguirre-Camacho, M.A., Coronel-Delgado, J. A.

Redacción – borrador original: Coronel-Díaz, J. A., Aguirre-Camacho, M. A., Coronel-Delgado, J. A.

Redacción – revisión y edición: Coronel-Díaz, J. A., Aguirre-Camacho, M. A.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akkaya, A., & Çağatay, İ. H. (2021). Experimental investigation of the use of pervious concrete on high volume roads. *Construction and Building Materials*, 279, 122430. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122430>
- Altamirano Pérez, H. R., Cadena Pasquel, V. J., Anchundia Guerrero, C. A., & Larcos Perez, J. A. (2023). Application of the Honey - Alonso Questionnaire for the characterization of learning styles in students of Higher Basic Education. *Universidad Ciencia y Tecnología*, 27(121), 7–15. <https://doi.org/10.47460/uct.v27i121.750>
- American Concrete Institute. (2010). 522R-10: Report on Pervious Concrete. In *Technical Documents* (Vol. 10, Number Reapproved 2011). <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/51663557>
- Bright Singh, S., & Madasamy, M. (2022). Investigation of aggregate size effects on properties of basalt and carbon fibre-reinforced pervious concrete. *Road Materials and Pavement Design*, 23(6), 1305–1328. <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1886158>
- Coronel, J. (2023). *Influencia de las fibras de acero trefilado de alta calidad en las propiedades del concreto permeable para pavimentos rígidos*. 1–103. <https://hdl.handle.net/11042/6470>
- De Abreu, V. H. S., Santos, A. S., & Monteiro, T. G. M. (2022). Climate Change Impacts on the Road Transport Infrastructure: A Systematic Review on Adaptation Measures. *Sustainability*, 14(14), 8864. <https://doi.org/10.3390/su14148864>
- Guzmán, C. A. (2016). *Influencia de la fibra de acero trefilado de alta calidad y microsilíce en la resistencia a flexión del concreto ecológico $f_c=210 \text{ kg/cm}^2$ para pavimentos rígidos*. Universidad Nacional de Cajamarca.
- Koo, D.-H., Kim, J.-S., Kim, S.-H., & Suh, S.-W. (2023). Evaluation of Flexural Toughness of Concrete Reinforced with High-Performance Steel Fiber. *Materials*, 16(20), 6623. <https://doi.org/10.3390/ma16206623>
- Lee, M.-G., Wang, W.-C., Wang, Y.-C., Hsieh, Y.-C., & Lin, Y.-C. (2022). Mechanical Properties of

- High-Strength Pervious Concrete with Steel Fiber or Glass Fiber. *Buildings*, 12(5), 620. <https://doi.org/10.3390/buildings12050620>
- Lee, M.-G., Wang, Y.-C., Wang, W.-C., Chien, H.-J., & Cheng, L.-C. (2023). Experimental Study on the Mechanical Properties of Reinforced Pervious Concrete. *Buildings*, 13(11), 2880. <https://doi.org/10.3390/buildings13112880>
- Lee, M.-G., Wang, Y.-C., Wang, W.-C., & Hsieh, Y.-C. (2024). Abrasion and Maintenance of High-Strength Fiber-Reinforced Pervious Concrete. *Buildings*, 14(1), 127. <https://doi.org/10.3390/buildings14010127>
- Li, J., Xia, J., Di Sarno, L., & Gong, G. (2023). Fiber utilization in pervious concrete: Review on manufacture and properties. *Construction and Building Materials*, 406, 133372. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133372>
- Ministerio de Transporte y Comunicaciones. (2013). Manual de Carreteras Especificaciones Técnicas Generales para Construcción EG-2013. *Suelos, Geología, Geotecnia Y Pavimentos*, 0(0), 1440. https://cdn-web.construccion.org/normas/files/tecnicas/Manual_Suelos_Pavimentos.pdf
- Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento. (2010). *Norma Técnica CE.010 Pavimentos Urbanos*. 68. <http://www.vivienda.gob.pe/%5Cnhttp://app.knovel.com/>
- SENAMHI. (2023). Memoria anual. *REOP - Revista Española de Orientación y Psicopedagogía*, 30(3), I–VI. <https://www.senamhi.gob.pe/pdf/trans/memoria-senamhi-2023.pdf>
- SIKA Perú S.A. (2022). *Hoja técnica SIKA FIBER CHO 80/60 NB*. <https://per.sika.com/es/construccion/otros-aditivos-adiciones/fibras-de-concreto/macrofibra-metalica/sikafiber-cho-8060nb.html>
- Tamimi, A., Tabsh, S. W., & El-Emam, M. (2023). Pervious Concrete Made with Recycled Coarse Aggregate and Reinforced with Date Palm Leaves Fibers. *Materials*, 16(23), 7496. <https://doi.org/10.3390/ma16237496>
- Tang, C.-W., Cheng, C.-K., & Ean, L.-W. (2022). Mix Design and Engineering Properties of Fiber-Reinforced Pervious Concrete Using Lightweight Aggregates. *Applied Sciences*, 12(1), 524. <https://doi.org/10.3390/app12010524>
- Wu, J., Pang, Q., Lv, Y., Zhang, J., & Gao, S. (2022). Research on the Mechanical and Physical Properties of Basalt Fiber-Reinforced Pervious Concrete. *Materials*, 15(19), 6527. <https://doi.org/10.3390/ma15196527>
- Yun, H.-D., Choi, K.-B., & Choi, W.-C. (2023). Comparative Evaluation of Flexural Toughness of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams. *Materials*, 16(10), 3789. <https://doi.org/10.3390/ma16103789>