

ARTÍCULO DE REVISIÓN

Evaluación de las propiedades físico-mecánicas de pavimentos rígidos con adición de fibras naturales: Una revisión sistemática

Evaluation of the physical and mechanical properties of rigid pavements with the addition of natural fibers: A systematic review

Evelyn Paico ¹ * y Manuel Laurencio ² 

RESUMEN

Este trabajo revisa el uso de fibras naturales como refuerzo en el concreto para pavimentos rígidos, con énfasis en el desempeño físico-mecánico y en los criterios de dosificación. Se realizó una revisión sistemática de 45 estudios publicados entre 2016 y 2025 en Scopus y SciELO, registrando tipo de fibra, tratamiento, longitud, porcentaje en mezcla, matriz y aplicación. Los resultados evidencian mejoras consistentes en resistencia a flexión y tracción, tenacidad y control de fisuras, especialmente con fibras cortas medias (20 – 50 mm) y dosificaciones bajas intermedias (0.3 – 1.5 % en volumen o 0.5 – 2.0 % en masa). El pretratamiento mediante procesos alcalinos o recubrimientos fortalece la adherencia fibra matriz, reduce la absorción y estabiliza la respuesta posfisura. Entre las fibras más destacadas se encuentran el plátano, yute, coco y sisal por su comportamiento estructural confiable; cáñamo, lino, piña, palma datilera y fibras amazónicas muestran viabilidad en sistemas de recubrimiento o matrices compatibles, siempre que se controle la trabajabilidad y la permeabilidad. En general, las fibras naturales ofrecen ventajas técnicas y ambientales, con potencial para optimizar el diseño de losas y reducir el impacto ambiental del concreto, aunque persisten retos de variabilidad y estandarización.

Palabras clave: Fibras naturales; pavimento rígido; concreto reforzado; Tracción; sostenibilidad.

ABSTRACT

This work reviews the use of natural fibers as reinforcement in concrete for rigid pavements, with emphasis on physical-mechanical performance and dosage criteria. A systematic review of 45 studies published between 2016 and 2025 in Scopus and SciELO was conducted, recording fiber type, treatment, length, dosage, matrix, and application. The results show consistent improvements in flexural and tensile strength, toughness and crack control, especially with medium short fibers (20 – 50 mm) and intermediate low dosages (0.3 – 1.5% by volume or 0.5 – 2.0% by mass). Pretreatments, such as alkaline processes or surface coatings, enhance fiber–matrix adhesion, reduce absorption, and stabilize postcracking behavior. Among the most effective fibers, banana, jute, coconut, and sisal stand out for their reliable structural behavior, while hemp, flax, pineapple, date palm, and Amazonian fibers are feasible in coating systems or compatible matrices, provided that workability and permeability are properly controlled. Overall, natural fibers represent a technical and environmental alternative for rigid pavements, with potential to optimize slab design and reduce the environmental footprint of concrete. However, challenges remain regarding variability and the lack of standardized methodologies.

Keywords: Natural fibers; rigid pavement; concrete reinforcements; toughness; sustainability.

* Autor para correspondencia

¹ Universidad Católica Sedes Sapientiae, Perú. Email: 2020102317@ucss.pe, mLaurencio@ucss.edu.pe

INTRODUCCIÓN

La infraestructura vial constituye un pilar esencial para el desarrollo económico y social de los países. Dentro de ella, los pavimentos rígidos desempeñan un rol fundamental en proyectos de gran escala como autopistas, aeropuertos y vías urbanas de alto tránsito, debido a su elevada resistencia estructural y durabilidad frente a cargas pesadas y condiciones climáticas adversas. Sin embargo, el concreto tradicional utilizado en pavimentos rígidos evidencia limitaciones importantes, sobre todo por su baja resistencia a tracción y la tendencia a la fisuración asociada a retracción, cargas dinámicas o impactos repetidos (Silva, Mobasher, & Toledo Filho, 2017). Para superar estas deficiencias y extender la vida útil de las estructuras, se han propuesto diversas estrategias de refuerzo. Entre ellas, una de las más destacadas es la incorporación de fibras naturales al concreto, que reemplazan parcialmente a fibras sintéticas y aditivos convencionales. Este recurso no solo busca mejorar las propiedades mecánicas del material, sino también mitigar el impacto ambiental de la construcción, ya que la producción de cemento constituye una de las principales fuentes de emisiones de CO₂ (Bahmani & Mostafaei, 2025). En esta línea, diferentes revisiones subrayan el potencial de las fibras vegetales como alternativa sostenible y describen métodos de tratamiento y aplicación (Amin, Ahmad, Khan, & Ahmad, 2022). Incluso se han evaluado indicadores de eficiencia eco-estructural que combinan desempeño mecánico y huella ambiental en concretos con yute (Khan, Khan, & Ali, 2023). Los resultados coinciden en que fibras como bambú, coco, lino, yute y sisal fortalecen propiedades críticas del concreto, como la resistencia a flexión y tracción, el desempeño frente al impacto y la durabilidad, al actuar como puentes de transferencia de esfuerzos que retrasan la propagación de microgrietas (Ahmad, Zaid, Farooq, & Ostrowski, 2022). En el caso de la fibra de coco, los ensayos muestran mejoras notables en absorción de energía e impacto cuando se optimizan contenido y longitud de fibra (Ahmad et al., 2022). Algo similar se observa con el cáñamo, cuyos resultados experimentales revelan incrementos en parámetros mecánicos clave para su uso en elementos tipo losa, confirmando su aplicabilidad en pavimentos rígidos (Zhou, Zheng, Li, & Bian, 2017). Además, compilaciones experimentales recientes corroboran el efecto de puenteo y la ganancia de tenacidad en matrices cementicias reforzadas con fibras vegetales (Joachim, Le, & Holschemacher, 2024). Un panorama comparativo con sisal, yute, bagazo y coco confirma que el contenido de fibra es un factor decisivo sobre el desempeño final del material (Jamshaid, Mishra, Hussain, & Hussain, 2022).

Desde el punto de vista técnico, la incorporación de fibras naturales también abre la posibilidad de reducir el espesor de las losas y optimizar el consumo de materiales sin comprometer la seguridad estructural, siempre que se respalden los cambios de diseño con modelos y criterios de verificación adecuados (Geremew et al., 2025). Estos beneficios se potencian mediante tratamientos físicos o químicos, en particular procesos alcalinos con NaOH que mejoran la adherencia fibra matriz y disminuyen problemas de absorción y degradación (Farias et al., 2024; Wang, Chang, Shi, & Wang, 2019).

A pesar de los avances experimentales, subsisten vacíos importantes para su aplicación práctica en pavimentos rígidos. La variabilidad propia de las fibras, marcada por el origen vegetal, las condiciones de cultivo y los métodos de tratamiento, continúa siendo un obstáculo para la estandarización y la reproducibilidad (Bahmani & Mostafaei, 2025). La ausencia de criterios uniformes también limita la transferencia de resultados a normativas de diseño y dificulta la comparación entre estudios (Hasan, Saidi, Jamil, Amalia, & Mubarak, 2022). En este contexto, el presente artículo tiene como objetivo realizar una revisión bibliográfica exhaustiva y crítica sobre los efectos de la incorporación de fibras naturales en el concreto destinado a pavimentos rígidos. Se recopilaron publicaciones académicas indexadas en Scopus, SciELO, y MDPI priorizando trabajos recientes de 2016 a 2025 que analizan propiedades físico mecánicas, tratamientos aplicados a las fibras, proporciones óptimas y experiencias prácticas en infraestructura vial.

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación corresponde a una revisión sistemática documental con enfoque descriptivo analítico, orientada a evaluar los efectos físico-mecánicos del uso de fibras naturales en mezclas de concreto aplicadas a pavimentos rígidos. Se definieron a prioridad las preguntas de investigación, las variables de interés y los criterios de elegibilidad.

Fuentes y periodo de búsqueda. La recopilación de información se realizó entre abril y junio de 2025. Se consultaron prioritariamente las bases Scopus y SciELO ; de manera complementaria se verificó la disponibilidad de los textos completos en los portales de las revistas. Para garantizar la exhaustividad, se definieron cadenas de búsqueda exactas estructuradas con operadores booleanos. En Scopus se empleó la ecuación: ("natural fiber" OR "vegetable fiber" OR "coconut" OR "coir" OR "jute" OR "sisal" OR "hemp" OR "bamboo" OR "date palm fiber" OR "bagasse" OR "fique") AND ("concrete" OR "mortar" OR "geopolymer") AND ("rigid pavement" OR "mechanical properties" OR "slab"). En la base de datos SciELO se adaptó la

sintaxis al español e inglés: ("fibra natural" OR "fibra vegetal") AND ("concreto" OR "hormigón") AND ("pavimento rígido" OR "propiedades mecánicas").

Criterios de inclusión. (i) Publicaciones 2016–2025, con revisión por pares y texto completo disponible en abierto; (ii) estudios experimentales, estudios de caso aplicados o revisiones críticas con datos comparables sobre concreto, morteros o geopolímeros reforzados con fibras naturales (p. ej., yute, coco, sisal, cáñamo, lino, kenaf, bagazo, fique, bambú, palma datilera, piña); (iii) resultados cuantitativos de propiedades físico-mecánicas relevantes para diseño de losas/pavimentos (compresión, tracción, flexión, tenacidad/impacto, fisuración, durabilidad).

Criterios de exclusión. Documentos sin acceso completo; artículos centrados solo en fibras sintéticas o matrices poliméricas ajenas al concreto; estudios sin vínculo con elementos estructurales o aplicaciones en infraestructura vial.

Proceso de selección y extracción. Para asegurar la transparencia y reproducibilidad metodológica de esta revisión sistemática, la selección de estudios se documentó siguiendo las directrices del diagrama de flujo PRISMA (véase Figura 1). La búsqueda inicial en las bases de datos arrojó 75 registros. Tras aplicar los criterios de inclusión y exclusión, la muestra final se refinó a 45 fuentes pertinentes. Se extrajeron de cada estudio: país, tipo de fibra y tratamiento (físico, térmico, alcalino), longitud, dosificación, tipo de matriz (concreto/mortero/geopolímero), propiedad evaluada y la aplicación al concreto de pavimentos rígidos. La síntesis comparativa se organizó en tablas temáticas.

RESULTADOS

Los estudios seleccionados demuestran descriptivamente que la adición de fibras vegetales al concreto para pavimentos rígidos genera incrementos directos en el comportamiento a tracción y flexión, además de elevar la tenacidad del material. El análisis de los datos extraídos revela mejoras cuantitativas consistentes; por ejemplo, se reportan incrementos que oscilan entre el 15 % y el 30 % en la resistencia a flexión, dependiendo de la compatibilidad de la matriz y el tipo de fibra utilizada. En el concreto convencional y de alta resistencia, la fibra de coco destaca por su alta capacidad para elevar la absorción de energía frente a impactos. Paralelamente, los ensayos con sisal y con fibras de palma datilera documentan aumentos numéricos directos en los módulos de tracción indirecta y flexión.

En esta tabla se presenta la comparación de estudios según tipo de fibra natural y propiedades físico-mecánicas mejoradas en concreto para pavimento rígido.

Figura 1

Diagrama de flujo PRISMA del proceso de selección de estudios.

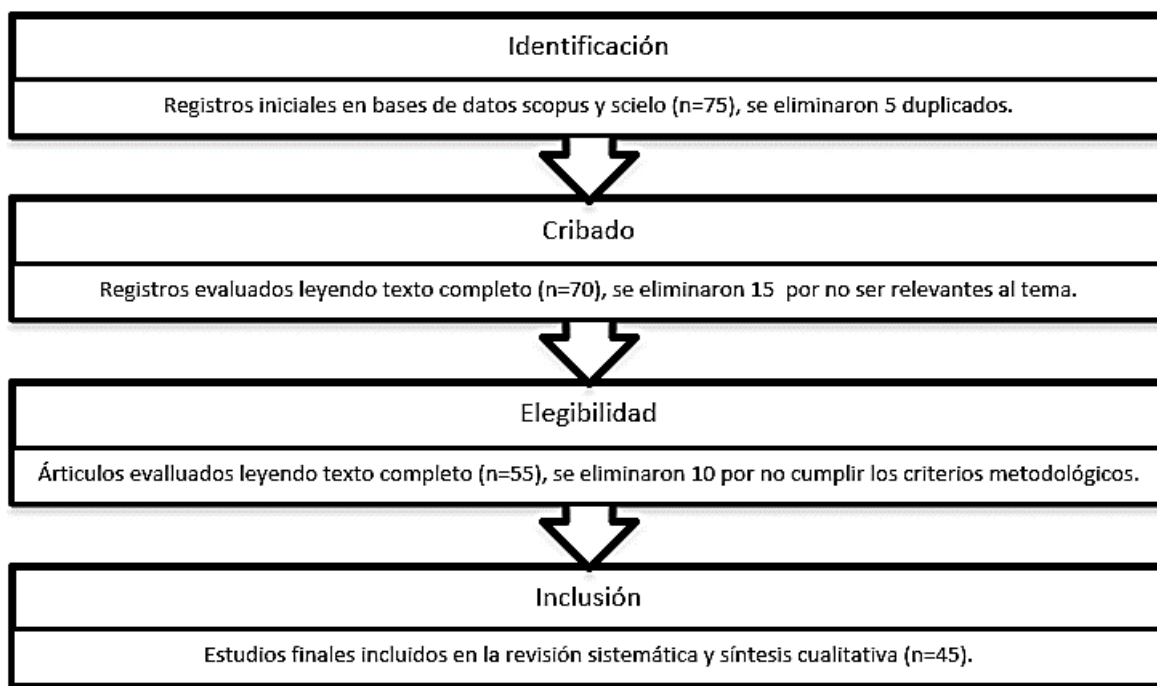


Tabla 2

Comparación de estudios según tipo de fibra natural y propiedades físico-mecánicas mejoradas en concreto para pavimento rígido

| Fuente | Autor(es) y Año | Fibra Natural | Longitud (mm) | % en mezcla | Propiedades mejoradas |
|-----------|---------------------|---------------|---------------|--------------|--|
| MDPI | Khan et al., 2023 | Yute | - | - | Flexión, tracción, eficiencia eco estructural en concretos con yute |
| MDPI | Ahmad et al., 2022 | Coco (coir) | - | - | Control de fisuración, tenacidad, mejora de flexión e impacto en concretos |
| MDPI | Okeola et al., 2018 | Sisal | - | - | Incrementos en tracción por división y módulo; efecto limitado en compresión |
| Frontiers | Zhou et al., 2017 | Cáñamo (hemp) | - | - | Mejora de tracción, compresión y ductilidad con tratamiento de la fibra |
| MDPI | Farias et al., 2024 | Yute (corto) | 20–40 | 2–4% mortero | Mayor rigidez y tenacidad a flexión en recubrimientos sobre soporte rígido |

| | | | | | |
|------------------|------------------------------|--|-------|--------------|---|
| MDPI | Shcherban' et al., 2022 | Coco (coir) | - | - | Mejor respuesta esfuerzo deformación |
| Frontiers | Jiang et al., 2021 | Coco (coir) | - | - | Aumento de resistencia a flexión y tenacidad en cemento fosfato magnésico |
| MDPI | Beskopylny et al., 2022 | Sisal | - | 0.25–1.5% | Tenacidad y control de fisura con pérdidas controladas de asentamiento |
| MDPI | Martinelli et al., 2023 | Coco (coir) | - | - | Síntesis: control de apertura de fisuras y aumento de tenacidad |
| MDPI | Mohammed et al., 2024 | Yute (geopolímero) | 15–35 | 0.10–0.70% | Óptimos intermedios en tracción flexión con buena trabajabilidad |
| MDPI | Althoey et al., 2022 | Palma datilera | - | 0.20–1.00% | Incrementos en tracción y flexión; atención a interfaz fibra matriz |
| MDPI | Adamu et al., 2023 | fibra de palma datilera + carbón activado en polvo | - | - | Mitigación de pérdidas mecánicas a alta temperatura |
| MDPI | Bamaga et al., 2022 | Fibra de palma datilera. | - | - | Revisión: mejoras mecánicas con tratamientos previos de la fibra |
| MDPI | da Costa Santos et al., 2022 | Lino y cáñamo | - | - | Mejora de adherencia y resistencia residual tras tratamientos superficiales |
| MDPI | Abbas et al., 2022 | Kenaf | - | - | Viabilidad en cementicios; efectos en fisuración y durabilidad |
| SciELO | Azevedo et al., 2020 | Fibra de piña | - | 1–5% mortero | Viabilidad tecnológica en morteros de recubrimiento sobre losa |
| SciELO | Borges et al., 2019 | Sisal y rami | - | - | Comparativo con propiedades físicas y mecánicas en elementos delgados |
| SciELO | Dias et al., 2021 | Residuos de sisal | - | - | Influencia en propiedades físicas y mecánicas de morteros |

| | | | | | |
|---------------|----------------------|----------------------|---|----|--|
| SciELO | Fonseca et al., 2021 | Fibras amazónicas | - | - | Tratamientos que reducen absorción y mejoran interfaz en morteros |
| SciELO | Soares et al., 2025 | Sisal (fibrocemento) | - | 3% | Efectos en desempeño mecánico de placas delgadas compatibles con losas |

El efecto principal documentado en las matrices cementicias y geopoliméricas es la capacidad de la fibra para actuar como puente, redistribuyendo los esfuerzos internos. En los sistemas de recubrimiento estructural, el yute y las fibras amazónicas han evidenciado una mejora sustancial en la rigidez de las capas complementarias sobre losas. Para fibras como el cáñamo y el lino, los avances más sólidos provienen de la evaluación de tratamientos superficiales previos, los cuales determinan la durabilidad del compuesto en elementos delgados.

Asimismo, diversos estudios coinciden en que el tratamiento previo de las fibras es fundamental para asegurar una buena adherencia con la matriz cementicia, reduciendo la degradación y mejorando el comportamiento mecánico. A continuación, se presenta la Tabla 3, la cual recoge los tratamientos más comunes y su efecto en la mezcla.

Tabla 3

Tratamientos aplicados y efecto en la adherencia fibra-matriz cementicia

| Autor(es) y Año | Fibra natural | Tratamiento reportado | Efecto observado |
|-------------------------------------|---------------------------|---|---|
| da Costa Santos et al., 2022 | Lino, cáñamo | Alcalinización y tratamientos superficiales (p.ej., NaOH, recubrimientos) | Mejora de interfaz fibra-matriz, aumenta resistencia residual y energía de fractura |
| Fonseca et al., 2021 | Fibras amazónicas | Tratamientos alcalinos y térmicos según especie | Disminuye absorción, aumenta adherencia y desempeño mecánico en morteros cementicios |
| Bamaga et al., 2022 | Palma datilera (revisión) | Limpieza, corte, alcalinización; recomendaciones de preacondicionamiento | Aumenta propiedades mecánicas y estabilidad; necesidad de control de variabilidad |
| Abbas et al., 2022 | Kenaf (revisión) | Alcalino (NaOH), blanqueo y acondicionamientos | Aumenta adherencia y disminuye degradación; impacto positivo en control de fisuración |
| Martinelli et al., 2023 | Coco (revisión) | Pretratamientos para reducir absorción y mejorar compatibilidad | Aumenta tenacidad y control de apertura de |

| | | | |
|-----------------------------|---------------|---|--|
| | | | fisuras; ajustes de trabajabilidad |
| Zhou et al., 2017 | Cáñamo | Tratamiento de la fibra previo a la mezcla | Aumenta tracción y compresión del compuesto; mejor comportamiento a fisuración |
| Farias et al., 2024 | Yute (corto) | Selección de longitud, dosificación y curado del sistema de recubrimiento | Aumenta rigidez y tenacidad a flexión en paneles sobre soporte rígido |
| Azevedo et al., 2020 | Fibra de piña | Tratamiento alcalino en morteros | Viabilidad tecnológica y cohesión en capas de revestimiento |
| Okeola et al., 2018 | Sisal | Acondicionamiento y dispersión de fibra en mezcla | Aumenta tracción por división y módulo; necesidad de controlar asentamiento |

En conjunto, los tratamientos alcalinos y los recubrimientos superficiales son los que más consistentemente mejoran la interfaz fibra–matriz, ya que reducen la absorción y mejoran la adherencia. Esto se traduce en mayor resistencia residual y mejor control de fisuras en elementos tipo losa, tal como lo señalan da Costa Santos et al. (2022). De forma complementaria, Fonseca et al. (2021) también destacan que dichos tratamientos incrementan el desempeño mecánico en morteros cementicios.

La siguiente Tabla 4 expone una síntesis crítica sobre las ventajas y limitaciones prácticas de las fibras naturales analizadas, lo cual será esencial para orientar su uso en escenarios reales de infraestructura.

Tabla 4

Ventajas y limitaciones de fibras naturales para pavimentos rígidos

| Fibra | Ventajas principales | Limitaciones observadas |
|--------------------|--|--|
| Coco (coir) | Aumenta tenacidad y control de fisuras; buen desempeño posfisura | Disminuye trabajabilidad; requiere pretratamiento para controlar absorción |
| Yute | Aumenta flexión y rigidez en recubrimientos y matrices compatibles | Sensible a humedad sin tratamiento; variabilidad por procedencia |
| Sisal | Aumenta tenacidad y control de fisura a bajas dosificaciones | Pérdida de asentamiento si no se ajusta la mezcla; variación de calidad |
| Cáñamo | Aumenta tracción/compresión y ductilidad con tratamiento | Necesidad de acondicionamiento; disponibilidad y estandarización |

| | | |
|--|--|---|
| Lino | Aumenta adherencia y desempeño tras tratamientos superficiales | Sensibilidad a ambientes alcalinos si no se protege la fibra |
| Kenaf | Viabile en cementicios; apoyo en control de fisuración | Requiere tratamientos para durabilidad; datos aún heterogéneos |
| Palma datilera | Aumenta tracción flexión; desempeño mejorable con adiciones | Interfaz crítica; absorción y permeabilidad a vigilar |
| Fibra de piña | Opción en morteros de recubrimiento; cohesión | Aplicación más sólida en morteros; necesidad de control de dosificación |
| Fibras amazónicas | Mejoras de adherencia tras tratamiento | Alta variabilidad por especie y preparación |
| Sistemas híbridos (p. ej., sisal + rami; yute en capas) | Sinergias en tenacidad y control de agrietamiento | Requiere diseño cuidadoso y compatibilidad entre fibras y matriz |

En conjunto, las fibras muestran ventajas diferenciales y compromisos: el coir y el sisal sobresalen por tenacidad y comportamiento posfisura en losas, el yute rinde mejor en recubrimientos o matrices delgadas, y la fibra de palma datilera aporta resistencia a tracción y flexión, aunque exige un control riguroso de la interfaz y de la permeabilidad. Además, el cáñamo y el lino logran un mejor desempeño cuando reciben tratamientos superficiales. Ahmad et al. (2022) destacan la mejora del control de fisuras y de la tenacidad con fibras de coco, mientras que Farias et al. (2024) documentan beneficios similares en el caso del yute. Por su parte, Althoey et al. (2022) señalan la relevancia de la palma datilera en la tracción y la flexión, y da Costa Santos et al. (2022) confirman el aporte del cáñamo y del lino tras aplicar tratamientos superficiales. En todos los casos, dosificaciones moderadas y pretratamiento de la fibra son claves para lograr una adherencia estable sin comprometer la trabajabilidad, favoreciendo su aplicación en pavimentos rígidos.

DISCUSIÓN

La evidencia recopilada confirma que las fibras vegetales mejoran significativamente el desempeño posfisura (tenacidad y ductilidad) y reducen la propagación de microgrietas en matrices cementicias para pavimentos. Este fenómeno se explica teóricamente porque las fibras asumen los esfuerzos de tracción una vez que la matriz de concreto se fisura, mecanismo que Martinelli et al. (2023) describen como puentes de transferencia de esfuerzos.

Al cruzar los datos de los distintos estudios, se identifica que el rango de máxima eficiencia

estructural y mecánica se obtiene con longitudes de fibra entre 20 y 50 mm, utilizando dosificaciones volumétricas o másicas bajas a intermedias (0.3 – 1.5 %). Superar este umbral del 1.5 % resulta contraproducente. La interpretación física de este límite radica en que el exceso de material lignocelulósico incrementa la porosidad efectiva de la mezcla, desencadenando una pérdida severa de trabajabilidad que impide una correcta consolidación del concreto, anulando así cualquier ganancia mecánica adicional.

La alcalinización con NaOH y la aplicación de recubrimientos superficiales mejoran la humectabilidad, eliminan hemicelulosas y reducen la hinchazón higroscópica, lo que se traduce en una mejor adherencia y en mayor resistencia residual del compuesto. da Costa Santos et al. (2022) confirman estos beneficios en fibras tratadas con soluciones alcalinas. De forma complementaria, Fonseca et al. (2021) reportan efectos empíricos positivos en la reducción drástica de la absorción hídrica, mientras que Siouta et al. (2024) destacan mejoras de adherencia similares al trabajar específicamente con fibras de cáñamo.

A pesar del consenso sobre los beneficios mecánicos a nivel experimental, la aplicación de estas mezclas en infraestructura vial enfrenta limitaciones prácticas que la literatura actual no resuelve adecuadamente. El primer gran obstáculo es la variabilidad intrínseca de los resultados. Al ser materiales naturales, las propiedades mecánicas de las fibras cambian drásticamente según su procedencia geográfica, las condiciones climáticas del cultivo y las técnicas de extracción. Esta falta de homogeneidad impacta negativamente en la reproducibilidad de los resultados entre los diferentes estudios analizados, complicando la estandarización de las normativas de diseño.

En segundo lugar, existe una evidente falta de validación en campo. La inmensa mayoría de las investigaciones documentadas se limitan a ensayos controlados en laboratorio a escala de probeta. Es imperativo reconocer que el comportamiento de estas fibras frente a condiciones reales de servicio (gradientes térmicos extremos a la intemperie, exposición a sales de deshielo y abrasión vehicular constante) sigue siendo una incógnita significativa para la adopción práctica

Finalmente, se evidencia un análisis económico ausente en el estado del arte. No existe una discusión profunda sobre la relación costo-beneficio de emplear fibras naturales tratadas en comparación con las fibras sintéticas tradicionales. Aspectos como el costo de la extracción, los tratamientos alcalinos a escala industrial y el control de calidad riguroso son factores determinantes para evaluar su verdadera viabilidad económica en megaproyectos de pavimentación.

Para consolidar el refuerzo del concreto con fibras vegetales en pavimentos rígidos y facilitar su transición hacia normativas oficiales, se sugieren las siguientes líneas de acción:

* Ensayos de campo y evaluación de fatiga a largo plazo: Es prioritario ejecutar tramos experimentales de carreteras a escala real instrumentados para monitorear el comportamiento del material frente a cargas dinámicas de fatiga y desgaste superficial por abrasión durante ciclos multianuales.

* Estandarización de protocolos: Se requiere un esfuerzo conjunto para desarrollar guías normativas que unifiquen los métodos de caracterización, tratamiento químico y rangos de dosificación de las fibras, garantizando la homogeneidad de la mezcla.

* Estudios de factibilidad económica: Desarrollar análisis de ciclo de vida (ACV) integrados con evaluaciones de costos directos e indirectos, comparando la implementación de fibras naturales frente al acero y el polipropileno bajo escenarios industriales reales.

CONCLUSIONES

La revisión realizada demuestra de manera consistente que la incorporación de fibras naturales en mezclas cementicias destinadas a pavimentos rígidos mejora las propiedades físico-mecánicas del concreto, particularmente la resistencia a tracción y flexión, la tenacidad y el control de fisuración. Este comportamiento se explica por el efecto de puenteo que las fibras ejercen sobre las microgrietas, favoreciendo una redistribución estable de los esfuerzos durante la etapa posfisura.

Los resultados analizados permiten establecer que los rangos de longitud óptimos se sitúan entre 20 y 50 mm, y las dosificaciones más eficientes se ubican entre 0.3 y 1.5 %, valores que maximizan el desempeño sin afectar significativamente la trabajabilidad del concreto. Fuera de estos intervalos, la ganancia mecánica tiende a estabilizarse o disminuir debido a problemas de dispersión y asentamiento.

El pretratamiento de las fibras mediante procesos alcalinos o recubrimientos superficiales constituye una condición esencial para lograr una adherencia duradera con la matriz cementicia, reduciendo la absorción de humedad y la variabilidad entre lotes. En este sentido, la combinación de métodos físicos y químicos de acondicionamiento contribuye a estabilizar las propiedades mecánicas y de durabilidad del material compuesto.

En términos comparativos, el coco (coir) y el sisal presentan el mejor comportamiento posfisura y mayor tenacidad en elementos tipo losa; el yute evidencia un desempeño favorable en recubrimientos estructurales y matrices geopoliméricas; el cáñamo y el lino muestran una

respuesta destacada tras recibir tratamientos superficiales; mientras que la fibra de palma datilera requiere un control riguroso de la interfaz y de la permeabilidad para garantizar su eficiencia estructural. Asimismo, las fibras amazónicas y de piña resultan viables para morteros de revestimiento complementarios sobre losas de pavimento.

Desde el punto de vista estructural, el aumento de la energía de fractura y del comportamiento posfractura ofrece márgenes de optimización del diseño, permitiendo reducir el espesor de las losas o espaciar juntas sin comprometer la seguridad, siempre que se verifique el desempeño a fatiga y abrasión bajo condiciones reales de servicio.

En cuanto a la durabilidad, la respuesta frente a ciclos térmicos, hielo deshielo o exposición a sales depende directamente de la calidad del anclaje fibra matriz y del curado del sistema. La inclusión de adiciones minerales finas puede contribuir a mitigar la absorción y la permeabilidad, prolongando la vida útil del material.

Finalmente, las fibras naturales representan una alternativa técnica y ambientalmente viable para el refuerzo del concreto en pavimentos rígidos, al promover la valorización de residuos agroindustriales y reducir la huella de carbono de la construcción. Sin embargo, se mantiene la necesidad de estandarizar los procedimientos de caracterización, los parámetros de tenacidad y energía de fractura, así como los protocolos de ensayo a escala de losa, a fin de consolidar su aplicación normativa y práctica en la ingeniería vial contemporánea.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abbas, A. G. N., et al. (2022). Kenaf Fibre Reinforced Cementitious Composites. *Fibers*, 10(1), 3. <https://doi.org/10.3390/fib10010003>

Adamu, M., et al. (2023). Modeling and Optimization of Date Palm Fiber Reinforced Concrete Modified with Powdered Activated Carbon under Elevated Temperature, 15(8), 6369. <https://doi.org/10.3390/su15086369>

Ahmad, J., Zaid, O., Farooq, F., & Ostrowski, K. (2022). Mechanical and Durability Performance of Coconut Fiber Reinforced Concrete: A State-of-the-Art Review. *Materials*, 15(10), 3601. <https://doi.org/10.3390/ma15103601>

Althoej, F., et al. (2022). Behavior of Concrete Reinforced with Date Palm Fibers. *Materials*, 15(22), 7923. <https://doi.org/10.3390/ma15227923>

- Amin, M. N., Ahmad, W., Khan, K., & Ahmad, A. (2022). A Comprehensive Review of Types, Properties, Treatment Methods and Application of Plant Fibers in Construction and Building Materials. *Materials*, 15(12), 4362. <https://doi.org/10.3390/ma15124362>
- Azevedo, A. R. G., Marvila, M. T., Zanelato, E. B., Alexandre, J., Xavier, G. C., & Cecchin, D. (2020). Development of mortar for laying and coating with pineapple fibers. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 24(3), 187–193. <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/j8czBWQQYxTsgRJgtwtqXQZ/>
- Bahmani, H., & Mostafaei, H. (2025). Impact of Fibers on the Mechanical and Environmental Properties of High-Performance Concrete Incorporating Zeolite. *Journal of Composites Science*, 9(5), 222. <https://doi.org/10.3390/jcs9050222>
- Bamaga, S. O., et al. (2022). A Review on the Utilization of Date Palm Fibers as Inclusion in Concrete and Mortar, 10(4), 35. <https://doi.org/10.3390/fib10040035>
- Beskopylny, A. N., et al. (2022). Enhanced Performance of Concrete Dispersedly Reinforced with Sisal Fibers. *Applied Sciences*, 12(18), 9102. <https://doi.org/10.3390/app12189102>
- Borges, A. P. S. N., Motta, L. A. C., & Franco, L. S. (2019). Study of concrete properties with vegetal and polypropylene fibers for use in structural walls. *Matéria*. <https://www.scielo.br/j/rmat/a/LprhPDswVZzMg6ZkydLbh7f/>
- da Costa Santos, A. C., et al. (2022). Suitability of Surface-Treated Flax and Hemp Fibers for Concrete Reinforcement. *Fibers*, 10(11), 101. <https://doi.org/10.3390/fib10110101>
- Dias, L. S., et al. (2021). Incorporation of waste from the production of sisal fibers into mortar: Effects on physical and mechanical properties. *Matéria*. <https://www.scielo.br/j/rmat/a/5RMw95bJyVMjf846VCbjpTw/>
- Farias, L. N., Lam, S. S., Bettencourt Ribeiro, M. C., Franceschini, L. H., Nunes, V. N., & Mota, G. F. T. (2024). Short Jute Fiber Reinforced Cement Mortar for Out-of-Plane Strengthening of Masonry Prisms. *Sustainability*, 16(13), 5675. <https://doi.org/10.3390/su16135675>

- Fonseca, R. P., et al. (2021). Influence of Different Types of Treatments on Amazonian Vegetable Fibers on the Performance of Mortars Based on Portland Cement, Metakaolin and Fly Ash. *Materials Research*. <https://www.scielo.br/j/mr/a/ftqPhCtwzYZqSTd8qsgMYzt/>
- Geremew, A., Outtier, A., De Winne, P., Demissie, T. A., & De Backer, H. (2025). An Experimental Investigation on the Effect of Incorporating Natural Fibers on the Mechanical and Durability Properties of Concrete by Using Treated Hybrid Fiber-Reinforced Concrete Application. *Fibers*, 13(3), Art. 26. <https://doi.org/10.3390/fib13030026>
- Hasan, M., Saidi, T., Jamil, M., Amalia, Z., & Mubarak, A. (2022). Mechanical Properties and Absorption of High-Strength Fiber-Reinforced Concrete (HSFRC) with Sustainable Natural Fibers. *Buildings*, 12(12), 2262. <https://doi.org/10.3390/buildings12122262>
- Jamshaid, H., Mishra, P., Hussain, U., & Hussain, M. (2022). Natural Cellulosic Fiber Reinforced Concrete: Influence of Fiber Type and Loading Percentage on Mechanical and Water Absorption Performance. *Materials*, 15(3), 874. <https://doi.org/10.3390/ma15030874>
- Jiang, Z., et al. (2021). Effect of Coconut Fiber Dosage on Flexural Performances of Magnesium Phosphate Cement. *Frontiers in Materials*, 8, 557355. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.557355>
- Joachim, L., Le, V. N., & Holschemacher, K. (2024). Experimental Investigations on the Application of Natural Plant Fibers in Ultra-High-Performance Concrete. *Materials*, 17(14), 3519. <https://doi.org/10.3390/ma17143519>
- Khan, M. B., Khan, M. U., & Ali, S. (2023). Effects of Jute Fiber on Fresh and Hardened Characteristics of Concrete with Environmental Assessment. *Buildings*, 13(7), 1691. <https://doi.org/10.3390/buildings13071691>
- Martinelli, F. R. B., et al. (2023). A Review of the Use of Coconut Fiber in Cement Composites. *Polymers*, 15(5), 1309. <https://doi.org/10.3390/polym15051309>

- Mohammed, A. D. A. A., et al. (2024). Mechanical Properties of Natural Jute Fiber-Reinforced Geopolymer Concrete: Effects of Various Lengths and Volume Fractions. *Journal of Composites Science*, 8(11), 450. <https://doi.org/10.3390/jcs8110450>
- Okeola, A. A., et al. (2018). Experimental Investigation of the Physical and Mechanical Properties of Sisal Fiber-Reinforced Concrete. *Fibers*, 6(3), 53. <https://doi.org/10.3390/fib6030053>
- Shcherban', E. M., et al. (2022). Normal-Weight Concrete with Improved Stress–Strain Characteristics Reinforced with Dispersed Coconut Fibers. *Applied Sciences*, 12(22), 11734. <https://doi.org/10.3390/app122211734>
- Silva, F. A., Mobasher, B., & Toledo Filho, R. D. (2017). Cracking mechanisms in durable sisal fiber reinforced cement composites, 89, 150–161. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.07.004>
- Siouta, L., Apostolopoulou, M., & Bakolas, A. (2024). Natural Fibers in Composite Materials for Sustainable Building: A State-of-the-Art Review on Treated Hemp Fibers and Hurds in Mortars. *Sustainability*, 16(23), 10368. <https://doi.org/10.3390/su162310368>
- Soares, E. N. C., et al. (2025). Effect of combining surfactant additives in extruded fiber cement reinforced with sisal fiber natura, 25(1), e20531. <https://www.scielo.br/j/ac/a/HwghRRXnG4HJ7yLRrNNHYMx/>
- Wang, X., Chang, L., Shi, X., & Wang, L. (2019). Effect of Hot-Alkali Treatment on the Structure Composition of Jute Fabrics and Mechanical Properties of Laminated Composites. *Materials*, 12(9), 1386. <https://doi.org/10.3390/ma12091386>
- Zhou, X., Zheng, F., Li, H., & Bian, Y. (2017). Engineering Properties of Treated Natural Hemp Fiber-Reinforced Concrete. *Frontiers in Built Environment*, 3, 33. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2017.00033>

ANEXOS

Tabla 1

Resumen de artículos de fibras naturales en pavimentos rígidos

| Fuente | Autor(es) y Año | País | Fibra Natural | Aplicación / Contexto |
|-----------|-------------------------|----------------------------------|---------------|---|
| MDPI | Khan et al., 2023 | Múltiples (revisión) | Yute | Mejora de compresión, tracción y flexión; eficiencia eco-estructural; aplicable a losas de pavimento rígido. |
| MDPI | Ahmad et al., 2022 | Múltiples (revisión) | Coco | Control de fisuración y aumento de tenacidad; incrementos en flexión e impacto en concretos para pavimentos. |
| MDPI | Okeola et al., 2018 | Nigeria (experimental) | Sisal | Aumento de tracción/división y módulo; efecto limitado en compresión; utilidad en capas de rodadura rígidas. |
| Frontiers | Zhou et al., 2017 | China/Reino Unido (experimental) | Cáñamo | Tratamientos alcalinos mejoran adherencia; incrementos en tracción/compresiones relevantes para losas. |
| MDPI | Farias et al., 2024 | Brasil (experimental) | Yute | Mortero de recubrimiento con yute para refuerzo; mejora de respuesta fuera del plano en paneles sobre soporte rígido. |
| MDPI | Shcherban' et al., 2022 | Rusia (colaboración) | Coco | Concreto de alta resistencia con coir; mejor comportamiento posfisura para elementos tipo losa. |
| Frontiers | Jiang et al., 2021 | China (experimental) | Coco | Óptimo 3 %; mejora de flexión y tenacidad; útil para reparaciones rápidas de losas. |
| MDPI | Beskopylny et al., 2022 | Rusia (experimental) | Sisal | Concretos ecos con sisal; incrementos en tracción y flexión a bajas dosificaciones; control de fisura. |
| MDPI | Martinelli et al., 2023 | Brasil (revisión) | Coco | Control de apertura de fisuras, aumento de tenacidad; guía para dosificación en pavimentos. |
| MDPI | Mohammed et al., 2024 | Múltiples (experimental) | Yute | Geo polímero reforzado con yute; efectos en flexión y absorción; alternativa cementicia para losas. |

| | | | | |
|---------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------|--|
| MDPI | Althoey et al., 2022 | Arabia Saudita (experimental) | Palma datilera | Incremento de tenacidad/resistencia residual; interfaz fibra matriz crítica en elementos de concreto. |
| MDPI | Adamu et al., 2023 | Múltiples (experimental) | Palma datilera | Mantiene desempeño a alta temperatura; útil en zonas cálidas para losas rígidas. |
| MDPI | Bamaga et al., 2022 | Arabia Saudita (revisión) | Palma datilera | Revisión: mejora mecánica con tratamiento de fibras; consideraciones de durabilidad para pavimentos. |
| MDPI | da Costa Santos et al., 2022 | Brasil/Portugal (experimental) | Lino y cáñamo | Tratamientos superficiales alta resistencia residual y energía de fractura; aplicabilidad en losas delgadas. |
| MDPI | Abbas et al., 2022 | Malasia (revisión) | Kenaf | Revisión: viabilidad de kenaf en cementicios; efectos en fisuración y durabilidad en elementos rígidos. |
| SciELO | Azevedo et al., 2020 | Brasil (experimental) | Fibra de piña | Mortero para asentado/revestimiento con fibra tratada; viabilidad tecnológica en capas sobre losa. |
| SciELO | Borges et al., 2019 | Brasil (experimental) | Sisal y Rami | Propiedades físicas y mecánicas en concretos para muros/losas delgadas. |
| SciELO | Dias et al., 2021 | Brasil (experimental) | Residuos de sisal | Influencia en propiedades físicas y mecánicas de morteros; potencial en capas de recubrimiento. |
| SciELO | Fonseca et al., 2021 | Brasil (experimental) | Fibras amazónicas | Tratamientos mejoran adherencia y desempeño en morteros cementicios aplicables sobre losas. |
| SciELO | Soares et al., 2025 | Brasil (experimental) | Sisal | Fibrocemento con 3 % sisal y aditivos; efectos en desempeño mecánico de placas delgadas. |