

ARTÍCULO ORIGINAL

Comportamiento físico y mecánico de mezclas asfálticas en caliente modificadas con fibras de bambú

Physical and mechanical behavior of hot mix asphalt modified with bamboo fibers

David Manayay ¹, Erick Rodríguez ², Luis Villegas ³ y Guillermo Arriola ⁴

RESUMEN

El desarrollo de pavimentos flexibles más eficientes y sostenibles con el medio ambiente ha impulsado la necesidad de investigar materiales alternativos de origen natural que sean capaces de mejorar el comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente, destacando la fibra de bambú, debido a sus propiedades mecánicas y carácter renovable. La investigación tuvo por objetivo evaluar el comportamiento físico y mecánico de mezclas asfálticas en caliente modificadas con fibras de bambú, usando adiciones de 0.20%, 0.25%, 0.30%, 0.35% y 0.40%. La metodología fue del tipo aplicada y diseño experimental, para lo cual fue necesario elaborar 72 muestras cilíndricas, correspondientes a la muestra control y a los diferentes tratamientos con fibras, para establecer con los ensayos de laboratorio, las propiedades fisicomecánicas de la mezcla asfáltica. Los resultados evidenciaron variaciones en las propiedades volumétricas de las mezclas, con comportamientos diferenciados del peso específico, porcentaje de vacíos, porcentaje de vacíos en el agregado mineral y porcentaje de vacíos llenos con cemento asfáltico, según la dosificación de fibra empleada. En cuanto a las propiedades mecánicas, aumentaron hasta 0.30% de fibra, lográndose optimizar el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica estándar, pues el flujo, estabilidad y rigidez aumentaron en 5.96%, 11.92% y 5.46%, respectivamente. Por lo expuesto, la incorporación de fibras de bambú constituye una alternativa técnicamente viable, contribuyendo al Objetivo de Desarrollo Sostenible 12, relacionado con la producción y consumo responsable.

Palabras clave: Estabilidad, fibras de bambú, flujo, mezcla asfáltica

ABSTRACT

The development of more efficient and environmentally sustainable flexible pavements has driven the need to investigate alternative materials of natural origin that can improve the performance of hot mix asphalt, with bamboo fiber standing out due to its mechanical properties and renewable nature. This research aimed to evaluate the physical and mechanical behavior of hot mix asphalt modified with bamboo fibers, using additions of 0.20%, 0.25%, 0.30%, 0.35%, and 0.40%. The methodology was applied type and experimental design, requiring the preparation of 72 cylindrical samples, corresponding to the control sample and the different fiber treatments, to establish the physical and mechanical properties of the asphalt mixture through laboratory testing. The results showed variations in the volumetric properties of the mixtures, with differentiated behaviors in specific gravity, percentage of voids, percentage of voids in the mineral aggregate, and percentage of voids filled with asphalt cement, depending on the fiber dosage used. Regarding mechanical properties, these increased up to 0.30% fiber, optimizing the mechanical behavior of the standard asphalt mixture, as flow, stability, and stiffness increased by 5.96%, 11.92%, and 5.46%, respectively. Therefore, the incorporation of bamboo fibers constitutes a technically viable alternative, contributing to Sustainable Development Goal 12, related to responsible production and consumption.

Keywords: Stability, bamboo fiber, flow, asphalt mix

* Autor para correspondencia

¹ Universidad César Vallejo, Perú. Email: mmanayayca@ucvvirtual.edu.pe, erodriguezta11@ucvvirtual.edu.pe, vgranadoslm@ucvvirtual.edu.pe

² Universidad Señor de Sipán, Perú. Email: garriola@uss.edu.pe

INTRODUCCIÓN

Las mezclas asfálticas en caliente (HMA) siguen siendo el material más utilizado para la construcción de pavimentos flexibles debido a su adecuada capacidad estructural, facilidad constructiva y comportamiento frente a las cargas repetidas del tránsito (Naveed et al., 2022). Sin embargo, el incremento del volumen vehicular, las mayores cargas por eje y las variaciones climáticas han acelerado la aparición de patologías como ahuellamiento, fisuración por fatiga, fisuración térmica y daño por humedad, reduciendo la vida útil de los pavimentos y aumentando los costos de conservación (Yasir et al., 2025). En consecuencia, durante los últimos años las investigaciones se han orientado hacia el desarrollo de HMA modificadas, capaces de mejorar el comportamiento mecánico, manteniendo simultáneamente criterios de diseño a nivel técnico y sostenibilidad ambiental (Milad et al., 2022). Entre la diversidad de alternativas, destaca la incorporación de las fibras dentro de la matriz asfáltica, ya que estas actúan como elementos de soporte tridimensional, favoreciendo la distribución de esfuerzos, incrementando la cohesión interna de la mezcla y mejorando la adhesión entre el asfalto y los agregados minerales (Kou et al., 2025); asimismo, contribuyen a reducir el drenado del ligante durante la fabricación, limitando de esta manera, la propagación de microfisuras y aumentando la resistencia frente a deformaciones permanentes y procesos de fatiga (Guo et al., 2023).

Actualmente diferentes estudios están demostrando que el efecto reforzante que se genera, depende no sólo del tipo de fibra utilizada, sino también de sus propiedades físicas, longitud, proporción y método de incorporación durante el proceso de mezclado de la HMA (Hui et al., 2022). En este contexto, las fibras naturales han despertado un importante interés debido a que constituyen una alternativa renovable, biodegradable y de menor impacto ambiental respecto a las fibras sintéticas tradicionales (Wu et al., 2024). Entre la diversidad de fibras orgánicas destacan las provenientes de sisal, coco, yute, bagazo de caña y bambú, pues presentan una elevada disponibilidad en numerosos países tropicales, permitiendo aprovechar residuos agroforestales mediante estrategias de economía circular (Alnadish et al., 2023); además, estas fibras pueden incrementar las propiedades mecánicas, siendo su comportamiento comparable con una HMA tradicional. Dentro de este grupo, la fibra de bambú ha adquirido especial relevancia por su adecuada resistencia, alto contenido de celulosa, buena estabilidad térmica durante el proceso de mezclado y considerable capacidad de absorción del ligante (Jia et al., 2026). Así mismo, su superficie rugosa favorece la adherencia con el asfalto, generando una red interna que mejora la cohesión de la HMA y restringe el desplazamiento relativo de los

agregados, pues estudios recientes indican que la incorporación de fibra de bambú puede incrementar la estabilidad Marshall, mejorar la resistencia al daño por humedad y aumentar la resistencia al agrietamiento a bajas temperaturas (Xia et al., 2024); aunque un contenido excesivo superior al 1.00%, puede afectar negativamente la trabajabilidad, compactación y algunas propiedades volumétricas (Li et al., 2024).

A pesar de estos avances, la literatura científica evidencia que aún existen discrepancias respecto al contenido óptimo de fibra de bambú. Mientras algunos investigadores reportan mejoras significativas con contenidos cercanos a 0.30% respecto al peso total de la mezcla (Xie et al., 2023). Otros investigadores indican que incrementos superiores al 0.50% pueden ocasionar aglomeración de fibras, aumento del contenido de vacíos y disminución de la estabilidad estructural (Zheng et al., 2023). Estas diferencias están relacionadas con factores como la procedencia del bambú, el método de extracción de la fibra, sus dimensiones, el tipo de ligante asfáltico, la granulometría de los agregados y las condiciones de fabricación de la HMA (Li et al., 2023). En consecuencia, resulta necesario continuar evaluando experimentalmente el comportamiento físico y mecánico de las mezclas asfálticas modificadas bajo diferentes porcentajes de incorporación de fibra. Desde el punto de vista del diseño Marshall, el análisis conjunto de propiedades físicas, como el peso específico, porcentaje de vacíos, porcentaje de vacíos en el agregado mineral y porcentaje de vacíos llenos con cemento asfáltico, junto con los parámetros mecánicos, tales como el flujo, la estabilidad y la rigidez, constituyen una herramienta ampliamente aceptada para evaluar la calidad de una mezcla asfáltica, lo que garantizará un desempeño adecuado del pavimento flexible (Alnadish et al., 2023). Así mismo, la modificación mediante fibras naturales puede alterar favorablemente estas propiedades, aunque su efecto depende de la dosificación utilizada y de la interacción entre la fibra, asfalto y agregado, por ello se hace necesario evaluar el comportamiento de las fibras de bambú en una HMA (Jia et al., 2022).

En países con abundantes recursos de bambú y similares fibras, como Perú y América Latina, el aprovechamiento de este tipo de fibra representa una oportunidad para desarrollar pavimentos asfálticos más sostenibles, lo que permite reducir el uso de modificadores sintéticos y generar valor agregado a los recursos naturales de amplia disponibilidad (Castro et al., 2020). No obstante, todavía existe una limitada evidencia experimental que relacione directamente diferentes contenidos de fibra de bambú con las propiedades físicas y mecánicas de HMA

elaboradas mediante el método Marshall, particularmente bajo condiciones de materiales locales y condiciones climáticas específicas (Adrianzen et al., 2022).

Por lo expuesto, la presente investigación tiene como objetivo evaluar el comportamiento físico y mecánico de mezclas asfálticas en caliente modificadas con diferentes contenidos de fibra de bambú de 0.20%, 0.25%, 0.30%, 0.35% y 0.40%, comparándolas con una mezcla convencional, mediante el análisis de sus propiedades volumétricas y sus parámetros mecánicos. Los resultados permitirán identificar el contenido de fibra que proporciona el mejor equilibrio entre desempeño estructural y características volumétricas, aportando evidencia científica para promover el uso de materiales naturales renovables en la ingeniería de pavimentos.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología fue del tipo aplicada y diseño experimental, para lo cual fue necesario elaborar 72 muestras cilíndricas, correspondientes a la muestra control y a los diferentes tratamientos con fibras de bambú, distribuidas en 12 especímenes por tratamiento, para establecer con los ensayos de laboratorio, las propiedades fisicomecánicas de la HMA. Así mismo, el diseño experimental contempló una mezcla patrón (TM-1) elaborada sin adición de fibra y cinco mezclas modificadas con contenidos de fibra de bambú de 0.20% (TM-2), 0.25% (TM-3), 0.30% (TM-4), 0.35% (TM-5) y 0.40% (TM-6), expresados como porcentaje respecto al peso total de la mezcla. Todas las probetas fueron sometidas al mismo procedimiento de preparación, acondicionamiento y compactación mediante el método Marshall en concordancia a las especificaciones de la norma ASTM D6926-20 y se mantuvieron constantes la composición granulométrica de los agregados y el contenido óptimo de cemento asfáltico. La Figura 1, sintetiza los procedimientos aplicados en la presente investigación.

Los materiales empleados estuvieron constituidos por agregados pétreos, cemento asfáltico y fibra natural de bambú, los cuales fueron obtenidos de la ciudad de Chiclayo, Región Lambayeque, Perú. Los agregados fueron seleccionados de canteras de la Región Lambayeque, conforme a los requisitos establecidos para una HMA. El ligante asfáltico utilizado correspondió al grado de penetración PEN 60/70, mientras que la fibra de bambú fue previamente acondicionada para asegurar una adecuada dispersión durante el proceso de mezclado y favorecer su interacción con la matriz asfáltica. Las normas empleadas para el control de calidad de los materiales en esta investigación se muestran en la Tabla 1.

El diseño de las mezclas se realizó mediante el método Marshall conforme a la norma ASTM D6926-20, ampliamente utilizado para la dosificación de mezclas, debido a su confiabilidad para evaluar las propiedades de la HMA. Es por ello que la mezcla asfáltica convencional fue empleada como referencia para comparar el comportamiento de las mezclas modificadas con fibra de bambú. Posteriormente, se elaboraron las diferentes dosificaciones incorporando progresivamente la fibra de bambú en los porcentajes indicados anteriormente, pero manteniendo constantes la granulometría de los agregados y el contenido óptimo de asfalto de 5.50%, que fue determinado en el diseño de referencia estándar. Cabe agregar que el contenido óptimo de cemento asfáltico de la mezcla patrón del 5.50%, determinado mediante el procedimiento de diseño Marshall, se mantuvo constante en todas las mezclas modificadas, con la finalidad de evaluar específicamente el efecto de la incorporación progresiva de fibra de bambú sobre el comportamiento de cada HMA. Así mismo, esta condición experimental permitió mantener constante la cantidad del ligante y la distribución de la granulometría, de modo que las variaciones observadas en las propiedades volumétricas y mecánicas pudieran asociarse principalmente a la incorporación y dosificación de la fibra.

En cuanto a la preparación de las diferentes mezclas asfálticas, este desarrollo consistió en el calentamiento independiente de los agregados y del cemento asfáltico hasta alcanzar la temperatura de mezclado correspondiente, cercana a los 155.00°C. Posteriormente, la fibra de bambú fue incorporada mediante mezcla en seco con los agregados calientes para favorecer su distribución homogénea, seguida de la adición del ligante asfáltico hasta obtener una mezcla uniforme. Finalmente, el material fue compactado utilizando el procedimiento Marshall, obteniéndose especímenes cilíndricos para la evaluación experimental.

Figura 1
Diagrama de flujo de procesos de la investigación



Tabla 1
Principales normas usadas para el control de calidad de los materiales usados en la investigación

Material	Ensayo	Norma	Especificación	Resultado
Agregado fino	Equivalente de arena	ASTM D2419-22	45% Min.	74.00%
	Angularidad	ASTM C1252-23	30% Min.	51.20%
	Valor de azul de metileno	AASHTO TP 330-22	8% Max.	7.35%
	Índice de plasticidad	ASTM D4318-17e1	NP	NP
	Índice de durabilidad	ASTM D3744/D3744M-18	35% Min.	56.30
	Adhesividad (Riedel Weber)	MTC E220	4% Min.	5.00%
	Sales solubles totales	ASTM D1888	0.50 Max.	0.09%
	Determinación de terrones de arcilla y partículas friables en agregados	ASTM C142/C142M-17(2023)	1% Max.	0.02%
	Durabilidad al magnesio	ASTM C88-99a	máximo 18%	8.10%
	Abrasión en la máquina de Los Ángeles	ASTM C131/C131M-20	máximo 35%	19.00%
Agregado grueso	Adherencia	AASHTO T 182-84	> 95	> 95
	Índice de durabilidad	ASTM D3744/D3744M-18	mínimo 35%	55.00%
	Partículas chatas y alargadas	ASTM D4791-19	máximo 10%	8.10%
	Caras fracturadas (1 cara)	ASTM D 5821-13	mínimo 85%	100%
	Caras fracturadas (2 caras)	ASTM D 5821-13	mínimo 75%	100%
	Sales solubles totales	ASTM D1888	máximo 0.50	0.06%
	Absorción	ASTM C127-24	máximo 1%	0.82%
	Penetración	ASTM D5/D5M-20	60 a 70	69.00

Asfalto PEN 60/70	Ductilidad	ASTM D113/D113M- 17(2023)	mínimo 100	>150
	Fluencia	ASTM D2170/D2170M-24	mínimo 200	540.00
	Solubilidad	ASTM D2042-22	mínimo 99	101.00
	Volatilidad	ASTM D92-18	mínimo 232	285.00
	Densidad	ASTM D70/D70M- 21	-	6.95
	Susceptibilidad térmica	ASTM D36/D36M- 14(2020)	máximo 54	52.00
		ASTM D2872-22	máximo 0.80	0.45
		ASTM D5/D5M-20	mínimo 52	65.00
		ASTM D113-17	mínimo 50	71.00

Las propiedades físicas analizadas, que en conformidad a la norma ASTM D6927-22, comprendieron el peso específico (PE), el porcentaje de vacíos de aire (%V), el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (%VMA) y el porcentaje de vacíos llenos con cemento asfáltico (%VLLCA). Estas variables permitieron analizar la densificación de la mezcla, el equilibrio volumétrico y la capacidad del asfalto para ocupar los espacios internos de la composición granular, aspectos fundamentales para el comportamiento físico y mecánico del pavimento flexible.

En cuanto a las propiedades mecánicas, que en concordancia a lo señalado por la norma ASTM D6927-22, se determinaron el flujo (F), la estabilidad Marshall (E) y la relación estabilidad/flujo, conocida como la rigidez (R). El flujo representa la deformación experimentada por la mezcla antes de alcanzar la carga máxima, mientras que la estabilidad Marshall corresponde a la carga máxima soportada por la probeta durante el ensayo. La rigidez fue empleada como un indicador complementario del desempeño estructural y de la resistencia de la mezcla frente a deformaciones permanentes.

Posteriormente, los resultados obtenidos fueron organizados mediante una tabla y también representados gráficamente para facilitar el análisis comparativo entre las diferentes dosificaciones. Finalmente, se evaluó el efecto del contenido de fibra de bambú sobre cada uno de los parámetros de las propiedades físicas y mecánicas, identificando la dosificación que proporcionó el mejor equilibrio entre estabilidad, deformabilidad y comportamiento volumétrico de la mezcla asfáltica.

RESULTADOS

Los resultados del diseño de la HMA permitieron determinar las principales propiedades de este tipo de mezcla, cuyos parámetros representativos se muestran en la Tabla 2, tanto para la HMA estándar y para la HMA con los diferentes contenidos de fibras de bambú.

Respecto al peso específico, indicado en la Tabla 2, muestra que la incorporación de fibras de bambú generó ligeras variaciones en la densidad de la HMA, pues las mezclas con adiciones de 0.20%, 0.25% y 0.30% presentaron valores similares a la mezcla patrón (TM-1), revelando una influencia limitada de estas dosificaciones. En contraste, la mezcla con 0.40% de fibra (TM-6) alcanzó el mayor peso específico, posiblemente debido a una mejor distribución de agregados y ligante, además de una menor movilidad del asfalto durante la compactación. Por otro lado, la dosificación de 0.35% (TM-5) mostró menor densidad, asociada a una estructura más abierta.

En relación al %V la incorporación de fibras de bambú mostró un comportamiento variable en la HMA (Tabla 2). Las dosificaciones de 0.20% (TM-2) y 0.25% (TM-3) incrementaron moderadamente los vacíos, mientras que el tratamiento con 0.30% (TM-4) presentó el menor contenido, evidenciando una mejor compactación y distribución interna de los agregados. No obstante, al aumentar la fibra a 0.35% y 0.40%, los vacíos incrementaron nuevamente, alcanzando el mayor valor en el tratamiento TM-6. Este comportamiento podría atribuirse a que concentraciones elevadas de fibra dificultan la compactación y generan espacios adicionales en la estructura de la mezcla.

Tabla 2

Parámetros de las propiedades de las diferentes HMA

Parámetro de HMA	Unidad	Muestra					
		TM-1	TM-2	TM-3	TM-4	TM-5	TM-6
PE	gr/cm ³	2.344	2.327	2.332	2.337	2.306	2.365
%V	%	3.88	4.35	4.14	3.37	4.39	4.82
%VMA	%	8.87	8.41	8.26	6.80	9.38	7.55
%VLLCA	%	56.23	48.35	49.94	50.49	53.23	36.18
F	mm	3.69	3.72	3.84	3.91	3.44	3.09
E	Kg	1092.72	1114.57	1182.34	1222.96	1022.60	842.42
R	Kg/cm	2964.43	2993.49	3083.00	3126.39	2970.65	2726.27

Los resultados del %VMA, evidenciaron que la fibra de bambú modificó la estructura interna de la HMA, tal y como se indica en la Tabla 2, ya que las adiciones de 0.20% (TM-2) y 0.25% (TM-3) generaron ligeras reducciones respecto a la mezcla patrón (TM-1), mientras que el rango de 0.30% (TM-4) la HMA presentó la mayor disminución, asociada a una mejor interacción entre agregados y eficiencia granular. En contraste a estos hallazgos, el valor de 0.35% (TM-5) incrementó el %VMA debido a una mayor presencia de espacios internos. Finalmente, la dosis de 0.40% (TM-6) redujo nuevamente este parámetro, demostrando que el efecto de las fibras depende de su dosificación.

En relación al %VLLCA, la incorporación de fibras de bambú modificó el comportamiento físico de la HMA (Tabla 2), ya que las dosificaciones de 0.20% (TM-2), 0.25% (TM-3) y 0.30% (TM-4) redujeron ligeramente este parámetro. En contraste a ello, el tratamiento de 0.35% (TM-5) mostró una recuperación cercana a la mezcla patrón, evidenciando mayor retención del asfalto. Finalmente, la adición de 0.40% (TM-6) redujo nuevamente el %VLLCA debido al incremento de vacíos internos generado por el exceso de fibras.

En cuanto al flujo (Tabla 2), se evidencia que la fibra de bambú modificó la capacidad de deformación de las mezclas, pues en relación con la mezcla patrón (TM-1), los tratamientos de 0.20% (TM-2), 0.25% (TM-3) aumentaron y especialmente con la muestra de 0.30% (TM-4), se produjo un incremento de 5.96%. Este resultado indica que la mezcla adquirió una mayor capacidad de deformación antes de la falla, posiblemente generada por la capacidad de las fibras para distribuir los esfuerzos. Sin embargo, cuando el contenido de fibra aumentó a 0.35% (TM-5) y 0.40% (TM-6), el flujo disminuyó, siendo este último tratamiento el que presentó el menor valor. Esto sugiere que cantidades excesivas de fibra pueden generar una estructura más rígida y menos deformable.

Respecto a la estabilidad (Tabla 2), la incorporación de fibras de bambú mejoró la resistencia de la HMA hasta una dosificación óptima de 0.30%, alcanzando un aumento de 11.92%. Por otro lado, las mezclas con 0.20% (TM-2) y 0.25% (TM-3), también incrementaron progresivamente la estabilidad, debido al efecto de refuerzo de las fibras frente a cargas externas. Sin embargo, al aumentar la fibra a 0.35% (TM-5) y 0.40% (TM-6), la estabilidad disminuyó, posiblemente por una distribución inadecuada y la formación de zonas de concentración que reducen la cohesión de la mezcla.

La rigidez, presentó un comportamiento acorde con los resultados del ensayo Marshall (Tabla 2). Las dosificaciones de 0.20% (TM-2) y 0.25% (TM-3) generaron incrementos moderados, mientras que con la incorporación de 0.30% (TM-4) alcanzó el mayor valor, superando a la muestra estándar (TM-1) en 5.46%, evidenciando un equilibrio óptimo entre resistencia y deformación. Sin embargo, las mezclas con 0.35% (TM-5) y 0.40% (TM-6) mostraron reducciones, siendo esta última la de menor desempeño, por lo expuesto, este tipo de comportamiento sugiere que los contenidos elevados de fibra disminuyen la eficiencia mecánica de la HMA.

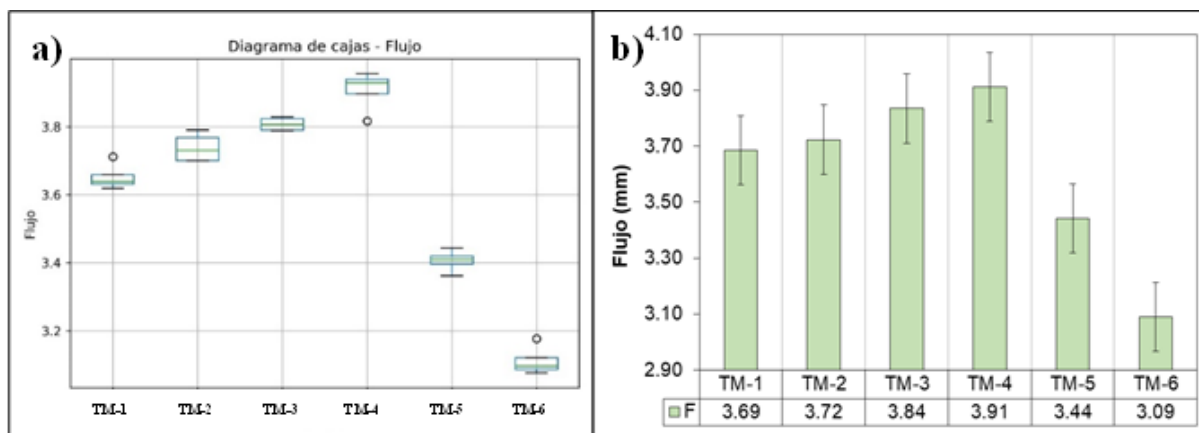
Análisis estadístico e interpretación

Complementarios a estos hallazgos, se realizó el análisis estadístico para los parámetros mecánicos, que permitió validar los hallazgos mediante un análisis de varianzas (ANOVA) y prueba de medias de Tukey.

En cuanto al parámetro flujo, el análisis ANOVA mostró diferencias significativas ($p = 7.36E-15 < 0.05$) entre las diferentes HMA estudiadas, tal y como se muestra en la Figura 2a y Figura 2b. Además, la prueba de medias de Tukey ubicó a las muestras TM-3 y la TM-4 dentro del grupo de mayores valores, con 3.84 mm y 3.91 mm, respectivamente. Mientras que el tratamiento TM-6 presentó el menor valor con 3.09 mm. Por tanto, la prueba de Tukey complementa los resultados del ANOVA al demostrar que determinadas dosificaciones de fibras de bambú generan mejoras significativas en el comportamiento de la mezcla asfáltica, asociada en este caso a la deformación de la HMA.

Figura 2

Parámetro flujo: (a) diagrama de cajas y (b) variación según el tipo de muestra

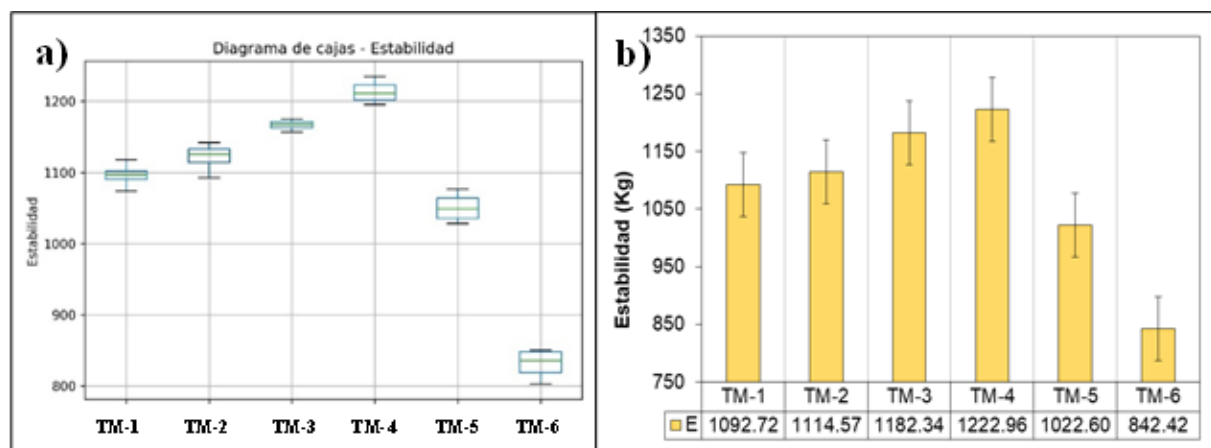


La estabilidad Marshall (Figura 3a y Figura 3b) fue uno de los parámetros mecánicos que presentó las diferencias más marcadas entre los diferentes tratamientos. El ANOVA evidenció una significancia estadística elevada ($p = 2.99E-15 < 0.05$), mientras que la prueba de Tukey identificó a TM-3 y TM-4 como los grupos de mayor desempeño mecánico, con valores promedio de 1182.34 Kg y 1222.96 Kg, respectivamente. En contraste, el tratamiento TM-6 registró la menor estabilidad con 842.42 Kg, diferenciándose claramente del resto de HMA. Desde el punto de vista estructural, la estabilidad Marshall constituye uno de los indicadores más importantes de la capacidad resistente de una mezcla asfáltica frente a las cargas de tránsito. Los resultados obtenidos indican que la dosis TM-4 presenta la mejor capacidad para soportar esfuerzos externos, pero sin experimentar deformaciones excesivas. La superioridad estadística observada mediante la prueba de medias de Tukey confirma que las diferencias registradas son

muy significativas, ya que destaca la TM-4 como la de mejor comportamiento mecánico para este parámetro evaluado.

Figura 3

Parámetro estabilidad: (a) diagrama de cajas y (b) variación según el tipo de muestra



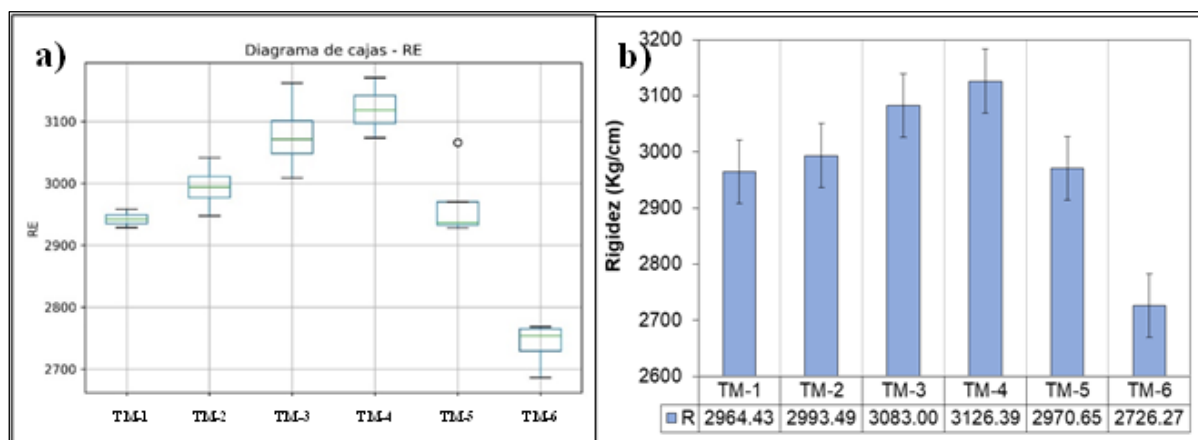
El análisis ANOVA de la rigidez (Figura 4a y Figura 4b) evidenció diferencias significativas entre las mezclas ($p = 2.40E-08 < 0.05$), por otro lado, la prueba de Tukey identificó a los tratamientos TM-3 y TM-4, como los rangos superiores, con valores de 3083.00 Kg/cm y 3126.39 Kg/cm, respectivamente; mientras que la muestra TM-6 presentó el menor valor, pues fue 2726.27 Kg/cm. Así mismo, estos hallazgos demuestran que las dosificaciones intermedias de fibra de bambú favorecieron una mayor rigidez, ubicándose en grupos estadísticos superiores. En contraste, contenidos elevados de fibra redujeron el desempeño. Esto confirma que una dosificación adecuada mejora la resistencia y deformación controlada de la mezcla asfáltica.

Considerando conjuntamente los hallazgos experimentales y los derivados del análisis ANOVA, junto con la prueba de Tukey, puede deducirse que las modificaciones generadas por la fibra de bambú en las diferentes HMA, produjeron cambios estadísticamente significativos en el comportamiento mecánico. En consecuencia, desde una perspectiva estadística y de desempeño, el tratamiento TM-4, puede considerarse la HMA más favorable dentro del conjunto de muestras analizadas. Así mismo, los resultados del ensayo Marshall evidencian que las dosificaciones intermedias de fibra favorecen los parámetros de estabilidad y rigidez bajo las condiciones específicas del ensayo. Sin embargo, estos hallazgos no permiten establecer directamente un incremento de la durabilidad frente a cargas repetidas, debido a que no se realizaron ensayos específicos de fatiga, ahuellamiento o desempeño dinámico. Por ello, los resultados deben interpretarse como evidencia del efecto de la fibra sobre la respuesta Marshall

de la mezcla, mientras que su influencia sobre el desempeño a largo plazo requiere ser validada mediante ensayos complementarios.

Figura 4

Parámetro rigidez: (a) diagrama de cajas y (b) variación según el tipo de muestra



DISCUSIÓN

Los resultados asociados a las propiedades volumétricas (PE, %V, %VMA y %VLLCA) demostraron que la incorporación de fibras de bambú, generó modificaciones en la estructura interna de las HMA. Se evidenció además que el %V presentó variaciones según la dosificación de fibra empleada, mientras que el %VMA y %VLLCA reflejaron cambios relacionados con la interacción entre las fibras, los agregados y la distribución del asfalto en cada tipo de HMA. Estos resultados presentan similitud con lo reportado por Shahnewaz et al. (2023), quienes señalaron que las fibras de origen natural, modifican la estructura de vacíos y favorecen la retención del asfalto, optimizando la estabilidad volumétrica de la mezcla asfáltica. Asimismo, Alnadish et al. (2023), indican que la fibra de bambú incrementa la capacidad de absorción y retención del asfalto, generando variaciones significativas en los parámetros volumétricos. De igual manera Xia et al. (2024), demostraron que estas fibras mejoran la interacción de los componentes de las HMA, mediante una mejor interacción entre los agregados y el asfalto. En consecuencia, las diferencias observadas en las propiedades volumétricas evidencian el efecto directo de la fibra de bambú sobre la configuración interna de la mezcla contribuyendo al desempeño y durabilidad potencial del pavimento flexible.

Respecto a las propiedades mecánicas, los resultados evidenciaron que la incorporación de fibra de bambú, modificó significativamente la resistencia y capacidad de deformación de las HMA, lo cual fue confirmado mediante el análisis ANOVA y la prueba de comparación múltiple de Tukey. Las mezclas con contenidos intermedios de fibra presentaron los mayores

valores de estabilidad y rigidez, ubicándose en los grupos estadísticamente superiores, mientras que las dosificaciones extremas mostraron menor desempeño. Este comportamiento indica que existe una proporción óptima de fibra capaz de mejorar la transferencia de esfuerzos dentro de la matriz asfáltica sin comprometer su uniformidad. Estos resultados coinciden con Xia et al. (2024), quienes señalaron que las fibras de bambú incrementan la resistencia a la fatiga mediante mecanismos de refuerzo interno. Asimismo Zhang et al. (2024), demostraron que las fibras de bambú mejoran la cohesión y resistencia del mortero asfáltico frente a deformaciones permanentes. De manera complementaria, Li et al. (2024), concluyeron que estas fibras favorecen el comportamiento frente al ahuellamiento, fatiga y envejecimiento de las mezclas asfálticas. Además Shahnewaz et al. (2023), reportaron incrementos en la estabilidad Marshall al incorporar fibras naturales en mezclas asfálticas.

Por lo expuesto, las diferencias observadas respecto de investigaciones previas pueden estar relacionadas con las características propias de la fibra de bambú empleada, particularmente su geometría, acondicionamiento y contenido de incorporación, así como con las características del asfalto y de los agregados utilizados. Adicionalmente, las condiciones de mezclado, compactación y distribución de la fibra pueden modificar su interacción con la matriz asfáltica y, por tanto, generar respuestas diferentes aun cuando se empleen porcentajes de fibra similares. En este sentido, los resultados obtenidos deben interpretarse considerando las condiciones específicas de los materiales y procedimientos empleados en la presente investigación. No obstante, los hallazgos del presente estudio y la evidencia científica internacional, respaldan que una adecuada dosificación de fibras de bambú contribuye a mejorar la resistencia mecánica de los pavimentos flexibles.

CONCLUSIONES

Se concluye que la incorporación de fibras de bambú en la HMA modificó el comportamiento físico de manera diferenciada, ya que los hallazgos evidenciaron variaciones en las propiedades volumétricas de las mezclas, con comportamientos diferenciados del peso específico, porcentaje de vacíos, porcentaje de vacíos en el agregado mineral y porcentaje de vacíos llenos con cemento asfáltico, según la dosificación de fibra empleada, lo que sugiere que la fibra de bambú al absorber parte del asfalto, logra alterar la distribución interna de la mezcla, viéndose afectada la estructura volumétrica de la HMA, pero sin comprometer el desempeño global de la misma.

Se concluye que la incorporación de fibra de bambú mejoró las propiedades mecánicas de la HMA hasta una dosificación óptima de 0.30%, logrando incrementos en el flujo, estabilidad y rigidez de 5.96%, 11.92% y 5.46%, respectivamente, respecto a la mezcla estándar, los cuales fueron validados mediante la prueba ANOVA y la prueba de medias de Tukey, evidenciando diferencias significativas entre los diferentes tratamientos y demostrando el efecto positivo de la fibra sobre el comportamiento mecánico de la HMA, a pesar de ello, contenidos superiores al 0.30% redujeron la eficiencia mecánica de la mezcla, a pesar de mantener el mismo contenido óptimo de asfalto.

Se concluye que el 0.30% de fibra de bambú permitió maximizar simultáneamente la estabilidad, el flujo y la rigidez de la HMA, por lo que esta proporción se recomienda como referencia para futuros diseños de mezclas y estudios de validación en campo a mayor escala, pues el uso de la fibra de bambú constituye una alternativa con potencial para el aprovechamiento de recursos naturales renovables dentro de la modificación de HMA. No obstante, debido a que la presente investigación no incluyó un análisis económico ni una evaluación ambiental cuantitativa, los posibles beneficios asociados con la reducción de costos, consumo de recursos, impacto ambiental o ciclo de vida, deben considerarse como aspectos potenciales que requieren ser demostrados mediante estudios específicos. En este sentido, el aprovechamiento de la fibra de bambú puede vincularse con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 12, particularmente desde la perspectiva del uso y valorización responsable de recursos.

Entre las principales limitaciones del estudio se encuentra la evaluación del comportamiento de las mezclas exclusivamente mediante parámetros Marshall y propiedades volumétricas, sin incorporar ensayos específicos de fatiga, ahuellamiento, susceptibilidad al daño por humedad o envejecimiento. Asimismo, los especímenes fueron elaborados y evaluados bajo condiciones controladas de laboratorio, por lo que los resultados no pueden extrapolarse directamente al comportamiento de un pavimento a escala real. En consecuencia, futuras investigaciones deberían complementar estos resultados mediante ensayos de desempeño y validaciones a escala piloto o de campo, además de evaluar la influencia del envejecimiento y de diferentes condiciones ambientales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adrianzen, O., Azula, J., Pacherrres, C., Rodriguez, E., & Muñoz, S. (2022). Uso de distintos tipos de fibras para mejorar las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica: Una

- revisión literaria. *Infraestructura Vial*, 24(43), 1-16.
<https://doi.org/10.15517/iv.v24i43.47931>
- Alnadish, A., Singh, N., & Alawag, A. (2023). Applications of synthetic, natural, and waste fibers in asphalt mixtures: A citation-based review. *Polymers*, 15(4).
<https://doi.org/10.3390/polym15041004>
- Castro, H., Romero, B., Vásquez, C., & Arriola, G. (2020). Influencia de la cáscara y fibra de coco en mezclas asfálticas en caliente. *Revista Ingeniería: Ciencia, Tecnología e Innovación*, 7(2), 176-190. <https://doi.org/10.26495/icti.v7i2.1506>
- Guo, Y., Tataranni, P., & Sangiorgi, C. (2023). The use of fibres in asphalt mixtures: A state of the art review. *Construction and Building Materials*, 390.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131754>
- Hui, Y., Men, G., Xiao, P., Tang, Q., Han, F., Kang, A., & Wu, Z. (2022). Recent advances in basalt fiber reinforced asphalt mixture for pavement applications. *Materials*, 15(19).
<https://doi.org/10.3390/ma15196826>
- Jia, H., Chen, H., Sheng, Y., Meng, J., Cui, S., Kim, Y. R., Huang, S., & Qin, H. (2022). Effect of laboratory aging on the stiffness and fatigue cracking of asphalt mixture containing bamboo fiber. *Journal of Cleaner Production*, 333.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130120>
- Jia, H., Gao, X., Zhang, Y., Meng, X., Huang, X., Wang, K., Chen, L., Hu, P., & Sheng, Y. (2026). A State of the art review on the use of natural fibers in asphalt mixtures. *Materials*, 19(4). <https://doi.org/10.3390/ma19040756>
- Kou, C., Xu, S., Sun, J., Wang, D., Chen, Z., & Kang, A. (2025). Pavement performance and mechanism of asphalt mixtures reinforced with different diameters of basalt fibers for the surface layer. *Coatings*, 15(10). <https://doi.org/10.3390/coatings15101153>
- Li, H., Liu, S., Yang, F., He, S., Jing, H., Zou, X., Li, Z., & Sheng, Y. (2024). Review of utilization of bamboo fiber in asphalt modification: Insights into preparation, performance, reinforcement, and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 468.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143010>

- Li, J., Yang, L., He, L., Guo, R., Li, X., Chen, Y., Muhammad, Y., & Liu, Y. (2023). Research progresses of fibers in asphalt and cement materials: A review. *Journal of Road Engineering*, 3(1), 35-70. <https://doi.org/10.1016/j.jreng.2022.09.002>
- Milad, A., Babalghaith, A., Al-Sabaei, A., Dulaimi, A., Ali, A., Reddy, S., Bilema, M., & Yusoff, N. (2022). A comparative review of hot and warm mix asphalt technologies from environmental and economic perspectives: Towards a sustainable asphalt pavement. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(22). <https://doi.org/10.3390/ijerph192214863>
- Naveed, M., Raza, M., & Mehmood, R. (2022). Performance analyses of conventional hot mix asphalt with waste additives. *Case Studies in Construction Materials*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00850>
- Shahnewaz, S., Masri, K., Ahmad, N., Putra, R., Siew, C., Giannakopoulou, P., Rogkala, A., Lampropoulou, P., & Petrounias, P. (2023). Porous asphalt mixtures enriched with bamboo fibers as a new approach for future sustainable construction. *Construction and Building Materials*, 407. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133456>
- Wu, J., Zhao, Z., Jiang, C., Yang, Y., Sun, Z., Yuang, J., & Xiao, F. (2024). Recent development and application of natural fiber in asphalt pavement. *Journal of Cleaner Production*, 449. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141832>
- Xia, C., Xu, M., Li, Q., Liu, K., & Jiang, K. (2024). Study on the freeze–thaw cycle durability of bamboo fiber asphalt mixture. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 17(3), 535-548. <https://doi.org/10.1007/s42947-022-00254-y>
- Xie, T., Ren, W., Chen, Y., Sheng, J., & Wang, L. (2023). Enhancing the performance of asphalt mastic with natural fiber reinforcement: Basalt and bamboo fibers. *Applied Sciences*, 13(13). <https://doi.org/10.3390/app13137946>
- Yasir, M., Khattak, N., Khan, I., & Hoy, M. (2025). Performance evaluation of HDPE-Bakelite Dual-Modified asphalt mixtures for sustainable pavements. *Polymers*, 17(22). <https://doi.org/10.3390/polym17223065>

Zhang, N., Wang, X., Sun, P., Zheng, N., & Sun, A. (2024). Performance of bamboo bark fiber asphalt mortar modified with Surface-Grafted Nano-SiO₂. *Polymers*, 16(19). <https://doi.org/10.3390/polym16192850>

Zheng, X., Liu, Z., Fu, T., Easa, S., Liu, W., & Qiu, R. (2023). Performance enhancement of asphalt mixtures enabled by bamboo fibers and acrylated epoxidized soybean oil. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 11(15), 5867-5875. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c06764>