

# Análisis del desempeño mecánico de una mezcla asfáltica modificada con fibra de bambú

*Mechanical performance analysis of an asphalt mixture modified with bamboo fibres*

**Angie Jiménez**

Instituto Tecnológico de Costa Rica  
Cartago, Costa Rica  
[angiey2395j@gmail.com](mailto:angiey2395j@gmail.com)

**Fecha de recepción:** 27 de noviembre de 2020 / **Fecha de aprobación:** 13 de julio de 2021

## RESUMEN

Las organizaciones internacionales como la ONU reconocen la importancia de efectuar acciones contra el cambio climático. Por esta razón, Costa Rica se plantea alcanzar la meta de carbono-neutralidad en los próximos años. A raíz de lo anterior, se ha visto incrementado el uso de materiales biodegradables en diferentes aplicaciones. Al respecto, este artículo presenta una alternativa sostenible a los aditivos de mezclas asfálticas al plantear el uso de bambú para tal fin. Por tanto, uno de los objetivos de esta investigación es potenciar el uso de este cultivo, que genera múltiples beneficios al ambiente como: fijación de carbono, evita erosión en los suelos, genera fuentes de empleo para su cultivo entre otras. Cabe mencionar que las fibras del culmo se utilizan en esta investigación como producto final y no como residuo por lo que, una vez cultivada, la planta vuelve a crecer generando así un ciclo sostenible.

Esta investigación presenta el análisis y desempeño mecánico de una mezcla asfáltica modificada con fibra de bambú de la especie *guadua angustifolia*. El objetivo principal fue evaluar su comportamiento mecánico con la metodología SUPERPAVE. Como resultado se obtuvo una mejoría en la resistencia de la mezcla a la fatiga y al daño por humedad, lo cual es prometedor y abre una posibilidad al uso de fibras en estos materiales.

**Palabras clave:** fibras de bambú, mezclas asfálticas, desempeño mecánico.

## ABSTRACT

*International organizations such as the UN recognize the importance of acting against climate change. For this reason, several countries such as Costa Rica, plan to achieve carbon neutrality in the coming years. As a result, the use of biodegradable materials in different applications has increased. In this regard, this article presents a sustainable alternative to asphalt mixture additives: the use of bamboo fibres. Therefore, one of the objectives of this research is to promote the use of bamboo, which holds multiple benefits to the environment such as: carbon fixation, avoids soil erosion, generates job opportunities related to cultivation, among others. It is worth mentioning that the culm fibres are used in this research as a final product and not as a waste, this way the plant grows again after harvesting, generating a sustainable cycle.*

*This research presents the analysis and mechanical performance of an asphalt mixture modified with bamboo fibres of the *guadua angustifolia* species. The main objective was to evaluate its mechanical behavior of the resulting mixture by means of the SUPERPAVE methodology. As a result, an improvement in the resistance of the mixture to fatigue and moisture damage was obtained, which is promising and opens a possibility to the use of fibres in these materials.*

**Keywords:** bamboo fibres, asphalt mixture, mechanical performance.

## INTRODUCCIÓN

Las mezclas asfálticas se realizan a partir de la utilización del asfalto, un producto derivado del petróleo. Dicho proceso conlleva un daño ambiental considerable, producto de la destilación del material (García, 2015). En ocasiones estas mezclas requieren un tipo de reforzamiento mediante fibras sintéticas debido a condiciones de diseño como tráfico vehicular, temperatura de la zona, o su utilización en mezclas drenantes. Las fibras sintéticas son hechas a partir de polímeros y otros materiales inertes que permiten la suficiente adherencia a la mezcla, homogeneidad y resistencia requerida para el diseño (Reyes, Troncoso, y Reyes, 2005). Sin embargo, estos materiales no son sostenibles o bien de origen natural.

La necesidad de buscar materiales sostenibles que permitan un adecuado uso y aporte de resistencia a la mezcla da origen a esta investigación. Con estos esfuerzos se pretende contribuir al plan carbono-neutralidad del Ministerio de Ambiente y Energía y sus objetivos de cambio climático en Costa Rica (MINAE, 2020).

En el estudio de pavimentos sustentables se ha avanzado considerablemente, como principal ejemplo destaca el diseño de pavimentos con plástico reciclado, resolviendo así un gran problema derivado del plástico de un solo uso (Brunner, 2018).

En la naturaleza existen materiales que pueden ser utilizados en las mezclas asfálticas como aditivos, entre ellos la fibra de bambú. Este material por sus características mecánicas puede aportar resistencia a tensión, fatiga y deformación en la mezcla, es decir puede ser considerado como un material de refuerzo (Moreno, Trujillo, y Osorio, 2007). En cuanto al bambú, esta planta genera múltiples beneficios al medioambiente tales como: regulación de caudales, esto mediante los rizomas y las raíces de las plantas, ya que le permite contener volúmenes de agua en su interior; también, permiten el desarrollo de flora y fauna en el ecosistema. Además, esta planta cumple una función fijadora de carbono debido a su interacción con el ambiente, en la que capta el dióxido de carbono en exceso presente en la atmósfera (Giraldo, 2020). Dado lo anterior es imprescindible contar con el bambú en nuestros bosques, su accionar contra el

cambio climático es evidente. Como tal, el objetivo de esta investigación es analizar si la fibra de bambú es apta para la utilización como aditivo en mezclas asfálticas, permitiendo a su vez la utilización de materiales naturales y sostenibles.

Sobre esta línea y tomando en cuenta los aspectos antes mencionados, el estudio realizado analiza la factibilidad de agregar fibras de esta planta a las mezclas asfálticas. Para analizar dicha factibilidad se determinó el comportamiento mecánico de la mezcla y el cálculo volumétrico de la adición de las fibras, así como los problemas asociados a las condiciones prácticas de laboratorio. La metodología de diseño de mezcla empleada para el proyecto corresponde a SUPERPAVE; esta metodología considera tanto la resistencia de la mezcla y sus componentes como las condiciones de sitio para su implementación, según el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME, 2015). Asimismo, contempla algunos ensayos adicionales que toman en cuenta la deformación de los materiales y su desempeño a largo plazo (Castro, 2019).

## METODOLOGÍA

Para el desarrollo de esta investigación se utilizó la metodología de diseño SUPERPAVE para mezclas asfálticas en caliente, así como el Manual de Especificaciones Generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes CR-2010 del Ministerio de Obras Públicas y Transporte (Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 2010) como norma de referencia para el cumplimiento de parámetros técnicos de la mezcla. En este caso, es importante indicar que se trabajó con una mezcla previamente diseñada. A esta mezcla se le añadió la fibra de bambú mediante vía seca, es decir, agregándola directamente al agregado.

En este caso particular, la mezcla de control utilizada como base para realizar la modificación cumple con los requerimientos de diseño señalados en el Manual de Especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes CR-2010 (Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 2010). A continuación, se muestra un resumen de las principales características de la mezcla de control (Cuadro 1).

Cuadro 1. Datos de la mezcla de control

Volumetría		
Parámetro	Valor	Requisito
% AC (PTM)	6,2	
% VTM	4,0	
% VMA	14,9	> 14
% VFA	73,3	65 - 75
DP	1,20	0,6 - 1,3
% Gmm @ Nini	85,9	< 89
Características de la mezcla		
Tipo de Asfalto	AC-30	
Tamaño Máximo Nominal mezcla (TMN)	12,5 mm	
Granulometría (Apilamientos)	Polvo de Piedra	
	Cuartilla	
	Quintilla	

Como parte del proceso que se llevó a cabo con la fibra, esta fue colocada 4 veces en un molino para reducir su tamaño, aproximadamente a 2-3 mm de longitud. Se elige este tamaño debido a que se consideró como una hipótesis que a menor tamaño la fibra lograría una distribución uniforme al momento de realizar el proceso de mezclado. Además, mediante una prueba termogravimétrica se determinó la pérdida de masa de la fibra con un aumento gradual de temperatura, en la cual se observó que a la temperatura de interés (160 °C) la muestra pierde menos del 10 % de su masa inicial (Jiménez, 2019), lo cual es adecuado ya que indica que es resistente a la descomposición térmica por debajo de 160 °C.

La fibra de bambú está compuesta en gran parte por celulosa y agua, entre otros componentes. Para utilizarla es necesario reducir su contenido de humedad, así como reducir su tamaño buscando facilitar su mezclado con los agregados y el ligante. En la Figura 1 se muestra la fibra de bambú procesada.

Como parte de la volumetría de la mezcla, fue necesario un reajuste de los cálculos de esta sección debido a la adición de las fibras sobre el 100 % de la mezcla. No obstante, para esta sección se decidió calcular una curva de diseño de PTM (peso total de mezcla) para la mezcla con fibra.

Para el nuevo diseño fue necesario evaluar el porcentaje de fibra adecuado para cumplir los parámetros volumétricos de la mezcla. Se evaluaron 3 posibles porcentajes de fibra (1 %;



Figura 1. Fibra de Bambú

0,5 % y 2 %). Para el primer caso, se encontró que la cantidad de 1 % presentaba un inadecuado porcentaje de vacíos en la mezcla (2,3 %), resultando muy densa. En consecuencia, se procedió a limitar la cantidad de fibra en máximo 1 % y ajustar el porcentaje de asfalto en la mezcla según el nuevo diseño.

Por lo tanto, se omitió el porcentaje de 2 %. Posteriormente, se evaluó 0,1 % en su lugar. Una vez compactados los especímenes en el compactador giratorio SUPERPAVE (ASTM D6925, 2015) se realizaron las pruebas de gravedad específica máxima teórica y gravedad específica bruta de la mezcla para determinar los porcentajes de vacíos. Para el caso de 0,1 % de fibra, la mezcla presentaba alta exudación del asfalto. Según lo mencionado, no se obtuvo el punto de 4 % de vacíos, por lo que se realizó nuevamente la curva de diseño para porcentaje de asfalto reportado en peso total de mezcla, en adelante, PTM. En este caso, debido a la baja densidad de la granulometría de la mezcla, se utilizó la granulometría combinada de los apilamientos de origen aluvial, estos corresponden a piedra cuarta, quinta y polvo de piedra con un tamaño máximo nominal de 12,5 mm. A continuación, se muestra la curva granulométrica de los agregados más la fibra de bambú.

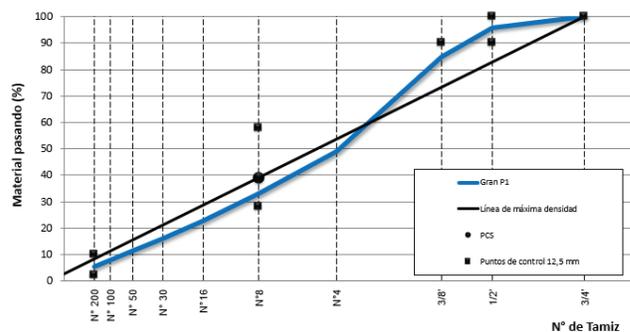


Figura 2. Granulometría de agregados utilizados más la fibra de bambú

En la figura anterior se logra graficar la curva granulométrica de los agregados utilizados y la fibra de bambú según la cual cumple con los parámetros o puntos de control para un tamaño máximo de agregado de 12,5 mm.

Se obtuvo un porcentaje de 5,84 % PTM para un porcentaje de fibra de 1 %. Con estos resultados se realizaron las pruebas de desempeño mecánico más significativas indicadas por la metodología SUPERPAVE Resistencia retenida a la tensión

diametral (AASHTO T-283, 2018), fatiga a flexión en vigas (AASHTO T-321, 2017), daño permanente en rueda de Hamburgo (AASHTO T-324, 2019). De acuerdo con las clasificaciones dadas por AASHTO M323-17 (2017) la mezcla corresponde al rango de 3 a 10 ESAL's (millones de ejes equivalentes). Esto considerando carreteras con una velocidad entre 20 km/h a 70 km/h.

En la Figura 3 se describe la metodología llevada a cabo para el diseño de la mezcla.

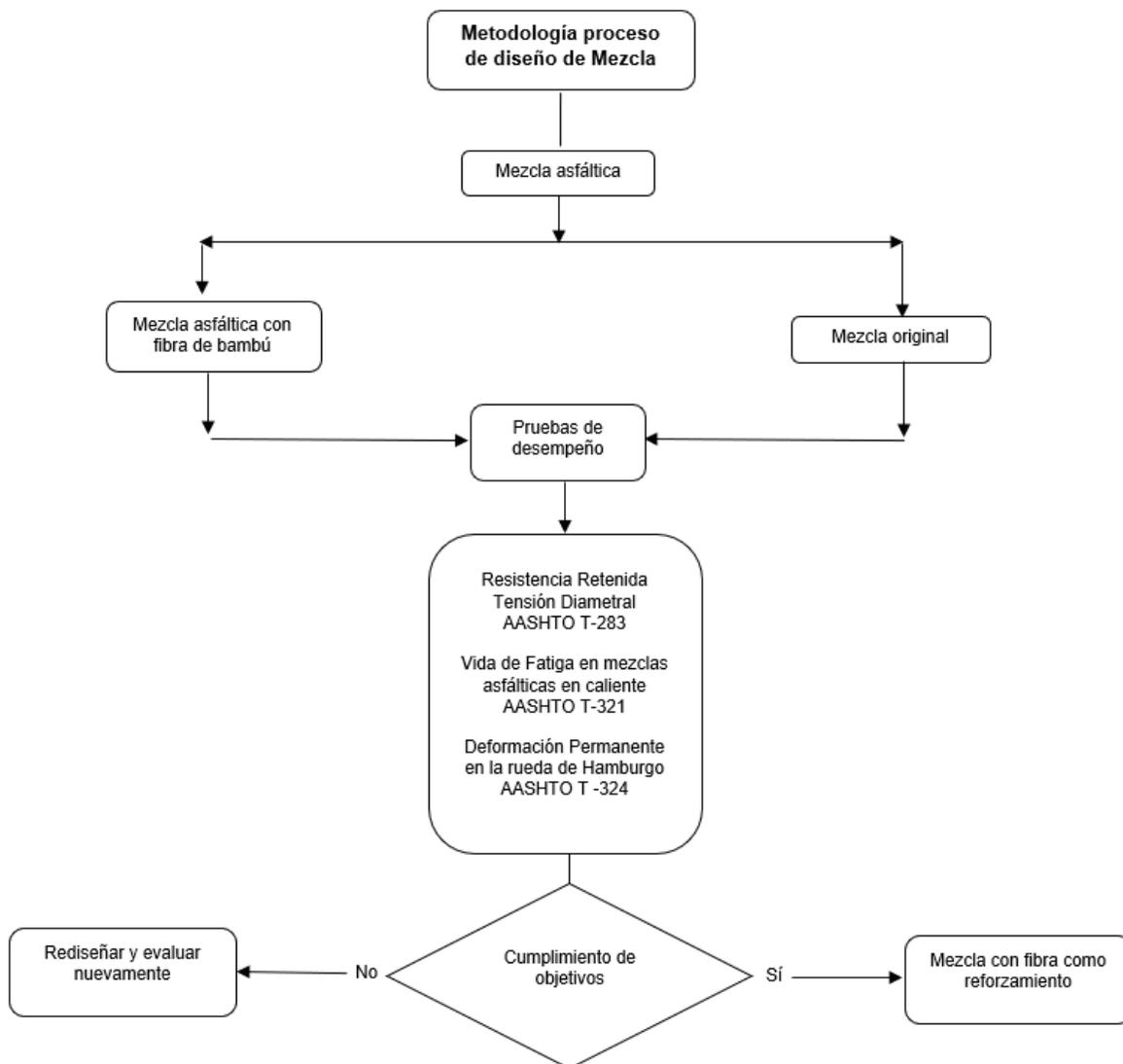


Figura 3. Esquema metodológico del proyecto de investigación (Jiménez, 2019)

En la figura anterior se describe el proceso implementado para la presente investigación, donde el objetivo principal es establecer una base experimental y teórica acerca del comportamiento de una mezcla a la que se le agrega bambú como parte de su matriz de agregados. Esto se compara con la mezcla de control y se determinan los resultados.

## RESULTADOS

Entre los principales resultados obtenidos de esta investigación, se presenta a continuación los datos recolectados del análisis volumétrico de la mezcla, con 5,84 % PTM y 1 % de fibra de bambú (Figura 4).

En el Cuadro 2 se puede observar que la mezcla no logra cumplir con 2 de los parámetros volumétricos mostrados, estos son VMA (vacíos en el agregado mineral) (Figura 4c) y DP (relación polvo-asfalto efectivo) (Figura 4d). Esto es debido a que, al adicionar un agregado diferente y en este caso, con poca densidad, la volumetría se ve comprometida, por lo cual, es estrictamente necesario diseñar nuevamente la granulometría de la mezcla con fibra hasta obtener el cumplimiento de todos los parámetros. El principal cambio en la mezcla original es la adición de la fibra, este agregado cambia considerablemente la densidad de la mezcla, cambiando a su vez el porcentaje de vacíos. Es por esta razón que es necesario realizar un nuevo diseño de apilamientos con una granulometría definida que incluya dentro de su combinación la fibra de bambú y a partir de este nuevo diseño de granulometría realizar las pruebas de densidad en los especímenes.

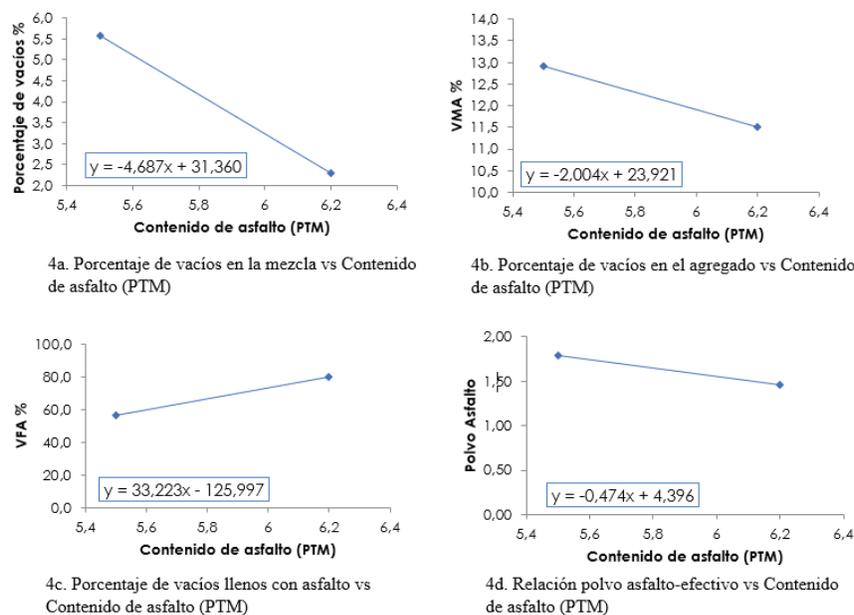


Figura 4. Relación de distintos parámetros con respecto al contenido de asfalto de la mezcla (Jiménez, 2019)

Cuadro 2. Parámetros volumétricos de mezcla con fibra

Diseño 12.5 mm		Requisito
% AC (PTM)	5,84	-
% VTM	4	-
% VMA	12,22	>14
% VFA	68,03	65-75
DP	1,63	0,6-1,3
% Gmm @ N <sub>ini</sub>	80,39	<89

En la prueba de tensión diametral se obtuvo que la mezcla con fibra reportó un valor de 88,5 % frente a un valor de 83,6 % de la mezcla original, siendo 85 % el valor mínimo permitido en el CR-2010 mezcla 418 (3) designada en el Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes (Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 2010). Esta designación indica que requisitos debe cumplir una mezcla para resistir deformación plástica y daño por humedad. En esta prueba se determina el daño por humedad de la mezcla asfáltica, comparando la resistencia a compresión axial de los especímenes saturados frente a los especímenes secos. En este caso, la mezcla con fibra presenta un mejor desempeño que la mezcla original y además logra cumplir el requisito del CR-2010 que corresponde a 85 %. Se puede deducir entonces que la fibra aporta resistencia a la tensión a la mezcla. Particularmente, se puede inferir que la fibra de bambú actúa como una ligera malla que permite aumentar el esfuerzo que resiste la mezcla.

Cabe destacar que las pruebas de resistencia retenida y deformación permanente evalúan la susceptibilidad a la humedad de la mezcla asfáltica, la prueba de tensión diametral permite determinar el grado de desnudamiento que sufre el agregado y el ligante frente a la acción del agua. En el caso del ensayo de rueda de Hamburgo, este permite medir la

resistencia de la mezcla bajo esfuerzos cíclicos que ocasiona el tráfico vehicular a la mezcla y que desgasta notablemente la superficie del pavimento.

En el Cuadro 3 se muestran los resultados del ensayo de vigas a flexión sobre ambas mezclas. Se observa que la mezcla con fibra cumple debidamente con los requisitos detallados en el manual CR-2010 (en la Tabla 418-16 del manual) y como se muestra, presenta mayores ciclos de repeticiones a la falla. En cuanto a los tipos de mezcla C y D especificados en el manual CR-2010 (detallado en la Tabla 402-1 del manual) la mezcla con fibra incumple a una deformación de 400 *microstrain*. Adicionalmente, como se puede observar en la Figura 5 y Figura 6, la mezcla de control incumple los criterios evaluados. Al respecto, se concluye que la fibra de bambú aporta resistencia ante cargas repetitivas. Cabe mencionar que la volumetría de la mezcla con fibra presentó problemas con algunos criterios evaluados (VAM, DP), no obstante, esto no necesariamente es una desventaja en comparación con la mezcla de control. Se debe recordar que la mezcla con fibra logró cumplir una especificación técnica, caso contrario con la mezcla original, esta tuvo 100 % de efectividad en las pruebas volumétricas. Es necesario evaluar como recomendación realizar un estudio más atinente al tamaño de la fibra en la mezcla y su diseño granulométrico con los apilamientos utilizados; esto con el objetivo de cumplir totalmente la volumetría.

Cuadro 3. Deformación unitaria a tensión de la mezcla con fibra vs la mezcla de control

Tipo de mezcla	Deformación unitaria a tensión (1x10 <sup>-6</sup> mm/mm)	Rigidez inicial a flexión (MPa)	Rigidez final a flexión al S x n máximo (MPa)	Número de ciclos de fatiga
Mezcla con fibra	400	8099	8,82E+08	261398
	400	7390	6,44E+08	184123
	400	7745	7,63E+08	222761
	0	501	1,68E+08	54642
	600	6387	1,63E+08	58987
	600	7494	1,63E+08	54162
	600	6940	1,63E+08	56575
	0	783	0	3412
Mezcla de control	400	5485,58	4,63E+08	169170
	400	4848,74	4,94E+08	199520
	400	5167	4,79E+08	184345
	0	450	2,19E+07	21461
	600	4812,66	4,96E+07	20570
	600	4951,22	6,19E+07	25310
	600	4882	5,58E+07	22940
	0	98	8,70E+06	3352

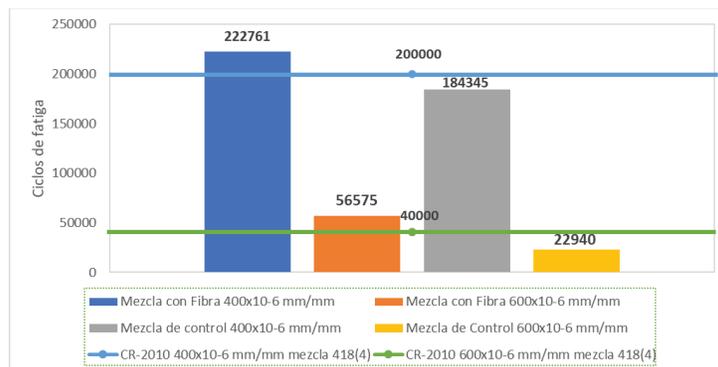


Figura 5. Gráfico comparativo de la prueba de ciclos de fatiga vs especificaciones técnicas

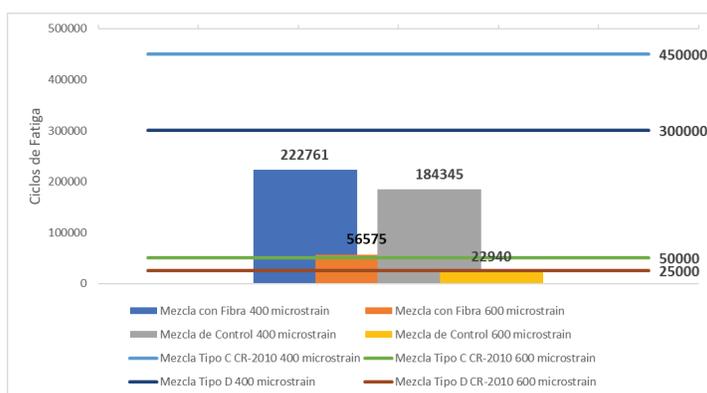


Figura 6. Gráfico comparativo de la prueba de ciclos de fatiga vs tipo de mezcla

Tomando como referencia los gráficos anteriores se asume que la fibra de bambú aumenta el desempeño de la mezcla en esfuerzos de flexión. En la Figura 7 y Figura 8 se presentan los resultados de la prueba de deformación permanente en rueda de Hamburgo AASHTO T-324. Dicha prueba evalúa la susceptibilidad de la mezcla a la deformación mediante 2 especímenes sumergidos a 50 °C. La deformación se mide tanto en el lado izquierdo (rueda LI) como en el lado derecho (rueda LD).

Los resultados muestran que la mezcla de control presenta mayor resistencia a la deformación permanente. Lo anterior podría justificarse considerando que la fibra de bambú pudo perder adhesividad con la mezcla al estar sumergida 6 horas a 50 °C, y por lo tanto no aportará mayor resistencia, esto en concordancia con los porcentajes de asfalto de cada mezcla, ya que la mezcla con fibra posee un 5,84 % de asfalto frente a un 6,20 % de la mezcla original. Esto permite que exista menor

ligante para entrelazar la fibra con los agregados, situación que pudo ocasionar dicha diferencia en el desempeño de la prueba. Sin embargo, no se realizaron pruebas que respalden estas consideraciones.

La mezcla con fibra cumple las dos normativas evaluadas, estas son: Federal Highway Administration en Estados Unidos (FHWA) a 20000 pasadas de rueda y Ciudad de Hamburgo a 19200 pasadas de rueda. En el gráfico 10 se muestran los valores límite de cada norma. Para el caso de la mezcla original se habían realizado 2 ensayos de deformación permanente (APA y rueda de Hamburgo), en el caso de la mezcla con fibra solamente se realizó la prueba de rueda de Hamburgo por considerarla más severa para la mezcla. En tal caso se encontró que la mezcla con fibra cumple los parámetros de las normas internacionales mencionados anteriormente mientras que la mezcla original cumple dichos parámetros más el ensayo APA.

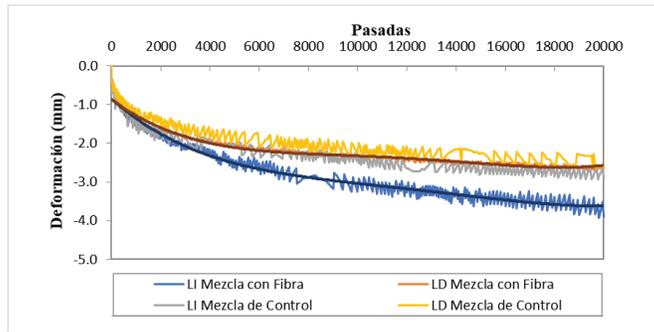


Figura 7. Gráfico comparativo de la prueba de deformación permanente para ambas mezclas

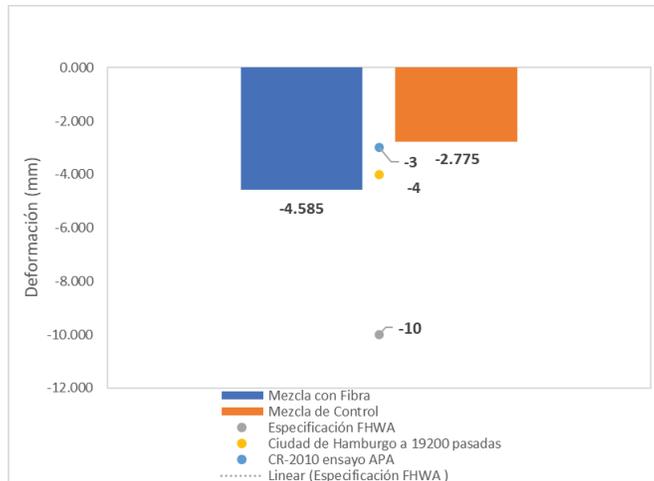


Figura 8. Gráfico comparativo de la prueba de deformación vs especificaciones técnicas

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La adición de la fibra provoca cambios en el VTM, VFA y VMA, por lo tanto, durante el diseño de la mezcla modificada con bambú se debe monitorear tales propiedades de manera que no se incurra en incumplimientos en la volumetría y esta pueda cumplir los parámetros indicados en la norma AASHTO M 323-17.

Es recomendable no permitir un incremento de temperatura de mezclado arriba de los 170 °C, ya que la fibra de bambú tendría un mayor porcentaje de pérdida de masa, comprometiendo el aporte de resistencia a la mezcla.

La comparación entre las mezclas es limitada debido a la diferencia de contenido de asfalto en ambas.

La mezcla con fibra obtiene un buen desempeño mecánico en las 3 pruebas evaluadas, siendo la que mejor comportamiento presenta en los ensayos de resistencia retenida a la tensión diametral AASHTO T-283 y Fatiga en vigas a flexión AASHTO T-321. Respecto al ensayo de deformación permanente por

Rueda de Hamburgo, la mezcla con fibra es óptima según dos normas internacionales (FHWA y Ciudad de Hamburgo), no obstante, la mezcla original cumple todos los parámetros evaluados para esta última prueba.

Como punto importante es necesario realizar pruebas más exhaustivas a la fibra de bambú, con el objetivo de solventar vacíos respecto a la información técnica de la misma y su proceso en mezclas asfálticas.

Finalmente, se concluye que la fibra de bambú es un agregado sostenible que aporta resistencia a la mezcla y posee ventajas tales como su bajo costo en comparación con otros posibles agregados, además es una planta regenerativa que permite un desarrollo sostenible de nuestro ecosistema. Como parte de la investigación se recomienda realizar un diseño granulométrico de los agregados que permita cumplir con la volumetría especificada en las normas, también como una mejora potencial se recomienda adicionar un 0,3 %-0,4 % de porcentaje de fibra con una longitud de fibra de  $6 \pm 2$  mm para lograr un adecuado comportamiento y distribución de la fibra (Sheng, *et al.*, 2018).

## REFERENCIAS

- ASTM International (2015). *Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Asphalt Mix Specimens by Means of the Superpave Gyrotory Compactor* (ASTM D6925-15).
- American Association of State Highway and Transportation Officials (2017). *Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design* (AASHTO M323-17).
- American Association of State Highway and Transportation Officials (2018). *Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage* (AASHTO T283-14).
- American Association of State Highway and Transportation Officials (2017). *Standard Method of Test for Determining the Fatigue Life of Compacted Asphalt Mixtures Subjected to Repeated Flexural Bending* (AASHTO T321-17).
- American Association of State Highway and Transportation Officials (2019). *Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Asphalt Mixtures* (AASHTO T324-19).
- Brunner, F. (2018). *El LANAMME elabora asfalto con sostenibilidad ambiental*. Recuperado de: <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2018/07/10/el-lanammeucr-elabora-asfalto-con-sostenibilidad-ambiental.html>
- Castro, P. (2019). *Diseño de mezcla SUPERPAVE para mezcla asfáltica en caliente*. Pavimentos. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- García, S. (2015). *Contaminación por las refinerías*. Recuperado de: <https://www.elfinanciero.com.mx/opinion/salvador-garcia-linan/contaminacion-por-las-refinerias>
- Giraldo, E. (2020). *La Guadua y sus aportes al ambiente*. Recuperado de: <https://guaduybambu.es.tl/Aportes-Ambientales-Guadua--s--Bambu.htm>
- Jiménez, A. (2019). *Análisis del desempeño de una mezcla asfáltica con fibra de bambú* (Tesis de grado). Tecnológico de Costa Rica, Cartago. Recuperado de <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/12221>
- Ministerio de Ambiente y Energía (2020). *Programa País Carbono Neutralidad*. Dirección de Cambio Climático. Recuperado de <https://cambioclimatico.go.cr/metadescarbonizacion/#:~:text=El%20Programa%20Pa%C3%ADs%20de%20Carbono%20Neutralidad%20Cantonal%20tiene%20como%20objetivo,en%20materia%20de%20acci%C3%B3n%20clim%C3%A1tica>.
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes (2010). *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes CR-2010*. San José, Costa Rica.
- Moreno, L., Trujillo, E., y Osorio, L. (2007). Estudio de las características físicas de haces de fibra de Guadua Angustifolia. *Scientia et Technica*, 1(34), 613-617. DOI: 10.22517/23447214.5719
- LANAMME UCR (2015). *Metodología de diseño de mezclas asfálticas en caliente para Costa Rica* (LM-PI-UMP-026-R1).
- Reyes-Ortiz, O., Troncoso-Rivera, J., y Reyes-Lizcano, F. (2005). Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de fibras. *Ciencia E Ingeniería Neogranadina*, 15, 12-29. DOI: 10.18359/rcin.1251
- Sheng, Y., Zhang, B., Yan, Y. Li, H., Cheng, Z., y Chen, H. (2019). Laboratory Investigation on the Use of Bamboo Fiber in Asphalt Mixtures for Enhanced Performance. *Arabian Journal of Science and Engineering*, 44, 4629-4638. DOI: 10.1007/s13369-018-3490-x