

**CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE
PROYECTO DE GRADUACIÓN**

Proyecto de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por los profesores Ing. Gustavo Rojas Moya, Ing. Sergio Fernández Cerdas, Ing. Pedro Castro Fernández, Ing. Rommel Cuevas Kauffmann, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

P/so via Vargas

Ing. Gustavo Rojas Moya
Director

Ing. Sergio Fernández Cerdas.
Profesor Guía

Ing. Pedro Castro Fernández.
Profesor Lector

Ing. Rommel Cuevas Kauffmann.
Profesor Observador

Análisis del desempeño de una mezcla asfáltica con fibra de bambú

Abstract

The project was directed into the mechanic performance analyze of asphalt mixture with bamboo fiber. The above given that this natural material and sustainable could input to the asphalt strength. The fiber functioned as a mesh that allows resistance to stress caused by point or cyclic loads. During the development of this project was necessary investigated about utility and processing bamboo fiber, study its narrow circumstances and implications

It worked with a design previously developed in the laboratory, it used the Superpave design methodology, which was modified with bamboo fiber as an aggregate dry way to determine volumetric parameters of the mixture and mechanical performance analysis.

The results obtained showed that the volumetry of the mixture must be redesigned since it is necessary to adjust the granulometry curve to the fiber, it should also be noted that the performance tests showed positive results for the fiber mixture, being able to comply with most of the national and international specifications.

As an unavoidable fact, it is necessary to carry out a control design again to be able to adjust all the parameters to the AASHTO standards and the national regulations.

Resumen

La investigación se dirigió hacia el análisis del desempeño mecánico de una mezcla asfáltica con fibra de bambú como posible material natural y sostenible que aporte resistencia a la mezcla. En este caso, la fibra funcionó como una malla que permite resistencia a esfuerzos ocasionados por cargas puntuales o cíclicas. En el desarrollo de este proyecto, se trató de resolver un problema orientado a la utilización y el procesamiento de mezclas asfálticas con fibra celulosa, sus implicaciones y limitaciones.

Se trabajó con un diseño previamente elaborado en laboratorio, con la metodología de diseño Superpave, el cual se modificó con fibra de bambú como agregado vía seca para determinar parámetros volumétricos de la mezcla y analizar el desempeño mecánico.

Los resultados obtenidos mostraron que la volumetría de la mezcla debe rediseñarse, dado que es necesario ajustar la granulometría a la fibra. Además, cabe destacar que las pruebas de desempeño mostraron resultados positivos para la mezcla con fibra, siendo esta capaz de cumplir con la mayoría de las especificaciones nacionales e internacionales.

Como hecho ineludible, es necesario realizar nuevamente un diseño de control para lograr ajustar todos los parámetros a las normas AASHTO y la reglamentación nacional.

Análisis del desempeño de una mezcla asfáltica con fibra de bambú

ANGIE YULIANA JIMÉNEZ LORÍA

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Noviembre 2019

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

Prefacio	1
Resumen ejecutivo	2
Introducción	3
Marco teórico	7
Metodología	20
Resultados	35
Análisis de resultados	93
Conclusiones	105
Recomendaciones	107
Apéndices	108
Anexos	114
Referencias	117

Lista de abreviaturas

% A.C: Contenido de Asfalto.

Gb: Gravedad específica del asfalto.

Gmb: Gravedad específica bruta de la mezcla compactada.

Gmm: Gravedad específica máxima teórica de la mezcla compactada.

% VTM: Vacíos totales en la mezcla.

Gsb: Gravedad específica bruta de agregados.

% VMA: Vacíos en el agregado mineral.

% VFA: Vacíos llenos con asfalto.

Gse: Gravedad específica efectiva.

Pba: Porcentaje de asfalto absorbido.

Pbe: Porcentaje de asfalto efectivo.

P0.075: Porcentaje de material pasando la malla # 200.

DP: Relación polvo mineral / asfalto efectivo en la mezcla compactada.

h inicial: Altura inicial de compactación en el 8^{vo} giro en el compactador Superpave.

h final: Altura final de compactación a los 100 giros en el compactador Superpave.

% Gmm @ Nini: Compactación de la mezcla en función del porcentaje de gravedad específica máxima teórica a los giros iniciales.

% Gmm @ Ndis: Compactación de la mezcla en función del porcentaje de gravedad específica máxima teórica a los giros de diseño.

ESALs: Tráfico en millones de ejes equivalente de 8.2 ton.

Prefacio

La necesidad de incursionar en la investigación de materiales sostenibles para la construcción, la innovación y emprendimiento en el área hace posible la realización de este proyecto, pretendiendo con ello aportar a la ingeniería civil en temas de infraestructura sostenible. Además, es significativo mencionar que el uso de la fibra de bambú permitiría un cultivo de la planta para la comercialización y extracción de esta, con lo cual se impacta de manera positiva el ambiente, ya que el cultivo de bambú capta CO₂ y ayuda evitar erosión en los suelos.

Generalmente, el bambú tiene poca apertura entre el público para el uso constructivo, por lo que existen prejuicios sobre este material en temas de estatus social y resistencia. Es por esta razón que es necesario maximizar su uso y demostrar que dicho material tiene propiedades que se pueden aprovechar en el ámbito de la construcción.

El principal objetivo de este proyecto es analizar el desempeño mecánico de una mezcla asfáltica con agregado de fibra de bambú y evaluar los resultados contra especificaciones nacionales e internacionales.

Con ello, se espera contribuir al diseño de mezclas asfálticas, utilizando un material natural y regenerativo como el bambú, llamada la planta del futuro.

Los agradecimientos de esta tesis se dirigen principalmente a:

A Dios, por darme todo y permitirme siempre alcanzar mis metas. A mi madre, Marta Jiménez, por ser el principal apoyo en mi vida.

A mis tías y mi abuelo, por ayudarme en todo lo necesario para culminar esta investigación. A mi hermana Kendy Sevilla, por brindarme su tiempo para realizar este trabajo y demostrarme siempre que puedo llegar más lejos.

Al Ing. Sergio Fernández, por su gran apoyo y ayuda técnica en esta investigación.

Al Ing. José Pablo Aguiar, por su ayuda, disposición y asesoría técnica en este proyecto.

Al personal del Lanamme: Ing. Mónica Jiménez, Técnico Jose Agustín Sanabria, Msc. Alejandra Baldi, Ana Naranjo y todo el personal a cargo.

A los ingenieros Gustavo Rojas, director de la escuela de Ingeniería en Construcción, y Adrián Chaverri, por su apoyo brindado para hacer posible este proyecto.

A don Manuel Retana de la empresa Bambutico, por aportar la fibra de bambú para realizar esta tesis.

A todos ellos gracias, esto es por y para ustedes.

Resumen ejecutivo

El aporte de aditivos y materiales sintéticos a las mezclas asfálticas para mejorar algunas de sus propiedades son, en muchos casos, las únicas opciones para el diseño de una mezcla asfáltica determinada. En este proyecto se investigó si la fibra de bambú de la especie *Guada angustifolia*, es capaz de contribuir con la resistencia mecánica de la mezcla asfáltica. Esto porque se pretenden investigar materiales sostenibles y de bajo costo económico para el diseño de mezclas. Este tema es significativo, debido a que la construcción sostenible representa un reto para el sector, siendo así que se hace necesario profundizar en el estudio de esta materia en áreas, como los posgrados en algunas instituciones de educación superior, siendo pionera en el país la Escuela de Ingeniería en Construcción del Tecnológico de Costa Rica.

El proyecto se llevó a cabo en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (Lanamme) en la Universidad de Costa Rica. Se investigó acerca de las propiedades físicas y mecánicas de la fibra de bambú como posible agregado en la mezcla. Además, se utilizó como base un diseño de mezcla previamente elaborado en el laboratorio, del cual se utilizó la granulometría de control y el contenido de asfalto óptimo para, posteriormente, modificar este diseño con la fibra y comparar su desempeño.

Este proceso se realizó con la metodología de diseño Superpave en el laboratorio, tomando en cuenta las normas de diseño AASHTO y el Manual de especificaciones nacionales para la construcción de carreteras, caminos y puentes CR-2010.

Debido a problemas con la mezcla de control, fue necesario cambiar ampliamente el

contenido de asfalto óptimo de la mezcla con fibra, por lo cual la comparación entre ambas mezclas no es la más precisa. No obstante, se permite observar el desempeño de cada mezcla y su cumplimiento con las especificaciones nacionales. Se realizaron 3 pruebas de desempeño mecánico consideradas de gran utilidad en el diseño Superpave las cuales son: Resistencia Retenida a la Tensión Diametral AASHTO T 283, Agrietamiento por Fatiga AASHTO T 321-17 y Deformación Permanente en Rueda de Hamburgo AASHTO T 324-19. Cabe destacar que la mezcla realizada corresponde a un diseño de entre 10 y 30 millones de ejes equivalentes y una velocidad de diseño entre 20 km/h y 70km/h, es decir, tránsito lento según AASHTO M323.

Los resultados permiten observar que la mezcla con fibra obtiene un buen desempeño mecánico, siendo que obtiene una resistencia a la tensión diametral mayor a 85 % (CR-2010), ciclos de fatiga mayores a 50000 y 25000 para mezclas tipo C y D con un nivel de deformación de 600 microstrain; una deformación permanente menor a 4 mm para 19200 pasadas de rueda según el criterio de la Ciudad de Hamburgo en Alemania. No obstante, la mezcla debe mejorar algunas de sus propiedades para cumplir a cabalidad con las especificaciones nacionales.

Se concluye, entonces, que la fibra aporta resistencia a la mezcla, permitiendo que el pavimento adquiriera un mejor desempeño en fatiga, daño por humedad y deformación permanente, sin embargo, debe realizarse nuevamente el diseño para corregir errores en la volumetría de la mezcla y en algunas especificaciones de desempeño mecánico.

Introducción

Las mezclas asfálticas modificadas con fibra celulosa han sido objeto de investigación por el aporte de este material al desempeño de la mezcla. En el presente proyecto, se utiliza fibra de bambú como agregado en la mezcla asfáltica.

El bambú es una planta sumamente versátil que ofrece múltiples beneficios en diversas áreas como alimentación, textilera, biomasa y construcción, en este caso, se pretende medir el comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica con el aporte de la fibra de bambú. Se utiliza esta planta por tener propiedades regenerativas, alta resistencia mecánica y principalmente porque su origen no ocasiona daño ambiental ya que su cultivo y extracción es completamente sostenible. Dado lo anterior, se pretende investigar materiales naturales y producidos en el país que puedan ser empleados de forma sustentable y que represente un bajo costo económico.

Antecedentes

En Costa Rica, no existe una empresa que ofrezca materia de mezclas asfálticas modificadas con fibra de origen natural, no obstante, la empresa MECO realizó mezcla asfáltica con polímeros de tipo RET (terpolímero elastomérico reactivo ELVALOY granulada). Este polímero permite una alta estabilidad en el asfalto por su composición y reacción química con los asfaltenos del asfalto (López y Puma, 2017). Además, también realizó mezcla asfáltica con SBR de forma líquida, la cual por su estado físico presenta mayor facilidad

de producción en planta, esta mezcla fue colocada en la Costanera (Salazar, 2007).

Como se puede observar, en el país se ha tratado de implementar esta técnica de diseño de asfaltos para mejorar sus propiedades, sin embargo, por el tipo de polímeros disponibles en el mercado (sólidos plastómeros y en forma líquida) resulta difícil en la mayoría de los casos en lo que respecta al equipo de laboratorio, el proceso de almacenamiento del polímero y la homogeneidad de la mezcla, luego de añadirle el polímero, ya que existen casos en los que esta homogeneidad no se logra al 100 %.

Asimismo, la introducción de los pavimentos verdes al país ha tenido gran auge, pues esto permite abaratar costos de la mezcla. Este tipo de pavimentos consisten en utilizar materiales de desecho que optimicen las propiedades de la mezcla. Dichos materiales deben aportar una solución ambiental, como por ejemplo, el uso de plástico reciclado y caucho.

En Costa Rica, se ha investigado la técnica con el uso de RAP que consiste en reutilizar lo máximo posible la carpeta asfáltica de un pavimento que ha sido colocado previamente, esto con el objetivo de ahorrar costos y aplicar técnicas de sostenibilidad. Como consecuencia de lo anterior, se espera aportar conocimiento técnico y práctico sobre el diseño de mezcla asfáltica con fibra natural compuesta en su mayor parte por celulosa, un biopolímero.

Justificación del proyecto

La construcción de superficies de rodamiento en carreteras nacionales actualmente presenta vacíos en lo que respecta a la sostenibilidad. En la producción de mezcla asfáltica, existen toneladas de desecho y desperdicio en cada proyecto de infraestructura civil. Es por ello que el diseño de pavimentos ha sido visto como una industria en la que la obtención de la materia prima y los procedimientos de mejora de pavimentos han recurrido a la práctica común de utilización de materiales no sostenibles y recursos extraídos masivamente.

Debido a lo anterior, es necesario plantear una solución para el diseño de pavimentos verdes que optimicen sus propiedades aprovechando los materiales de origen natural producidos en nuestro país. Lo anterior da como resultado la necesidad de investigación sobre nuevos diseños de mezcla asfáltica que requieran menos recursos extraídos o fabricados artificialmente. Por el contrario, que estos se conviertan en productos óptimos y factibles de ser desarrollados dentro de un ámbito sostenible y que mitigue las consecuencias ambientales que provoca el uso desmedido de recursos naturales y el no aprovechamiento de la materia prima producida en nuestro país.

Planteamiento del problema

La necesidad de investigar sobre si es posible obtener mezcla asfáltica con similares o iguales propiedades en el diseño Superpave (resistencia a la tensión diametral, resistencia a la fatiga y susceptibilidad a la humedad) y, a la vez, utilizar materia prima local y sostenible, permite la

apertura de investigaciones orientadas a estos resultados, con el fin de encontrar parámetros de análisis para el mejoramiento de las características de desempeño mecánico de la mezcla, cumpliendo con la reglamentación vigente en Costa Rica y siguiendo las normas técnicas AASHTO para diseño de mezcla asfáltica.

Objetivos

Objetivo general

Analizar el desempeño mecánico de una mezcla asfáltica con fibra de bambú, de acuerdo con los requerimientos de la metodología de diseño Superpave.

Objetivos específicos

- Caracterizar los agregados y el ligante para la realización de las pruebas de dosificación y desempeño de la mezcla.
- Determinar el efecto de la adición de las fibras de bambú sobre la mezcla y las propiedades volumétricas esta.
- Evaluar en ambas mezclas (sin adición de fibra y con adición de fibra) la resistencia al agrietamiento por fatiga, la susceptibilidad al daño por humedad y desnudamiento y la resistencia a la tensión diametral.
- Analizar los resultados de la mezcla modificada con fibra y comparar su desempeño con la mezcla sin fibra mediante curvas y gráficos.

Alcances y limitaciones

Alcances

Se utilizará el diseño de mezcla asfáltica producida en el laboratorio y, seguidamente, se realizarán distintas dosificaciones de fibra de bambú a la mezcla y se escogerá la mezcla que presente mejores propiedades volumétricas para posteriormente aplicarles las pruebas de desempeño mecánico descritas anteriormente.

Una vez realizado lo anterior, se procede a un análisis teórico del aporte de la fibra a las características mecánicas de la mezcla. Cabe destacar que la mezcla de control se limita al uso de agregados provenientes de la zona sur y además la metodología de diseño de dicha mezcla corresponde a Superpave, por lo tanto, no incluye Marshall.

Limitaciones

Algunas de las limitaciones que se presentaron en el proyecto son las siguientes:

- Los apilamientos de la fuente de Río Claro presentan valores de densidad menores comparado con la fuente de Guápiles, por lo cual, considerando que la densidad de la fibra es sumamente baja, se requirió utilizar agregados que aportaran un valor mayor de densidad y, por lo tanto, un Gbs combinado más alto.
- La textura física de la fibra no permite el tiempo de mezclado acostumbrado en mezclas estándares, sino que este debe ser aproximadamente el doble para lograr homogenizar la mezcla, esto es aproximadamente 5 minutos.

- La funcionalidad y disponibilidad de equipos de laboratorio fue un factor importante, ya que en algunas épocas del año el volumen de trabajo en el laboratorio era muy alto, por lo que los equipos no están disponibles en ocasiones por más de dos semanas.
- La mezcla de control sufrió cambios en el contenido óptimo de asfalto, debido a los apilamientos de los agregados, dado lo anterior, el diseño modificado con fibra sufrió, de igual forma, algunas alteraciones.
- El atraso en la realización de la mezcla y en las pruebas no permitió la elaboración del trabajo escrito paralelamente, por lo que este, en algunas ocasiones, se trabajó de manera independiente.

Productos esperados

Los productos esperados en este proyecto se mencionan a continuación:

- Caracterización de los materiales de la mezcla, esto es: agregados pétreos, fibra de bambú y ligante asfáltico.
- Resultados de las pruebas de la fibra de bambú, especialmente su resistencia a la temperatura de mezclado y compactación de mezcla asfáltica.
- Resultados de la mezcla asfáltica y su interacción con la fibra de bambú al

momento de la mezcla, así como las propiedades volumétricas del conjunto.

- Pruebas de desempeño mecánico de la mezcla original y la mezcla con fibra de bambú, así como sus propiedades mejoradas o desmejoradas.
- Un análisis comparativo entre ambas mezclas.

Marco teórico

El diseño de mezcla Superpave (Superior Performance Asphalt Pavements) se originó en Estados Unidos en la década de los 90, como resultado de la necesidad de crear mejores alternativas de diseño de mezclas asfálticas en las cuales los parámetros de análisis se acerquen más a la realidad del pavimento, esto es, se tome en cuenta aspectos como el tráfico vehicular y el clima de la zona.

Además, se incorpora una nueva forma de clasificación de ligante, llamada Grado por Desempeño, la cual toma en consideración los promedios de las temperaturas altas y bajas del pavimento. Esta metodología se fundamenta en 4 criterios fundamentales que se mencionan a continuación:

1. Selección de materiales.
2. Diseño de granulometría.
3. Contenido óptimo de asfalto.
4. Susceptibilidad a la humedad.

El objetivo del diseño es crear una mezcla asfáltica durable, resistente a las cargas vehiculares y las condiciones del clima, además, se busca que esta tenga suficiente estabilidad y aumente su resistencia a la humedad y el desnudamiento. Para ello, se seleccionan debidamente los materiales de acuerdo con los criterios de grado por desempeño para el ligante asfáltico según AASHTO M320 y los agregados de conformidad con las tablas de pruebas mecánicas descritas en la sección 703.17 del Manual de Especificaciones Generales para la Construcción

de carreteras, caminos y puentes 2010, en la cual se indican las normas AASHTO correspondientes. Estas especificaciones se muestran en los anexos.

Una vez clasificado los materiales se debe diseñar las granulometrías de prueba, las cuales serán mínimo 3 combinaciones de agregado de distintos apilamientos, a estas granulometrías se le determina el contenido óptimo de asfalto. Luego, se compactan especímenes de prueba y se evalúa cada una en relación con sus propiedades volumétricas y criterios de diseño tabulados en el diseño Superpave, con base en lo anterior se elige la granulometría adecuada.

Seguidamente, como última etapa, se evalúa la susceptibilidad al desnudamiento que determina la resistencia de la mezcla al desligamiento asfalto-agregado provocado por la humedad presente en la mezcla, esto mediante la norma AASHTO T 283 (Resistencia al daño inducido por humedad de mezclas asfálticas compactadas).

Diseño Superpave y aspectos técnicos de la metodología

El diseño Superpave se basa en las normas AASHTO M323 y AASHTO R35. Los criterios y la teoría en la que se fundamenta esta metodología se describe a continuación:

- Preparación de agregados y ligante: para seleccionar estos materiales Superpave indica que debe caracterizarse cada material y evaluar

sus condiciones de desempeño y servicio según el tráfico y el clima de la zona. Además, señala que debe realizarse un mínimo de 3 combinaciones de agregado que deben cumplir debidamente los criterios de control de la metodología mostrados a continuación:

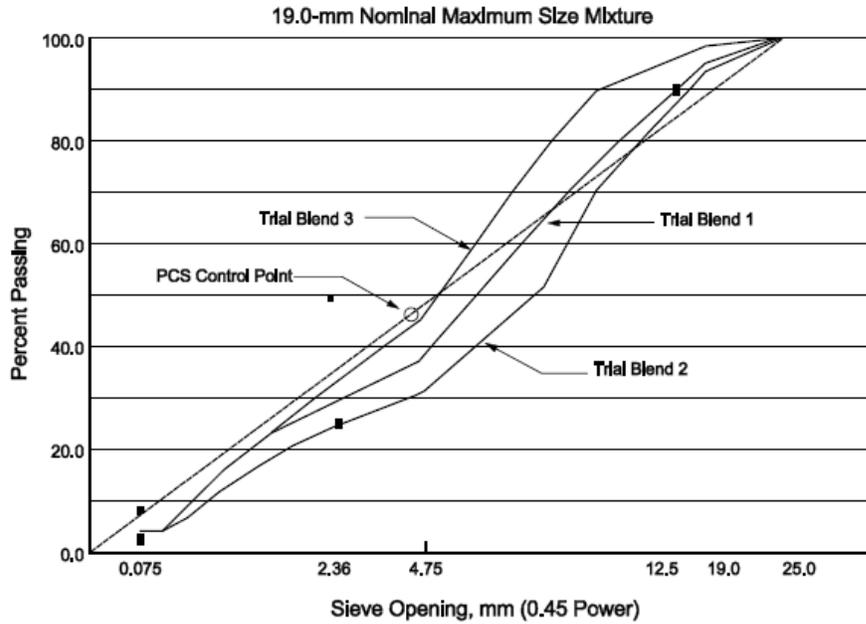


Gráfico 1. Curva de graduación de agregado 3 combinaciones. Fuente: AASHTO R35, figura 1, pág. 6

Tabla 1. Puntos de control por número de tamiz para agregado según TMN.

Sieve Size, mm	Nominal Maximum Aggregate Size—Control Points (% Passing)											
	37.5 mm		25.0 mm		19.0 mm		12.5 mm		9.5 mm		4.75 mm	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
50.0	100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
37.5	90	100	100	—	—	—	—	—	—	—	—	—
25.0	—	90	90	100	100	—	—	—	—	—	—	—
19.0	—	—	—	90	90	100	100	—	—	—	—	—
12.5	—	—	—	—	—	90	90	100	100	—	100	—
9.5	—	—	—	—	—	—	—	90	90	100	95	100
4.75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	90	90	100
2.36	15	41	19	45	23	49	28	58	32	67	—	—
1.18	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	30	55
0.075	0	6	1	7	2	8	2	10	2	10	6	13

Fuente: AASHTO M323, tabla 4, pág. 6.

- Contenido de aglutinante en la mezcla: para cada graduación de la curva granulométrica debe seleccionarse un contenido de asfalto y este debe ser seleccionado de acuerdo a las condiciones de diseño y criterio ingenieril del diseñador. No obstante, debe tomarse en cuenta la velocidad y el tráfico de diseño de la zona para elegir el ligante. En este caso, el presente proyecto será diseñado tomando como referencia una carretera de 10 a 30 ESALs, con una velocidad de diseño entre 20 km/h y 70 km/h, esto pensando en las rutas nacionales más importantes de nuestro país.
- Compactación de especímenes de cada prueba de graduación granulométrica: se solicita un bache de 14000 g, para determinar muestras de 4500 a 4700 g por cada espécimen compactado y dos muestras sueltas mayores a 1600 g, en este caso ,se utiliza el compactador giratorio Superpave y se selecciona la cantidad de giros según el tipo de ESALs.

Tabla 2. Número de giros de diseño compactador Superpave.

Design ESALs ^a (Million)	Compaction Parameters			Typical Roadway Application ^b
	$N_{initial}$	N_{design}	N_{max}	
<0.3	6	50	75	Applications include roadways with very light traffic volumes, such as local roads, county roads, and city streets where truck traffic is prohibited or at a very minimal level. Traffic on these roadways would be considered local in nature, not regional, intrastate, or interstate. Special purpose roadways serving recreational sites or areas may also be applicable to this level.
0.3 to <3	7	75	115	Applications include many collector roads or access streets. Medium-trafficked city streets and the majority of county roadways may be applicable to this level.
3 to <30	8	100	160	Applications include many two-lane, multilane, divided, and partially or completely controlled access roadways. Among these are medium to highly trafficked city streets, many state routes, U.S. highways, and some rural Interstates.
≥30	9	125	205	Applications include the vast majority of the U.S. Interstate system, both rural and urban in nature. Special applications such as truck-weighing stations or truck-climbing lanes on two-lane roadways may also be applicable to this level.

^a The anticipated project traffic level expected on the design lane over a 20-year period. Regardless of the actual design life of the roadway, determine the design ESALs for 20 years.

^b As defined by *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*, 2004, AASHTO.

Fuente: AASHTO R35, tabla 1, pág. 6.

Tabla 3. Selección de ligante según tráfico y velocidad de diseño.

Design ESALs ^b (Million)	Adjustment to the High-Temperature Grade of the Binder ^a		
	Traffic Load Rate		
	Standard ^c	Slow ^d	Standing ^e
<0.3	—	—	— ^f
0.3 to <3	—	1	2
3 to <10	—	1	2
10 to <30	— ^f	1	2
≥30	1	1	2

^a Increase the high-temperature grade by the number of grade equivalents indicated (one grade is equivalent to 6°C). Use the low-temperature grade as determined in Section 5.

^b The anticipated project traffic level expected on the design lane over a 20-yr period. Regardless of the actual design life of the roadway, determine the design ESALs for 20 yr.

^c Standard traffic—where the average traffic speed is greater than 70 km/h.

^d Slow traffic—where the average traffic speed ranges from 20 to 70 km/h.

^e Standing traffic—where the average traffic speed is less than 20 km/h.

^f Consideration should be given to increasing the high-temperature grade by one grade equivalent.

Fuente: AASHTO M323, tabla 1, pág. 5.

- Evaluación de especímenes compactados: una vez realizados los especímenes, se evalúan las propiedades volumétricas de cada combinación granulométrica para determinar si cumple los criterios de diseño Superpave.

Estas propiedades volumétricas determinan el desempeño de la mezcla en el pavimento, debido a sus características de compactación, vacíos, porcentaje de asfalto y densidad de la mezcla, factores que son tomados en cuenta para el diseño de mezcla con fibra de bambú.

Tabla 4. Requerimientos de diseño Superpave.

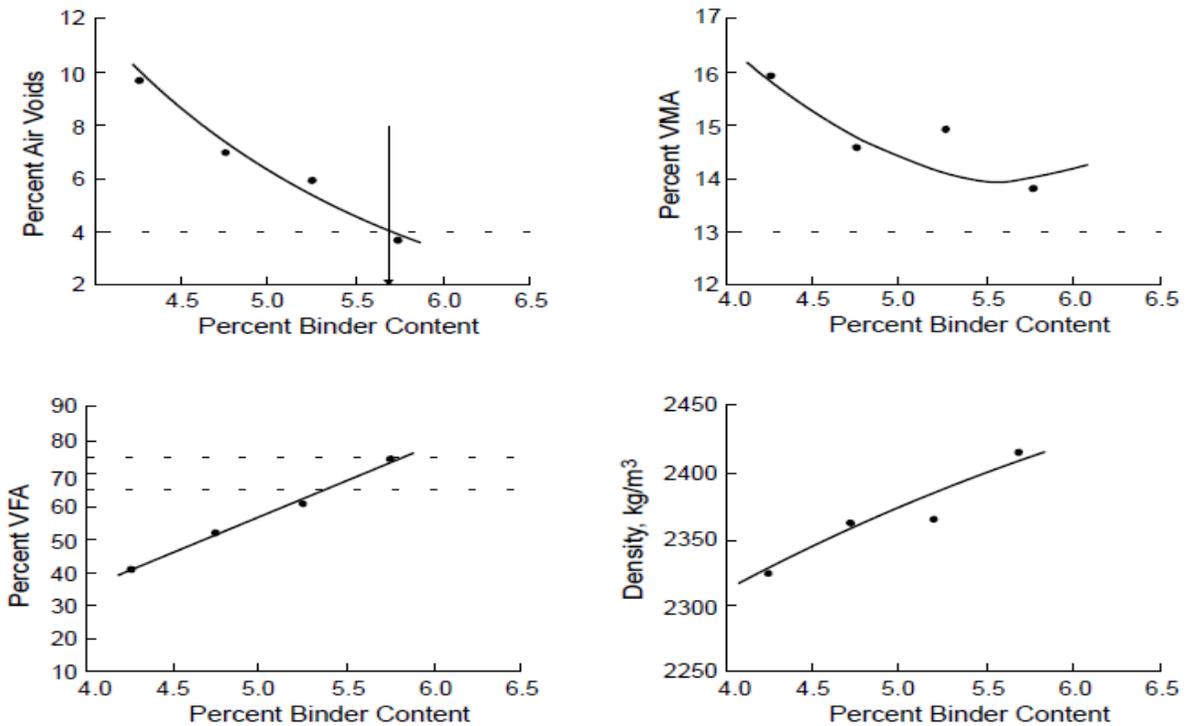
Design ESALs, ^a million	Required Relative Density, Percent of Theoretical Maximum Specific Gravity			Voids in the Mineral Aggregate (VMA), % Minimum						Voids Filled with Asphalt (VFA) Range, ^b %	Dust-to- Binder Ratio Range ^c
	N _{initial}	N _{design}	N _{max}	Nominal Maximum Aggregate Size, mm							
				37.5	25.0	19.0	12.5	9.5	4.75		
<0.3	≤91.5	96.0	≤98.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	70–80 ^{d,e}	0.6–1.2
0.3 to <3	≤90.5	96.0	≤98.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	65–78 ^f	0.6–1.2
3 to <10	≤89.0	96.0	≤98.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	65–75 ^{g,h}	0.6–1.2
10 to <30	≤89.0	96.0	≤98.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	65–75 ^{g,h}	0.6–1.2
≥30	≤89.0	96.0	≤98.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	65–75 ^g	0.6–1.2

Fuente: AASHTO M323, tabla 7, pág. 8.

- Contenido de asfalto de diseño: se selecciona el contenido de asfalto al 4 % de vacíos de compactación de la mezcla. En el caso del proyecto en cuestión, este diseño es el utilizado en el laboratorio de asfaltos como diseño predeterminado con un contenido de asfalto del 6.20 % al 4 % de vacíos.

Las curvas mostradas a continuación se desarrollan en la metodología del proyecto, se presenta cada curva con el objetivo de mostrar el comportamiento de la mezcla asfáltica variando la granulometría y el contenido de fibra.

Gráfico 2. Curvas de diseño



Fuente: AASHTO R35, Curvas de diseño, pág. 12.

Ensayos de desempeño mecánico

Resistencia retenida a la tensión diametral

Este ensayo se centra en la norma AASHTO T-283, y se realiza para determinar la resistencia retenida de la mezcla asfáltica, luego de un acondicionamiento de los especímenes bajo saturación.

El ensayo se realiza subdividiendo 6 especímenes en dos grupos de 3, en los cuales el primer grupo estará bajo condición seca y, posteriormente, se acondicionan durante 2 horas a 25°C cubiertos completamente con material impermeable, por el contrario. El segundo subgrupo deberá ser acondicionado a 60°C durante 24 horas, pasado este período se efectúa la prueba de tensión diametral.

Dicha prueba se realiza aplicando una carga de compresión en dirección al eje longitudinal del espécimen hasta que este falle (se produce por una grieta). Este dato se reporta como la carga máxima P en Newtons. Una vez realizado esto, se fallan los especímenes saturados, los cuales deberán tener un porcentaje de saturación entre 70 % y 80 %, posterior a eso se hace la comparación entre ambos subgrupos y la resistencia retenida a la tensión diametral deberá ser mayor a 85 % dependiendo del diseño de mezcla realizado.

Para la mezcla asfáltica con fibra, se espera un aumento de la carga en el espécimen y por consiguiente un aumento de la resistencia retenida, teniendo como hipótesis la resistencia a la tensión de la fibra. A continuación, se muestra el equipo utilizada para la prueba.



Figura 1. Equipo para prueba Resistencia Retenida a la Tensión Diametral AASHTO T 283. Fuente: Catálogo de ensayos. Lanamme UCR.

Resistencia a la fatiga

Este ensayo se detalla en la norma AASTHO T-321, y se realiza para determinar la resistencia de la mezcla a las cargas repetitivas del tránsito que causan esfuerzos de tensión. El ensayo se realiza a una temperatura de 20°C, ya que según la teoría a esta temperatura la mezcla asfáltica sufre susceptibilidad al agrietamiento por fatiga, esto dado las propiedades del ligante (Castro, 2018).

En la prueba se preparan 4 vigas para ser ensayadas en la cámara de prueba, se aplica carga en dos puntos a 2/3 de longitud del espécimen y se mide la rigidez del mismo en cada ciclo de carga, intentando que este vuelva a su posición original, el objetivo principal es medir la pérdida de rigidez de la viga y así determinar los ciclos de carga a la falla.

Los ciclos de carga se comparan con la especificación nacional CR-2010, según el tipo de mezcla asfáltica diseñada. Para la mezcla asfáltica con fibra de bambú, se espera un buen comportamiento a la fatiga debido a que la fibra podría funcionar como un tipo de malla que se adhiere al espécimen y ayuda a la resistencia a los ciclos de carga. A continuación, se muestra el equipo utilizado.

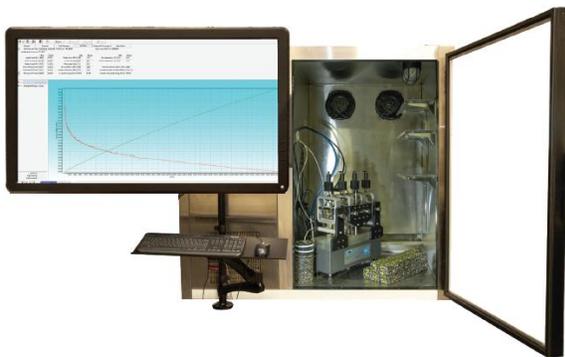


Figura 2. Equipo para prueba de Fatiga de Mezclas Asfálticas Compactadas AASHTO T 321. Fuente: Catálogo de ensayos. Lanamme UCR.

Deformación permanente en rueda de Hamburgo

Este ensayo se especifica en la norma AASHTO T-324 y tiene el objetivo de evaluar la resistencia a la deformación permanente de la mezcla determinado a partir de la estructura del agregado, la rigidez del ligante y el daño causado por la humedad, el principal objetivo es obtener la deformación o el ahuellamiento de la mezcla producto de la carga aplicada por la rueda de acero. Se determina el punto de inflexión de la

mezcla o el número de pasadas a la falla del espécimen, este criterio va a depender de la legislación consultada.

En Costa Rica, el Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes establece el ensayo APA como parámetro para medir la deformación permanente en mezclas asfálticas compactadas. En el caso de la mezcla con fibra, se espera que la fibra contribuya a la deformación permanente funcionando como una malla que contribuye a la resistencia a la deformación, no obstante, no se sabe que comportamiento podría ocasionar en la fibra el aumento de temperatura a 50°C durante la aplicación del ensayo, es probable que la humedad a dicha temperatura pueda desnudar la fibra. A continuación, se muestra el equipo de rueda de Hamburgo.

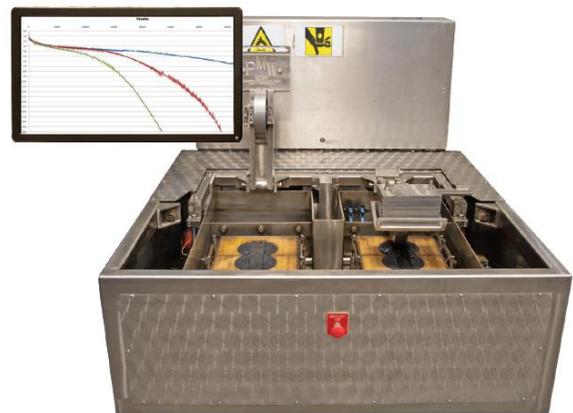


Figura 3. Equipo para prueba de Deformación Permanente en la rueda de Hamburgo AASHTO T 324. Fuente: Catálogo de ensayos. Lanamme UCR.

Fibras en mezcla asfáltica en caliente

El uso de fibras en mezcla asfáltica ha sido investigado con el objetivo de obtener mejores propiedades. Este tipo de mezclas se conocen como mezclas asfálticas SMA (Stone Mastic

Asphalt). Estas mezclas son abiertas o drenantes, esto es; que permiten un excelente desempeño en términos de la deformación permanente, estabilidad, agrietamiento y durabilidad con granulometrías uniformes y altos contenidos de asfalto del orden de 8 %.

Estas mezclas necesitan la fibra celulosa para evitar la segregación del ligante en la mezcla (Zúñiga y Aguila, s.f.). En este caso, se tiene referencia del uso de fibra celulosa en la mezcla asfáltica con metodología Marshall (Jiménez, 2016), así como un tramo de prueba realizado por el Laboratorio Nacional de Vialidad en Chile (Zúñiga y Aguila, s.f.).

Mezcla asfáltica con fibras de coco metodología Marshall

Según la investigación realizada por Jiménez (2016) en la Universidad Técnica de Ambato, Ecuador, el uso de fibras en la mezcla funcionaría como un agente estabilizador y a la vez aporta al diseño de mezclas asfálticas ecológicas, en este caso las fibras utilizadas son las fibras de coco, ya que, según el autor, son resistentes y versátiles (Jiménez, 2017, pág. 23).

En este caso, la mezcla fue diseñada con la metodología Marshall para determinar estabilidad y flujo en comparación con la mezcla original, no obstante, el pavimento asfáltico sin fibras logra una mejor estabilidad con 19.29 % mayor a la estabilidad ofrecida por la mezcla con fibra de coco (Jiménez, 2017. pág. 107).

Cabe destacar que la fibra en esta investigación se mezcló previamente con el asfalto para, posteriormente, realizar la mezcla y que, además, se debe calentar el asfalto hasta una temperatura que permita el estado líquido de este ya que una temperatura más alta provocaría que la fibra se degrade. Según los resultados de la investigación, el costo de la fibra de coco es de 380 USD la tonelada (Jiménez, 2017, pág. 104).

Mezcla SMA en tramo de prueba

Esta investigación se realizó en el Laboratorio Nacional de Vialidad en Chile bajo un contrato Concesión Autopista Central (Zúñiga y Aguila, s.f.). El objetivo de este tramo es evaluar las características de la mezcla SMA, además de realizar otras pruebas como auscultación, deflectometría en el tramo de prueba etc.

En cuanto a la fibra la investigación señala que no hay condiciones especiales para este tipo de agregado, no obstante, debe tener un comportamiento y calidad en el servicio para ello se recomienda obtener un certificado del producto (Zúñiga y Aguila, pág. 4). Según los resultados de la investigación el tramo de prueba muestra un buen comportamiento de la mezcla ya que los valores de fricción medidos fueron mayores a los valores mínimos (0.4-0.5) (Zúñiga y Aguila, pág. 14).

Cabe mencionar que la fricción mide la adherencia neumático-pavimento. Asimismo, los valores de textura muestran una superficie con una textura profunda (0.8-1.2 mm), este parámetro mide la capacidad que tiene el pavimento de evacuar el agua presente en la interfaz neumático-pavimento para una mejor estabilidad del vehículo y un menor consumo de gasolina (Gálvez, s.f.). Además, se evaluó el índice de regularidad superficial que permite analizar las irregularidades de la superficie del pavimento, en este caso ,se obtuvo valores cercanos a 1, con lo cual se concluye un pavimento prácticamente sin irregularidades (Zúñiga y Aguila, pág. 14).

Ligante

El ligante asfáltico corresponde a un material negro con consistencia semisólida, de alta viscosidad y que se obtiene de la destilación del petróleo con el nombre de bitumen que corresponde a las moléculas con mayor peso en el compuesto.

El ligante tiene características propias que permiten que pueda utilizarse para preparar mezcla asfáltica en carreteras, ya que su alta resistencia a sulfatos y ácidos, así como sus propiedades de adherencia e impermeabilidad permiten que el material funcione como base para la mezcla asfáltica la cual como se describirá más adelante debe poseer propiedades de diseño que cumplan los criterios de la metodología Superpave.

La función principal del ligante es crear adherencia entre los agregados, permitir aglutinamiento y generar suficiente película alrededor del agregado para permitir un adecuado acomodo de partículas. Algunas de las propiedades que influyen en la mezcla asfáltica producto del ligante son las siguientes:

- A temperaturas de servicio entre 50-70°C influye en la resistencia a la deformación plástica
- A temperaturas de servicio entre 10-40°C influye en el agrietamiento por fatiga.
- A temperaturas menores de -10°C influye en el agrietamiento térmico.

Entre las propiedades de los ligantes asfálticos, se encuentran las características de un material viscoelástico que consiste en un material que permite tanto deformación elástica y deformación plástica, así como también posee características termoplásticas, esto es, incrementa su consistencia con un aumento en la velocidad de carga y disminuye su consistencia con un aumento de temperatura.

Las propiedades anteriores son relevantes de conocer para producir mezclas asfálticas durables y resistentes, tomando en cuenta las temperaturas de servicio, esto ya que el pavimento es uno de los materiales que sufre cambios

drásticos de temperatura en un solo día y que está expuesto a la intemperie por lo que considerar la humedad y la temperatura es fundamental en el diseño de mezclas asfálticas.

Metodologías de clasificación

- Grado por viscosidad: esta clasificación se basa en el grado de consistencia que permite el ligante asfáltico a cierta temperatura, en este caso existe la viscosidad absoluta y la viscosidad cinemática, en la primera el asfalto tiene una consistencia semisólida y se mide su capacidad de fluir de manera forzada, mientras que en la segunda la consistencia del asfalto es fluida, justo la necesaria para la mezcla, en este caso el asfalto fluye por gravedad.
- Grado por desempeño: la clasificación de grado por desempeño clasifica mediante ensayos mecánicos al ligante como tal, tomando en cuenta la temperatura de mezclado y compactación, la temperatura de servicio y el envejecimiento del asfalto en condiciones de servicio. Los ensayos a los que se somete el ligante se describen a continuación:
 - Reómetro dinámico de cortante DSR
 - Prueba de tensión directa
 - Falla a flexión de vigas
 - Horno rotatorio de película delgada RTFO
 - Envejecimiento por presión PAV.

Seguidamente, se muestran las tablas de clasificación del ligante asfáltico, según el Reglamento Técnico Centroamericano.

Tabla 5. Clasificación de asfaltos por grado de viscosidad.

Tabla 702-01 A
Especificaciones para asfaltos clasificados por su viscosidad a 60 °C

Parámetro	Métod o ASTM	Grado de viscosidad					
		AC-2.5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
Viscosidad, 60 °C (N.s/m ²)	D-2171	250 ±50	500±100	1000±200	2000±400	3000 ±600	4000±800
Viscosidad, 135°C, (mm ² /s), mínimo	D-2170	80	110	150	210	250	300
Penetración, 25°C, 100 g, 5 s, (1/10 mm), mínimo	D-5	200	120	70	40	30	20
Punto de inflamación, Cleveland Copa Abierta, (°C), mínimo	D-92	165	175	220	230	230	230
Solubilidad en tricloroetileno, (%), mínimo	D-2042	99	99	99	99	99	99

Fuente: Reglamento Técnico Centroamericano Tabla 1A. RTCA 75.01.22:04

Tabla 6. Clasificación del asfalto por grado por desempeño

**Tabla 702-03
Especificaciones para asfaltos clasificados por Grado de Desempeño**

Característica	Grado de Desempeño						
	PG 46	PG 52	PG 58	PG 64	PG 70	PG 76	PG 82
	-34 -40 -46	-10 -16 -22-28 -34 -40 -46	-16 -22 -28 -34 -40	-10- 16 -22 -28 - 34 -40	-10 -16 -22-28 -34 -40	-10 -16- 22 -28-34	-10-16-22 -28-34
Promedio 7-días Temperatura Máxima de Diseño de Pavimento (°C)	<46	<52	<58	<64	<70	<76	<82
Temperatura Mínima de Diseño de Pavimento ¹⁾ (°C)	>-34 >-40>-46	>-10>-16>-22 >-28>-34 >-40 >-46	>-16>-22 >-28>-34 >-40	>-10>-16 >-22 >-28>-34 >-40	>-10>-16 >-22>-28>-34 >-40	>-10>-16 >-22 >-28 >-34	>-10>-16 >-22>-28 >-34
Asfalto Original							
Temperatura de Punto de Inflamación, mínima (°C)	230						
Viscosidad, 3 Pa.s, Temperatura de Ensayo, máxima (°C)	135						
Módulo de Rigidez al cortante: ⁴⁾ G'/senð, mín. 1,00 kPa, Plato de 25 mm, Abertura de 1 mm, Temp. de Ensayo a 10 rad/s (°C)	46	52	58	64	70	76	82
Horno Rotatorio de Película Delgada Vertical (Método de Prueba ASTM D-2872)							
Pérdida de Masa, máxima (%)	1,0						
Módulo de Rigidez al cortante : G'/senð, mín. 2,20 kPa, Plato de 25 mm, Abertura de 1 mm, Temp. de Ensayo a 10 rad/s (°C)	46	52	58	64	70	76	82
MSCR, AASHTO TP 70: Tránsito Grado "S" J _{nr3.2} máx. 4.0 kPa ⁻¹ J _{nr4m} máx 75% Temperatura de ensayo, °C	46	52	58	64	70	76	82
MSCR, AASHTO TP 70: Tránsito Grado "H" J _{nr3.2} máx. 2.0 kPa ⁻¹ J _{nr4m} máx 75% Temperatura de ensayo, °C	46	52	58	64	70	76	82
MSCR, AASHTO TP 70: Tránsito Grado "V" J _{nr3.2} máx 1.0 kPa ⁻¹ J _{nr4m} máx 75% Temperatura de ensayo, °C	46	52	58	64	70	76	82
Residuo de Recipiente para Envejecimiento a Presión (AASHTO PP1)							
Temperatura de Envejecimiento PAV ³⁾	90	90	100	100	100 (110)	100 (110)	100 (110)
Módulo de Rigidez al Cortante							
G'/senð, máx. 5000 kPa, Plato de 8 mm, 2 mm de Abertura, Temp. de Ensayo a 10 rad/s (°C) Tránsito Grado "S"	10 7 4	25 22 19 16 13 10 7	25 22 19 16 13	31 28 25 22 19 16	34 31 28 25 22 19	37 34 31 28 25	40 37 34 31 28
G'/senð, máx. 6000 kPa, Plato de 8 mm, 2 mm de Abertura, Temp. de Ensayo a 10 rad/s (°C) Tránsito Grado "H" y "V"	10 7 4	25 22 19 16 13 10 7	25 22 19 16 13	31 28 25 22 19 16	34 31 28 25 22 19	37 34 31 28 25	40 37 34 31 28
Resistencia a la Fluencia a Bajas Temperaturas: ⁴⁾ S, máx. 300 MPa, valor m: mín. 0,300, Temp. de Ensayo en 60 s (°C)	-24 -30 -36	0 -6 -12 -18 -24 -30 -36	-6 -12 -18 -24 -30	0 -6 -12 -18 -24 -30	0 -6 -12 -18 -24-30	0 -6 -12 -18 -24	0 -6 -12 -18 -24
Tensión Directa: ⁴⁾ Falla de Deformación, mín. 1,0 %, Temp. de Ensayo a 1,0 m/minuto (°C)	-24 -30 -36	0 -6 -12 -18 -24 -30 -36	-6 -12 - 18 -24 -30	0 -6 -12 -18 -24 -30	0 -6 -12 -18 -24-30	0 -6 -12 -18 -24	0 -6 -12 -18 -24

Fuente: Reglamento Técnico Centroamericano Tabla 1A. RTCA 75.01.22:04

Agregados

Los agregados se clasifican en agregado grueso y agregado fino, en cuanto al proyecto en cuestión, se utiliza agregado grueso, cuartilla, quintilla y polvo de piedra. En este caso, cada agregado debe ser sometido a una serie de pruebas mecánicas para caracterizar sus propiedades químicas y físicas que determinan el comportamiento de la mezcla. Algunas de las pruebas más comunes que se le realiza al agregado son las siguientes:

- **Análisis granulométrico (AASHTO M232):** es el análisis del tamaño de partícula del agregado, se realiza con los tamices en forma descendente hasta alcanzar el tamaño del tamiz 200, en este caso se determina el porcentaje pasando de cada tamiz para seguidamente graficarlo contra el tamaño de malla, esto es necesario para hacer las combinaciones granulométricas del diseño de mezcla y es útil para caracterizar el tamaño promedio de partícula según la fuente del agregado.
- **Gravedad específica bruta (ASTM C 127):** se determina la relación de peso del agregado, incluyendo los vacíos con un peso igual de agua a una temperatura determinada, esto es necesario para definir la densidad del agregado y posteriormente calcular el volumen que ocupa dicho agregado en la mezcla asfáltica para un correcto cálculo volumétrico.
- **Gravedad específica máxima teórica (ASTM C127):** en este caso no se consideran los vacíos presentes en el agregado, por lo cual este valor será más alto que la gravedad específica bruta, dado que considera menos volumen. Con este valor, se debe simular el agregado compactado.
- **Porcentaje de absorción (ASTM C127):** se determina para calcular el volumen de

agua o bitumen que puede absorber el agregado en la mezcla asfáltica.

- **Abrasión en la máquina de los ángeles (ASTM C535):** este ensayo mide el desgaste y trituración del agregado en un tambor con 12 esferas de acero, se realiza con el objetivo de medir el porcentaje de pérdida de masa.
- **Partículas friables y arcillosas (ASTM C142):** capacidad de un agregado de reducirse a partículas finas (polvo) con la sola acción de ser frotado, en este caso se mide el porcentaje que tiene un agregado de poseer partículas arcillosas o friables.
- **Caras fracturadas (ASTM C5821):** determina el porcentaje de partículas fracturadas de un agregado, se requiere para medir el comportamiento del agregado en la mezcla en términos de fricción y estabilidad de esta.
- **Partículas planas y elongadas (ASTM C4791):** este ensayo determina el porcentaje de partículas con forma plana o alargada que impide una adherencia suficiente del ligante-agregado en la mezcla asfáltica.

Mezcla asfáltica con agregado de fibras

Recurrentemente, lo que ha sido más utilizado e investigado es propiamente el ligante asfáltico modificado. Esto es el asfalto que es combinado con algún tipo de aditivo previamente aprobado por especificaciones técnicas, este aditivo necesariamente debe mejorar el grado por desempeño del ligante asfáltico, o al menos modificar algunas de sus propiedades originales.

En el caso del proyecto en cuestión, lo que se busca es modificar la mezcla asfáltica utilizando como metodología de mezcla la adición de la fibra de bambú como parte del agregado, esto con un

cálculo volumétrico de los componentes de la mezcla, reduciendo así cada uno de ellos para compensar la adición de la fibra y respetar el diseño previo Superpave realizado en el laboratorio.

En cuanto a trabajos relacionados con la modificación de mezclas asfálticas, solo se encontró uno de referencia de un proyecto de tesis de licenciatura que analizó la estabilidad y la deformación de una mezcla asfáltica con fibra celulosa en comparación con una mezcla asfáltica original. Esto utilizando las fibras de coco como materia prima para modificar la mezcla. Según esta tesis la mezcla asfáltica con fibra celulosa es un material impermeable, durable y resistente a la formación de roderas (Jiménez, 2016).

En este caso, las conclusiones de esta tesis referente a la mezcla con fibra de coco mostraron como resultados que la mezcla original contribuía mejor a la estabilidad del pavimento, con la misma deformación o flujo y a menor costo, ya que para realizar la mezcla con fibras el porcentaje de asfalto aumentaba en 7.55 % con respecto a la cantidad utilizada para la mezcla asfáltica original.

Este último aspecto se presenta de igual forma en el proyecto en cuestión, no obstante, se realizaron diversos cambios para evitar el aumento del porcentaje de asfalto, ya que esto implica un costo mayor en la producción de mezcla asfáltica, así como también con la utilización de la fibra de bambú y el estudio de sus propiedades, con los cuales se prevé un mejor comportamiento mecánico de la mezcla, sin embargo, esto se discutirá más precisamente en los resultados del proyecto. A continuación, se muestra la mezcla asfáltica con fibra de bambú.



Figura 4. Mezcla asfáltica con fibra de bambú.

Metodología

A continuación, se detallan los pasos realizados para completar cada objetivo específico.

Caracterización de agregados

Los agregados pétreos y el ligante fueron caracterizados a través de pruebas en el Laboratorio de Materiales (Lanamme), mediante las normas AASHTO y la especificación nacional CR-2010. La fibra de bambú, por su parte, fue caracterizada mediante investigaciones realizadas anteriormente y que describen importantes características de la fibra, así como algunas pruebas realizadas en el laboratorio que permiten describir el comportamiento de la fibra para ser utilizada en mezclas asfálticas.

Fibras de bambú

Las fibras de bambú consisten en fibras naturales compuestas en un 65 % por celulosa, biopolímero que consiste en macromoléculas sintetizadas por los seres vivos y con el cual están compuestas la mayoría de las fibras que se utilizan para combinar con materiales como concreto o asfalto.

En este caso, la fibra pertenece a la especie de bambú *Guadua Angustifolia* que se caracteriza por su alta resistencia mecánica y sus usos en construcción. En seguida, se muestra la composición química de la fibra realizada por el escaner del Laboratorio de Materiales y

Pavimentos en el Lanamme UCR. Las fibras son las encargadas de resistir el esfuerzo mecánico y se caracterizan por presentar forma delgada, ahusada y con textura voluminosa (Moreno, Trujillo y Osorio, 2007).

Según los autores anteriores, la fibra constituye entre el 40-50 % del tejido total y entre 60-70 % del peso total de la caña. Cabe rescatar de este artículo investigativo que la estructura interna de la fibra posee paredes intercaladas con orientación distinta, esto hace que la fibra posea alta resistencia mecánica y por lo tanto existe una alta probabilidad de que esta le permita a la mezcla asfáltica mejorar las propiedades de resistencia a la fatiga y daño inducido por humedad.

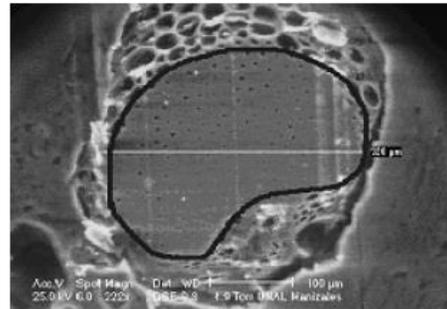


Figura 5. Micrografía de la sección transversal típica de un haz de fibra *G. angustifolia*. Fuente: Estudio de las características de haces de fibra de bambú. Moreno, Trujillo, Osorio, 2007, pág. 615.

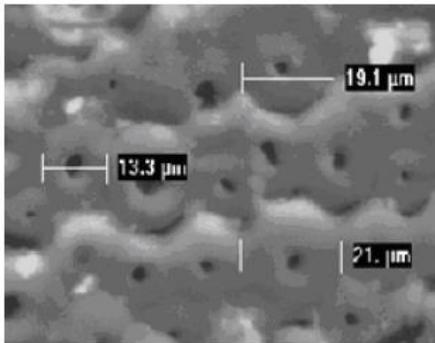


Figura 6. Micrografías de las microfibras de la fibra de *G. angustifolia*, en las que se observa su forma geométrica. Fuente: Estudio de las características de haces de fibra de bambú. Moreno, Trujillo, Osorio, 2007, pág. 615.

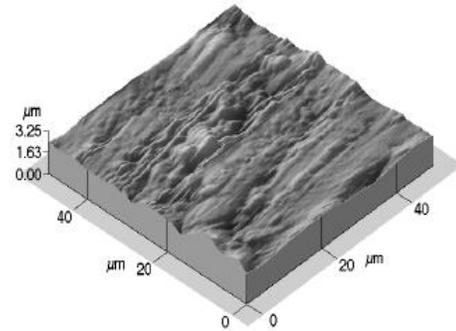


Figura 7. Micrografía en 3D de la topografía superficial de la fibra de *G. angustifolia*. Fuente: Estudio de las características de haces de fibra de bambú. Moreno, Trujillo, Osorio, 2007, pág. 615.

En el estudio mencionado, se realizó una tomografía perpendicular al eje de la fibra, esto con el objetivo de evaluar sus características físicas internas, uno de los resultados encontrados es la topografía irregular que presenta la fibra, lo que la ayuda a resistir esfuerzos mecánicos y a la adhesión entre la matriz y la fibra (Moreno, Trujillo, Osorio 2007, pág. 615).

Estos estudios a lo interno de la fibra permiten que esta pueda ser utilizada como material de refuerzo por su adherencia y por su resistencia mecánica, aunque como se verá más adelante por la textura de la fibra de guadua resulta difícil la homogenización de la mezcla asfáltica.

Cabe mencionar que la obtención de la fibra se realizó en Pérez Zeledón, con una altitud promedio de 721 m.s.n.m, una precipitación anual de 2944 mm, una temperatura media de 23.3°C con una humedad relativa de 90 %, lo anterior constituyen datos importantes del origen de la fibra para efectos prácticos. A continuación, se muestra la textura interna de la fibra obtenida en el estudio anterior:

Además, como complemento al estudio de la fibra, se muestra la composición química de esta y su distribución en una curva que toma como base la celulosa, compuesto presente en fibras naturales.

En relación con el costo de la fibra, según el señor Manuel Retana, propietario de Bambutico (empresa de comercialización del bambú), esta tiene un costo de 150 USD por tonelada, siendo así que el kilo tiene un valor de 0.15 USD. No obstante, cabe mencionar que actualmente no existe un mercado de comercialización de fibra de *Guadua angustifolia*, sin embargo, es totalmente viable.

En el laboratorio, la fibra se caracterizó mediante una prueba de granulometría, termogravimetría, densidad y un triturador mecánico que permite reducir el tamaño de la fibra para un mejor mezclado de esta. Seguidamente, se muestran imágenes de las pruebas realizadas en el triturador.



Figura 8. Triturador mecánico utilizado para la fibra de bambú



Figura 10. Fibra de bambú en análisis granulométrico malla # 16 (1.18 mm)



Figura 9. Tamaño reducido de la fibra de bambú en el triturador mecánico.



Figura 11. Fibra de bambú en el equipo de Termogravimetría TGA Q5000 V3.17 Build 265



Figura 12. Fibra de bambú en probeta de 250 ml para prueba de densidad mediante volumen desplazado.

Efecto de la adición de las fibras de bambú sobre la mezcla

Para preparar los especímenes con fibra, primeramente, se realizó un cálculo volumétrico para determinar la cantidad de asfalto y agregado pétreo de cada bache considerando el porcentaje de fibra, seguidamente, se prepararon la cantidad de materiales calculados para posteriormente introducirlos al horno.

Una vez realizados los baches, se llevaron a cabo las pruebas de gravedad específica máxima teórica y gravedad específica bruta para calcular el porcentaje de vacíos de la mezcla, lo anterior se utiliza para calcular los parámetros volumétricos importantes de la mezcla. A continuación, se muestran los pasos mencionados anteriormente:

Cálculo volumétrico

Cantidad de agregado W_a para un bache de 14000 g

$$W_a = \frac{W_{mm}}{\left[1 + \frac{\%PTM}{(100 - \%PTM)} + \frac{\%Fibra}{100}\right]}$$

Donde:

W_{mm} = Total de mezcla en gramos

% PTM = Porcentaje total de asfalto en la mezcla

Peso de asfalto en la mezcla

$$W_{asf} = \frac{(W_{ag} + W_F) * \%PTM}{(100 - \%PTM)}$$

Donde:

W_{ag} = Peso de agregado en gramos

W_F = Peso de fibra en gramos

Porcentaje óptimo de asfalto (%PTM)

$$\% PTM = \frac{100 * W_{asf}}{[W_{ag} + W_F + W_{asf}]}$$

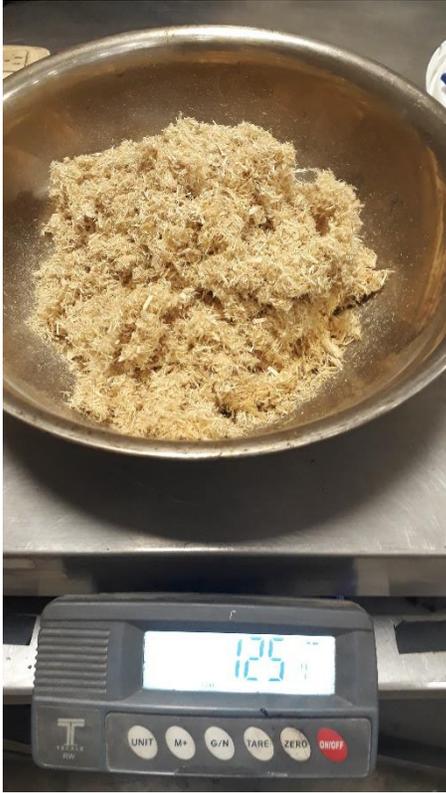


Figura 13. Preparación de baches, fibra de bambú.



Figura 14. Preparación de baches, agregado pétreo.

Mezclado y compactación

En el proceso de mezclado y compactación, se ajustaron los pesos de los materiales tomando en cuenta que los agregados tienen un peso menor conforme aumenta la temperatura, por lo cual, durante el mezclado, se debió revisar y ajustar la cantidad en gramos del ligante efectivo por añadir.

En el proceso de mezclado, se observó que la fibra de bambú forma grumos en la mezcla y el tiempo de mezclado toma aproximadamente 5 minutos. Se debió homogenizar la mezcla durante este tiempo ya que por la textura de la fibra la mezcla resulta heterogénea en los primeros minutos de mezclado. Una vez realizado lo anterior, se procede a realizar el cuarteo de la mezcla para distribuir la cantidad de gramos para las pruebas volumétricas. Esto es para la prueba de gravedad máxima teórica y gravedad específica

bruta. La temperatura de mezclado utilizada fue de 160°C, como lo indica la tabla 24, esta temperatura se toma de los ensayos realizados sobre viscosidad cinemática.

Seguidamente, se colocan en el horno durante aproximadamente 2 horas para luego realizar el proceso de compactación, ya sea este por giros de diseño (100 giros para determinar volumetría de diseño) o por altura (para determinar porcentaje de vacíos para pruebas de desempeño). La temperatura de compactación utilizada fue de 150°C, según la tabla 24, esto se determina según las pruebas de viscosidad del ligante, donde indica la temperatura óptima en la que el asfalto puede compactarse. En seguida, se muestran los procesos de mezclado y compactación:



Figura 15. Proceso de mezclado.



Figura 16. Proceso de cuarteo de mezcla asfáltica.

Volumetría de la mezcla

Gravedad específica máxima teórica: se realiza para calcular la densidad relativa de la mezcla, sin tomar en cuenta los vacíos de esta. Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$G_{mm} = \frac{D}{D+B-E} \quad (\text{AASHTO T-209})$$

Donde:

D: Peso seco del espécimen en gramos

B: Peso del contenedor con agua en gramos

E: Peso del contenedor con agua más la muestra en gramos.

Gravedad específica bruta: se calcula para determinar la densidad relativa de la mezcla considerando los vacíos de esta. A continuación, se muestra el cálculo:

$$G_{mb} = \frac{A}{B-C} \quad (\text{AASHTO T-166})$$

Donde:

A: Peso seco del espécimen en gramos

B: Peso del espécimen saturado superficie seca en gramos

C: Peso del espécimen sumergido (en gramos).



Figura 17. Compactador giratorio Superpave.



Figura 18. Prueba de gravedad específica máxima teórica. Equipo de vacío a presión

Cálculo de porcentaje de vacíos: el porcentaje de vacíos se calcula para determinar los vacíos de aire por peso total de mezcla y comparar con la especificación técnica de diseño a nivel nacional y las normas AASHTO. Se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{VTM} = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \times 100$$

Porcentaje de vacíos en el agregado mineral VMA: este porcentaje indica la cantidad de espacios de aire entre las partículas de agregado. Se calcula de la siguiente forma:

$$\% \text{VMA} = 100 - \frac{((G_{mb} * (100 - PTM)))}{G_{sb}}$$

Donde:

G_{sb} : Gravedad específica bruta del agregado combinado.

Porcentaje de vacíos llenos con asfalto VFA: se relaciona directamente con el VMA ya que corresponde al volumen de este que está ocupado por asfalto. Se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{VFA} = 100 \times \frac{(VMA - VTM)}{VMA}$$

Porcentaje de asfalto efectivo y asfalto absorbido: estos parámetros se calculan para conocer el porcentaje total de asfalto que realmente funciona como adherente en la mezcla y el porcentaje que fue absorbido por el agregado pétreo y en nuestro caso la fibra de bambú. A continuación, se muestra su cálculo:

$$\% \text{Pba} = 100 * \frac{(G_{se} - G_{sb})}{(G_{sb} * G_{se})} \times G_b$$

$$\% \text{Pbe} = PTM - \left(\frac{Pba}{100}\right) \times (100 - PTM)$$



Figura 19. Prueba de gravedad específica bruta. Peso de espécimen

Donde:

Gse: Gravedad específica efectiva (no incluye vacíos externos)

Relación polvo/asfalto efectivo: corresponde a la relación entre el porcentaje pasando el tamiz #200 y el asfalto efectivo calculado anteriormente. Se calcula de la siguiente forma:

$$P/A = \frac{\% \text{ Pasando } \#200}{\% \text{ Asfalto efectivo}}$$

Porcentaje de compactación a los giros iniciales y por diseño: este parámetro está en función de la gravedad máxima teórica y específica bruta e indica el nivel de compactación de la mezcla, la altura de compactación a los giros iniciales se reporta en el octavo giro y para los giros de diseño, el valor se reporta a los 100 giros. Se calcula de la siguiente forma:

$$\%Gmm N_{ini} = \left(\frac{Gmb}{Gmm} \right) \times \left(\frac{H_{final}}{H_{inicial}} \right) * 100$$

$$\%Gmm N_{dis} = \left(\frac{Gmb}{Gmm} \right) \times 100$$

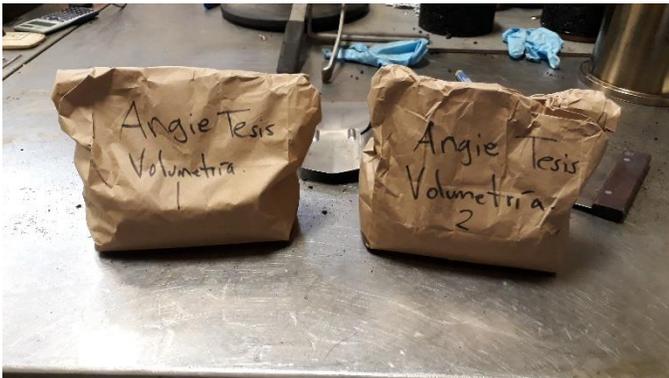


Figura 20. Mezcla asfáltica para pruebas volumétricas.



Figura 21. Especímenes compactados para pruebas volumétricas.

Pruebas de desempeño mecánico

Resistencia Retenida a la tensión diametral: en esta prueba se realizaron 6 especímenes, 3 en condición seca y 3 en condición saturada. Se compactaron los especímenes por altura (95 mm) a 7 % de vacíos. El ensayo se realizó en el laboratorio de pruebas de volumetría, se acondicionaron los especímenes del subgrupo húmedo a 60°C durante 24 horas hasta obtener una saturación entre 70 % y 80 %, seguidamente

los especímenes secos se acondicionaron a 25°C durante 2 horas con material impermeable.

Una vez realizado lo anterior, se procedió a fallar los especímenes secos en el equipo de tensión diametral aplicando una carga hasta la falla, seguidamente, se fallaron los especímenes húmedos y se comparó la resistencia retenida del subgrupo húmedo frente al subgrupo seco. El cálculo se muestra a continuación:

$$S_t = \frac{2000 * P}{l * t * D} \text{ (AASHTO T-283)}$$

Donde:

P = Carga máxima aplicada (N)

t = Espesor de la muestra (mm)

D = Diámetro de la muestra (mm)

$$TSR = \frac{S_1}{S_2} \text{ (AASHTO T-283)}$$

Donde:

TSR: Relación de Resistencia

S1: Promedio del grupo seco de especímenes (kPa)

S2: Promedio del grupo acondicionado (kPa)



Figura 22. Prueba de Tensión Diametral.

Resistencia a la fatiga: este ensayo se realiza utilizando la norma AASHTO T-321, y permite conocer la resistencia a la fatiga de una mezcla asfáltica provocada por la aplicación continua de cargas sobre el pavimento, tales cargas causan esfuerzos grandes de tensión y flexocompresión en la fibra inferior de la carpeta provocando grietas que se expanden hasta la capa de rodamiento, este tipo de grietas sobre el pavimento son conocidas como cuello de lagarto.

El ensayo se realiza compactando un bloque de mezcla asfáltica al 8 % de vacíos para luego acondicionar este durante 5 días a 85°C. Seguidamente, se cortan 4 vigas de 380mm de largo, 50 mm de altura y 63 mm de espesor, las 4 vigas representan cada tipo de deformación del ensayo, en este caso se utilizan 2 vigas para 400 $\mu\epsilon$ y 2 vigas para 600 $\mu\epsilon$. El porcentaje de vacíos de cada espécimen debe ser del 7 %, dado lo anterior el bloque inicialmente debe contener 8 %,

ya que, cuando este se corta, la densidad aumenta y esto permite que el volumen sea de 7 % al momento de la falla.

En el ensayo se registra la rigidez inicial del espécimen al ciclo 50 y la rigidez final de este, en este caso se toman en cuenta dos criterios para reportar el valor de rigidez final. El primero corresponde al valor del 50 % de la rigidez inicial del espécimen; el segundo, corresponde al valor máximo del producto $S \times n$ (Rigidez de flexión por los ciclos de carga), en este proyecto se reportan ambos valores, pero se toma el segundo como referencia para comparar con las especificaciones técnicas.

Los ciclos de fatiga deben reportarse para obtener un promedio y determinar si cumple con la especificación nacional CR-2010. La temperatura del ensayo corresponde a 20°C debido que a esta temperatura el asfalto es más susceptible al agrietamiento. Para reportar el ensayo, es necesario realizar dos curvas muy importantes que describen el comportamiento del espécimen, las cuales son: rigidez de flexión vs ciclos de carga y producto de la rigidez de flexión por los ciclos de carga $S \times n$ contra los ciclos de carga. Estos gráficos se muestran en la sección de resultados.



Figura 24. Especimen de fatiga en proceso.



Figura 23. Equipo de Fatiga en prueba.

Deformación permanente en rueda de Hamburgo: el ensayo de rueda de Hamburgo se detalla en la norma AASHTO T-324 y se utiliza para determinar la susceptibilidad de la mezcla asfáltica al desnudamiento y el ahuellamiento en la capa de ruedo del pavimento.

Este ensayo se realiza con especímenes al 7 % de vacíos sumergidos a 50°C en el equipo de rueda de Hamburgo, donde se aplica una carga dinámica sobre el área superficial de las muestras de 158 lb (71,66 kg) durante un tiempo de aproximadamente 6 horas. El objetivo de este es determinar la deformación máxima del espécimen a los 20000 ciclos de carga y el punto de inflexión en la curva si es que este último se presenta.

Una vez obtenida la curva y la deformación promedio, esta se compara con especificaciones técnicas internacionales como referencia, ya que en Costa Rica esta prueba se realiza con el ensayo APA y con un máximo permitido de 3 mm de deformación. Los especímenes de ensayo deben tener 150 mm de diámetro por 62 mm de altura. Los resultados del ensayo se muestran en la sección de resultados del proyecto.



Figura 25. Equipo de Rueda de Hamburgo en proceso de ensayo.



Figura 26. Especímenes ensayados en la prueba de Rueda de Hamburgo.

Análisis de la información

Como se ha planteado en los objetivos, se pretende realizar un análisis comparativo entre los resultados de ambas mezclas. Dicho análisis se realizará mediante la tabulación y representación gráfica de los resultados obtenidos en cada prueba de desempeño mecánico. Para ello, se utilizará la herramienta de gráficos de Excel para comparar cada una de las mezclas frente a las especificaciones nacionales e internacionales.

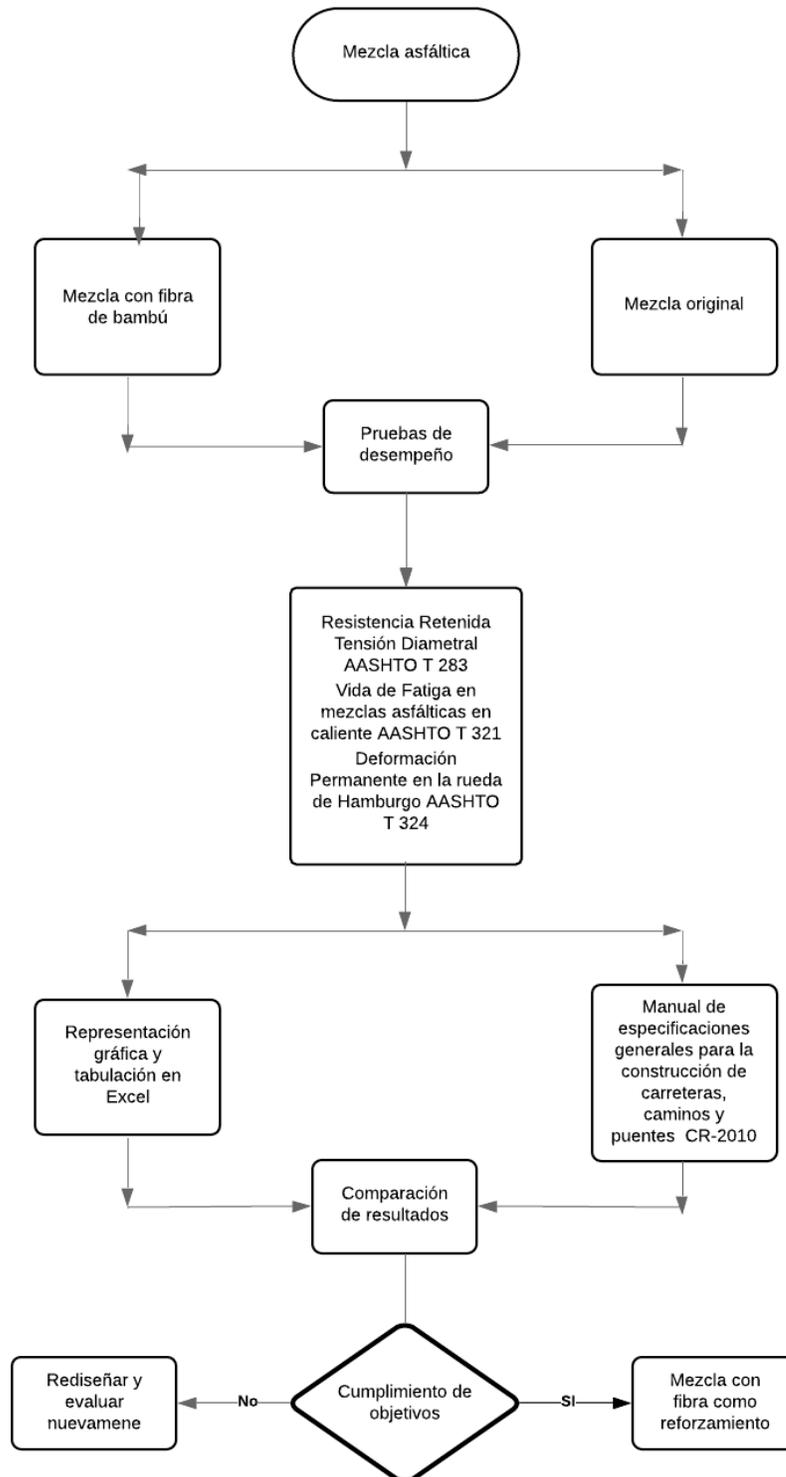
Los parámetros que se toman en cuenta para evaluar cada mezcla son los requerimientos técnicos del Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes CR-2010 realizado por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes.

Asimismo, se tomarán algunas especificaciones técnicas internacionales como la Administración Federal de Carreteras en Estados Unidos (FHWA) y los criterios de desempeño en deformación permanente descritos por la ciudad de Hamburgo en Alemania.

Con la información recolectada, se pretende obtener datos fidedignos para determinar si es posible diseñar y colocar una mezcla asfáltica con fibra de bambú en una carretera, esto dados los resultados obtenidos en las pruebas de volumetría y desempeño mecánico, así como señalar los puntos débiles de la investigación e implementar mejoras. A continuación, se muestra un esquema de la metodología a seguir para el análisis de la información.

Metodología proceso de diseño de mezcla

Angie Jiménez | Proyecto de graduación



Resultados

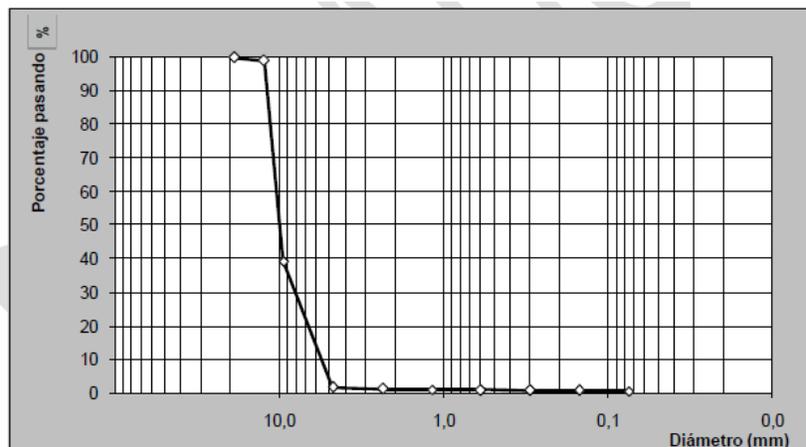
Como ya se ha mencionado, se realizaron pruebas a las fibras, los agregados, el asfalto y la mezcla asfáltica como tal, tanto a la mezcla asfáltica original (sin fibras) como a la mezcla con agregado de fibra de bambú. A continuación, se muestran las pruebas realizadas a los distintos materiales:

Caracterización de agregados y ligante a utilizar

A continuación, se muestra la caracterización del ligante asfáltico y el agregado grueso a utilizar en el proyecto. Cabe mencionar que se presentan dos tipos de fuente de agregado, dado que basados en conocimientos técnicos se decidió cambiar la fuente de agregado que se utilizó originalmente, esto se explicará con detalle en el análisis de resultados y metodología.

Muestra 2138-16 Cuartilla

Gráfico 4. Curva granulométrica de la muestra

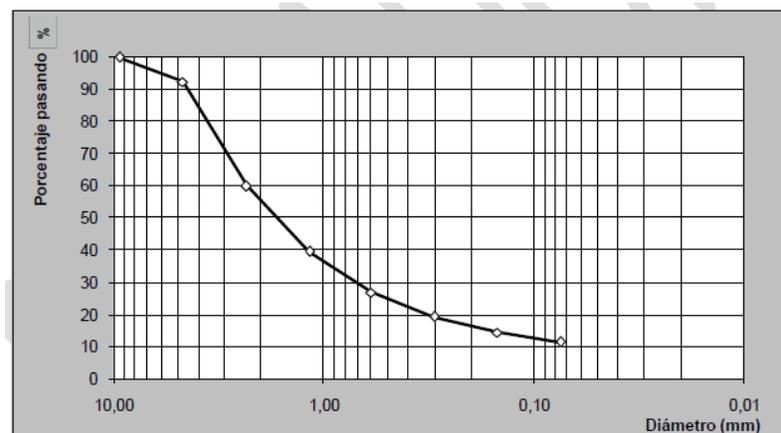


Fuente: Laboratorio de Materiales y Pavimentos. Lanamme UCR.

Agregado grueso Río Claro

Muestra 2137-16 Polvo de Piedra

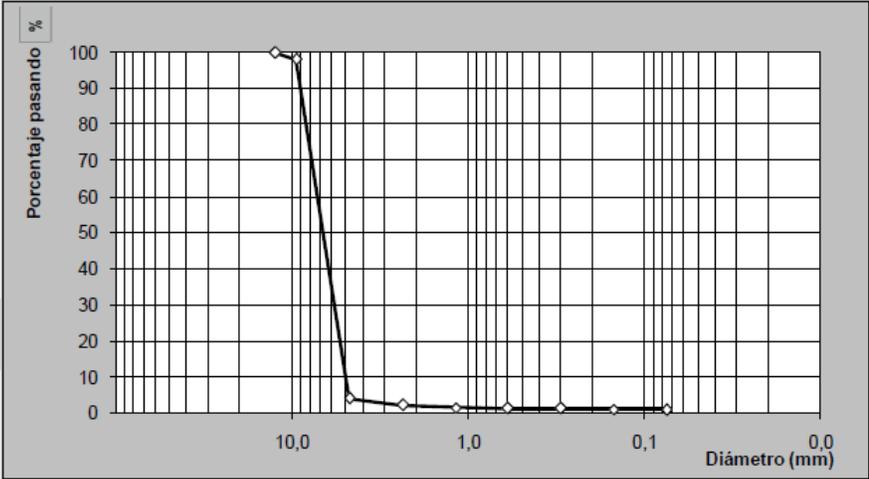
Gráfico 3. Curva granulométrica de la muestra.



Fuente: Laboratorio de Materiales y Pavimentos. Lanamme UCR.

Muestra 2139-16 Quintilla

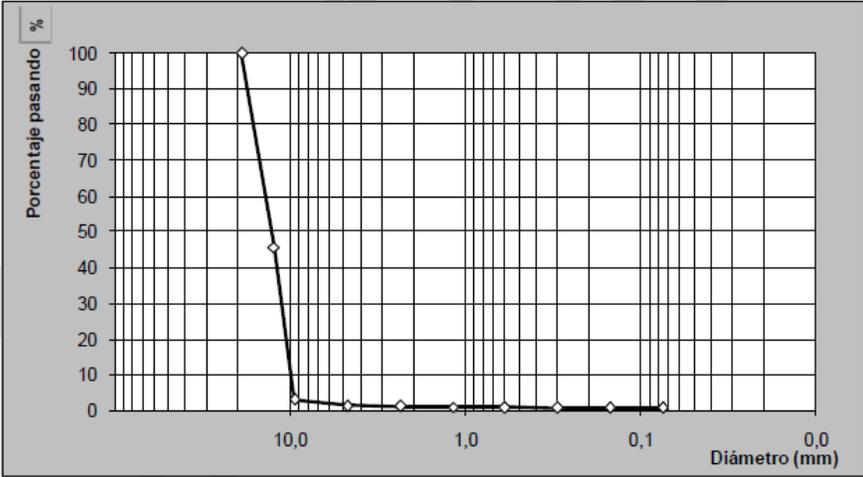
Gráfico 5. Curva granulométrica de la muestra



Fuente: Laboratorio de Materiales y Pavimentos. Lanamme UCR.

Muestra 2140-16 Grueso

Gráfico 6. Curva granulométrica de la muestra



Fuente: Laboratorio de Materiales y Pavimentos. Lanamme UCR.

Tabla 7. Pruebas de determinación de densidad, gravedad específica y absorción del agregado.

MUESTRA No.	GRAVEDAD ESPECIFICA			DENSIDAD			ABSORCION (%)
	Gs	Gbs	Gbss	Ds (kg/m ³)	Dbs (kg/m ³)	Dbss (kg/m ³)	
2137-16	2,72	2,49	2,57	2710	2490	2570	3,3
2138-16	2,73	2,61	2,66	2720	2610	2650	1,6
2139-16	2,72	2,60	2,65	2720	2600	2640	1,7
2140-16	2,73	2,64	2,67	2720	2630	2660	1,3

Fuente: Laboratorio de Materiales y Pavimentos. Lanamme UCR.

Tabla 8. Partículas fracturadas en el agregado grueso

MUESTRA N°	MALLA No.	ABERTURA (mm)	PESO PARTÍCULAS ENSAYADAS (G)	% AGREGADOS REDONDEADAS POR MASA	% AGREGADOS CON CARA FRACTURADA POR MASA	
					1 CARA	2 O MÁS CARAS
2138-16	3/8 "	9,50	500	0,00	0,00	100
	Nº4	4,75	500	0,00	0,00	100
2139-16	Nº4	4,75	600	0,00	0,00	100
2140-16	1/2 "	12,50	500	1,72	1,06	97,5
	3/8 "	9,50	500	0,00	0,00	100

Fuente: Laboratorio de Materiales y Pavimentos. Lanamme UCR.

Tabla 9. Contenido de vacíos en el polvo de piedra no compactado.

DETERMINACIÓN N°	MASA ARENA + RECIPIENTE (g)	MASA RECIPIENTE (g)	MASA ARENA (g)	VACIOS (%)
1	432	285	148	44,2
2	433	285	148	43,9
3	432	285	148	44,1
Promedio				44,0
Desv. Est.				0,21

Fuente: Laboratorio de Materiales y Pavimentos. Lanamme UCR.

Tabla 10. Partículas friables y arcillosas de cada una de las muestras

MUESTRA N°	RANGO DE MALLAS		PESO INICIAL (g)	PESO FINAL (g)	% DE ARCILLAS Y PARTÍCULAS FRIABLES
	(mm)	(N°)			
M-2137-16	1,18	No. 16	241	239	1,00
	4,75 - 9,75	No. 4 - 3/8"	105	105	0,47
M-2138-16	4,75 - 9,75	No. 4 - 3/8"	500	499	0,24
	9,50 - 19,0	3/8" - 3/4"	501	500	0,08
M-2139-16	4,75 - 9,75	No. 4 - 3/8"	500	499	0,24
	9,50 - 19,0	3/8" - 3/4"	501	500	0,08
M-2140-16	4,75 - 9,75	No. 4 - 3/8"	500	496	0,88

Fuente: Laboratorio de Materiales y Pavimentos. Lanamme UCR.

Tabla 11. Pruebas de agregado para determinar partículas planas, partículas elongadas y partículas planas y elongadas

MUESTRA N°	MALLA N°	PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO	% PART. ELONGADAS	% PART. PLANAS	% PART. PLANAS Y ELONGADAS	% PART. NO PLANAS NO ELONGADAS
2138-16	3/8"	500	50,0	0,34	0,60	0,49	48,8
	No. 4	500	50,0	0,25	0,99	1,10	47,9
2139-16	No. 4	600	100	0,15	0,40	0,20	99,6
2140-16	1/2"	500	50,0	0,00	0,00	0,00	50,0
	3/8"	500	50,0	0,00	0,20	1,67	48,3

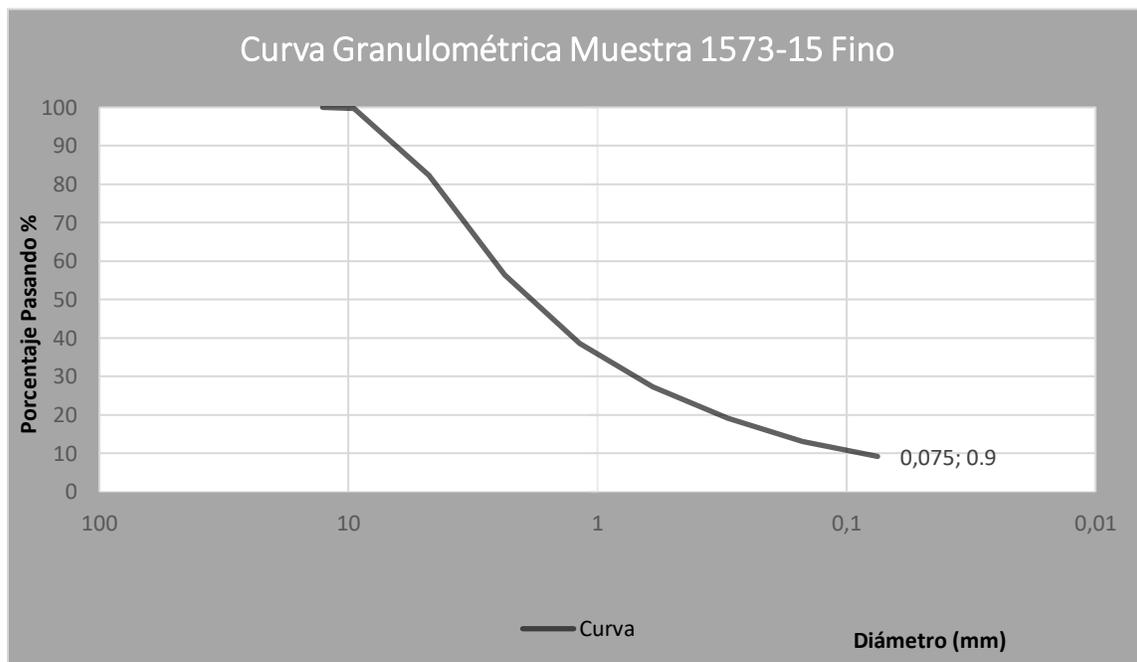
Fuente: Laboratorio de Materiales y Pavimentos. Lanamme UCR.

Agregado grueso Guápiles

A continuación, se exponen los resultados de la caracterización de las muestras utilizadas 1573-15 (Fino), 1574-15 (Grueso) y 1575-15 (Intermedio).

Muestra 1573-15 Fino

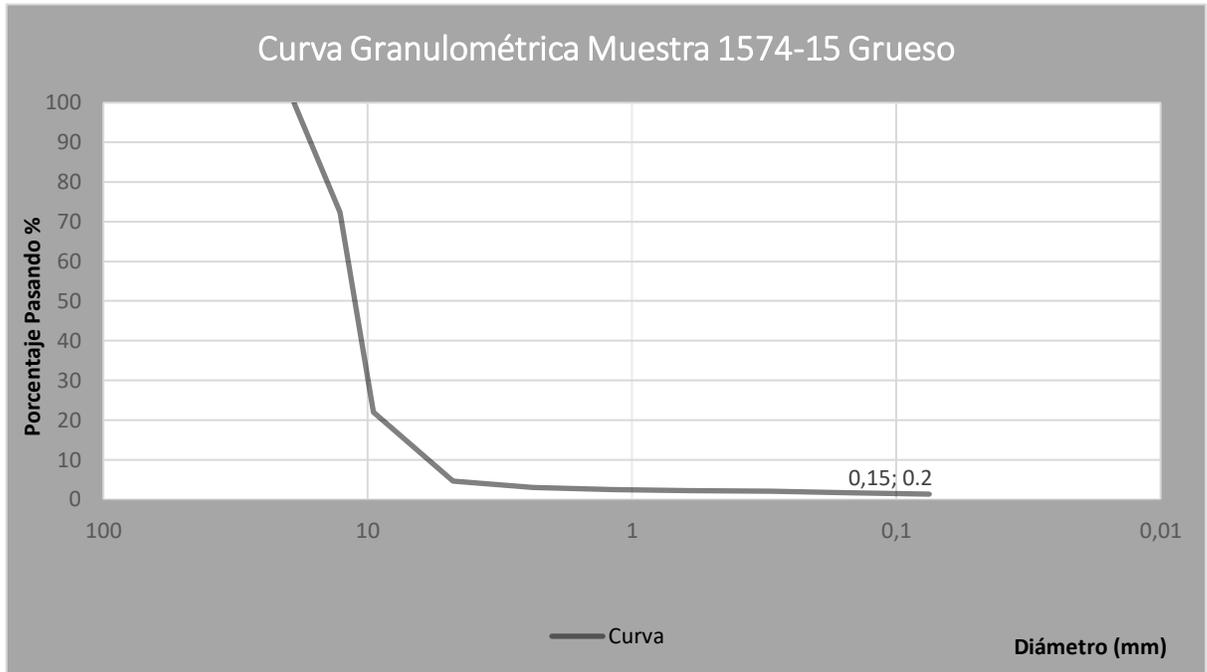
Gráfico 7. Curva granulométrica agregado fino



Fuente: Laboratorio de Materiales y Pavimentos. Lanamme UCR.

Muestra 1574-15 Grueso Cuartilla

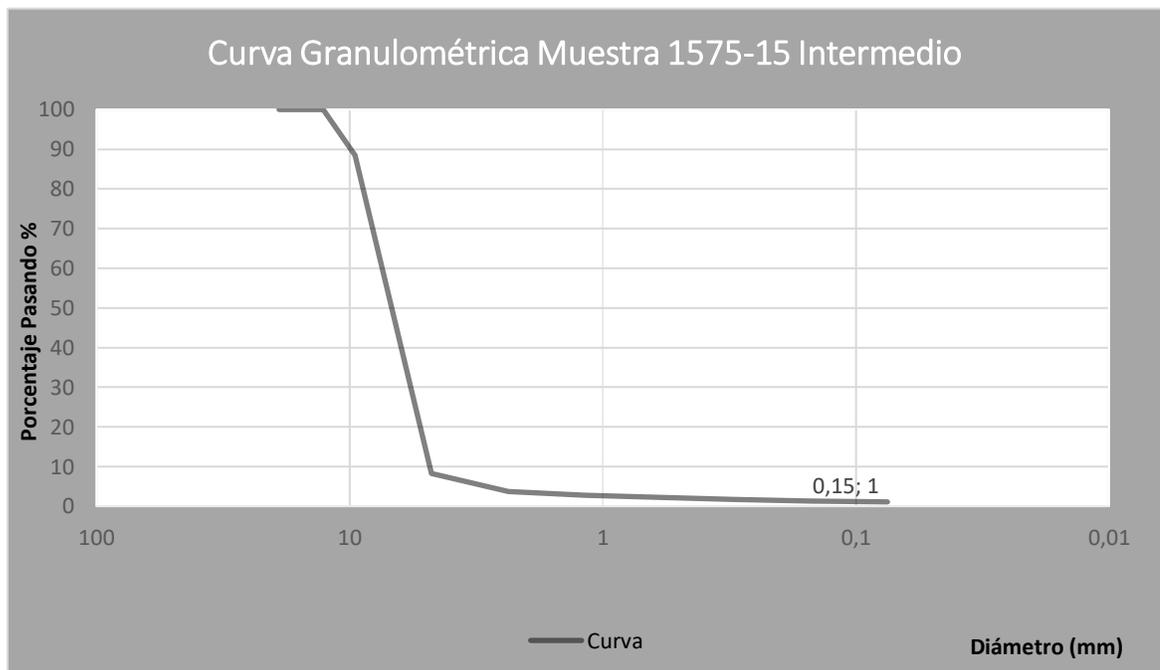
Gráfico 8. Curva granulométrica grueso



Fuente: Laboratorio de Materiales y Pavimentos. Lanamme UCR.

Muestra 1575-15 Intermedio Quintilla

Gráfico 9. Curva granulométrica intermedio



Fuente: Laboratorio de Materiales y Pavimentos. Lanamme UCR.

Tabla 12. Gravedad específica, densidad y absorción agregado fino

N° Muestra	Gravedad Específica			Densidad			Absorción
	Ga	Gbs	Gbss	Ds (kg/m ³)	Dbss (kg/m ³)	Dbss (kg/m ³)	%
1573-15	2.806	2.585	2.664	2770	2580	2650	3.04

Fuente: Laboratorio de Materiales y Pavimentos. Lanamme UCR.

Tabla 13. Gravedad específica, densidad y absorción agregado grueso

N° Muestra	Gravedad Específica			Densidad			Absorción
	Gs	Gbs	Gbss	Ds (kg/m ³)	Dbss (kg/m ³)	Dbss (kg/m ³)	%
1574-15	2.798	2.648	2.701	2780	2660	2700	2.03

Fuente: Laboratorio de Materiales y Pavimentos. Lanamme UCR.

Tabla 14. Gravedad específica, densidad y absorción agregado intermedio

N° Muestra	Gravedad Específica			Densidad			Absorción
	Gs	Gbs	Gbss	Ds (kg/m ³)	Dbss (kg/m ³)	Dbss (kg/m ³)	%
1575-15	2.818	2.644	2.706	2790	2660	2700	2.32

Fuente: Laboratorio de Materiales y Pavimentos. Lanamme UCR.

Tabla 15. Resultados de ensayo para determinación de caras fracturadas en el agregado muestra 1574-15 grueso

MALLA No.	ABERTURA (mm)	PESO PARTÍCULAS ENSAYADAS (G)	% AGREGADOS REDONDEADAS POR MASA	% AGREGADOS CON CARA FRACTURADA POR MASA	
				1 CARA	2 O MÁS CARAS
1/2 "	12,5	897	0,00	0,00	100
3/8 "	9,50	1022	0,00	0,26	100
Nº4	4,75	411	0,00	0,00	100
PROMEDIO PONDERADO:			0,00	0,12	99,9

Fuente: Laboratorio de Materiales y Pavimentos. Lanamme UCR.

Tabla 16. Resultados de ensayo para determinación de caras fracturadas en el agregado muestra 1575-15 intermedio

MALLA No.	ABERTURA (mm)	PESO PARTÍCULAS ENSAYADAS (G)	% AGREGADOS REDONDEADAS POR MASA	% AGREGADOS CON CARA FRACTURADA POR MASA	
				1 CARA	2 O MÁS CARAS
3/8 "	9,50	430	0,00	0,00	100
Nº4	4,75	1033	0,00	0,00	100
PROMEDIO PONDERADO:			0,00	0,00	100

Fuente: Laboratorio de Materiales y Pavimentos. Lanamme UCR.

Tabla 17. Resultados de ensayo porcentaje de vacíos en el agregado fino no compactado 1573-15.

DETERMINACIÓN Nº	MASA ARENA + RECIPIENTE (g)	MASA RECIPIENTE (g)	MASA ARENA (g)	VACIOS (%)
1	448	285	163	40,9
2	449	285	164	40,4
3	448	285	163	40,6
Promedio				40,7
Desv. Est.				0,33

Fuente: Laboratorio de Materiales y Pavimentos. Lanamme UCR.

Tabla 18. Ensayo para la determinación de partículas friables y arcillosas en el agregado grueso 1574-15

RANGO DE MALLAS		PESO INICIAL (g)	PESO FINAL (g)	% DE ARCILLAS Y PARTÍCULAS FRIABLES
(mm)	(Nº)			
4,75 - 9,75	No. 4 - 3/8"	524	521	0,52
9,50 - 19,0	3/8" - 3/4"	1689	1687	0,15

Fuente: Laboratorio de Materiales y Pavimentos. Lanamme UCR.

Tabla 19. Ensayo para la determinación de partículas friables y arcillosas en el agregado intermedio 1575-15

RANGO DE MALLAS		PESO INICIAL (g)	PESO FINAL (g)	% DE ARCILLAS Y PARTÍCULAS FRIABLES
(mm)	(N°)			
4,75 - 9,75	No. 4 - 3/8"	1640	1637	0,18
9,50 - 19,0	3/8" - 3/4"	441	439	0,41

Fuente: Laboratorio de Materiales y Pavimentos. Lanamme UCR.

Tabla 20. Resultados de ensayo para determinación del porcentaje de partículas planas, partículas elongadas y partículas planas y elongadas en el agregado grueso 1574-15.

MALLA N°	PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO	% PART. ELONGADAS	% PART. PLANAS	% PART. PLANAS Y ELONGADAS	% PART. NO PLANAS NO ELONGADAS
1/2"	913	36,0	0,00	0,00	0,00	36,0
3/8"	1124	44,3	0,00	0,48	0,00	43,8
No. 4	500	19,7	0,00	0,00	0,00	19,7
TOTAL:	2536	100	0,00	0,48	0,00	100

Fuente: Laboratorio de Materiales y Pavimentos. Lanamme UCR.

Tabla 21. Resultados de ensayo para determinación del porcentaje de partículas planas, partículas elongadas y partículas planas y elongadas en el agregado intermedio 1575-15.

MALLA N°	PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO	% PART. ELONGADAS	% PART. PLANAS	% PART. PLANAS Y ELONGADAS	% PART. NO PLANAS NO ELONGADAS
3/8"	430	26,1	0,00	0,05	0,00	26,0
No. 4	1218	73,9	0,15	0,44	0,00	73,3
TOTAL:	1648	100	0,15	0,49	0,00	99,4

Fuente: Laboratorio de Materiales y Pavimentos. Lanamme UCR.

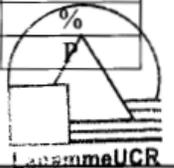
Ligante asfáltico

Las pruebas realizadas al ligante asfáltico se muestran a continuación. Estas tienen como finalidad evaluar el desempeño mecánico del ligante y comparar con la legislación nacional para determinar su uso en la producción de mezclas asfálticas, la legislación vigente se encuentra en el CR-2010, sección 702.01

Tabla 22. Ensayos de caracterización del ligante AC-30 muestra 2119-16.

Ensayo	Método de ensayo		Resultados	Unidades
	AASHTO	ASTM		
Densidad a 25 °C	T 228	D 70	1,0287 ± 0,0006	g/cm ³
Gravedad específica a 25 °C	T 228	D 70	1,0318 ± 0,0006	
Penetración a 25 °C	T 49	D 5	51 ± 2	1/10 mm
Punto de inflamación	T 48	D 92	355 ± 4	°C
Punto de ablandamiento [†]	T 53	D 36	49,7 ± 0,1	°C
Recuperación elástica [†]		D 6084	1,0 ± 0,9	%
Solubilidad en Tricloroetileno	T 44	D 2042	99,98 ± 0,02	%
Viscosidad absoluta a 60 °C	T 202	D 2171	3295 ± 85	

*La capacidad máxima del ductilómetro es de 100 cm
[†]Se utiliza la desviación estándar como incertidumbre



Fuente: Laboratorio de Materiales y Pavimentos. Lanamme UCR.

Tabla 23. Ensayos de viscosidad dinámica y cinemática del asfalto.

Ensayo	Método de ensayo		Resultados	Unidades
	AASHTO	ASTM		
Viscosidad dinámica a 125 °C		D 4402	940 ± 4	mPa·s
Viscosidad dinámica a 135 °C		D 4402	545 ± 3	mPa·s
Viscosidad dinámica a 145 °C		D 4402	336 ± 2	mPa·s
Viscosidad cinemática a 135 °C ¹		D 4402	560 ± 3	cSt

¹Se calcula usando los resultados de densidad y viscosidad dinámica a 135 °C

Fuente: Laboratorio de Materiales y Pavimentos. Lanamme UCR.

Tabla 24. Temperatura de mezclado y compactación

Temperaturas de trabajo	Límite	
	Inferior	Superior
Temperatura de mezclado (°C)	156	161
Temperatura de compactación (°C)	146	151

Fuente: Laboratorio de Materiales y Pavimentos. Lanamme UCR.

Tabla 25. Pruebas de cromatografía

Ensayo	Resultado	Unidades
Porcentaje de asfaltenos	15 ± 2	%
Porcentaje de saturados	7 ± 2	%
Porcentaje de nafténicos	46 ± 4	%
Porcentaje de aromáticos	32 ± 3	%
Índice de estabilidad coloidal	0,28	No aplica

Fuente: Laboratorio de Materiales y Pavimentos. Lanamme UCR.

Tabla 26. Cromatografía de capa fina

Ensayo	Resultado	Unidades
Porcentaje de asfaltenos [†]	19,4 ± 0,6	%
Porcentaje de saturados [†]	5,5 ± 0,1	%
Porcentaje de nafténicos [†]	58,4 ± 0,4	%
Porcentaje de aromáticos [†]	17,1 ± 0,6	%
Índice de estabilidad coloidal	0,33	No aplica

[†]Se utiliza la desviación estándar como incertidumbre

Fuente: Laboratorio de Materiales y Pavimentos. Lanamme UCR.

Tabla 27. Ensayo cambio de masa TFO

Ensayo	Método de ensayo		Resultados	Unidades
	AASHTO	ASTM		
Cambio de masa TFO	T 179	D 1754	-0,001 ± 0,008	%

Fuente: Laboratorio de Materiales y Pavimentos. Lanamme UCR.

Tabla 28. Ensayo de envejecimiento del ligante en TFO

Ensayo	Método de ensayo		Resultados	Unidades
	AASHTO	ASTM		
Ductilidad a 25 °C	T 51	D 113	100,0 ± 0,2	cm
Viscosidad absoluta a 60 °C	T 202	D 2171	7054 ± 47	P
Razón de viscosidades	2,14			No aplica

Fuente: Laboratorio de Materiales y Pavimentos. Lanamme UCR.

Tabla 29. Determinación del límite superior del grado de desempeño del ligante sin envejecer.

Ensayo	Método de ensayo		Resultados	Unidades	Límite Superior
	AASHTO	ASTM			
Módulo de deformabilidad (G* / sen δ) 58 °C	T 315	D 7175	4,40	kPa	64
Módulo de deformabilidad (G* / sen δ) 64 °C			1,90	kPa	
Módulo de deformabilidad (G* / sen δ) 70 °C			0,89	kPa	
Angulo de fase (δ) 58 °C			84,92	°	
Angulo de fase (δ) 64 °C			86,30	°	
Angulo de fase (δ) 70 °C			87,39	°	

Fuente: Laboratorio de Materiales y Pavimentos. Lanamme UCR.

Tabla 30. Cambio de masa en el horno rotatorio de película delgada RTFO.

Ensayo	Método de ensayo		Resultados	Unidades
	AASHTO	ASTM		
Cambio de masa RTFO	T 240	D 2872	-0,043 ± 0,002	%

Fuente: Laboratorio de Materiales y Pavimentos. Lanamme UCR.

Tabla 31. Límite superior del grado de desempeño envejecido en el RTFO.

Ensayo	Método de ensayo		Resultados	Unidades	Límite Superior
	AASHTO	ASTM			
Módulo de deformabilidad (G* / sen δ) 58 °C	T 315	D 7175	10,05	kPa	64
Módulo de deformabilidad (G* / sen δ) 64 °C			4,26	kPa	
Módulo de deformabilidad (G* / sen δ) 70 °C			1,88	kPa	
Angulo de fase (δ) 58 °C			80,96	°	
Angulo de fase (δ) 64 °C			83,22	°	
Angulo de fase (δ) 70 °C			84,96	°	

Fuente: Laboratorio de Materiales y Pavimentos. Lanamme UCR.

Tabla 32. Límite intermedio del grado de desempeño envejecido en RTFO y PAV (envejecimiento por presión).

Ensayo	Método de ensayo		Resultados	Unidades	Temperatura Intermedia
	AASHTO	ASTM			
Módulo de fatiga ($G^* \cdot \text{sen } \delta$) 22 °C	T 315	D 7175	5,26	MPa	25
Módulo de fatiga ($G^* \cdot \text{sen } \delta$) 25 °C			3,72	MPa	
Módulo de fatiga ($G^* \cdot \text{sen } \delta$) 28 °C			2,69	MPa	
Angulo de fase (δ) 22 °C			45,4	°	
Angulo de fase (δ) 25 °C			48,0	°	
Angulo de fase (δ) 28 °C			50,3	°	

Fuente: Laboratorio de Materiales y Pavimentos. Lanamme UCR.

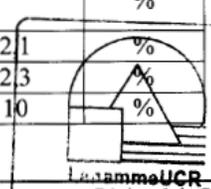
Tabla 33. Límite inferior del grado de desempeño envejecido en RTFO y PAV.

Ensayo	Método de ensayo		Resultados	Unidades	Límite Inferior
	AASHTO	ASTM			
Módulo de rigidez (s) -16 °C	T 315	D 6648	111,89	MPa	-22
Módulo de rigidez (s) -22 °C			172,72	MPa	
Módulo de rigidez (s) -28 °C			147,49	MPa	
Valor m estimado (m) -16 °C			0,36		
Valor m estimado (m) -22 °C			0,33		
Valor m estimado (m) -28 °C			0,21		

Fuente: Laboratorio de Materiales y Pavimentos. Lanamme UCR.

Tabla 34. Prueba de fluencia- recuperación bajo esfuerzo múltiple.

Ítem	Método de ensayo		Resultados	Unidades
	AASHTO	ASTM		
Promedio de porcentaje de recuperación a 0,1 kPa		D 7405	5,05	%
Promedio de porcentaje de recuperación a 3,2 kPa			1,7	%
Diferencia entre el promedio de porcentaje de recuperación a 0,1 kPa y 3,2 kPa			65,65	%
Jnr a 0,1 kPa			2,1	%
Jnr a 3,2 kPa			2,3	%
Diferencia en Jnr entre 0,1 kPa y 3,2 kPa			10	%



Fuente: Laboratorio de Materiales y Pavimentos. Lanamme UCR.

Tabla 35. Ensayo de recuperación elástica a diferentes esfuerzos.

Ensayo	Método de ensayo		J _{NR@3,2kPa}	$\frac{(J_{NR@3,2kPa} - J_{NR@0,1kPa}) * 100}{J_{NR@0,1kPa}}$
	AASHTO	ASTM		
Fluencia no recuperable a 64 °C		D 7405	2,30	9,52 ¹

¹Se obtiene aplicando la ecuación con los resultados del promedio aritmético de Jnr @0,1 kPa y Jnr @3,2 kPa

Fuente: Laboratorio de Materiales y Pavimentos. Lanamme UCR.

Tabla 36. Clasificación del asfalto según el grado de desempeño.

Grado de desempeño	
PG: 64-22	
Temperatura Superior (°C)	64
Temperatura Inferior (°C)	-22
MSCR	S

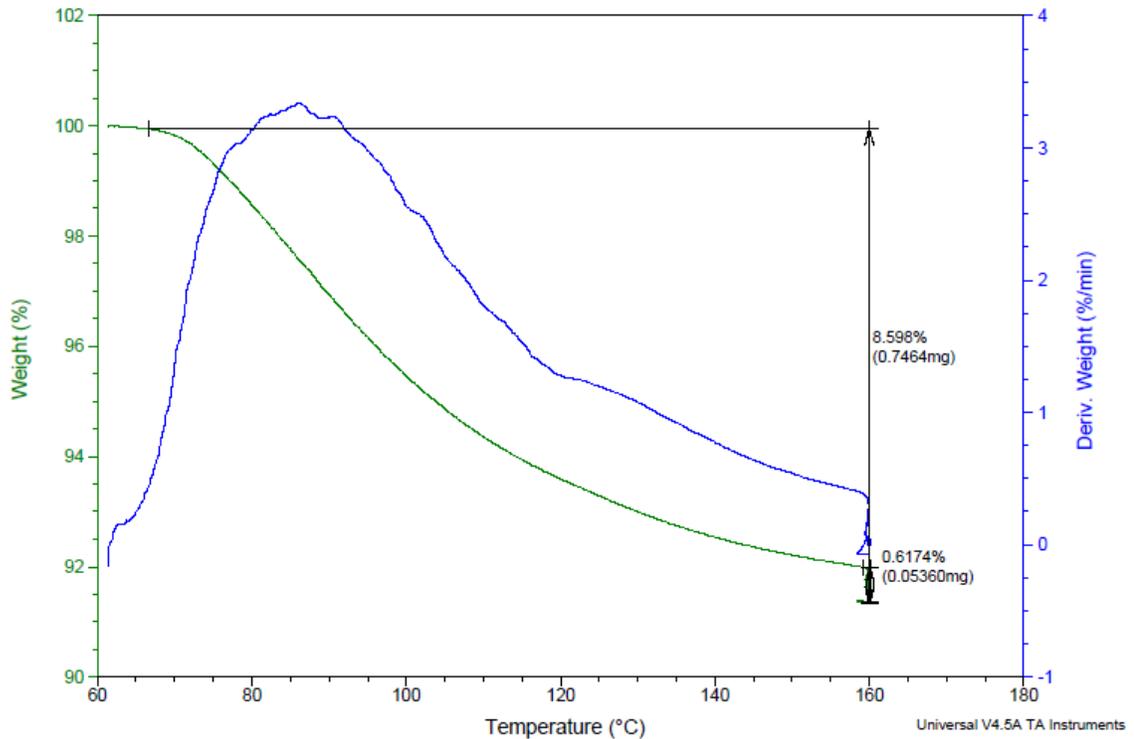
Fuente: Laboratorio de Materiales y Pavimentos. Lanamme UCR.

Fibras de bambú

Se realizó una prueba termogravimétrica para identificar el daño producido a la fibra en términos de la pérdida de masa, una vez expuesta a un aumento gradual de temperatura. Se tomaron datos con un aumento de 20°C/min hasta un máximo de 160°C, este último permaneció constante durante una hora para observar el comportamiento de la fibra ante tal temperatura habitual en el mezclado y compactación de mezclas asfálticas.

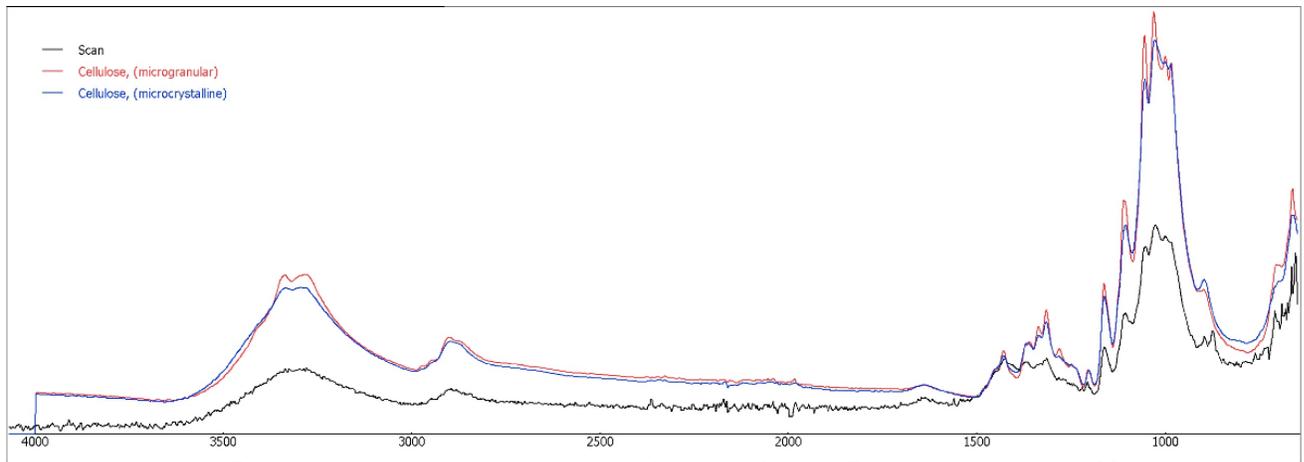
Como parte del agregado de la mezcla asfáltica, la fibra requirió de un análisis granulométrico para definir el tamaño de partícula de esta y determinar la curva del porcentaje pasando contra el tamaño de tamiz. Esto se realizó con las mallas destinadas para los análisis granulométricos, específicamente por la naturaleza de la fibra se utilizaron los tamices desde la malla # 4 (4.75 mm) hasta la malla # 200 (0.075 mm). Los resultados se muestran a continuación:

Gráfico 10. Curva termogravimétrica de la fibra de bambú



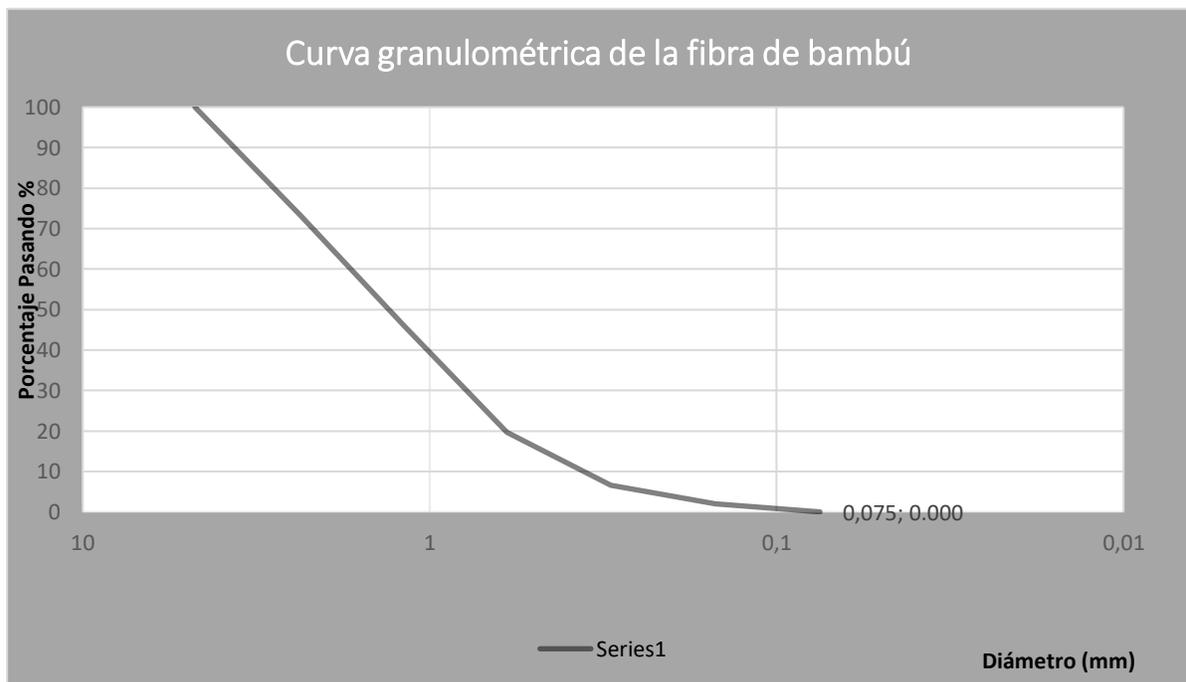
Fuente: La autora. Laboratorio de Materiales y Modelos Estructurales. Área de Pruebas de Desempeño.

Gráfico 11. Composición química de la fibra de bambú.



Fuente: La autora. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Lanamme UCR.

Gráfico 12. Curva granulométrica por tamaño de partícula.



Fuente: La autora.

Como se muestra en las curvas anteriores, el tamaño máximo de partícula corresponde a 4.75 mm, ya que este es el tamiz más grande que el tamiz que retiene más del 10 % de material, con esto se realizó una combinación granulométrica con las fuentes de agregados de los 4 distintos apilamientos (polvo de piedra, cuartilla, quintilla y grueso), la cual se muestra más adelante. Con ello, se cumple con la sección de granulometría del diseño Superpave descrita en la norma AASHTO M323.

Además de las pruebas anteriores, se utilizó el principio de Arquímedes para determinar la densidad de la fibra, esto ya que se necesita calcular la proporción volumétrica de esta para definir la cantidad específica de masa requerida en la mezcla asfáltica. Las pruebas de densidad se

realizaron 3 veces, obteniendo un resultado promedio de 0.7 g/cm³. Esta se determinó seca al aire, ya que se considera que, durante el proceso de almacenamiento y producción de mezcla asfáltica, la fibra seca al aire (no seca al horno) hace el proceso más práctico y económico.

Cabe destacar que no se realizó el procedimiento gravimétrico indicado en la norma ASTM C128 para la determinación de la densidad de agregados finos, ya que por la textura de la fibra esta no permite un adecuado procedimiento del ensayo, esto porque la fibra se adhiere a cualquier material y, al momento de remover o manipular dicho agregado, este pierde masa y, por lo tanto, el valor de densidad se ve afectado.

Tabla 37. Resultados de densidad de la fibra

Parámetro	Pruebas		
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Masa			
Peso recipiente (g)	126.7	126.7	126.7
Peso recipiente más fibra (g)	128.1	128.1	128.1
Peso fibra (g)	1.40	1.44	1.44
Volumen			
Volumen inicial (ml)	210	130	130
Volumen final (ml)	212	132	132
Volumen desplazado (ml)	2	2	2
Densidad absoluta (g/cm ³)	0.70	0.72	0.7
Promedio		0.71	

Fuente: La autora.

Efecto de la adición de las fibras de bambú sobre la mezcla

Cálculo de baches para mezcla asfáltica

A continuación, se muestra el cálculo realizado para determinar la cantidad de agregado y asfalto requerido para la mezcla. Dicho cálculo se explica detalladamente en la sección de metodología. Además, se muestran los demás porcentajes calculados en la sección de apéndices.

Tabla 38. Cálculo con 1 % de fibra y 6.20 % de asfalto

<u>Datos iniciales en gramos</u>		<u>Porcentajes iniciales de agregado</u>		
Wmm =	14000	Polvo de Piedra =	55	
% P.T.M =	6.2	Cuartilla =	15	
% Fibra =	1	Quintilla =	30	
<u>Cantidades en gramos</u>		<u>Peso de agregado y porcentajes con fibra</u>		<u>Cantidades en gramos</u>
Wa =	13009.97	Wa más fibra =	13140.07	
Peso fibra =	130.10	Polvo de Piedra =	54.450	7154.77
Peso asfalto =	859.93	Cuartilla =	14.85	1951.49
Polvo de Piedra =	7155.482	Quintilla =	29.70	3902.99
Cuartilla =	1951.495			
Quintilla =	3902.990			

Fuente: La autora.

Mezcla asfáltica Río Claro con propiedades volumétricas dosificación 1 %

Cabe destacar que esta prueba fue realizada con el agregado proveniente de Río Claro y fue necesario solamente dos especímenes de prueba, ya que, como se verá más adelante, las propiedades volumétricas incumplen 3 parámetros del diseño Superpave, por tal motivo, como se explicará en el análisis de resultados, fue necesario cambiar la fuente del agregado para cumplir con los parámetros de diseño establecidos en la norma AASHTO M32. No obstante, como parte de la investigación, se hace necesario documentar todas las pruebas realizadas y justificar los cambios realizados, dado lo anterior se muestra en las siguientes tablas los resultados obtenidos con la fuente de Río Claro.

Una vez realizada la mezcla asfáltica, se determinó la gravedad específica bruta y la gravedad específica máxima teórica de los especímenes para analizar las propiedades volumétricas, con lo cual se obtuvo lo siguiente:

Tabla 39. Resultados propiedades volumétricas 1 % dosificación

Propiedad	Resultado	Requisito
%AC (PTM)	6.32	
Gb	1.02	
Gmb	2.277	
Gmm	2.399	
% VTM	5.1	
Gsb	2.462	
% VMA	13.4	> 14
% VFA	61.8	65 - 75
Gse	2.640	
Pba	2.8	
Pbe	3.7	
P0.075	5.7	
DP	1.54	06 - 1.3
h inicial	130.75	
h final	116.15	
%Gmm @ Nini	84.3	< 89
%Gmm @ Ndis	94.9	< 96

Fuente: La autora.

Tabla 40. Porcentaje de distribución de agregados y Gbs combinado.

T.M.N	12,5mm				
	Polvo Piedra	Intermedio A	Intermedio B	Grueso	
Tipo de agregado	2137-16	2138-16	2139-16	2140-16	BAMBU
% de distribución de cada apliamento	46.53	9.9	32.67	9.9	0.99
Gsb	2.490	2.610	2.600	2.640	0.700
Gbs combinado	2.462				

Fuente: La autora.

Tabla 41. Prueba gravedad específica máxima teórica.

No. Espécimen	Peso contenedor (g)	Peso contenedor sumergido (g)	Peso contenedor + muestra seca (g)	Peso muestra (g)	Peso contenedor + muestra sumergida (g)	Cont. Asfalto (PTM)	Gmm	Peso bandeja + muestra (g)	Peso bandeja (g)	Gmm corregido
	A	B	C	D = C - A	E					
1	2368.7	1492.9	4463.9	2095.2	2715.1	6.32	2.400	3104.4	1008.8	2.399
2	2368.7	1492.9	4459	2090.3	2713.3	6.32	2.403	3104.4	1012.9	2.400
Promedios				2092.8			2.401			2.399

Fuente: La autora.

Tabla 42. Prueba de gravedad específica bruta.

No. Espécimen	W SECO A	W SUM B	W SSS C	Cont. Asfalto (PTM)	Gmb A / (C - B)	% VACÍOS	h inicial	h final
1	4566.6	2568.4	4577.8	6.32	2.273	5.3	130.4	115.9
2	4564	2576	4576.7	6.32	2.281	4.9	131.1	116.4
Promedio					2.277			

Fuente: La autora.

Como se muestra en las pruebas anteriores, el VTM es mayor al indicado en la norma de diseño Superpave que corresponde a un 4 % de vacíos, además, el VFA y el VMA se salen de los parámetros de aceptación de dicha norma, estos resultados se explicarán debidamente en la sección de análisis de resultados del proyecto.

Asimismo, en la tabla 40 se observa los porcentajes de agregado utilizados con base en la curva granulométrica de la combinación de apilamientos mostrada en la sección de metodología, la cual como se estudiará más adelante, cumple con los puntos de control del diseño Superpave, no obstante, no puede modificarse para cumplir con los parámetros de diseño, ya que incumpliría los puntos de control mencionados.

En cuanto a los resultados de gravedad específica bruta y gravedad específica máxima teórica, estos muestran valores bajos de densidad relativa, aunque como se demostrará, de igual manera es necesario aumentar y disminuir sus valores respectivamente con una fuente de agregado con propiedades diferentes que se explicarán en el análisis de resultados. Dado lo anterior, se muestran a continuación las dosificaciones de fibra en la mezcla asfáltica realizada con agregado proveniente de la fuente de Guápiles. Las combinaciones granulométricas de ambas mezclas se pueden observar en los apéndices.

Mezcla asfáltica Guápiles con propiedades volumétricas dosificación 1 %

Tabla 43. Propiedades volumétricas agregado Guápiles 1 % fibra.

Propiedad	Resultado	Requisito
%AC (PTM)	6.2	
Gb	1.02	
Gmb	2.399	
Gmm	2.456	
% VTM	2.3	
Gsb	2.543	
% VMA	11.5	> 14
% VFA	80.0	65 - 75
Gse	2.708	
Pba	2.4	
Pbe	3.9	
P0.075	5.7	
DP	1.46	06 - 1.3
h inicial	127.85	
h final	114.75	
%Gmm @ Nini	87.7	< 89
%Gmm @ Ndis	97.7	< 96

Fuente: La autora.

Tabla 44. Porcentaje de distribución de agregado y Gbs combinado.

T.M.N	12,5mm				
Tipo de agregado	Polvo Piedra	Cuartilla	Quintilla	Fibra	
% de distribución de cada apliamento	2137-16	2138-16	2139-16	BAMBU	
	55	15	29	0.99	
Gsb	2.585	2.648	2.644	0.700	
Gbs combinado	2.543				

Fuente: La autora.

Tabla 45. Prueba gravedad específica máxima teórica.

No. Espécimen	Peso bandeja + muestra (g)	Bandeja N°	Peso bandeja (g)	Peso muestra SSS (g)	Peso contenedor (g)	Peso contenedor + muestra seca (g)	Peso contenedor + muestra sumergida (g)	Peso contenedor + agua sumergido (g)	Temperatura (°C)	Gmm	
A	2639.0	11	1013.4	1625.6	2368.2	3993.3	2456.6	1493.4	24.8	2.453	
B	2636.2	12	1009.2	1627.0	2368.2	3994.6	2458.7	1493.4	24.8	2.458	Diferencia
Promedios	2637.6	-	1011.3	1626.3	2368.2	3994.0	2457.7	1493.4	24.8	2.456	-0.005
Desvest	2.0	0.7	3.0	1.0	0.0	0.9	1.5	0.0	0.0	0.003	OK

Fuente: La autora.

Tabla 46. Prueba de gravedad específica bruta

No. Espécimen	W SECO (A)	W SUM (B)	W SSS (C)	Temperatura (°C)	VOLUMEN	Gbs	Absorción de agua (%)	Vacios	Altura 8 giros (mm)	Altura 100 giros (mm)	%Gmm 8 giros (%)	%Gmm 100 giros (%)
1	4735.2	2769.7	4739.2	24.8	1969.5	2.404	0.20	2.18	127.7	114.5	87.8	97.9
2	4735.7	2761.5	4739.7		1978.2	2.394	0.20	2.60	128.0	115.0	87.6	97.5
Promedios	4735.5	2765.6	4739.5		1973.9	2.399	0.20	2.39	127.9	114.8	87.7	97.7
Desvest	0.4	5.8	0.4		6.2	0.007	0.00	0.30	0.2	0.4	0.1	0.3

Fuente: La autora.

Cabe destacar que los resultados obtenidos no cumplen las especificaciones requeridas para diseño Superpave, dado que el VTM ahora es 2.3 %, es decir, casi no existen vacíos totales en la mezcla, esto no permite un adecuado desempeño de la mezcla al momento de soportar las cargas del tránsito, además cabe mencionar que el VMA tuvo un resultado más bajo de lo esperado y el VFA también tuvo un valor fuera del

rango permitido.

Como resultado de lo anterior, es necesario bajar el contenido de asfalto para evaluar nuevamente la volumetría y mejorar los parámetros requeridos con el porcentaje de 1 % de fibra. A continuación, se muestra el cálculo de la mezcla asfáltica con 5.5 % de asfalto y 1 % de fibra.

Mezcla asfáltica Guápiles 5.5 % asfalto óptimo y 1 % de fibra de bambú

Tabla 47. Propiedades volumétricas

Propiedad	Resultado	Requisito
%AC (PTM)	5.5	
Gb	1.02	
Gmb	2.344	
Gmm	2.482	
% VTM	5.6	
Gsb	2.543	
% VMA	12.9	> 14
% VFA	56.7	65 - 75
Gse	2.708	
Pba	2.4	
Pbe	3.2	
P0.075	5.7	
DP	1.79	06 - 1.3
h inicial	131.2	
h final	118.1	
%Gmm @ Nini	85.0	< 89
%Gmm @ Ndis	94.4	< 96

Fuente: La autora.

Tabla 48. Porcentaje de distribución de agregado y Gbs combinado.

T.M.N	12,5mm				
Tipo de agregado	Polvo Piedra	Cuartilla	Quintilla	Fibra	
% de distribución de cada apliamento	2137-16	2138-16	2139-16	BAMBU	
	55	15	29	0.99	
Gsb	2.585	2.648	2.644	0.700	
Gbs combinado	2.543				

Fuente: La autora.

Tabla 49. Prueba gravedad específica máxima teórica

No. Espécimen	Peso bandeja + muestra (g)	Bandeja N°	Peso bandeja (g)	Peso muestra SSS (g)	Peso contenedor (g)	Peso contenedor + muestra seca (g)	Peso contenedor + muestra sumergida (g)	Peso contenedor + agua sumergido (g)	Temperatura (°C)	Gmm	
A	2656.5	11	1013.4	1643.1	2367.9	4010.1	2474.6	1493.4	24.8	2.481	
B	2651.7	12	1009.2	1642.5	2367.9	4010.1	2474.6	1493.4	24.8	2.483	
Promedios	2654.1	-	1011.3	1642.8	2367.9	4010.1	2474.6	1493.4	24.8	2.482	
Desvest	3.4	0.7	3.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.002	
											Diferencia
											-0.002

Fuente: La autora.

Tabla 50. Prueba de gravedad específica bruta

No. Espécimen	W SECO (A)	W SUM (B)	W SSS (C)	Temperatura (°C)	VOLUMEN	Gbs	Absorción de agua (%)	Vacios	Altura 8 giros (mm)	Altura 100 giros (mm)	%Gmm 8 giros (%)	%Gmm 100 giros (%)
1	4731.5	2727.8	4750.5	24.8	2022.7	2.339	0.94	5.80	132.0	114.5	81.7	94.2
2	4732.7	2730.4	4746.0		2015.6	2.348	0.66	5.45	130.4	115.0	83.4	94.6
Promedios	4732.1	2729.1	4748.3		2019.2	2.344	0.80	5.62	131.2	114.8	82.6	94.4
Desvest	0.8	1.8	3.2		5.0	0.006	0.20	0.25	1.1	0.4	1.2	0.3

Fuente: La autora.

Como se muestra en la tabla 47 el porcentaje de vacíos de la mezcla total asciende a 5.6 %, además de un VMA y VFA menores del rango establecido para mezclas asfálticas entre 10 y 30 ESALs, lo que resulta en un inadecuado diseño de mezcla.

Dado que lo anterior se da en gran medida por la densidad de la fibra, la cual es sumamente baja, se muestra a continuación un cálculo realizado no tomando en cuenta este factor para así demostrar que los problemas de volumetría son causados por este agregado, no obstante, más adelante se muestra la solución planteada para cumplir con la volumetría de la mezcla.

Mezcla asfáltica Guápiles 6.20 % asfalto óptimo sin fibra

Tabla 51. Propiedades volumétricas

Propiedad	Resultado	Requisito
%AC (PTM)	6.2	
Gb	1.02	
Gmb	2.376	
Gmm	2.483	
%VTM	4.3	
Gsb	2.612	
%VMA	14.7	> 14
%VFA	70.6	65 - 75
Gse	2.743	
Pba	1.9	
Pbe	4.4	
P0.075	5.7	
DP	1.28	06 - 1.3
h inicial	129.1	
h final	113.2	
%Gmm @ Nini	83.9	< 89
%Gmm @ Ndis	95.7	< 96

Fuente: La autora.

Tabla 52. Porcentaje de distribución de agregados y Gbs combinado

T.M.N	12,5mm			
Tipo de agregado	Polvo Piedra	Cuartilla	Quintilla	
% de distribución de cada apliamento	2137-16	2138-16	2139-16	
	55	15	30	
Gsb	2.585	2.648	2.644	
Gbs combinado	2.612			

Fuente: La autora.

Tabla 53. Prueba gravedad específica máxima teórica.

No. Espécimen	Peso contenedor (g)	Peso contenedor sumergido (g)	Peso contenedor + muestra seca (g)	Peso muestra (g)	Peso contenedor + muestra sumergida (g)	Gmm
	A	B	C	D = C - A	E	$F = D / (D + B - E)$
1	2369.6	1494.2	4391.9	2022.3	2702	2.483
2	2369.6	1494.2	4388.7	2019.1	2700	2.483
Promedios				2020.7		2.483

Fuente: La autora.

Tabla 54. Prueba gravedad específica bruta.

No. Espécimen	W SECO A	W SUM B	W SSS C	Cont. Asfalto (PTM)	Gmb A / (C - B)	% VACÍOS	h inicial	h final
1	4639	2692.2	4649.3	6.0	2.370	4.5	128.5	114.8
2	4637.4	2703.3	4643.5	6.0	2.390	3.7	128.7	114.9
3	4635.3	2683.3	4641.4	6.0	2.367	4.7	127.7	114.1
Promedios					2.376	4.3	128.3	114.6

Fuente: La autora.

El resultado anterior muestra una volumetría que cumple totalmente los parámetros de las normas AASHTO M323 y AASHTO R35, lo cual permite demostrar que el problema en este caso viene dado por la fibra de bambú, ya que, como se observó anteriormente, los resultados de volumetría tomando en cuenta un 1 % de fibra y porcentajes de asfalto óptimo de 6.20 % y 5.5 % demuestra una volumetría deficiente en cuanto a

los requerimientos de la norma.

Dado lo anterior, se realizaron curvas de diseño como las mostradas en el gráfico 2 presentado en el marco teórico, las cuales se realizaron con los contenidos de asfalto mostrados anteriormente. Además, se realizaron también 2 baches con contenido de fibra 0.5 % y 0.1 % para un contenido de asfalto de 6.20 %. No obstante, estos resultados no se muestran, dado que la mezcla asfáltica presentó problemas de exudación que se explicarán debidamente en el análisis de resultados.

Propiedades volumétricas de baches realizados con 5.5 % y 6.20 % asfalto óptimo

Tabla 55. Propiedades volumétricas

Propiedad	PTOS VERIFICACIÓN		
%AC (PTM)	5.5	6.2	
Gb	1.02	1.02	
Gmb	2.344	2.399	
Gmm	2.482	2.456	
% VTM	5.6	2.3	
Gsb	2.543	2.543	
% VMA	12.9	11.5	> 14
% VFA	56.7	80.0	65 - 75
Gse	2.708	2.708	
Pba	2.4	2.4	
Pbe	3.2	3.9	
P0.075	5.7	5.7	
DP	1.79	1.46	06 - 1.3
h inicial	131.2	143.6	
h final	114.75	114.75	
%Gmm @ Nini	82.6	78.1	< 89
%Gmm @ Ndis	94.4	97.7	< 96

Fuente: La autora.

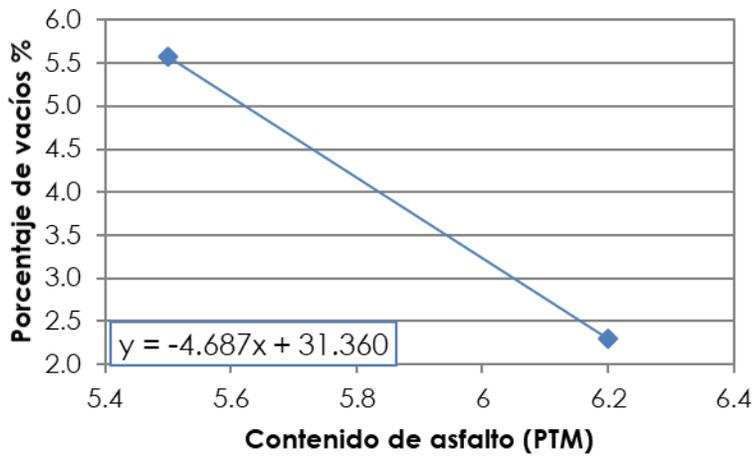
La tabla anterior tiene como objetivo interpolar y graficar los valores mostrados para realizar las curvas de diseño de la mezcla con 1 % de fibra de bambú.

Tabla 56. Resumen diseño a 4 % de vacíos

Diseño 12.5 mm	Requisito
% AC (PTM)	5.84
% VTM	4
% VMA	12.22
% VFA	68.03
DP	1.63
% Gmm @ Nini	80.39

Fuente: La autora.

Gráfico 13. Porcentaje de vacíos vs Contenido de asfalto



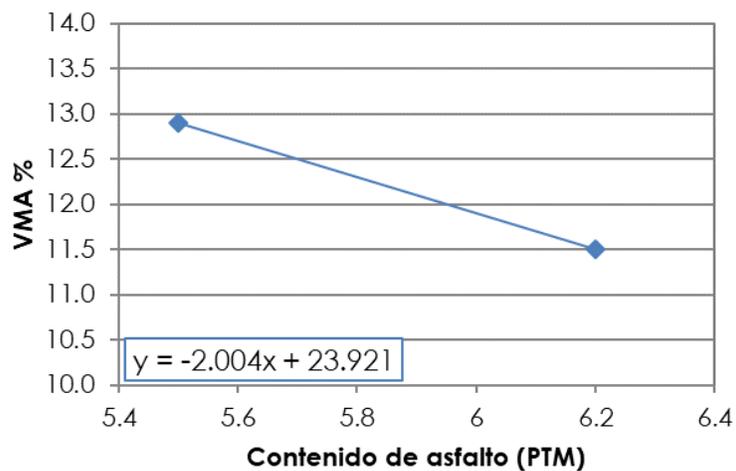
Fuente: La autora.

m	b
-4.687	31.36
%VTM deseado	% PTM
4	5.84

$$y = -4.687 x + 31.36$$

$$\%VTM = 4 \rightarrow PTM = 5.84$$

Gráfico 14. Vacíos en el agregado mineral vs Contenido de asfalto



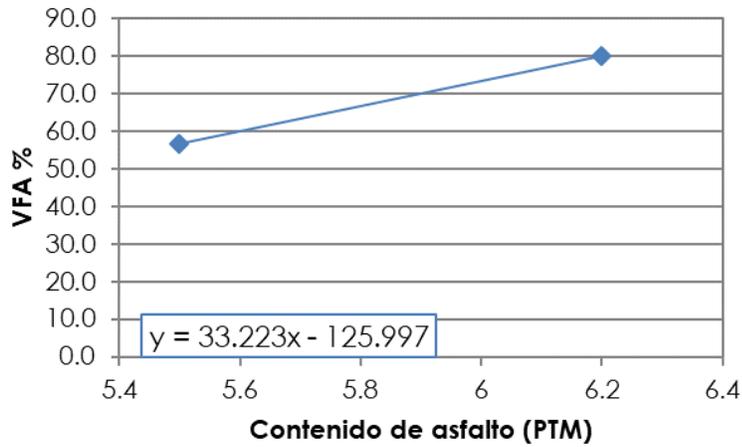
Fuente: La autora.

m	b
-2.004	23.921
% PTM	VMA diseño
5.84	12.22

$$y = -2.004 x + 23.921$$

$$\%PTM = 5.84 \rightarrow VMA = 12.22$$

Gráfico 15. Vacíos llenos con asfalto vs Contenido de asfalto.



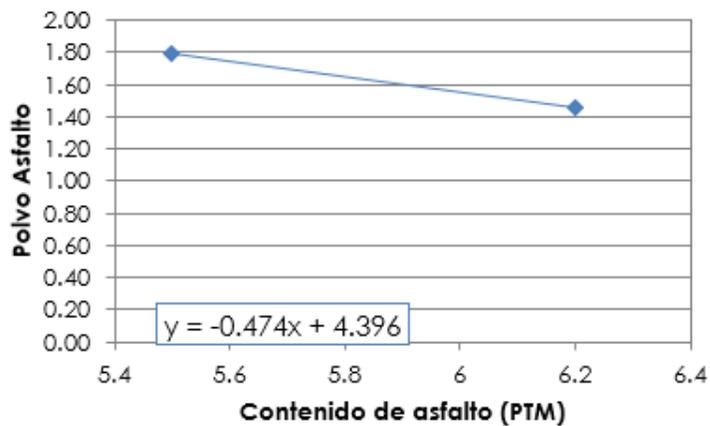
Fuente: La autora.

m	b
33.223	-125.997
% PTM	VFA diseño
5.84	68.03

$$y = 33.223 x + -125.997$$

$$\%PTM = 5.84 \rightarrow VFA = 68.03$$

Gráfico 16. Relación Polvo Asfalto vs Contenido de asfalto.



Fuente: La autora.

m	b
-0.474	4.396
% PTM	DP
5.84	1.63

$$y = -0.474 x + 4.396$$

$$\%PTM = 5.84 \rightarrow DP = 1.63$$

Resultados de la evaluación del desempeño mecánico de la mezcla con adición de fibra y la mezcla de control

Resultados de desempeño mecánico de la mezcla con fibra y 5.84 % asfalto óptimo.

Prueba resistencia retenida a la tensión diametral de la muestra 1489-19 TD.

Tabla 57. Gravedad máxima teórica

No. Espécimen	Peso bandeja + muestra (g)	Bandeja N°	Peso bandeja (g)	Peso muestra SSS (g)	Peso contenedor (g)	Peso contenedor + muestra seca (g)	Peso contenedor + muestra sumergida (g)	Peso contenedor + agua sumergido (g)	Temperatura (°C)	Gmm	
A	2665.1	9	1012.6	1652.5	2367.9	4019.8	2475.4	1493.4	24.8	2.464	
B	2665.9	10	1012.7	1653.2	2367.9	4019.4	2475.3	1493.4	24.8	2.460	Dif
Promedios	2665.5	-	1012.7	1652.9	2367.9	4019.6	2475.4	1493.4	24.8	2.462	-0.004

Fuente: La autora.

Tabla 58. Gravedad específica bruta

No. Espécimen	W SECO (A)	W SUM (B)	W SSS (C)	Temperatura (°C)	VOLUMEN	Gbs	Absorción de agua (%)	Vacíos
1	3721.2	2126.5	3742.1	24.8	1615.6	2.303	1.3	6.4
2	2390.8	1360.0	2404.5		1044.5	2.289	1.3	7.0

Fuente: La autora.

Tabla 60. Medidas de diámetro y altura para cada una de las muestras

No. Espécimen	Diámetro					Altura				
	D1	D2	D3	D4	Promedio	A1	A2	A3	A4	Promedio
1	150.70	150.48	150.31	150.59	150.52	95.17	95.18	95.14	95.17	95.17
2	150.70	150.11	149.94	149.95	150.18	95.15	95.23	95.18	95.21	95.19
3	150.01	150.15	150.31	150.01	150.12	95.51	95.37	95.48	95.81	95.54
4	149.71	150.09	150.15	150.26	150.05	94.92	94.48	94.63	94.83	94.72
5	150.11	150.27	150.15	150.03	150.14	95.23	95.17	95.18	95.18	95.19
6	150.71	149.93	149.98	149.96	150.15	95.14	95.13	95.16	95.17	95.15

Fuente: La autora.

Tabla 61. Gravedad específica bruta y porcentaje de vacíos

No. Espécimen	W SECO (A)	W SUM (B)	W SSS (C)	Temperatura (°C)	VOLUMEN	Gbs	Absorción de agua (%)	Vacíos
1	3700	2122	3743.1		1621.10	2.28	1.5	7.29
2	3716.3	2125.1	3745.8		1620.70	2.29	1.7	6.86
3	3714.0	2119.4	3741.6		1622.20	2.29	1.6	7.00
4	3702.4	2102.6	3726.9		1624.30	2.28	1.5	7.41
5	3713.5	2132.2	3741.2		1609.00	2.31	1.7	6.25
6	3715.1	2128.9	3740.9		1612.00	2.30	1.6	6.39

Fuente: La autora.

Tabla 62. Porcentajes de saturación

No. Espécimen	Volumen de vacíos	W SUM (B)'	W SSS (C)'	Volumen saturación (cm ³)	Volumen agua absorbida (cm ³)	Saturación (%)
1	118.2	2191.5	3792.2	1600.7	92.20	78.0
2	111.2	2185.0	3803.4	1618.4	87.10	78.3
3	113.6	2183.5	3799.5	1616.0	85.50	75.3

Fuente: La autora.

Tabla 63. Carga máxima y esfuerzo a tensión en la falla

No. Espécimen	Carga máxima (N)	Esfuerzo a tensión (kPa)
1	20543	913
2	20109	896
3	17741	787
4	22029	987
5	21970	979
6	21683	966

Fuente: La autora.

Tabla 64. Resistencia retenida a la tensión diametral

No. Espécimen	Porcentaje de vacíos (%)	Tipo de acondicionamiento	Saturación (%)	Carga máxima (N)	Esfuerzo a tensión (kPa)	Resistencia retenida a la tensión diametral (%)
4.0	7.4	Secas + 2 horas a 25 °C	-	22029	987	-
5.0	6.3		-	21970	979	
6.0	6.4		-	21683	966	
Promedios	6.7	-	-	21894	977	
Desv. Est.	0.6	-	-	185	10	
1	7.3	Saturación + 24 horas a 60 °C + 2 horas a 25 °C	78.0	20543	913	92.5
2	6.9		78.3	20109	896	91.5
3	7.0		75.3	17741	787	81.5
Promedios	7.1	-	77.2	19464	865	88.5
Desv. Est.	0.2	-	1.7	1508	68	6.1

Fuente: La autora.

Prueba de fatiga en viga a flexión de la muestra 1490-19

Tabla 65. Gravedad máxima teórica de especímenes de prueba.

No. Espécimen	Peso bandeja + muestra (g)	Bandeja N°	Peso bandeja (g)	Peso muestra SSS (g)	Peso contenedor (g)	Peso contenedor + muestra seca (g)	Peso contenedor + muestra sumergida (g)	Peso contenedor + agua sumergido (g)	Temperatura (°C)	Gmm
A	2665.1	9	1012.6	1652.5	2367.9	4019.8	2475.4	1493.4	24.8	2.464
B	2665.9	10	1012.7	1653.2	2367.9	4019.4	2475.3	1493.4	24.8	2.460
Promedios	2665.5	-	1012.7	1652.9	2367.9	4019.6	2475.4	1493.4	24.8	2.462

Fuente: La autora.

Tabla 66. Gravedad específica bruta y porcentaje de vacíos del bloque y las vigas de prueba

No. Espécimen	W SECO (A)	W SUM (B)	W SSS (C)	VOLUMEN	Gbs	Absorción de agua (%)	Porcentaje de vacíos (%)
B1	22779.0	12953.0	23010.0	10057.0	2.265	2.3	8.0
v1	2937.8	1670.1	2948.3	1278.2	2.298	0.8	6.6
v2	2844.1	1612.1	2855.4	1243.3	2.288	0.9	7.1
v3	2835.6	1610.5	2845.4	1234.9	2.296	0.8	6.7
v4	2963.4	1680.3	2971.3	1291.0	2.295	0.6	6.8
Promedios				1261.9	2.294	0.8	6.8
Desv. Est.				3933.4	0.014	0.6	0.2

Fuente: La autora.

Tabla 67. Resultados de fatiga mediante carga a flexo tracción con deformación controlada a 400 microstrain

No. Espécimen	Porcentaje de vacíos (%)	Temperatura (°C)	Deformación unitaria a tensión (1×10^{-6} mm/mm)	Rigidez inicial a flexión (MPa)	Rigidez final a flexión al 50% (MPa)	Número de ciclos de fatiga	Rigidez final a flexión al S x n máximo (MPa)	Número de ciclos de fatiga
B1-V01	6.7	20.0	400	8099	4051	176468	8.82E+08	261398
B1-V02	6.8	20.0	400	7390	3679	167880	6.44E+08	184123
Promedio	6.7	20.0	400	7745	3865	172174	7.63E+08	222761
Desv. Est.	0.0	0.0	0	501	263	6073	1.68E+08	54642

Fuente: La autora.

Tabla 68. Resultados de fatiga mediante carga a flexo tracción con deformación controlada a 600 microstrain

No. Espécimen	Porcentaje de vacíos (%)	Temperatura (°C)	Deformación unitaria a tensión (1×10^{-6} mm/mm)	Rigidez inicial a flexión (MPa)	Rigidez final a flexión al 50% (MPa)	Número de ciclos de fatiga	Rigidez final a flexión al S x n máximo (MPa)	Número de ciclos de fatiga
B1-V03	6.6	20.0	600	6387	3191	41807	1.63E+08	58987
B1-V04	7.1	20.0	600	7494	3736	32546	1.63E+08	54162
Promedio	6.9	20.0	600	6940	3463	37177	1.63E+08	56575
Desv. Est.	0.3	0.0	0	783	386	6549	0	3412

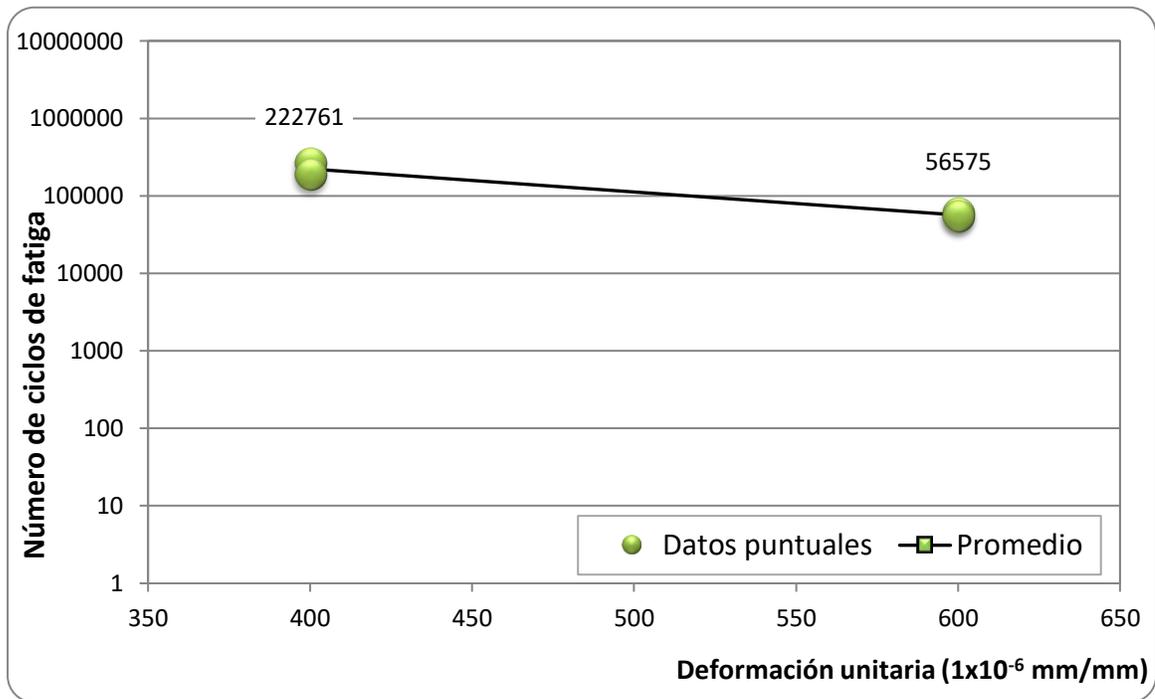
Fuente: La autora.

Tabla 69. Promedio del número de ciclos de fatiga de las vigas y cumplimiento con las especificaciones en el CR-2010

Deformación unitaria a tensión (1×10^{-6} mm/mm)	Promedio de número de ciclos de fatiga	Especificación CR-2010		Cumplimiento para el tipo de mezcla asfáltica C ⁽¹⁾	Cumplimiento para el tipo de mezcla asfáltica D ⁽¹⁾
		Tipo C*	Tipo D*		
400	222761	$\geq 450\ 000$	$\geq 300\ 000$	NO	NO
600	56575	$\geq 50\ 000$	$\geq 25\ 000$	SÍ	SÍ

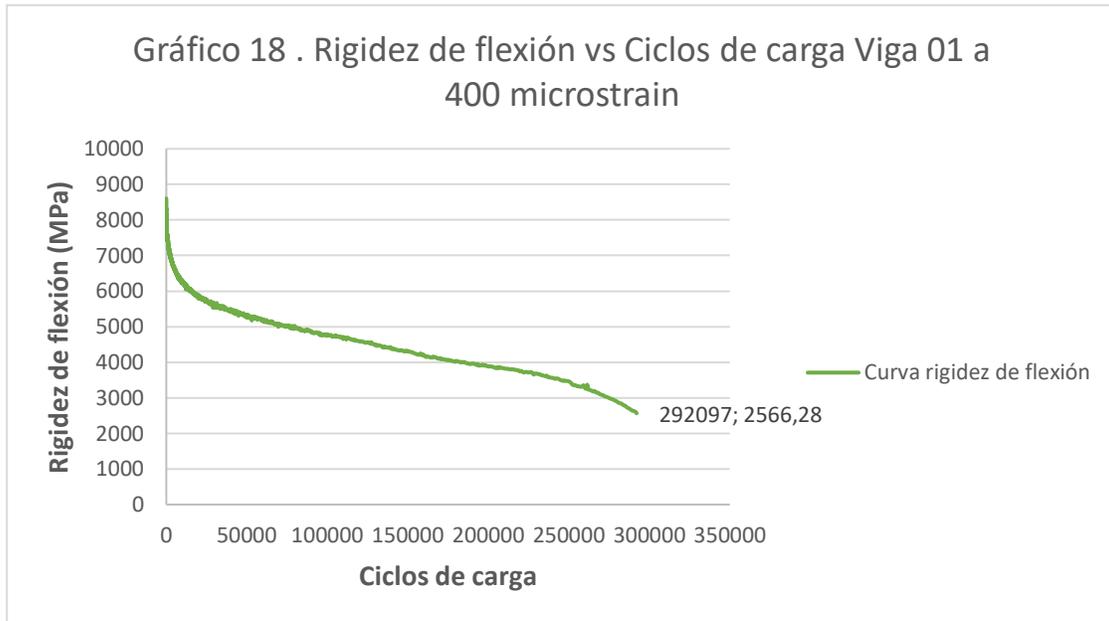
Fuente: La autora.

Gráfico 17. Comportamiento del número de ciclos de fatiga vs la deformación unitaria.



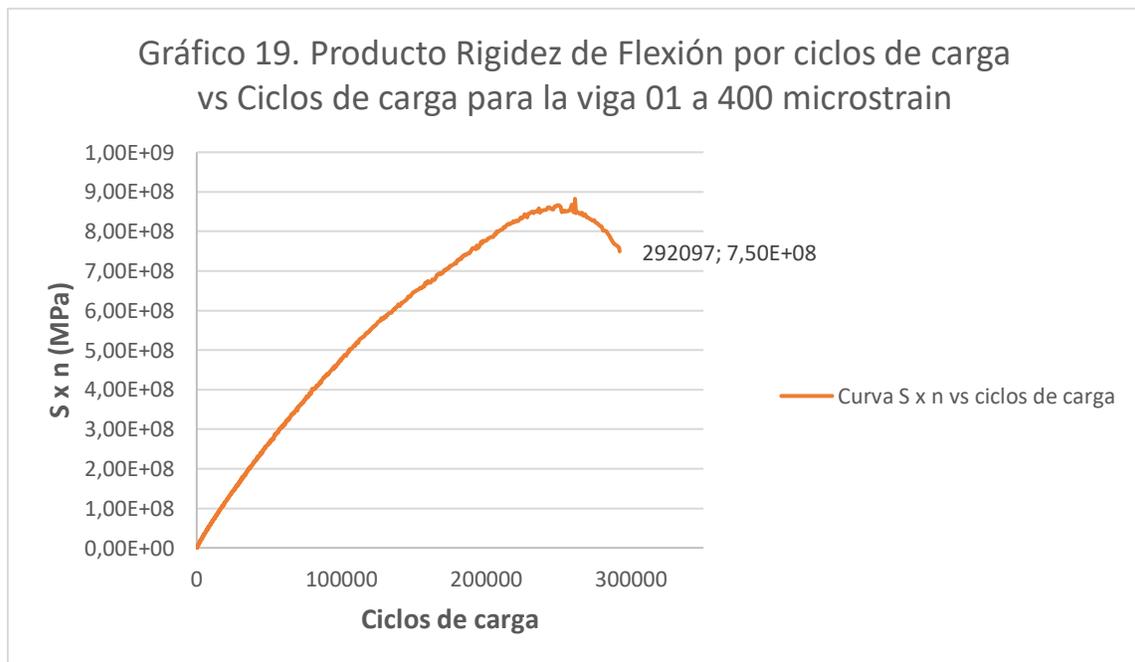
Fuente: La autora.

Gráfico 18. Rigidez de flexión vs ciclos de carga viga 01



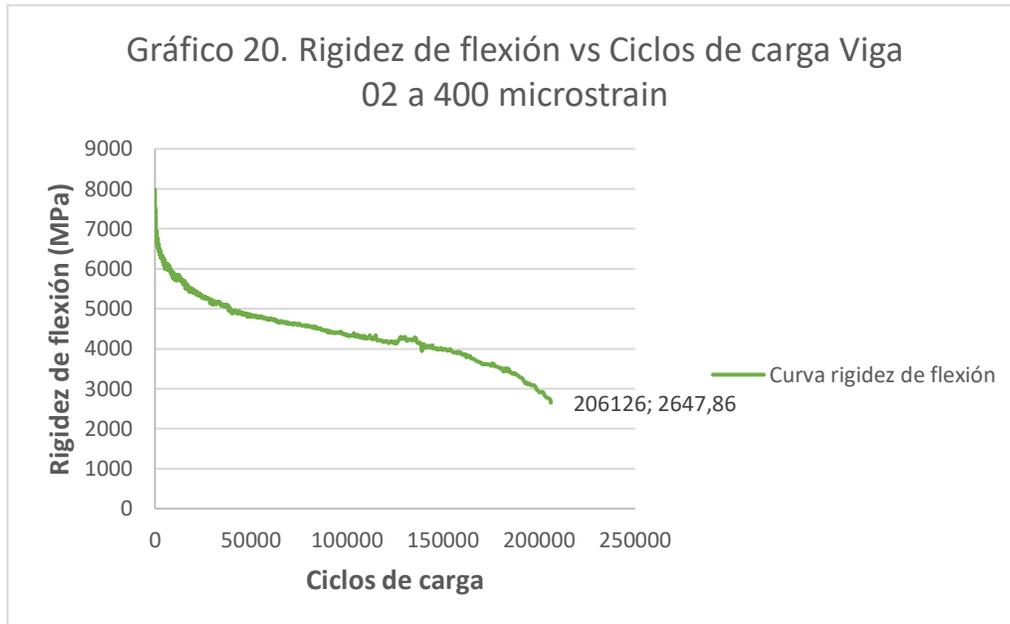
Fuente: La autora.

Gráfico 19. Producto Rigidez de Flexión S x n vs Ciclos de carga viga 01



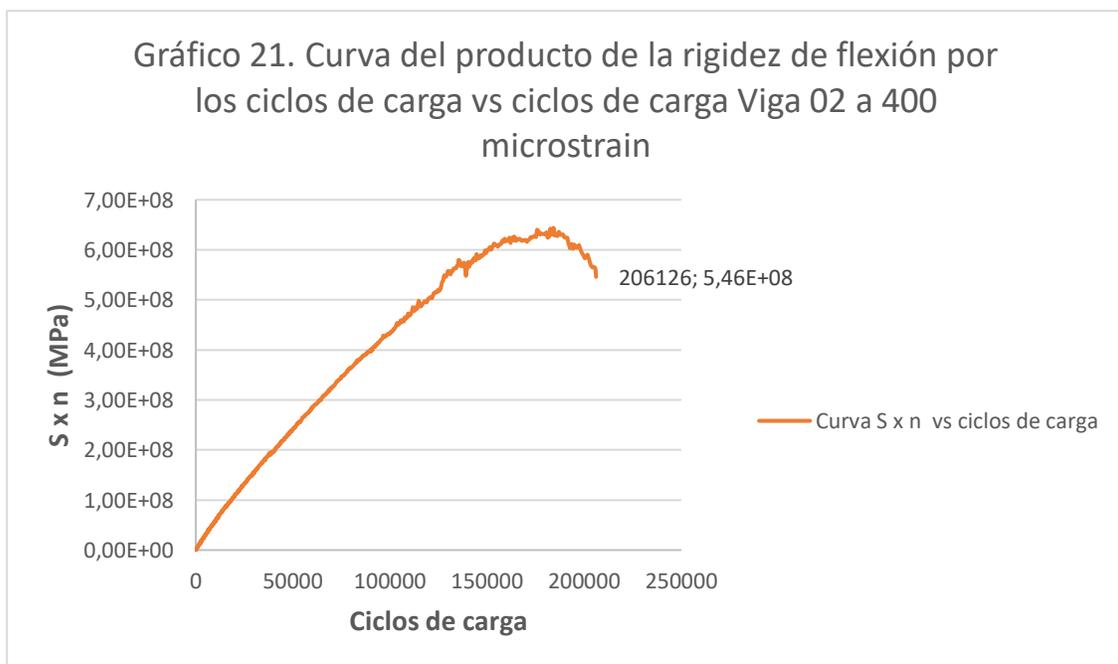
Fuente: La autora.

Gráfico 20. Rigidez de flexión vs ciclos de carga viga 02



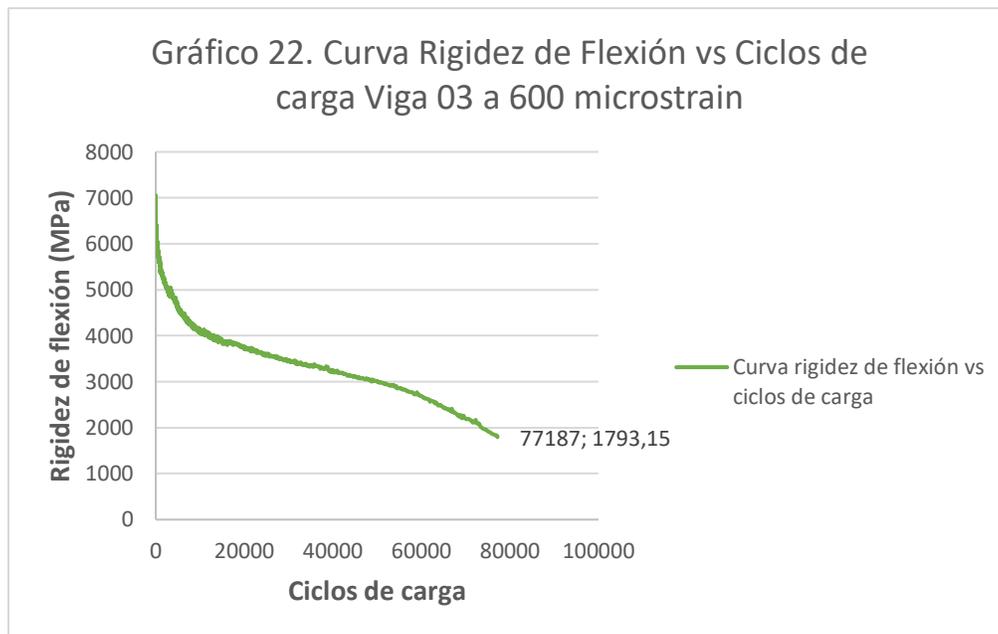
Fuente: La autora.

Gráfico 21. Producto Rigidez de Flexión $S \times n$ vs Ciclos de carga viga 02



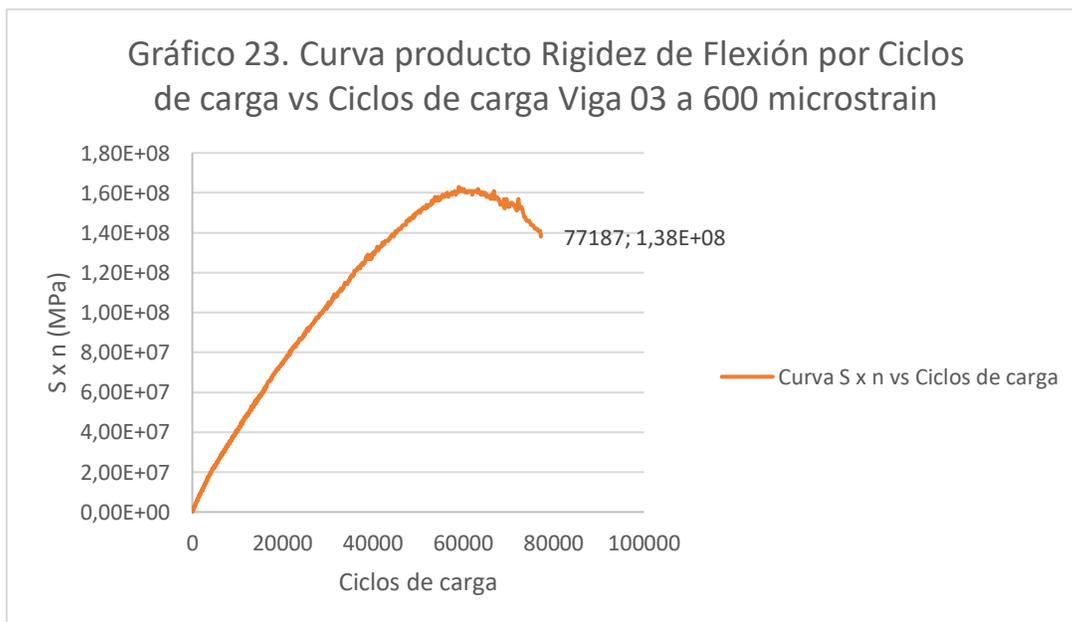
Fuente: La autora.

Gráfico 22. Rigidez de flexión vs ciclos de carga viga 03



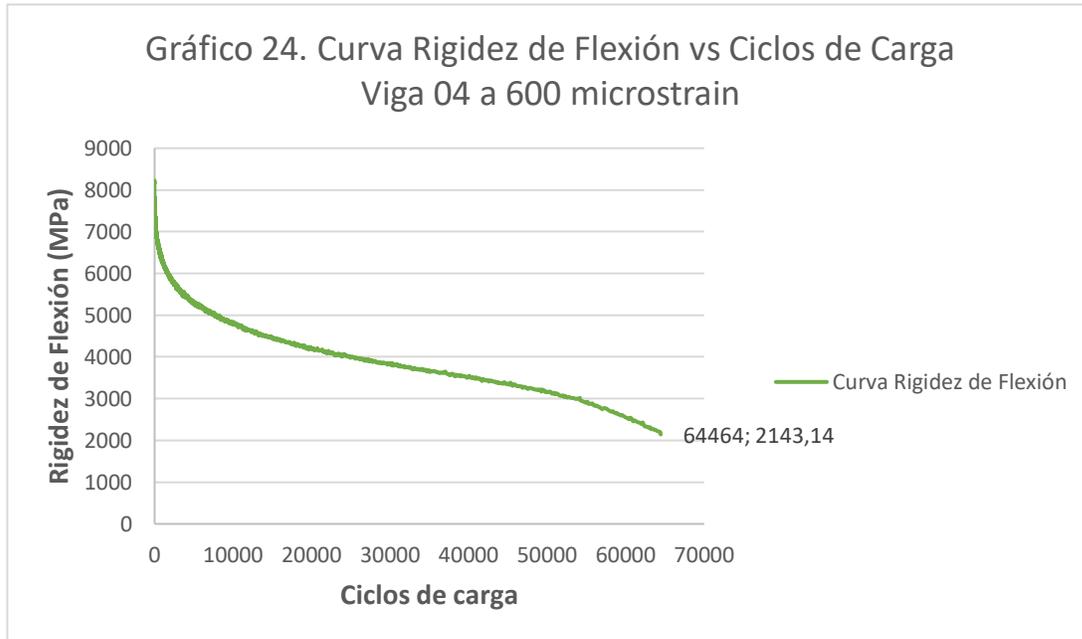
Fuente: La autora.

Gráfico 23. Producto Rigidez de Flexión $S \times n$ vs Ciclos de carga viga 03



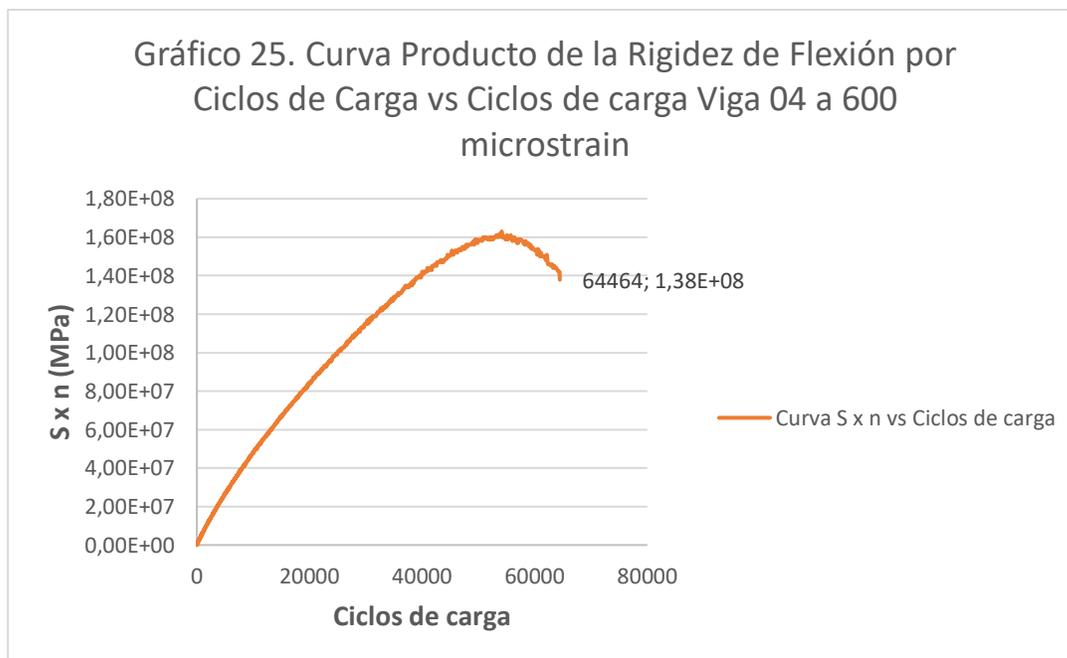
Fuente: La autora.

Gráfico 24. Rigidez de flexión vs ciclos de carga viga 04



Fuente: La autora.

Gráfico 25. Producto Rigidez de Flexión $S \times n$ vs Ciclos de carga viga 04



Fuente: La autora.

Resultados prueba deformación permanente en rueda de Hamburgo de la muestra 1491-19

Tabla 70. Verificación de vacíos de los especímenes de prueba.

No. Espécimen	W SECO (A)	W SUM (B)	W SSS (C)	Temperatura (°C)	VOLUMEN	Gbs	Absorción de agua (%)	Vacíos
1	2390.8	1360.0	2404.5	50.0	1044.5	2.289	1.3	7.0
2	2395.6	1364.4	2410.9		1046.5	2.289	1.5	7.0

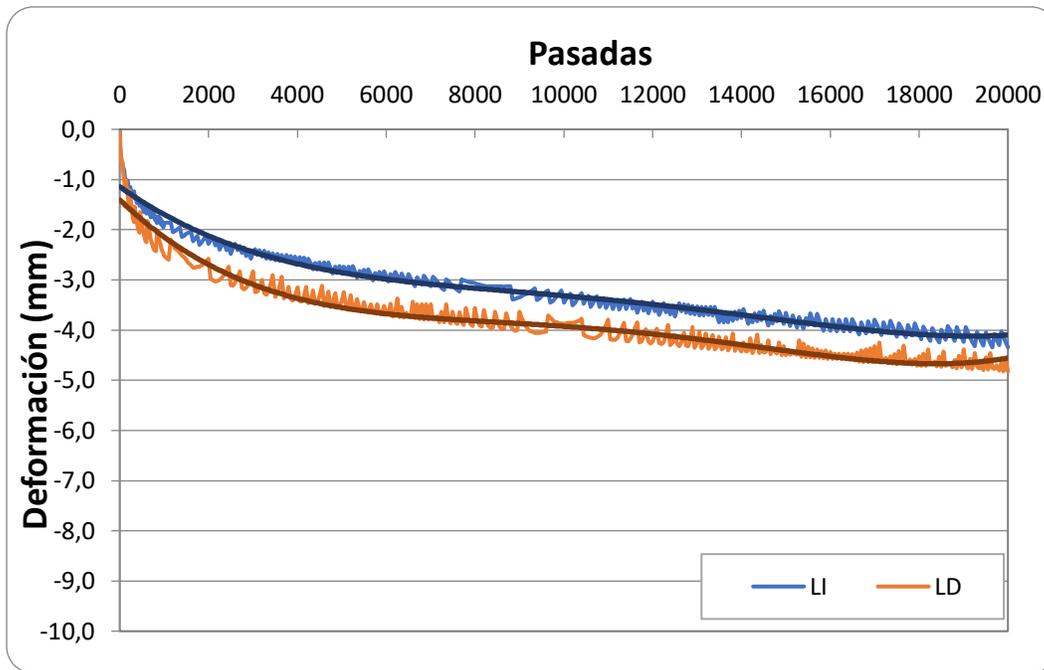
Fuente: La autora.

Tabla 71. Resultados del ensayo de rueda de Hamburgo

Nº Espécimen	Porcentaje de vacíos (%)	Temperatura (°C)	Grupo	Impresión máxima a los 20 000 ciclos (mm)	Cantidad de ciclos del punto de inflexión PSI
1	7.0	50.0	LI	-4.350	NA
2	6.5				
3	7.2		LD	-4.820	NA
4	7.0				
Promedio	6.9			-4.585	
Desvest	0.3			0.332	

Fuente: La autora.

Gráfico 26. Deformación permanente del espécimen vs el número de pasadas de la rueda por eje izquierdo y derecho.



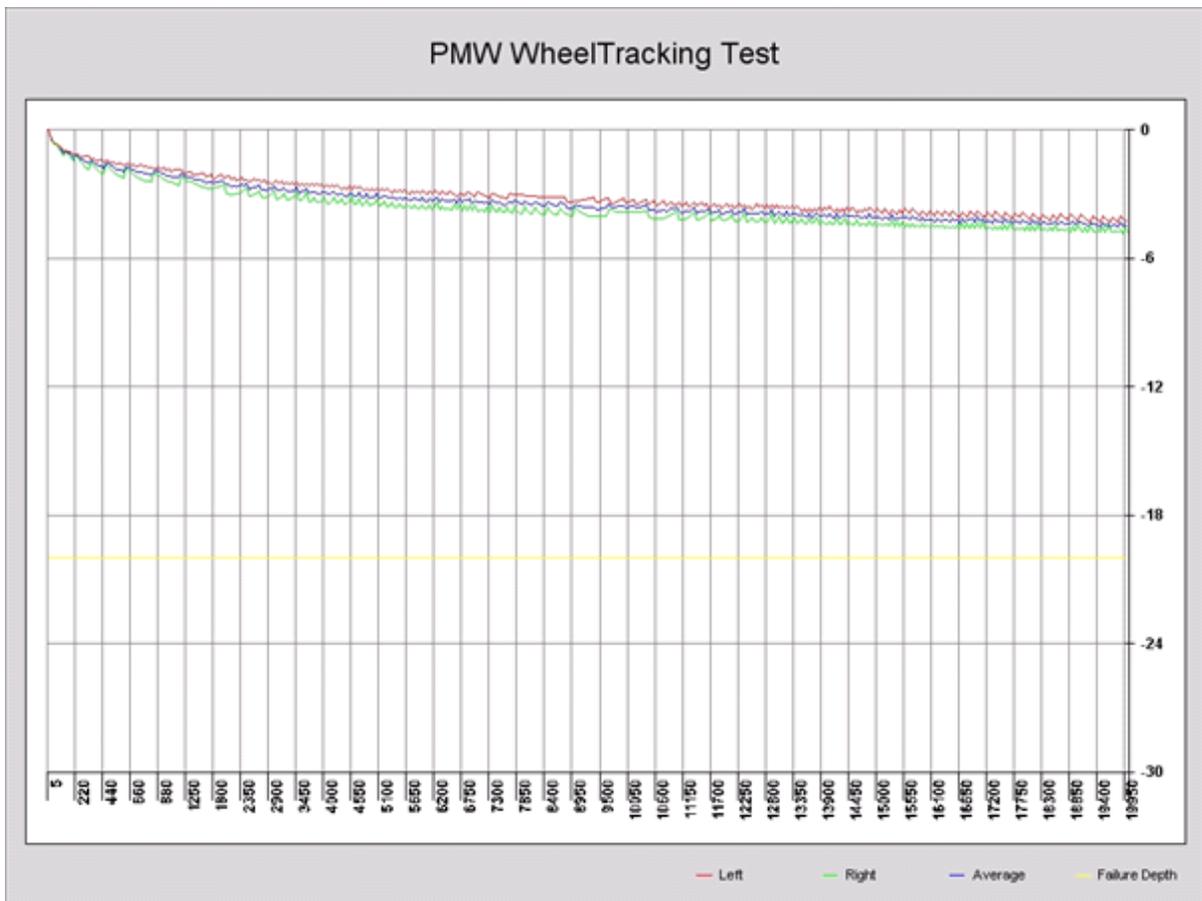
Fuente: La autora.

Tabla 72. Máxima deformación por eje a los 20000 ciclos de carga.

	Left	Right	Average
Max Impression:	-4.35 mm	-4.82 mm	-4.58 mm
	Pass #: 19650 / Pt: 9	Pass #: 19900 / Pt: 8	
Fail Depth: 20.00mm	PASS	PASS	PASS

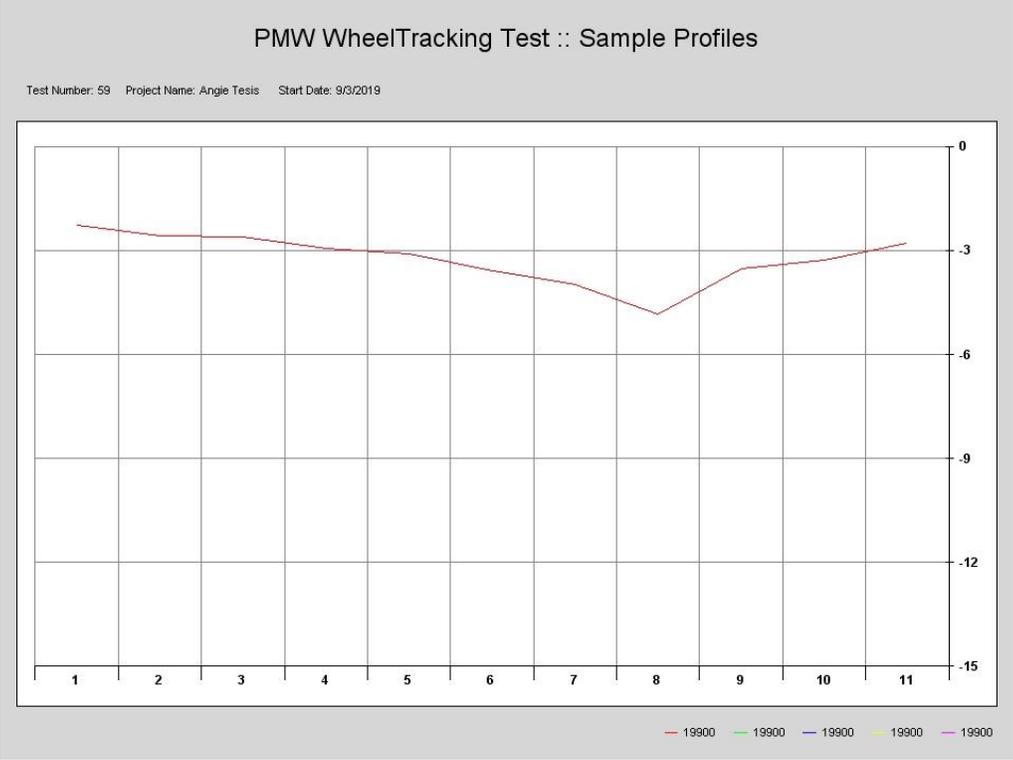
Fuente: La autora.

Gráfico 27. Deformación de ambos ejes vs el número de pasadas, promedio y deformación máxima a la falla de la prueba



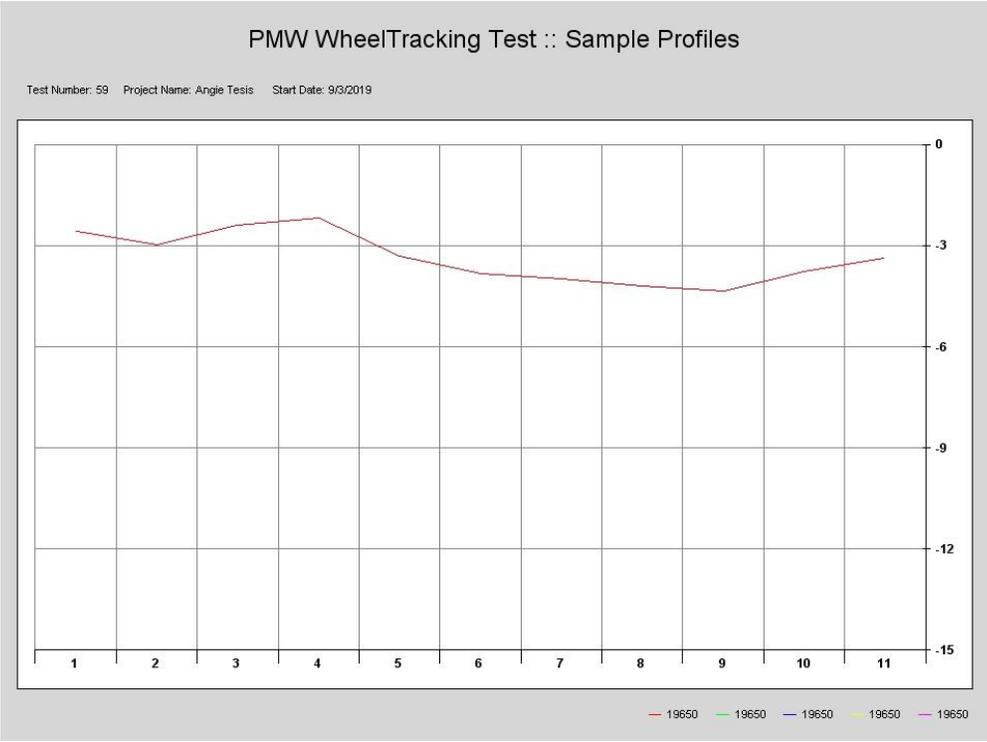
Fuente: La autora. Equipo Rueda de Hamburgo, Lanamme UCR.

Gráfico 28. Deformación ampliada eje derecho vs número de puntos de control del espécimen



Fuente: La autora. Equipo Rueda de Hamburgo, Lanamme UCR.

Gráfico 29. Deformación ampliada eje izquierdo vs número de puntos de control del espécimen



Fuente: La autora. Equipo Rueda de Hamburgo, Lanamme UCR.

**Resultados de desempeño mecánico
de la mezcla de control con 6.20 % de
asfalto óptimo**

**Prueba Resistencia retenida a la
tensión diametral**

**Tabla 73. Gravedad específica máxima teórica
mezcla de control**

No. Espécimen	Peso contenedor (g)	Peso contenedor sumergido (g)	Peso contenedor + muestra seca (g)	Peso muestra (g)	Peso contenedor + muestra sumergida (g)	Temperatur a (°C)	Gmm	Peso bandeja + muestra (g)	Peso bandeja (g)	Gmm corregido
	A	B	C	D = C - A	E		F = D/(D+B)	G	H	
1	2371.5	1495.5	4432.6	2061.1	2701.2	25.1	2.410	3074.8	1013.6	2.409
2	2371.5	1493	4433.9	2062.4	2702	25.1	2.417	3072.5	1009.1	2.414
Promedios	2371.5	1494.25	4433.25	2061.75	2701.6		2.413			2.412

Fuente: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales. UCR

**Tabla 74. Gravedad específica bruta de la
mezcla de control para 6 especímenes de
prueba.**

No. Espécimen	W SECO A	W SUM B	W SSS C	Temperatura	Gmb A / (C - B)	% VACÍOS
1	3629.3	2022.2	3642.2		2.240	7.1
2	3628.9	2028.4	3640.2		2.251	6.6
3	3629.3	2026.2	3643.6		2.244	7.0
4	3628.2	2029.8	3638.9		2.255	6.5
5	3628.4	2029.2	3641.1		2.251	6.7
6	3627.4	2035.4	3641.7		2.258	6.4

Fuente: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales. UCR

Tabla 75. Resultados resistencia retenida a la tensión diametral

No. Espécimen	Porcentaje de vacíos (%)	Tipo de acondicionamiento	Promedio Diámetro (mm)	Promedio Altura (mm)	Saturación (%)	Carga máxima (N)	Esfuerzo a tensión (kPa)	Resistencia retenida a la tensión diametral (%)
4	6.5	Seco	149.87	95.32	-	15004	669	-
5	6.7		150.37	95.00	-	15810	705	
6	6.4		150.18	95.14	-	14331	639	
Promedios	6.5	-	150.14	95.15	-	15048	671	
Desv. Est.	0.1	-	0.25	0.16	-	740	33	
1	7.1	Húmedo	150.14	94.91	76.8	11920	533	83.6
2	6.6		150.21	95.28	75.1	12578	559	
3	7.0		150.10	95.24	75.2	13221	589	
Promedios	6.9	-	150.15	95.14	75.7	12573	560	
Desv. Est.	0.2	-	0.06	0.21	0.9	651	28	

Fuente: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales. UCR

Prueba de fatiga en viga a flexión

Tabla 76. Resultados de fatiga mediante carga a flexo tracción con deformación controlada a 400 microstrain

No. Espécimen	Temperatura (°C)	Deformación unitaria a tensión (1×10^{-6} mm/mm)	Rigidez inicial a flexión (MPa)	Rigidez final a flexión al 50% (MPa)	Número de ciclos de fatiga	Rigidez final a flexión al $S \times n$ máximo (MPa)	Número de ciclos de fatiga
B1-V01	20.0	400	5485.58	2738.82	169170	4.63E+08	169170
B1-V02	20.0	400	4848.74	2415.41	202370	4.94E+08	199520
Promedio	20.0	400	5167	2577	185770	4.79E+08	184345
Desv. Est.	0.0	0	450	229	23476	2.19E+07	21461

Fuente: Zamora, M. Lanamme, Tesis UCR

Tabla 77. Resultados de fatiga mediante carga a flexo tracción con deformación controlada a 600 microstrain

No. Espécimen	Temperatura (°C)	Deformación unitaria a tensión (1×10^{-6} mm/mm)	Rigidez inicial a flexión (MPa)	Rigidez final a flexión al 50% (MPa)	Número de ciclos de fatiga	Rigidez final a flexión al S x n máximo (MPa)	Número de ciclos de fatiga
B1-V03	20.0	600	4812.66	2409.21	20570	4.96E+07	20570
B1-V04	20.0	600	4951.22	2445.71	25310	6.19E+07	25310
Promedio	20.0	600	4882	2427	22940	5.58E+07	22940
Desv. Est.	0.0	0	98	26	3352	8.70E+06	3352

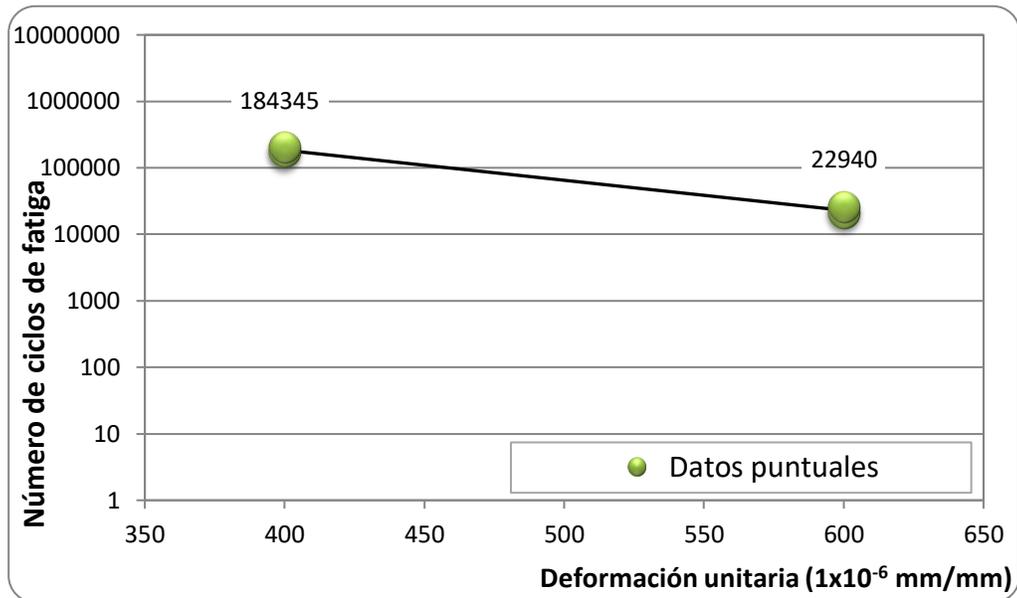
Fuente: Zamora, M. Lanamme, Tesis UCR

Tabla 78. Promedio del número de ciclos de fatiga de las vigas y cumplimiento con las especificaciones en el CR-2010.

Deformación unitaria a tensión (1×10^{-6} mm/mm)	Promedio de número de ciclos de fatiga	Especificación CR-2010		Cumplimiento para el tipo de mezcla asfáltica C ⁽¹⁾	Cumplimiento para el tipo de mezcla asfáltica D ⁽¹⁾
		Tipo C*	Tipo D*		
400	184345	≥ 450 000	≥ 300 000	NO	NO
600	22940	≥ 50 000	≥ 25 000	NO	NO

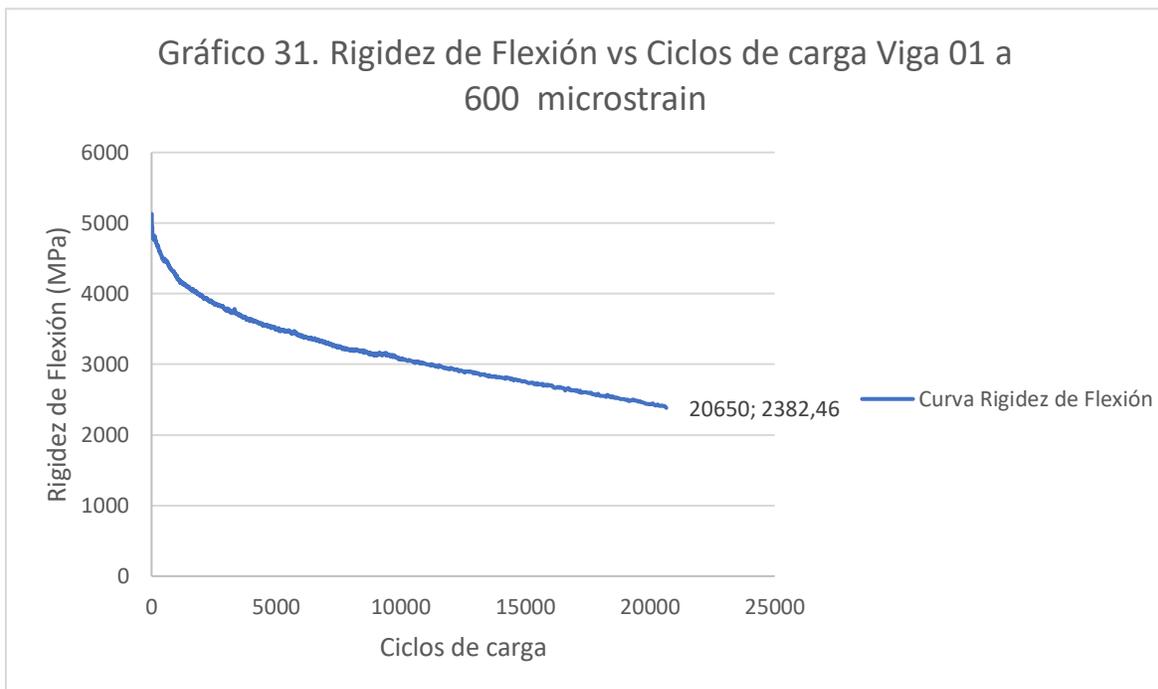
Fuente: Zamora, M. Lanamme, Tesis UCR

Gráfico 30. Comportamiento del número de ciclos de fatiga vs la deformación unitaria.



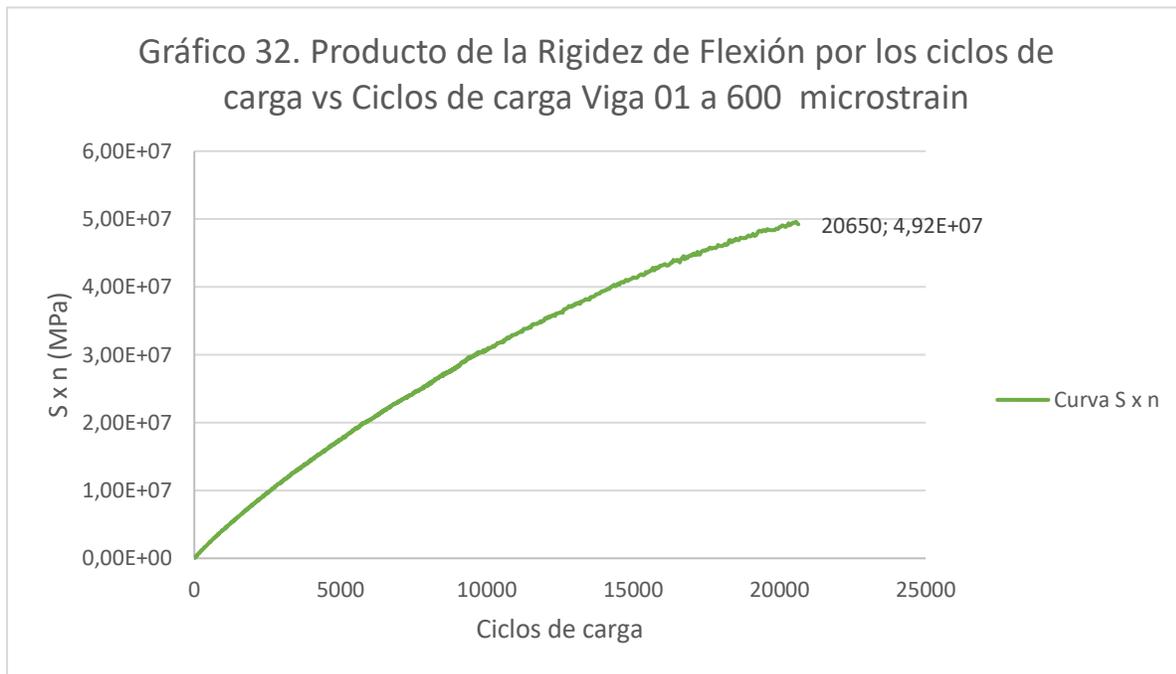
Fuente: Zamora, M. Lanamme, Tesis UCR

Gráfico 31. Rigidez de flexión vs ciclos de carga viga 01



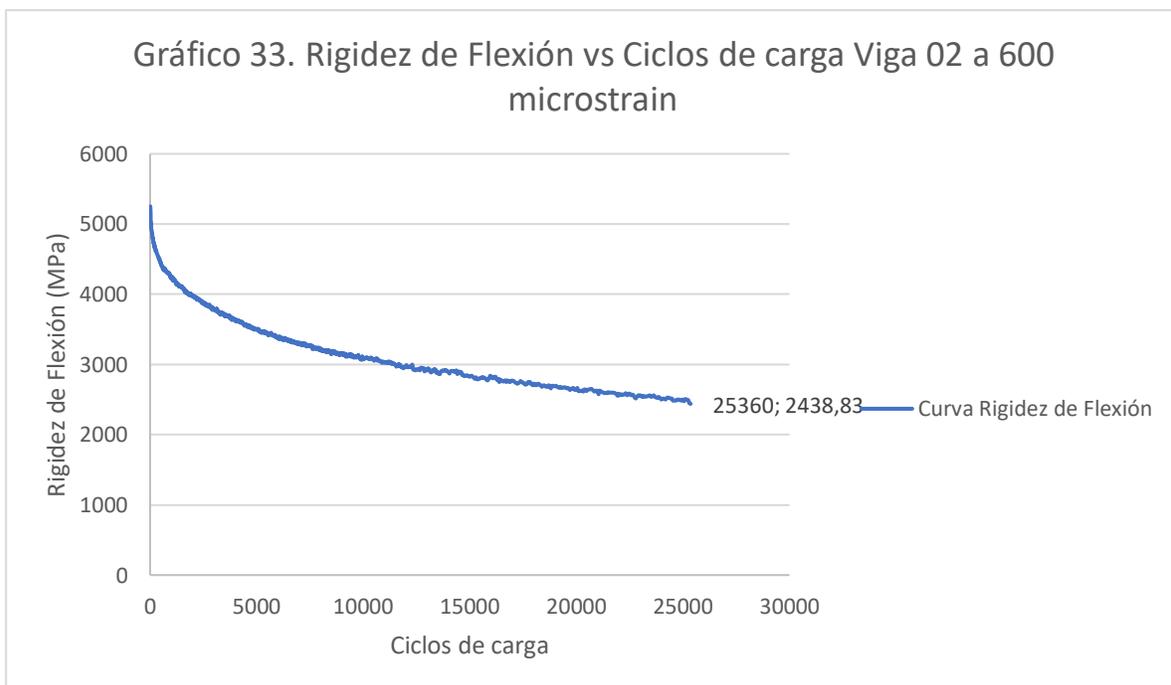
Fuente: Zamora, M. Lanamme, Tesis UCR

Gráfico 32. Producto Rigidez de Flexión vs Ciclos de carga viga 01



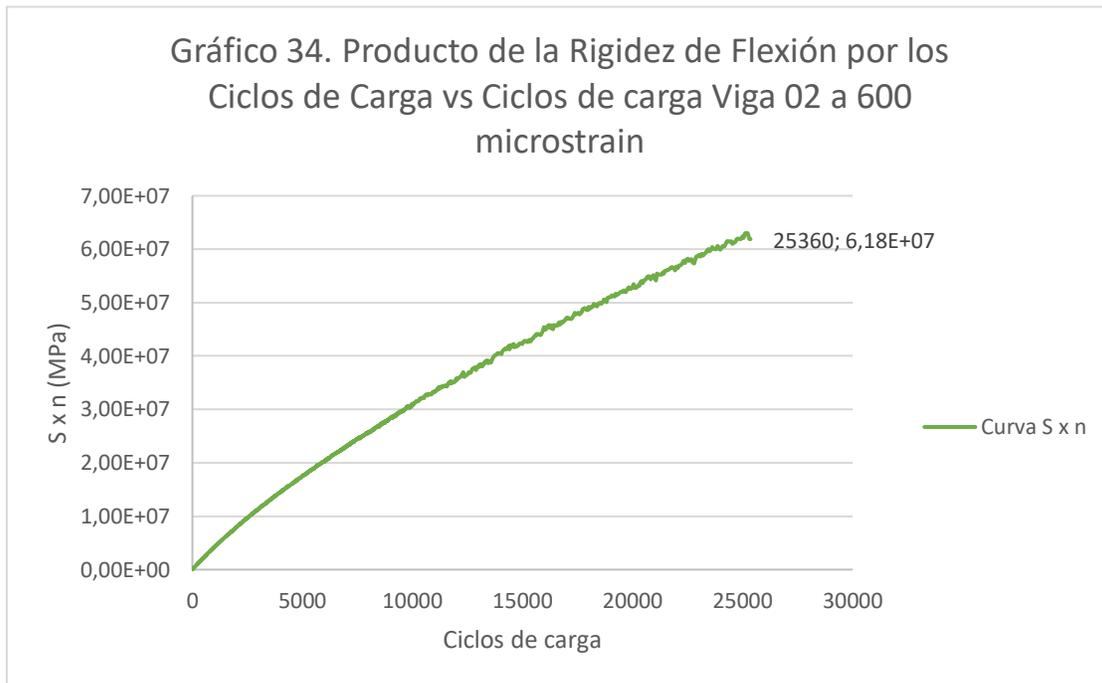
Fuente: Zamora, M. Lanamme, Tesis UCR

Gráfico 33. Rigidez de flexión vs ciclos de carga viga 02



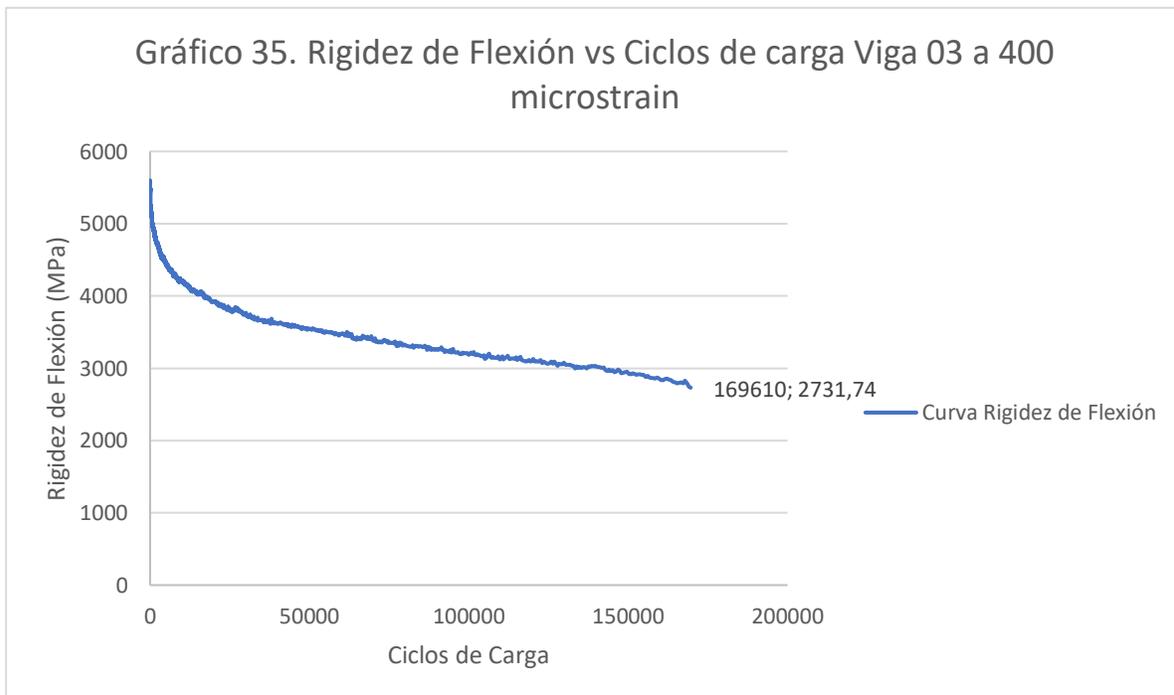
Fuente: Zamora, M. Lanamme, Tesis UCR

Gráfico 34. Producto Rigidez de Flexión $S \times n$ vs Ciclos de carga viga 02



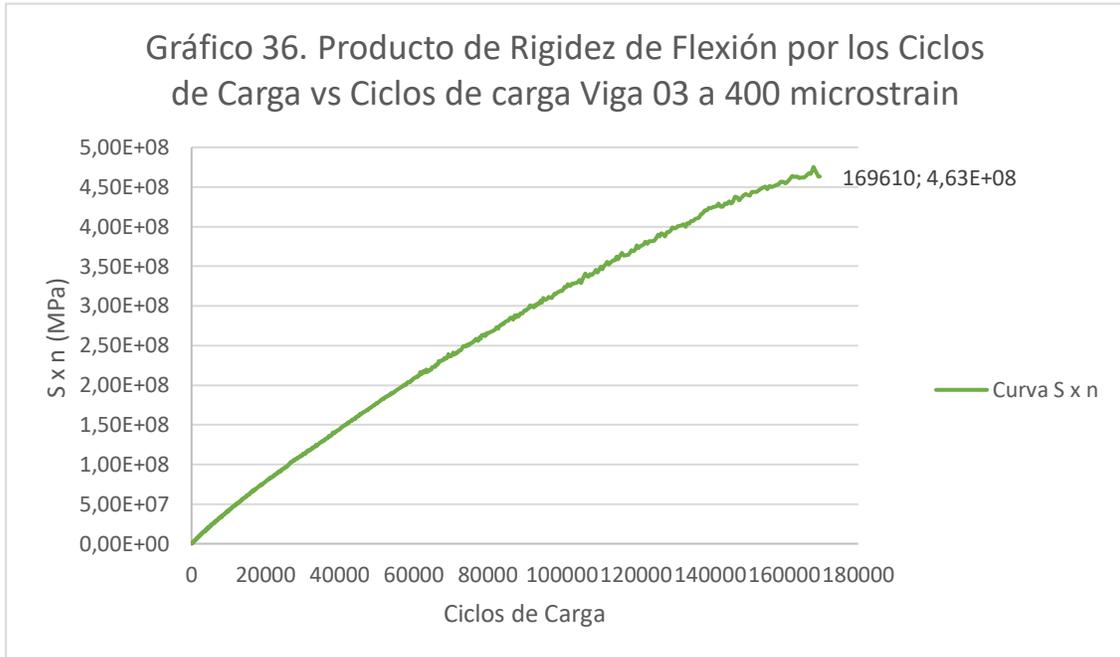
Fuente: Zamora, M. Lanamme, Tesis UCR

Gráfico 35. Rigidez de flexión vs ciclos de carga viga 03



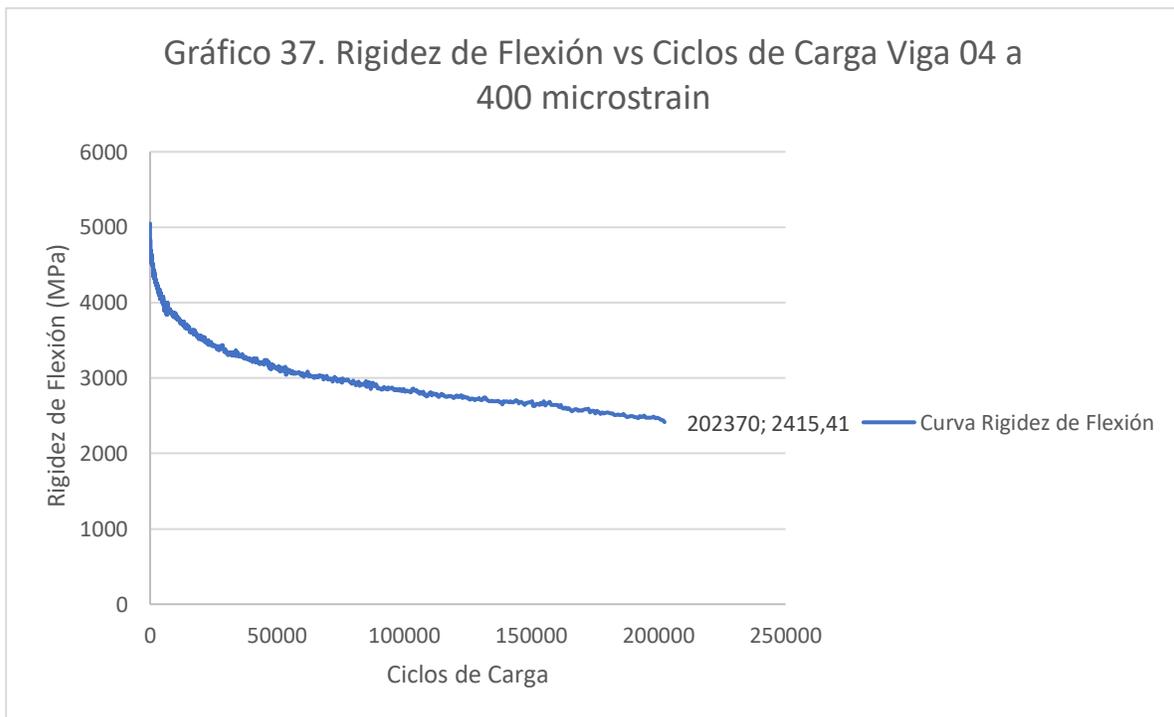
Fuente: Zamora, M. Lanamme, Tesis UCR

Gráfico 36. Producto Rigidez de Flexión S x n vs Ciclos de carga viga 03



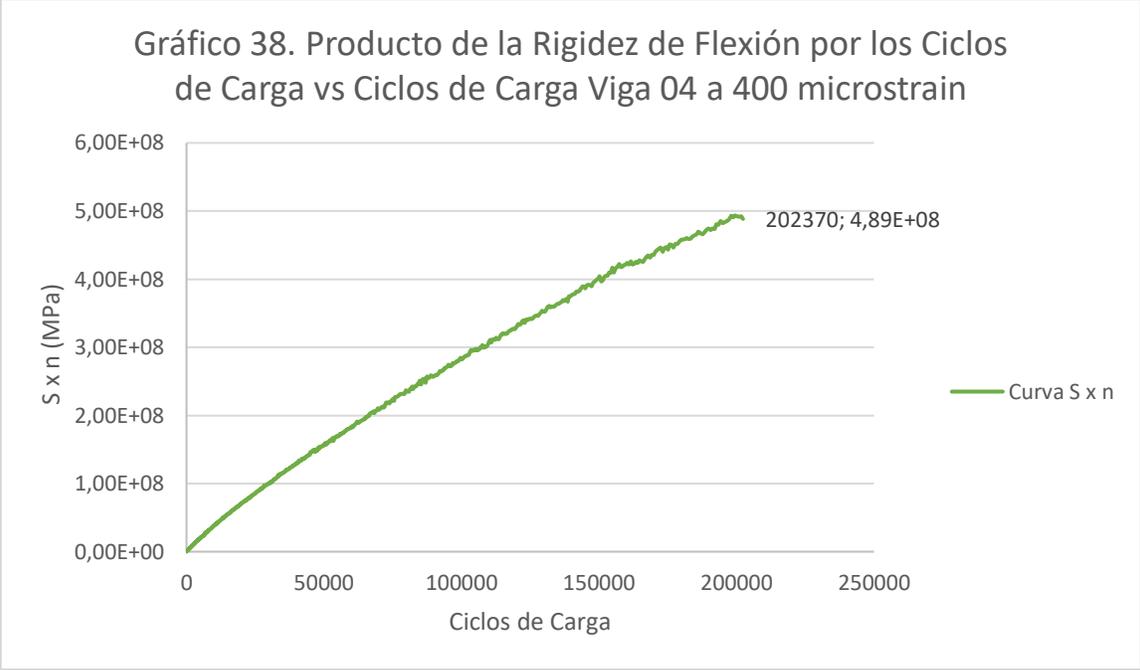
Fuente: Zamora, M. Lanamme, Tesis UCR

Gráfico 37. Rigidez de flexión vs ciclos de carga viga 04



Fuente: Zamora, M. Lanamme, Tesis UCR

Gráfico 38. Producto Rigidez de Flexión S x n vs Ciclos de carga viga 04



Fuente: Zamora, M. Lanamme, Tesis UCR

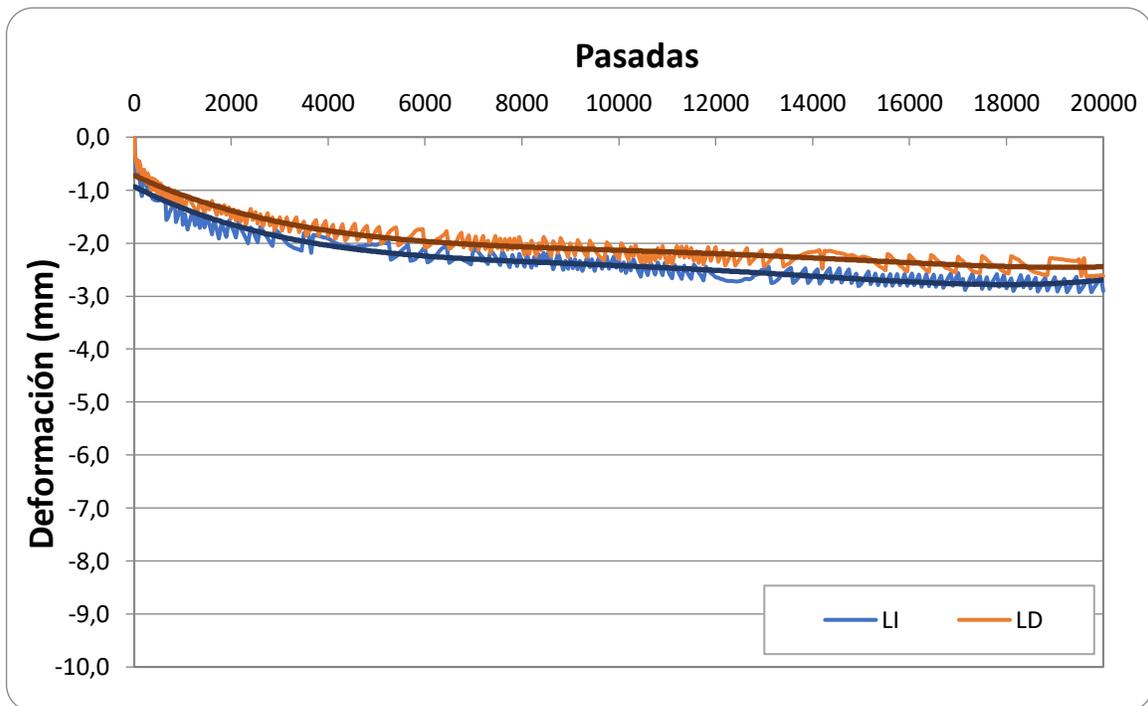
Resultados prueba deformación permanente en rueda de Hamburgo mezcla de control

Tabla 79. Resultados del ensayo de rueda de Hamburgo

Nº Espécimen	Temperatura (°C)	Grupo	Impresión máxima a los 20 000 ciclos (mm)	Cantidad de ciclos del punto de inflexión PSI
1	50.0	LI	-2.930	NA
2				
3		LD	-2.620	NA
4				
Promedio			-2.775	
Desvest			0.219	

Fuente: Lanamme, Prueba de Control UCR

Gráfico 39. Deformación permanente del espécimen vs el número de pasadas de la rueda por eje izquierdo y derecho.



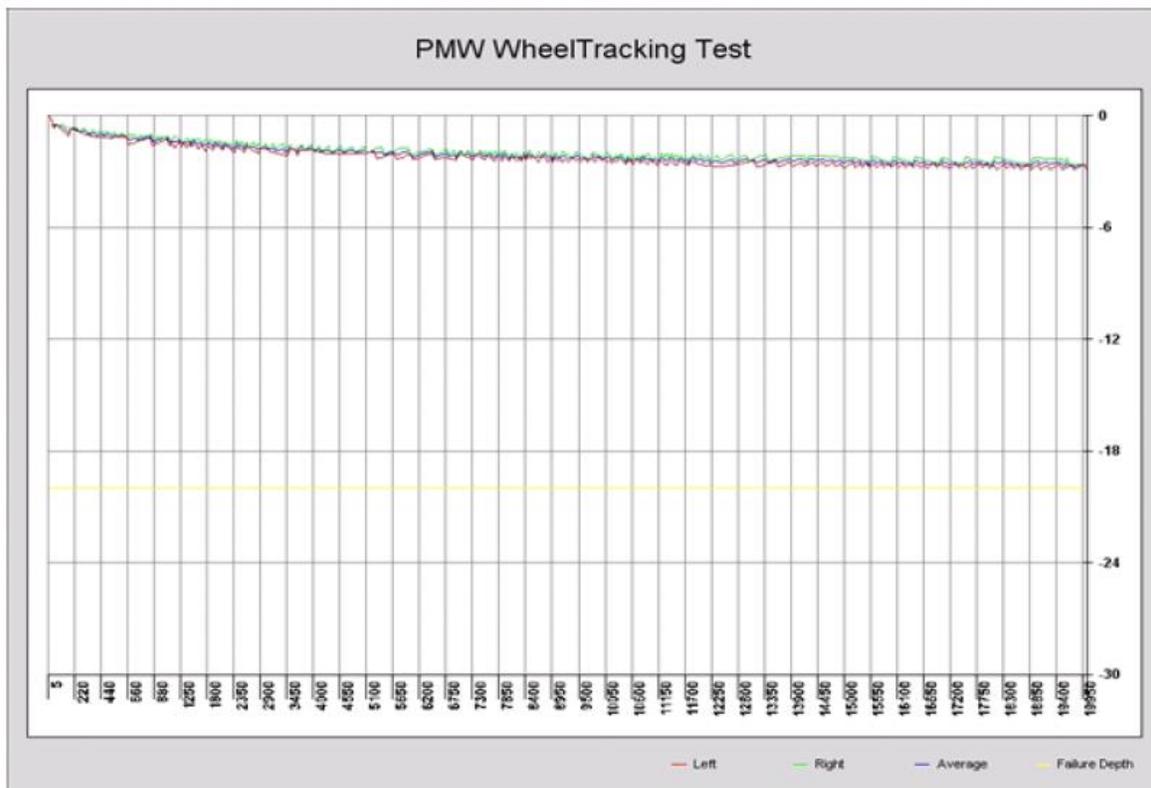
Fuente: Lanamme, Prueba de Control UCR

Tabla 80. Máxima deformación por eje a los 20000 ciclos de carga

	Left	Right	Average
Max Impression:	-2.93 mm	-2.62 mm	-2.77 mm
Pass #:	19250 / Pt: 8	19550 / Pt: 7	
Fail Depth: 20.00mm	PASS	PASS	PASS

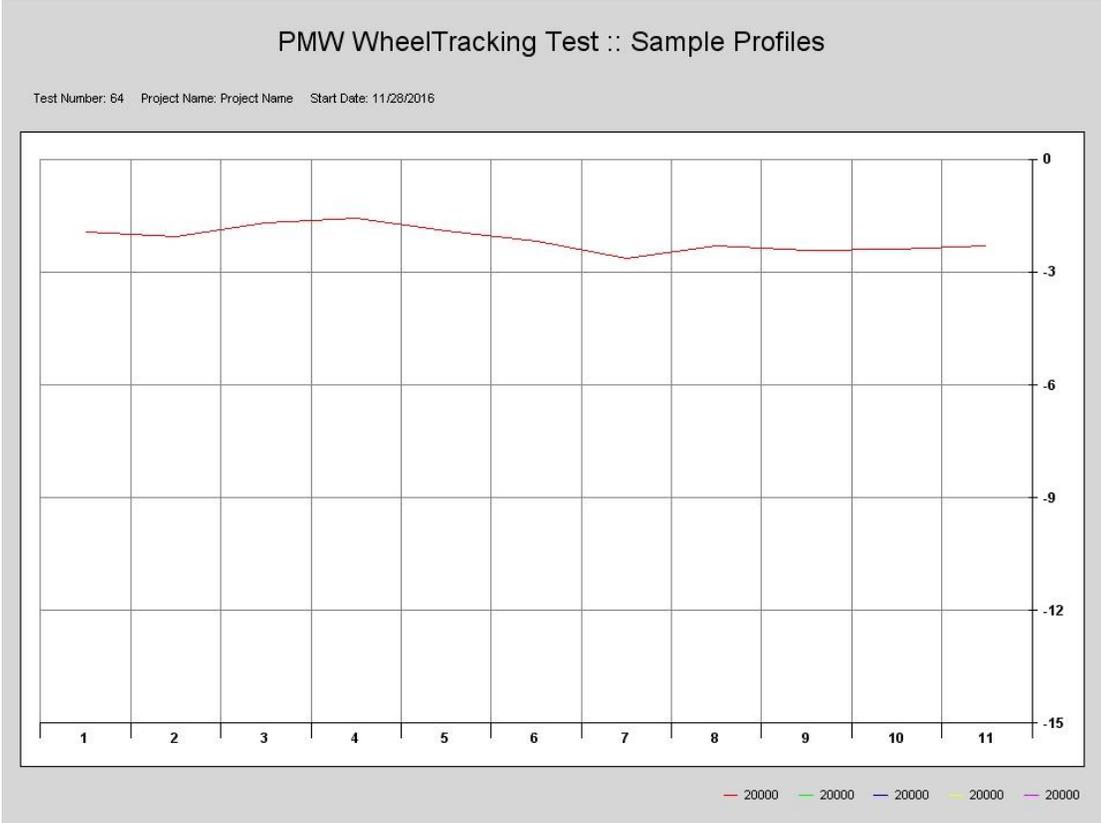
Fuente: Lanamme, Prueba de Control UCR

Gráfico 40. Deformación de ambos ejes vs el número de pasadas, promedio y deformación máxima a la falla de la prueba



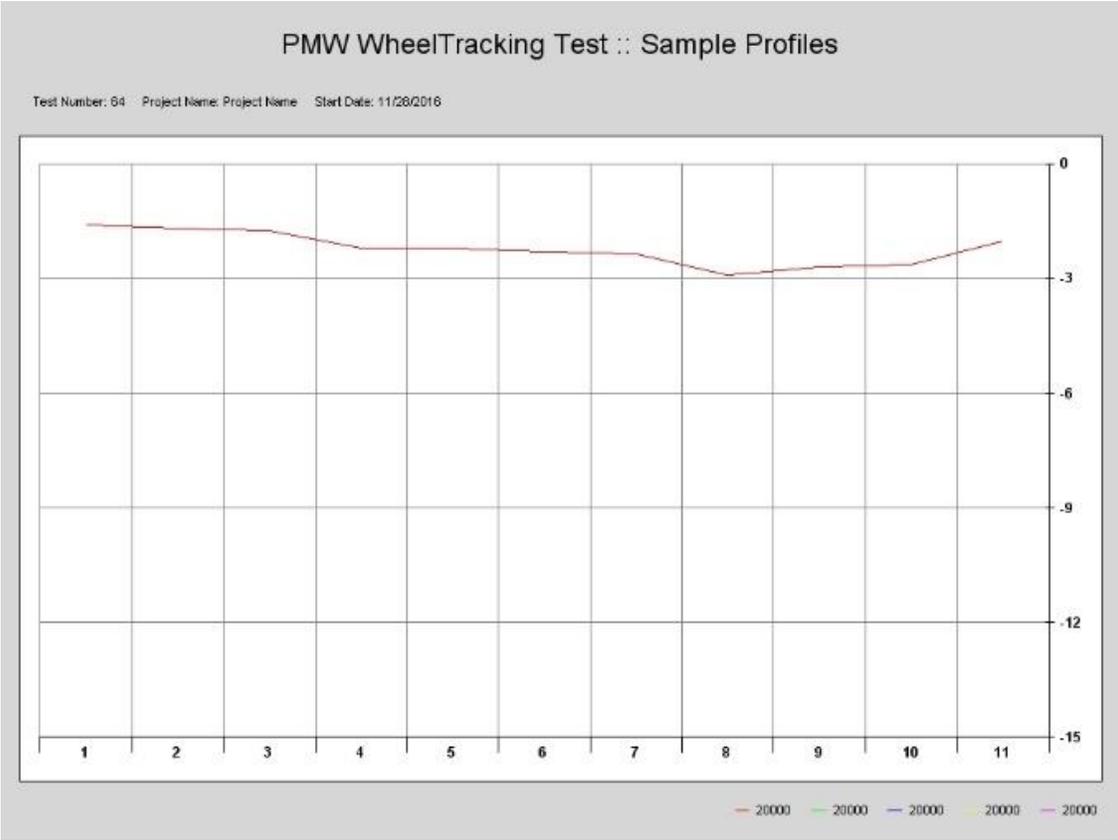
Fuente: Lanamme, Prueba de Control UCR

Gráfico 41. Deformación ampliada eje derecho vs número de puntos de control del espécimen



Fuente: Lanamme, Prueba de Control UCR

Gráfico 42. Deformación ampliada eje izquierdo vs número de puntos de control del espécimen



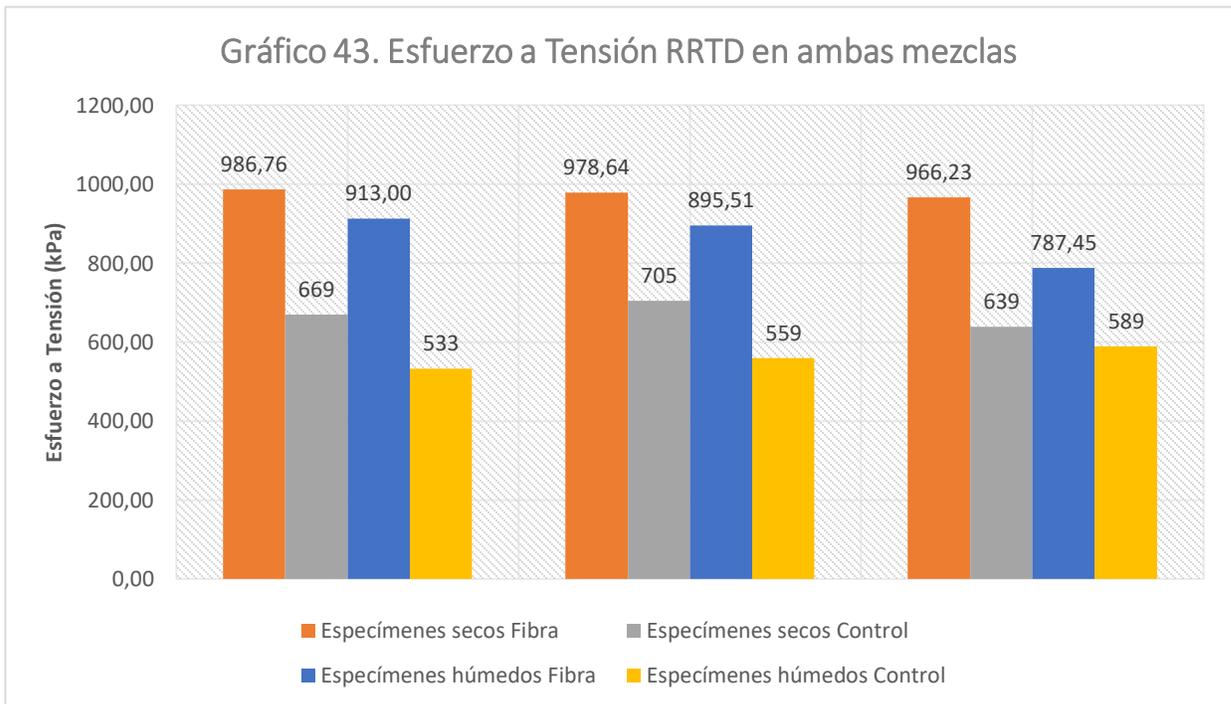
Fuente: Lanamme, Prueba de Control UCR

Resumen de resultados desempeño mecánico

A continuación, se muestran gráficos comparativos de cada una de las mezclas en las pruebas de desempeño mecánico, no obstante, debe aclararse que se realiza solamente para efectos de observar el resumen de los resultados, ya que, como se explicará más adelante, la comparación entre ambas mezclas es poco certera.

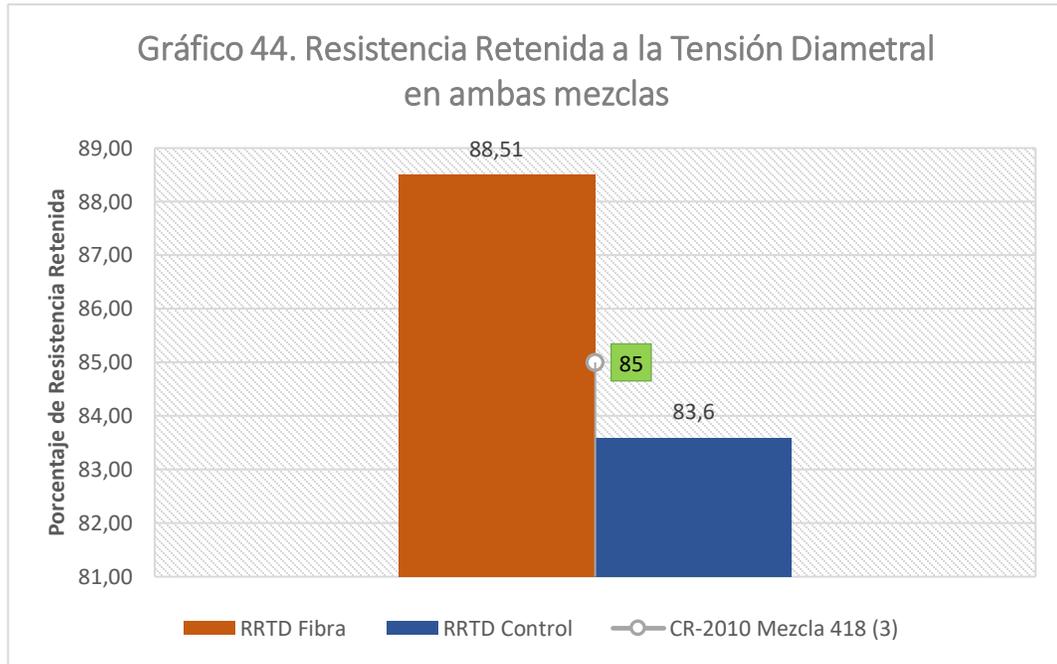
Prueba resistencia retenida a la tensión diametral

Gráfico 43. Esfuerzo a tensión RRTD para cada mezcla



Fuente: La autora.

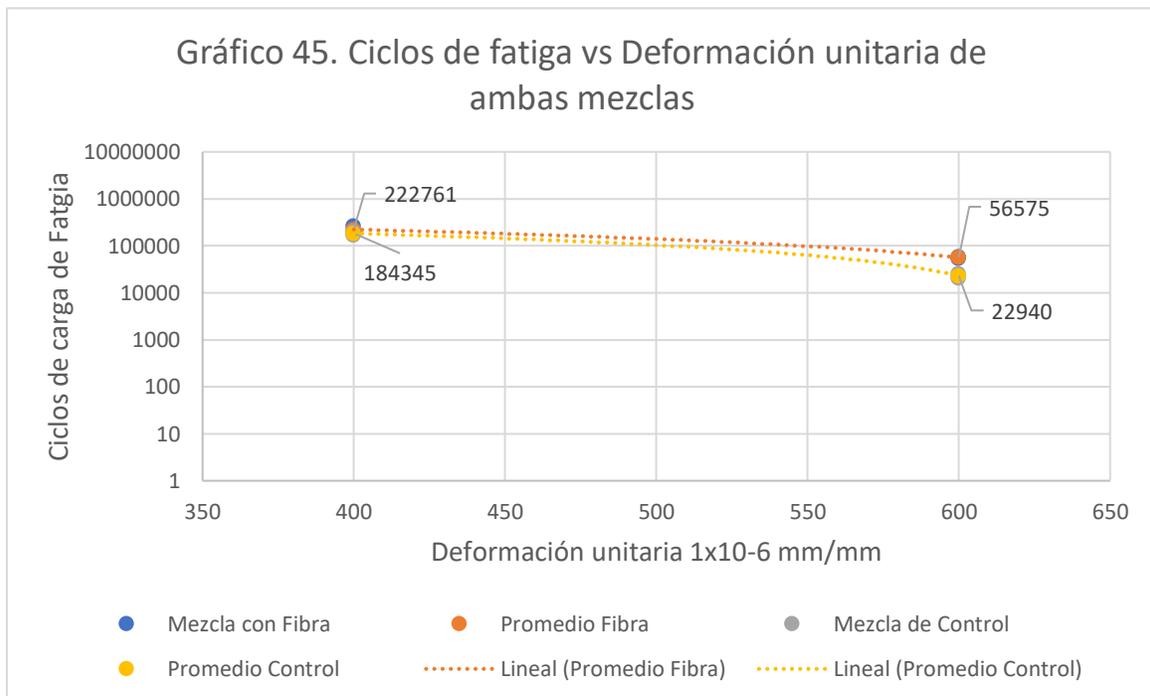
Gráfico 44. Comparación de la RRTD de cada mezcla vs la especificación CR-2010.



Fuente: La autora.

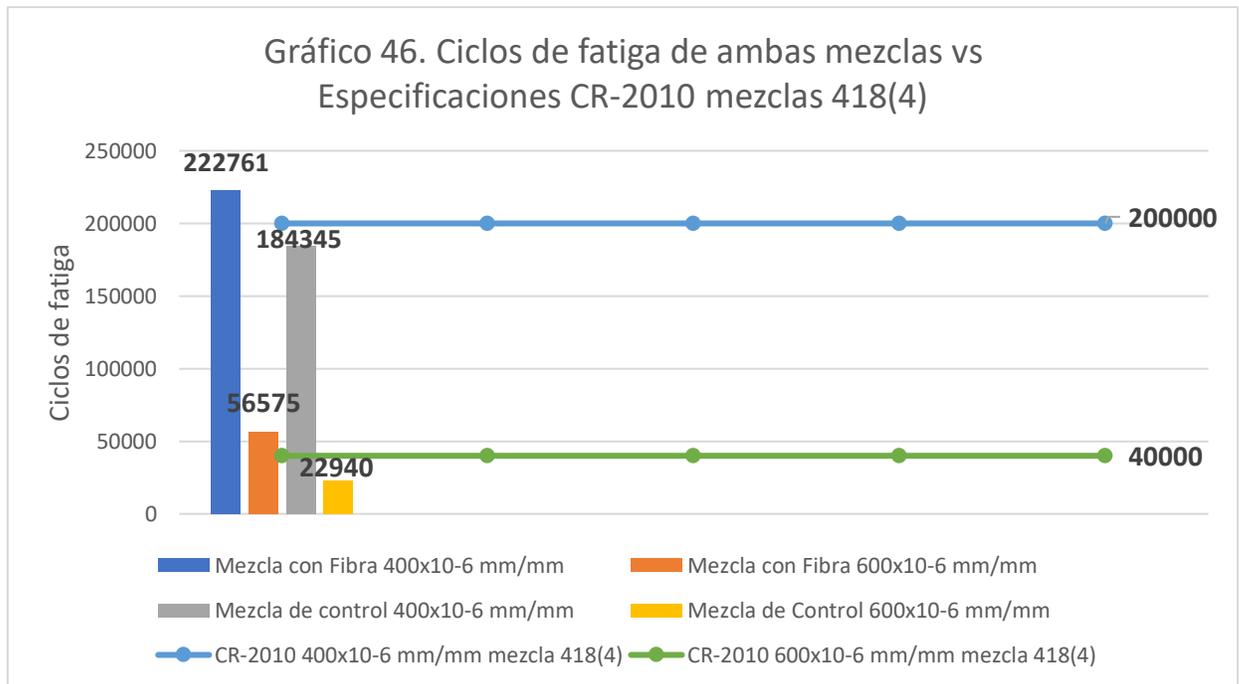
Prueba de fatiga en viga a flexión

Gráfico 45. Ciclos de fatiga de cada mezcla vs la deformación unitaria



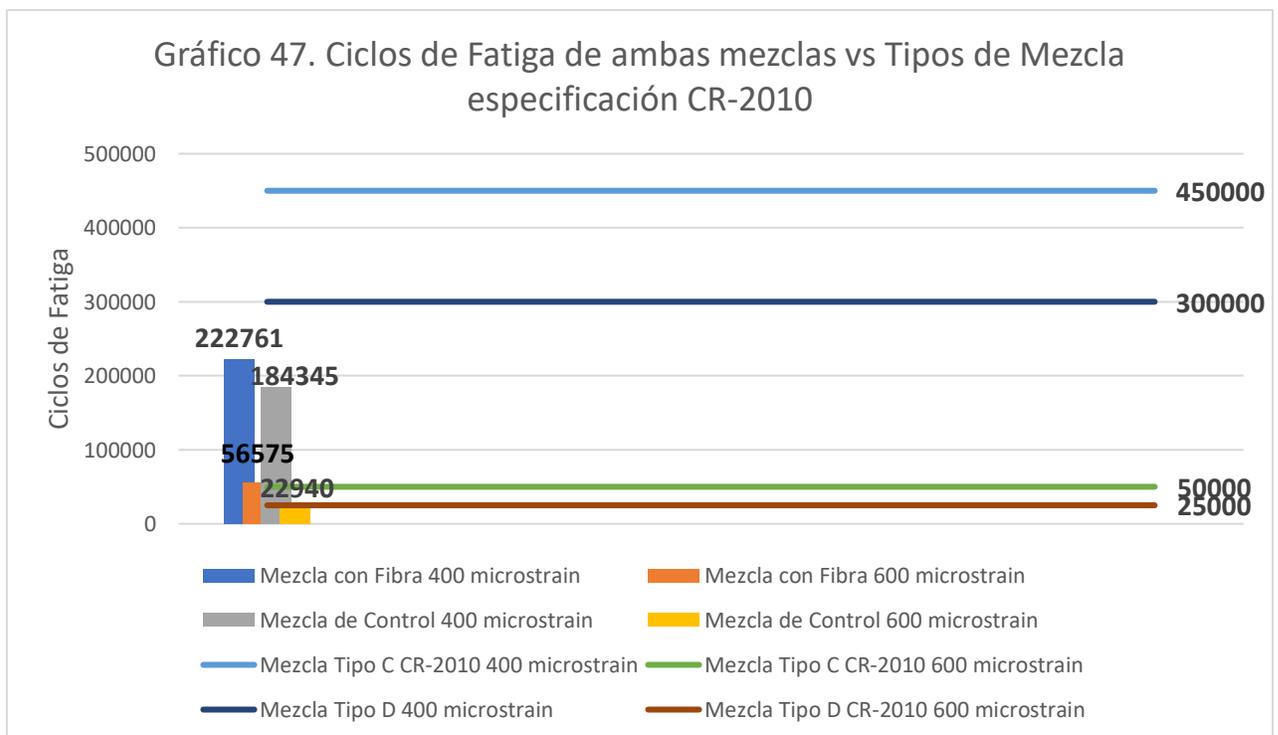
Fuente: La autora.

Gráfico 46. Ciclos de fatiga de cada mezcla vs las especificaciones del CR-2010 para mezclas 418 (4).



Fuente: La autora.

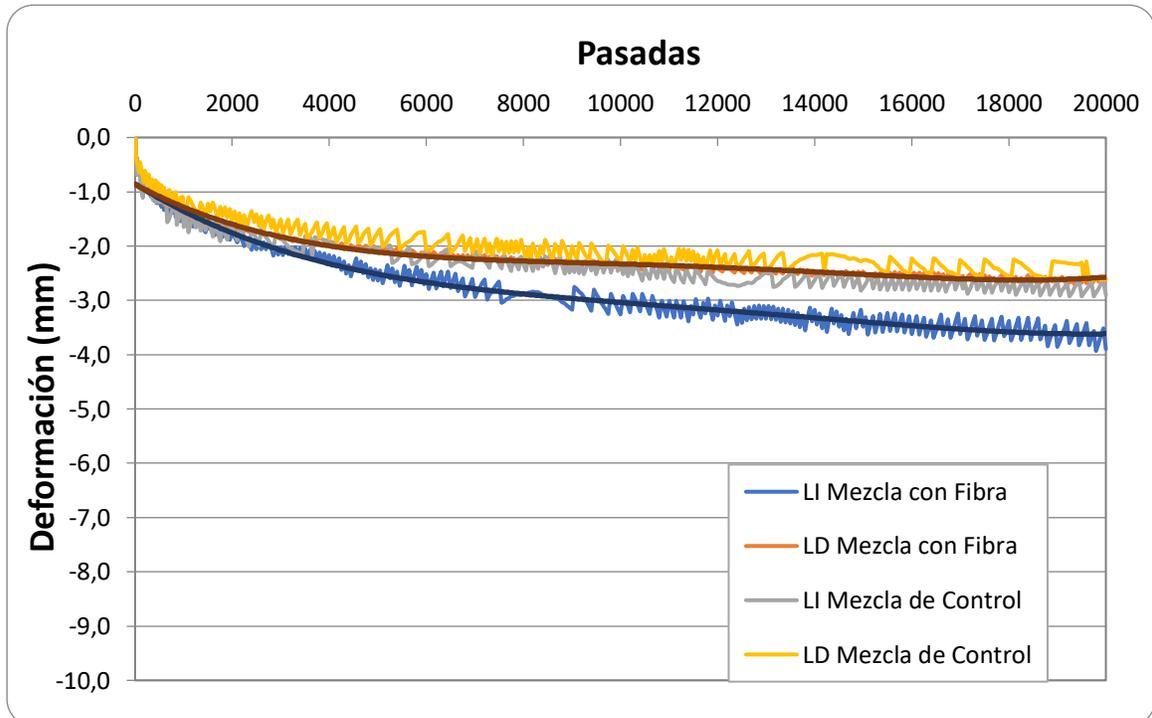
Gráfico 47. Ciclos de fatiga de cada mezcla vs Tipos de Mezclas CR-2010.



Fuente: La autora.

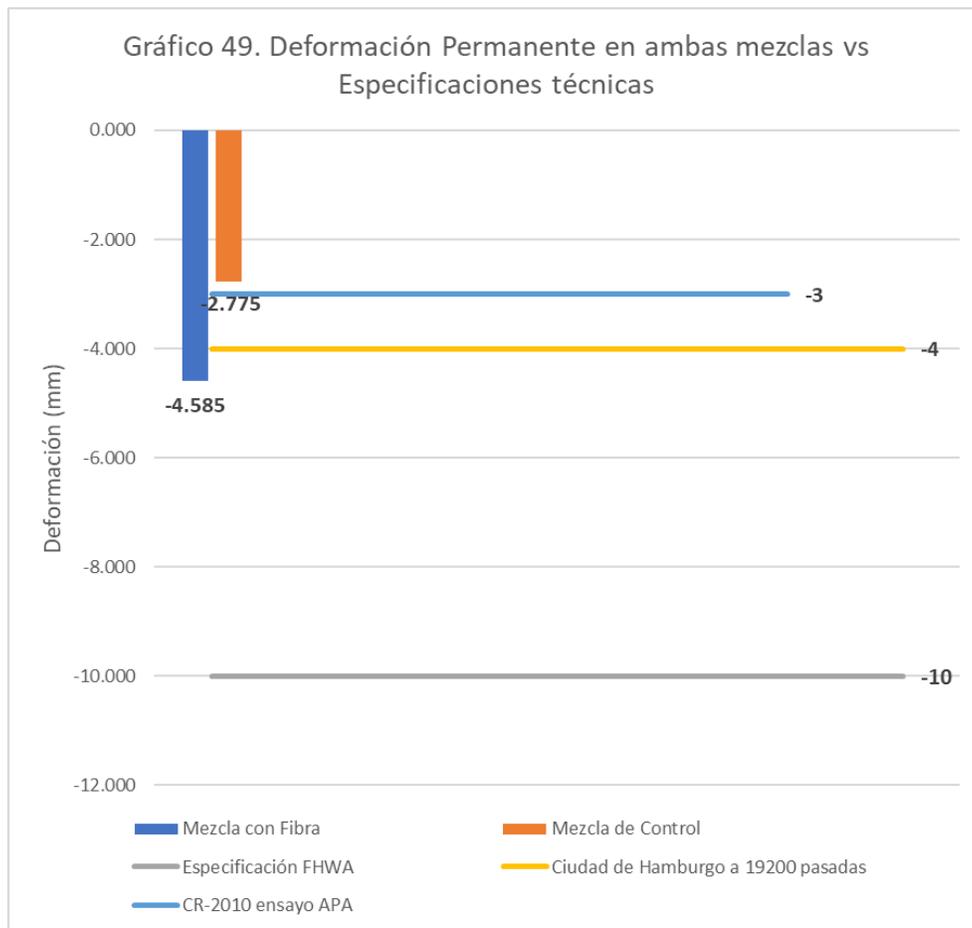
Prueba deformación permanente en rueda de Hamburgo

Gráfico 48. Deformación Permanente vs Número de Pasadas de cada eje por cada mezcla



Fuente: La autora.

Gráfico 49. Deformación permanente de cada mezcla vs Especificaciones nacionales e internacionales



Fuente: La autora.

Análisis de resultados

Caracterización de agregados y ligante asfáltico

Fuente Río Claro

El agregado proveniente de la fuente de Río Claro presenta 4 tipos de apilamientos: Polvo de Piedra, Cuartilla, Quintilla y Grueso; como se puede observar, la mezcla asfáltica realizada con esta fuente presenta propiedades de 4 agregados combinados, lo que resulta en un mejor desempeño de la mezcla. Es por esta razón que la metodología Superpave requiere de un mínimo de 3 apilamientos para el diseño.

El agregado fino presenta una granulometría densa con un tamaño máximo nominal de partícula correspondiente a 4.75 mm, el agregado intermedio A (Cuartilla) presenta un T.M.N de 12.5 mm con una granulometría más uniforme (ver gráfico 4), el agregado intermedio B (quintilla) tiene un T.M.N de 9.50 mm obteniendo, de igual forma, una granulometría uniforme. Además, se observa claramente que casi la totalidad del agregado queda retenido en el tamiz #4.

Por último, se tiene el agregado grueso, (gráfico 6), en este caso el agregado tiene un T.M.N de 19 mm, teniendo claramente la totalidad

del agregado retenido en la malla 9.50 mm. Como se puede observar en el gráfico mostrado en el apéndice 5 la curva de la combinación granulométrica de dichos agregados cumple con los puntos de control para un tamaño máximo nominal de mezcla de 12.5 mm. Los anteriores puntos se muestran en el cuadro de requerimientos de Superpave para la granulometría presente en el marco teórico.

Dentro de las características propias de cada agregado, se encuentra la gravedad específica y el porcentaje de absorción, los cuales son parámetros que indican una referencia sobre la densidad de la mezcla, la porosidad de esta y, por supuesto, el cálculo del volumen de dicho agregado en el total de la mezcla. Como se observa en la tabla 7, la gravedad específica seca al horno (Gbs) son valores aceptables para cada agregado, no obstante, se observa que el valor de Gbs para el agregado fino es relativamente bajo y presenta un porcentaje de absorción muy alto (3.3 %), esto indica una alta porosidad del agregado en comparación con las demás muestras.

El ensayo de caras fracturadas proporciona un indicador de la fricción entre las partículas de agregado brindando una mayor resistencia al corte de la mezcla, en este caso la totalidad de las muestras cumplen con el requerimiento especificado en el CR-2010 para un tránsito entre 10 a 30 ESALs, mostrado en el anexo 2, dado que el 100 % de la masa ensayada de partículas contiene 2 caras fracturadas. Asimismo, el agregado fino cumple adecuadamente con el porcentaje de vacíos mínimo requerido en el CR-2010 tabla 703-15 anexo 3, el cual indica un mínimo de 40 % de vacíos, este parámetro es útil para determinar la textura del agregado fino y su trabajabilidad en la mezcla.

Por su parte, las muestras de agregado cumplen debidamente con la especificación para partículas friables y arcillosas indicado en el CR-2010 (sección 418.04.02.02), la cual corresponde a un 2 % y, como se observa en la tabla 10, el mayor porcentaje de partículas friables y arcillosas lo presenta la muestra 2137-16 agregado fino con un 1 %.

En la tabla 11, se tienen los resultados de la prueba de partículas planas, partículas elongadas y partículas planas y elongadas. Este ensayo permite determinar tanto fricción del agregado en la mezcla como adherencia entre este y el ligante, dependiendo de la forma y textura que presente, en este caso la especificación del CR-2010 (sección 418.04.02.02 inciso f) indica que debe ser menor a 10 % para aquellas mezclas con un diseño por ejes equivalente mayor a 0.3, el cual corresponde al caso del presente proyecto que considera un diseño entre 10 a 30 ESALs; en este caso se tiene que el porcentaje mayor corresponde a 1.67 % de la muestra 2140-16 agregado grueso.

Fuente Guápiles

El agregado proveniente de la fuente de Guápiles está compuesto por 3 apilamientos: agregado fino con T.M.N de 9.5 mm, agregado intermedio quintilla (T.M.N de 12.7 mm) y agregado grueso cuartilla (T.M.N de 19 mm). Lo anterior se combina en una curva granulométrica de prueba que cumple debidamente los puntos de control requeridos en el diseño SUPERPAVE con T.M.N de 12.5 mm.

La densidad, gravedad específica y porcentajes de absorción son valores adecuados para el tipo de mezcla asfáltica requerida, ya que, como se observa, los valores de gravedad específica de los 3 apilamientos son más altos que los valores de la fuente proveniente de Río Claro, lo que indica un agregado con mayor densidad, no obstante, el agregado intermedio y el agregado grueso presentan mayores porcentajes de absorción en comparación con la fuente de Río Claro.

En relación con el porcentaje de caras fracturadas (tablas 15-16) para los agregados grueso e intermedio, se observa que ambos cumplen debidamente con el requerimiento en el CR-2010 tabla 418-3, el cual especifica que para ejes equivalente iguales o menores a 30 millones se requiere un 90 % de porcentaje por peso con dos o más caras fracturadas, en este caso los agregados presentan 100 % de porcentaje por peso con dos o más caras fracturadas.

El agregado grueso e intermedio no presentan porcentajes de partículas planas, partículas elongadas y partículas planas y elongadas mayor a 10 %; máximo 0.49 % de partículas planas para el agregado intermedio, de manera tal que cumple la especificación del CR-2010, lo cual permite concluir que es un agregado adecuado para la mezcla asfáltica.

El porcentaje de partículas friables y arcillosas en el agregado indica un valor máximo de 0.52 % para la muestra 1574-15 agregado de cuartilla, en este caso el valor es menor a 2 % como dicta la especificación en el inciso g sección 418 CR-2010.

Asimismo, el contenido de vacíos en el agregado fino corresponde a un 40.7 %, en este caso, el valor está en el límite mínimo de cumplimiento según la tabla 703-15 del CR-2010 ya que este debe ser como mínimo 40 %.

Ligante asfáltico

Para el ligante asfáltico, se tiene una serie de pruebas que permiten la aceptación del bitumen para la mezcla, en este caso, según se observa en la tabla 22, se debe cumplir con algunas pruebas que determinan la caracterización del ligante según las tablas 702-1, 702-2 y 702-3 para clasificación por viscosidad y grado por desempeño.

Según la misma referencia (tabla 22), la densidad a 25°C y la gravedad específica del ligante tienen un rango de valores adecuado, de acuerdo con lo establecido para bitúmenes, el cual está entre 1.02 g/cm³ y 1.03 g/cm³, la penetración del bitumen a 25°C dicta un valor de 51 1/10 mm, esto cumple adecuadamente la norma en el CR-2010 que permite un valor mínimo de 30 1/10mm. Este ensayo es importante debido a que mide la consistencia del ligante a temperaturas inferiores a 40°C (asfalto en estado sólido).

Se observa, además, que el punto de inflamación del ligante está muy por encima de la temperatura de mezclado y compactación (355 °C), lo cual es muy conveniente, dado que no se puede permitir evaporación de gases inflamables durante este proceso por razones de seguridad. La especificación técnica de la tabla 702-01 indica un valor mínimo de 230 °C, según lo anterior, el ligante cumple ampliamente el rango establecido.

En relación con los ensayos de puntos de ablandamiento y recuperación elástica, no se tiene un valor establecido en las tablas del CR-2010, por lo cual para estos ensayos no se tiene punto de comparación, no obstante, para los ensayos de solubilidad en tricloroetileno y viscosidad absoluta a 60°C sí se tiene referencia en la tabla 702-01, para el caso del primero, se tiene que el ligante presenta un 99.98 % de solubilidad para un requisito mínimo de 99 %. Este ensayo es

importante para verificar el refinado del bitumen, ya que este no debe dejar agua en los componentes del producto.

En cuanto al ensayo de viscosidad absoluta, este presenta un valor de 3295 P, en este caso cumple el mínimo establecido en la tabla 702-01 que indica un mínimo de 3000 P. Este ensayo indica la resistencia a fluir del asfalto en estado semisólido como un parámetro importante en el diseño de mezclas asfáltica, pues el asfalto es un material termoplástico, es decir, es un material que cambia su consistencia con la temperatura, dado lo anterior es trascendental conocer su comportamiento a diferentes temperaturas para el óptimo desempeño de la mezcla en estabilidad y deformación permanente.

Dada la importancia de la viscosidad en el asfalto, en la tabla 23 se muestran los diferentes ensayos de viscosidad rotacional y viscosidad cinemática que se realizan principalmente para conocer el grado de fluidez y la temperatura en el mezclado y compactación de mezcla asfáltica. Como se observa, la viscosidad dinámica se realizó a diferentes temperaturas y se utiliza la calculada a 135°C para determinar la viscosidad cinemática a la misma temperatura, concluyendo que el ligante cumple adecuadamente la especificación de la tabla 702-01 con un mínimo permitido de 250 cSt y un valor reportado de 560 cSt.

Con estos valores, se determina la temperatura de mezclado y compactación mediante la curva Viscosidad vs Temperatura, en este caso, los valores se observan en la tabla 24 con límites inferior y superior.

La prueba de índice de estabilidad coloidal se muestra en la tabla 25 por cromatografía de columna, en este caso, se obtiene un valor de 0.28 siendo 0.6, el valor máximo permitido, según el CR-2010 tabla 702-02. Esto indica que el ligante tiene un adecuado porcentaje de componentes intermedios (resinas y aromáticos), en relación con los componentes pesados y livianos (asfaltenos y saturados) en su composición, lo que permite ductilidad y adhesividad.

El ensayo de cambio de masa en el TFO muestra una pérdida total de -0.001 % con un máximo permitido de 0.5 %, según la tabla 27, debido a que en este caso el CR-2010 no indica un valor para asfaltos clasificados por viscosidad y grado por desempeño.

Asimismo, de la referencia anterior se obtiene la comparación con la ductilidad a 25°C y la razón de viscosidades, la primera muestra un valor de 100 cm para un mínimo permitido de 40 cm y la segunda muestra un valor de 2.14 para una razón máxima de 3.00. Este ensayo mide la susceptibilidad al envejecimiento del ligante a corto plazo (durante mezclado), mediante calentamiento de este. La razón de viscosidades es relevante, ya que detalla el comportamiento del bitumen posterior al envejecimiento en TFO, no permitiendo que la viscosidad original sea mayor al triple luego del acondicionamiento. De esta manera, se concluye que el asfalto corresponde a un AC-30, según la clasificación de viscosidades mostrada en la tabla 5.

Para determinar la clasificación del asfalto por grado por desempeño, se requiere un promedio de temperaturas del pavimento, así como el comportamiento del asfalto a dichas temperaturas, mayormente su resistencia a la deformación producto de la aplicación de cargas, donde se obtiene una componente elástica recuperable y una componente plástica. Además de ello, se evalúa la viscosidad y elasticidad del asfalto a las temperaturas de ensayo. Para ello, se realizaron los ensayos reológicos del asfalto, tanto original como envejecido, esto para determinar la clasificación de grado por desempeño y conocer la temperatura a la cual el asfalto no contribuye al desgaste de la carpeta asfáltica.

En las tablas 29-31 se observan los ensayos realizados al ligante, en los cuales se mide expresamente el módulo de deformabilidad $G^*/\text{sen}\delta$ que permite conocer la relación entre la resistencia a la deformación producto de la aplicación de un esfuerzo cortante vs la viscosidad o elasticidad del asfalto, para así determinar la tendencia a la formación de roderas. Cuanto menor sea $\text{sen}\delta$ más resistencia a la deformación permanente presenta el asfalto. Así, Superpave

indica que el criterio para medir el ensayo es 1.0 kPa como valor de corte mínimo. Este ensayo se hace, de igual forma, en el RTFO, no obstante, en este ensayo el criterio de corte aumenta para un valor mínimo de 2.2 kPa, dado que en condición envejecida el asfalto ha perdido sus componentes volátiles y ha pasado por un proceso de oxidación lo cual rigidiza el bitumen. En ambos casos se observa que el asfalto cumple debidamente con la temperatura de 64°C.

Además de ello, se realizó la prueba de pérdida de masa en el horno de película delgada RTFO, esto se determinó con el objetivo de evaluar la masa del ligante, luego del envejecimiento. Lo anterior porque en el proceso de mezclado en planta el asfalto expuesto a altas temperaturas comienza a sufrir oxidación de sus componentes y pérdida de masa. Superpave dicta un valor de pérdida de masa de 1 % máximo, en este caso el ligante pierde -0.043 %.

Para determinar el límite intermedio del ligante, se utiliza el asfalto envejecido tanto en RTFO como en el envejecimiento a presión PAV, en estos ensayos se mide el módulo de fatiga que permite describir el comportamiento del asfalto a la fatiga durante la exposición a temperaturas intermedias, dado que existe la correlación entre el $G^*\text{sen}\delta$ y la susceptibilidad al agrietamiento por fatiga producto de la formación de grietas ya que entre mayor sea $\text{sen}\delta$ y G^* el asfalto toma una condición menos elástica y más rígida.

El límite inferior de temperatura está ligado con la temperatura mínima del asfalto, al cual este conserva las propiedades reológicas que le permiten cumplir con las especificaciones AASHTO para grado por desempeño y, a la vez, la temperatura mínima del pavimento que se registra en el lugar del proyecto, en este caso se observa que dicha temperatura corresponde a -22°C según la tabla 33.

Con estos ensayos, se determina que el ligante tiene una clasificación de grado por desempeño PG 64 (25) -22, como muestra la tabla 36. Esta clasificación significa que el asfalto es apto para utilizarse en zonas donde la temperatura máxima del pavimento no exceda 64°C y donde la temperatura mínima no sea mayor a -22°C. En el

presente caso, esta última temperatura no representa un problema ya que no existe el invierno bajo cero en nuestro país.

Adicional a esto, se muestran los resultados de las pruebas de recuperación elástica bajo esfuerzo múltiple (MSCR), esta prueba ha demostrado tener mejor correlación con la deformación real que sufre el pavimento y se realiza mediante la aplicación de dos esfuerzos (0.1 kPa y 3.2 kPa) durante 1 segundo más 9 segundos de reposo, en este tiempo el asfalto debe recuperar la deformación percibida. Esta prueba permite conocer la deformación del pavimento con un nivel de precisión mayor que la metodología PG, además de que el ensayo se aplica a la temperatura máxima de desempeño. Los resultados se muestran en las tablas 34-35.

Según la información anterior, el asfalto es apto para rutas de medio volumen de tránsito, es decir, tránsito entre 10 y 20 ESALs con velocidades de diseño mayores a los 40 km/h, en este caso se toma como referencia la zonificación climática realizada por el Lanamme UCR sobre la clasificación de asfaltos mediante grado por desempeño (noviembre 2013). Dicha clasificación ubica al asfalto en estudio para ser utilizado en la Zona Central del país, delimitada en la investigación. Además, es posible utilizar el asfalto en las zonas Pacífico y Caribe con un volumen de tránsito menor a 10 ESALs.

Fibras de bambú

La fibra de bambú es un material novedoso en la producción de mezclas asfálticas, ya que recientemente se han realizados estudios de tesis sobre la adición de fibra celulosa a la mezcla, así como diversos métodos para implementar estos materiales en la producción de mezclas asfálticas abiertas o drenantes, este tipo de mezclas se utilizan por su elevada durabilidad y para cargas de tránsito pesado. En este caso se pretende estudiar las fibras de bambú como agregado en la mezcla, sin embargo, como es un material novedoso no existe actualmente una reglamentación en Costa Rica acerca de las

especificaciones mínimas que debe cumplir la fibra para ser utilizada en el diseño de mezcla asfáltica; no obstante; se realizaron 3 pruebas consideradas importantes para la caracterización de la fibra, las cuales se explican a continuación.

En el gráfico 10, se observa la curva termogravimétrica de la fibra, en la cual se muestra la pérdida de masa como porcentaje en función de la temperatura del ensayo, así como el porcentaje de pérdida de masa por minuto, para este caso se tiene que la fibra pierde un total de 8.59 % de masa a través de todo el proceso.

En este caso se observa en la gráfica que la curva no es constante en ningún momento, esto es debido a que la fibra nunca deja de perder masa, inclusive puede ser que a temperaturas mayores la fibra se desintegre completamente, sin embargo, dichas temperaturas no son objetivo de interés en el procesamiento de mezclas asfálticas, no obstante, permite conocer la respuesta de la fibra a la temperatura, inclusive esta fue sometida una hora a 160°C temperatura usual de mezclado y compactación, sin embargo el tiempo de mezclado real no sobrepasa los 5 minutos. Asimismo, se obtiene la curva de pérdida de peso por minuto en la cual se da un punto de inflexión cerca de la temperatura de 85°C con un porcentaje de pérdida cercano a 3.25 %, siendo este valor el punto con mayor tasa de cambio en la curva.

En el gráfico 11, se observa la composición química de la fibra de bambú. El objetivo de este ensayo es conocer la estructura de la fibra, como se muestra en dicho gráfico las ondas de análisis muestran una similitud con la celulosa, biopolímero que se encuentra en los tejidos de las fibras naturales como es el caso del bambú. Dado que en su mayoría la fibra está compuesta de celulosa, su estructura es fibrosa y sumamente volumétrica; esto es, presenta gran volumen comparado con su peso en masa. Como consecuencia de lo anterior, se presentaron algunas dificultades durante el proceso de mezclado que se detallan más adelante.

El análisis granulométrico de la fibra se muestra en el gráfico 12, en el que se obtiene un T.M.N de 4.75 mm siendo similar a una arena, no obstante, como se observa en el apéndice 7 la

fibra no presenta partículas más finas que la malla #200, esto puede deberse al tipo de molido o procesamiento de la fibra. La curva granulométrica presenta una buena distribución de los porcentajes pasando, esto demuestra no ser un agregado muy uniforme y, además, clasificarse como una graduación fina.

En la tabla 37, se muestran los datos obtenidos de densidad de la fibra, dicha prueba se realizó utilizando el principio de Arquímedes, para los 3 casos analizados la fibra obtiene un valor sumamente bajo de densidad (0.7 g/cm^3), lo que permite inferir que al momento de realizar la combinación granulométrica y determinar la gravedad específica bruta combinada se podrían presentar problemas asociados con la densidad que afecten significativamente los valores de vacíos totales en la mezcla, vacíos en el agregado mineral y vacíos llenos con asfalto. Sin embargo, este valor de densidad de la fibra es esperable ya que por su textura y volumetría se espera que el valor se asemeje al resultado obtenido.

Efecto de la adición de las fibras de bambú sobre la mezcla

Cálculo de baches para mezcla asfáltica

Como se detalla en la metodología y en la tabla 38 mostrada en los resultados del proyecto, el cálculo de la mezcla corresponde a un bache por cada porcentaje de fibra y asfalto óptimo. Dicho bache de 14000 gramos corresponde a las pruebas de gravedad máxima teórica y gravedad específica bruta de la mezcla compactada, esto para determinar el porcentaje de vacíos del diseño.

Como se puede observar, los porcentajes de agregado con el contenido de fibra añadido no difieren mucho de los porcentajes sin la fibra, esto se da porque la cantidad dosificada es relativamente poca. Lo anterior se refleja

mayormente en el cálculo de los baches con 0.1 % y 0.5 %; los cuales no fue posible realizar las pruebas de gravedad específica máxima teórica y gravedad específica bruta para la obtención del contenido de vacíos, debido a la exudación que presentó la mezcla al momento de compactar. Esto dado que el diseño de mezcla original fue realizado mucho tiempo antes que el diseño de mezcla con fibra, por lo cual es posible que los agregados sufrieran algunos cambios físicos y esto permitiera que la mezcla exudara al bajarle el contenido de fibra. Por esta razón, se decidió mantener el contenido de fibra en 1 % y variar el contenido de asfalto mediante curvas de diseño como se explica a continuación.

Mezcla asfáltica Río Claro 1 % fibra de bambú

En el diseño de mezcla de Río Claro, se obtuvo un porcentaje de vacíos del 5.1 % por peso total de mezcla, este porcentaje está por encima del requerido en la norma de diseño AASTHO M323, esto representa un problema, ya que un alto contenido de vacíos se traduce en problemas de durabilidad de la mezcla, pues cuanto más vacíos por peso total existan en el espécimen compactado más probabilidad de que el agua entre en la mezcla y deteriore sus componentes permitiendo un lavado de la película de asfalto. En este caso, como se observa el diseño por VTM, no cumple.

Adicional a esto, se tiene que los vacíos en el agregado mineral (VMA) y los vacíos llenos con asfalto (VFA) tampoco cumplen los requerimientos Superpave, dando valores muy bajos que no permiten un adecuado desempeño. Un bajo valor de VMA representa menos espacio entre las partículas de agregado y un menor recubrimiento de la película de asfalto en la mezcla, lo que provoca problemas de durabilidad, ya que la mezcla experimenta desintegración y agrietamiento. Con respecto al VFA, este corresponde al porcentaje de VMA que está lleno con asfalto o bien a los espacios vacíos que están cubiertos con asfalto no tomando en cuenta el asfalto absorbido por el agregado, en este caso el

valor obtenido (61.8 %) es menor al rango mínimo de cumplimiento (65 %-75 %). Un bajo valor de VFA provoca problemas de flexibilidad en la mezcla, dado que la poca cantidad de vacíos llenos con asfalto no permiten que la mezcla pueda ajustarse a asentamientos provocados por las cargas del tránsito y la mezcla tiende al agrietamiento.

En las tablas 41-42, se muestran los valores obtenidos para gravedad específica bruta y máxima teórica, en este caso, se hace necesario aumentar el Gmb y disminuir el Gmm, esto con el objetivo de obtener un porcentaje de vacíos más cercano al requerido en el diseño. Dado lo anterior, estos parámetros dependen directamente de la densidad del agregado, teniendo que agregados más pesados tendrán un Gbs combinado mayor (tabla 40) y esto permite valores acordes al porcentaje de vacíos de diseño, además de que permiten compensar el valor de densidad de la fibra que realmente no aporta suficiente al Gbs combinado. Como resultado de lo anterior y entendiendo que el VTM se ve afectado directamente por los valores de densidad de la mezcla, se hace necesario recurrir a agregados con mayor Gbs, en este caso se utilizó la fuente de Guápiles.

En relación con el asfalto absorbido, se reporta un valor de 2.8 % que se considera un valor bastante alto, este parámetro depende directamente de la absorción de los agregados y de la cantidad de relleno mineral que contenga la combinación granulométrica, ya que cuanto más relleno mineral con capacidad de absorción alta, mayor asfalto absorbido habrá en la mezcla.

La relación polvo asfalto se entiende como la relación entre el asfalto efectivo y el material pasando la malla #200, este parámetro tiene un rango permitido de 0.6-1.3, en el caso de la mezcla en cuestión se obtuvo 1.63, como se puede observar, el valor es mayor al máximo permitido. Esta relación indica que existe alto porcentaje de asfalto efectivo con respecto al porcentaje pasando la #200, es decir, que las partículas finas están absorbiendo asfalto y hace que la mezcla se vuelva inestable en cuanto al contenido óptimo de asfalto.

Se observa, además, que el porcentaje de compactación de la mezcla en el compactador giratorio SUPERPAVE cumple debidamente la especificación de diseño siendo que el %Gmm a los giros iniciales corresponde a 84.3 % menor al valor máximo permitido que es 89 %, asimismo, el %Gmm a los giros de diseño da un resultado de 94.9 % menor al valor máximo permitido en el diseño que es igual a 96 %.

No obstante, como se verá más adelante, ningún diseño de mezcla realizado cumple a cabalidad con las especificaciones de diseño, esto se explicará con mayor detalle en los siguientes apartados; sin embargo, se eligió el diseño con mayor cumplimiento de la especificación técnica.

Mezcla asfáltica Guápiles 1 % fibra de bambú

En la tabla 43 se observa que el diseño de mezcla de Guápiles utiliza un asfalto óptimo de 6.20 %, no obstante, al agregarle la fibra el diseño se modifica y obtiene un porcentaje de vacíos de 2.3 %, esto puede explicarse debido a que la granulometría combinada de Guápiles es más cerrada y densa que la granulometría combinada de Río Claro y esto permite menos cavidades de aire en el espécimen compactado. Tomando en consideración lo mencionado anteriormente respecto al porcentaje de vacíos, se tiene que es necesario realizar otro diseño de mezcla para obtener un porcentaje adecuado para el diseño, ya sea este modificando los porcentajes de fibra o el contenido de asfalto.

Como parte de la solución del VTM, se realizaron dos baches adicionales con 0.1 % y 0.5 % de fibra para un PTM de 6.20 %; no obstante, estos resultados mostraron que la mezcla asfáltica presentó exudación luego de su proceso de compactación. Esto sugiere que al existir menos partículas de fibra en el espécimen y considerar los posibles cambios físicos en los apilamientos de los agregados (posible segregación) el asfalto resulta en exceso y la mezcla presenta bajos porcentajes de vacíos.

El VMA y el VFA no cumplen los parámetros establecidos, no obstante, en este caso el VFA es mayor al máximo permitido, esto ocasiona problemas de estabilidad de la mezcla, debido a que hay menos fricción entre las partículas del agregado causado por el exceso de ligante, además de provocar tendencia al deslizamiento, ya que cuanto más ligante exista en la mezcla menos contacto entre las llantas de los vehículos y el pavimento, permitiendo deslizamiento de estos sobre la carretera.

Con respecto a los valores de Gmm y Gmb, en este caso ambos valores ascienden con respecto a la mezcla anterior, esto se debe a que la mezcla de Guápiles es más densa y, además, presenta un contenido diferente de asfalto lo que permite que el Gmm y Gmb aumenten su valor.

El porcentaje de asfalto absorbido es menor que la mezcla de Río Claro, aunque sigue siendo un valor alto, esto se debe a que la granulometría de Río Claro utiliza 4 apilamientos en comparación con la granulometría de Guápiles (3 apilamientos) además de la fibra en ambas mezclas, esto explica que el Pba de Río Claro sea mayor.

La relación polvo asfalto aún no está dentro del rango 0.6-1.3, aunque cabe destacar que es menor a la reportada por la mezcla anterior. Esto puede deberse a que el agregado fino 1573-16 posee menos porcentaje de absorción que el agregado 2137-16 de la fuente de Río Claro.

Se observa, además, que %Gmm a los giros de diseño sobrepasa el límite permitido de 96 %, este parámetro revisa el nivel de densificación que puede sufrir la mezcla para la cantidad de ejes equivalentes de diseño.

Mezcla asfáltica Guápiles 5.5 % asfalto óptimo y 1 % de fibra

En este caso, se decidió disminuir el contenido óptimo de asfalto basados en criterios granulométricos y en la mezcla de control, la cual cambió su contenido de asfalto debido a los posibles cambios físicos de los apilamientos, no

obstante, las propiedades de la mezcla desmejoraron con respecto a la mezcla anterior, es decir tampoco logra cumplir los parámetros volumétricos. Por esta razón, se decidió realizar las curvas de diseño y encontrar el asfalto óptimo con 1 % de fibra basados en 2 puntos estudiados previamente: 6.20 % y 5.5 %. Se determinó bajo criterios técnicos que la adición de la fibra ocasiona problemas volumétricos, esto se nota claramente en la tabla 51 donde se muestra el diseño óptimo sin fibra, el cual cumple debidamente la volumetría de diseño. A continuación, se explica el diseño realizado.

Volumetría y curvas de diseño para porcentaje de asfalto óptimo con 1 % de fibra

Los gráficos 13-16 muestran las curvas de diseño para los parámetros volumétricos de PTM, VMA, VFA y relación polvo-asfalto, como se puede observar, el contenido de asfalto óptimo fue de 5.84 %, aunque esto no garantiza un cumplimiento total de la volumetría, por ejemplo, aún no cumple el VMA, no obstante, sí cumple el VTM de diseño. En este caso, se decidió tomar este diseño para aplicar pruebas y determinar su resistencia mecánica.

Debe aclararse que, para lograr una correcta volumetría, se hace necesario realizar nuevamente el diseño de mezcla original y ajustar debidamente la granulometría con la fibra de bambú. Lo anterior es necesario debido a que la granulometría de los agregados pétreos debe ajustarse a la granulometría de la fibra, es decir, que deben ser diseñadas en conjunto no solamente adicionando la fibra como se realizó en este caso, esto porque ocasiona problemas volumétricos en la mezcla. En la tabla 55 se muestra el resumen del diseño realizado.

Análisis del desempeño mecánico de la mezcla con adición de fibra y la mezcla de control

Mezcla con fibra

Prueba resistencia retenida a la tensión diametral

En la prueba de tensión diametral, los especímenes alcanzan un esfuerzo a tensión promedio de 977 kPa (condición seca) y 865 kPa (condición húmeda) para una resistencia retenida del 88.5 %, tomando en cuenta que el valor del espécimen 6 con 81.5 % de resistencia representa un valor aislado en comparación con los otros, no obstante, se obtiene una resistencia mayor que la mínima requerida por el CR-2010 que corresponde a un 85 % (sección 402-4) para mezclas asfálticas diseñadas mediante Superpave para resistir daño por humedad (CR-2010).

El ensayo de resistencia retenida a la tensión diametral evalúa la susceptibilidad de la mezcla a la separación del ligante-agregado producto de la exposición del espécimen a la saturación (AASHTO T283). Este tipo de condiciones son frecuentes en los pavimentos, permitiendo que estos disminuyan su resistencia y consecuentemente sean menos durables.

Resistencia a la fatiga

El ensayo de fatiga es importante, ya que se determina la resistencia de la mezcla asfáltica ante las cargas repetidas del tránsito, lo que ocurre en este proceso es que las repeticiones de cargas sobre el pavimento comienzan a generar grietas debido al esfuerzo de tensión en las fibras inferiores de la carpeta asfáltica provocando que estas se expandan hasta la superficie y ocasionen el deterioro del pavimento. El ensayo busca cuantificar la rigidez de la viga frente a los ciclos

de carga y ubicar el punto de falla o bien la pérdida máxima de rigidez permitida.

En las tablas 67-68, se observa el número promedio de los ciclos de fatiga por cada tipo de deformación, obteniendo un promedio de 222761 ciclos para 400 $\mu\epsilon$, siendo mayor que la cantidad mínima permitida en el CR-2010 (tabla 418-16), la cual corresponde a 200000 repeticiones para la misma deformación, así también se obtiene el promedio para 600 $\mu\epsilon$ con un valor de 56575 ciclos, para una especificación mínima de 40000 repeticiones de carga. En este caso, se cumple con lo estipulado en el CR-2010 para mezclas asfálticas designación 418 (4). (CR-2010, pág. 347).

A pesar de lo anterior, en la tabla 69 se observa que la mezcla asfáltica no cumple los requisitos para mezclas tipo C, entendiéndose esta como la capa intermedia de alto desempeño (tabla 402-1, CR-2010), en este caso la especificación de la tabla 402-4 del CR-2010 dicta un valor mínimo de 450000 repeticiones para la falla con 400 $\mu\epsilon$, no obstante, la mezcla cumple para la deformación de 600 $\mu\epsilon$ la cual solicita un valor mínimo de repeticiones de 50000 ciclos.

El mismo caso se presenta para la mezcla tipo D, la cual corresponde a la capa de ruedo en el pavimento de alto desempeño (tabla 402-1, CR-2010), en esta ocasión cumple solamente para la deformación de 600 $\mu\epsilon$. Se concluye entonces que la mezcla asfáltica no cumple para la deformación de 400 $\mu\epsilon$ y debe realizarse un diseño acorde para lograr un correcto desempeño.

En los gráficos 18-25 se muestra el comportamiento de la rigidez de flexión vs los ciclos de carga y el producto de la rigidez de flexión por los ciclos de carga vs los ciclos de carga. Estas gráficas permiten observar el desempeño del espécimen a través del ensayo hasta determinar su rigidez máxima y el número de ciclos para la falla de cada nivel de deformación.

Análisis de deformación permanente en rueda de Hamburgo

La prueba de la rueda de Hamburgo permite conocer la susceptibilidad de la mezcla a la deformación permanente, la reglamentación nacional en el CR-2010 utiliza el ensayo APA, realizado a 8000 ciclos de carga con una temperatura de 60°C con muestras no sumergidas como parámetro para medir la deformación permanente. No obstante, para esta investigación, se utilizó la rueda de Hamburgo por considerarse un ensayo más agresivo que el ensayo APA, esto dado que los especímenes están sumergidos a una temperatura de 50°C. Los resultados mostrados en la tabla 72 señalan que la mezcla se deforma un promedio de 4.58 mm, no alcanzando el punto de inflexión en la prueba, que corresponde al punto donde el agregado comienza a sufrir desnudamiento o bien los ciclos a la falla, es decir, la mezcla soportó los 20000 ciclos de carga antes de alcanzar la deformación máxima de 20mm.

Como criterio de falla, se compara con especificaciones internacionales como las señaladas por la Administración Federal de Carreteras en Estados Unidos (FHWA) que indica una deformación máxima permitida de 10 mm a 20000 ciclos (Granados, 2012). En la ciudad de Hamburgo, Alemania, el criterio corresponde a una deformación máxima de 4 mm en autopistas para 19200 pasadas de rueda (Granados, 2012). Adicional a ello, también se compara con la legislación nacional que utiliza el ensayo APA, la cual permite una deformación máxima de 3 mm (CR-2010).

En este caso, la mezcla solamente cumple el criterio estipulado por la FHWA en Estados Unidos y el criterio de la ciudad de Hamburgo a 19200 pasadas, ya que en este punto la mezcla se deforma en promedio 2.98 mm según el gráfico 26.

Mezcla de control

Prueba resistencia retenida a la tensión diametral

En las tablas 73-75, se muestran las pruebas de tensión diametral de la mezcla de control, en este caso la mezcla obtiene una resistencia retenida de 83.6 %, este valor está por debajo de 85 %, que es el requerimiento en la normativa CR-2010. De esta manera, se concluye que la mezcla presenta mayor susceptibilidad al daño por humedad y consecuentemente puede presentar problemas de durabilidad.

Resistencia a la fatiga

En la tabla 78, se observa el resumen de los resultados de la prueba de resistencia a la fatiga, en este caso la mezcla presenta un promedio de ciclos a la fatiga (Gráfico 30) menor a lo solicitado para las mezclas asfálticas evaluadas en el CR-2010 (Tipo C y Tipo D), es decir, que la mezcla llega a presentar susceptibilidad a la fatiga antes de completar el mínimo de repeticiones para la falla. Se concluye que la mezcla asfáltica es no apta para resistir cargas repetidas en el pavimento y podría agrietarse con mayor facilidad.

Análisis de deformación permanente rueda de Hamburgo

En la tabla 80, se muestra los resultados obtenidos de la prueba de Hamburgo para cada rueda, obteniendo un promedio de deformación de 2.77 mm, en este caso, la mezcla muestra un comportamiento bastante aceptable, de hecho, como se puede ver, este resultado cumple las especificaciones utilizadas como referencia de la prueba, siendo estas las señaladas por la Administración Federal de Carreteras de Estados Unidos (FHWA), la ciudad de Hamburgo, Alemania, y el ensayo APA en Costa Rica. Se concluye, entonces, que la mezcla cumple

debidamente los criterios mínimos de deformación y es apta para resistir deformación permanente en el pavimento.

Análisis comparativo del desempeño mecánico de ambas mezclas

El análisis comparativo se realiza con el objetivo de resumir los resultados de cada prueba en ambas mezclas, la comparación no debe tomarse como un parámetro de referencia preciso, esto debido a que fue necesario modificar el diseño de mezcla original debido a problemas de la mezcla de control, los cuales no forman parte del alcance de esta investigación, no obstante, los valores presentados son veraces y pueden ser tomados en cuenta para futuras investigaciones.

Prueba resistencia retenida a la tensión diametral

Según los gráficos 43-44, la mezcla con fibra alcanza una resistencia mayor a la presentada por la mezcla original, no obstante, esta última no cumple el parámetro especificado en el CR-2010 (sección 418.06.03). En este caso, puede deducirse que la fibra de bambú aporta resistencia a la tensión a la mezcla y puede comportarse como una malla que la refuerza. Esto porque, como se muestra en los gráficos 14-15 del diseño de mezcla con fibra y los gráficos de diseño de la mezcla de control presentados en los apéndices, el VFA y el VMA son menores en la mezcla con fibra, es decir, que esta debería ser más susceptible a la separación ligante-agregado que la mezcla de control, no obstante, como se muestra en los resultados, la mezcla con fibra presenta mejor comportamiento. Cabe mencionar que dicha mezcla no cumple adecuadamente los parámetros volumétricos, sin embargo, logra un mejor desempeño.

Resistencia a la fatiga

Los gráficos 45-47 muestran los resultados de la mezcla con fibra y la mezcla de control contra las especificaciones nacionales, como se detalla en dichos gráficos, la mezcla con fibra cumple debidamente con la tabla 418-16 del CR-2010, y presenta mayores ciclos de repeticiones a la falla, sin embargo, evaluando los tipos de mezcla asfáltica C y D especificadas en dicho manual (tabla 402-1).

La mezcla con fibra no cumple los ciclos de fatiga para la deformación con 400 microstrain, sin embargo, la mezcla de control no cumple con ninguno de los criterios mencionados, dado lo anterior puede suponerse que la fibra contribuye a la resistencia ante cargas repetitivas que ocasionan esfuerzos de tensión en la mezcla. No obstante, es significativo mencionar que se esperaba un mejor comportamiento de la mezcla de control, dado que esta presenta mayores valores de VFA, VMA y una relación de polvo mineral/asfalto efectivo dentro del rango especificado en el CR-2010 (0.3-1.6), esto provoca que dicha mezcla presente las condiciones para resistir agrietamiento por fatiga, no obstante, no cumple con ninguno de los parámetros consultados. Asimismo, la mezcla con fibra logra cumplir con al menos una especificación técnica aún con problemas en el VFA, VMA y relación polvo mineral/ asfalto efectivo.

Análisis de deformación permanente rueda de Hamburgo

En el gráfico 48, se observa la deformación permanente de ambas mezclas contra el número de pasadas, en este se aprecia que la mezcla de control presenta mayor resistencia a la deformación permanente, en este caso, puede deberse a que la mezcla cumple debidamente los parámetros de VFA y VMA de la mezcla, lo que conlleva a una relación óptima de asfalto efectivo, ya que la película de ligante es adecuada para no perder fricción entre los agregados (Castro, Lanamme).

Lo anterior puede concurrir en un buen desempeño de la mezcla a la deformación plástica, además, cabe destacar que es posible que la fibra de bambú expuesta 6 horas a 50°C haya perdido adhesividad con la mezcla y no aportara mayor resistencia.

En el gráfico 49, se muestra la deformación promedio de cada mezcla y la deformación permitida en las 3 especificaciones consultadas en esta investigación, de manera que se concluye que la mezcla con fibra cumple dos de los parámetros de deformación, siendo estos los consultados en la FHWA y la Ciudad de Hamburgo, por su parte, la mezcla de control cumple con los mencionados anteriormente y la especificación nacional del CR-2010 con el ensayo APA como referencia.

Conclusiones

A partir del presente proyecto, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

Los agregados, tanto de la fuente de Guápiles como de Río Claro, cumplen la reglamentación vigente en Costa Rica para su utilización en mezclas asfálticas

El ligante asfáltico cumple los requerimientos especificados en el CR-2010 para clasificarse como PG 64 (25) -22, común en Costa Rica.

El porcentaje de fibra en la mezcla asfáltica se ve influenciado directamente por el tipo de agregado y la granulometría utilizada en la mezcla.

La fibra de bambú ocasiona un tiempo de mezclado cercano al doble (5 min), con respecto a la mezcla tradicional, ya que su textura produce grumos durante el proceso.

La adición de la fibra a la mezcla provoca problemas en el VTM, VMA y VFA.

Al disminuir el contenido de asfalto de manera significativa respecto a la mezcla original, la comparación entre ambas mezclas es limitada, no obstante, sí permite concluir sobre el desempeño de estas en relación con la reglamentación técnica en el país.

La mezcla con fibra de bambú cumple con el porcentaje mínimo requerido para resistencia retenida a la tensión diametral, demostrando así

que, aunque presentó problemas en volumetría, su desempeño mecánico es mayor al mínimo esperado.

La mezcla con fibra cumple la especificación para la resistencia al agrietamiento por fatiga estipulado en la tabla 418-16 del CR-2010 para repeticiones de carga mínima para la falla, sin embargo, no es apta para la deformación a $400 \mu\epsilon$ en mezclas asfálticas tipo C y D. Se debe rediseñar la mezcla para ajustar este parámetro.

En la prueba de la rueda de Hamburgo, la mezcla con fibra cumple el requerimiento de la FHWA y el criterio de la ciudad de Hamburgo, no obstante, la deformación es alta respecto a lo permitido por el ensayo APA en Costa Rica, lo cual hace necesario un rediseño de la mezcla en este aspecto y mediante dicho ensayo.

La mezcla de control no cumple el mínimo especificado en el CR-2010 para resistencia retenida a la tensión diametral, en este caso, aunque no es directamente comparable con la mezcla con fibra, sí se observa que al menos esta última cumple el parámetro.

La mezcla de control es susceptible al agrietamiento por fatiga, presentando pérdida de rigidez antes de los ciclos mínimos de carga para la falla. En este caso, esta mezcla no es apta para resistir estos esfuerzos según el CR-2010.

En relación con la prueba de Hamburgo, la mezcla de control cumple todas las especificaciones consultadas en esta

investigación, siendo suficiente para soportar deformaciones o ahuellamiento.

La fibra de bambú es un agregado que aporta resistencia a la fatiga y al daño inducido por humedad en la mezcla y que presenta ventajas sostenibles, pues el bambú es una planta regenerativa y de bajo costo comparado con la obtención de agregados pétreos.

Recomendaciones

Es necesario realizar una combinación granulométrica que se ajuste a la fibra de bambú para lograr una volumetría que cumpla con la norma de diseño AASHTO M323.

Se debe realizar un nuevo diseño de mezcla sin fibra para obtener una comparación adecuada entre las mezclas, evitando amplias modificaciones del contenido de asfalto del diseño original.

La fibra de bambú puede ser óptima en el diseño de mezclas asfálticas abiertas o drenantes SMA, en las cuales la fibra no permite el drenado del asfalto a través de la mezcla, estas se utilizan para pavimentos con altos volúmenes de tráfico, buenas condiciones de drenaje y resistencia a la fatiga entre otras características.

Se recomienda adicionar la fibra utilizando VIATOP, un material comprimido hecho de fibra celulosa que se utiliza en el diseño de mezclas asfálticas SMA, en este caso el VIATOP podría solucionar el problema de la adición de la fibra al proceso de mezclado.

Dado que el tiempo de mezclado es el doble para el caso de la adición de la fibra de forma manual, se debe monitorear la temperatura de mezclado, ya que no puede ser inferior a la indicada en la curva Temperatura vs Viscosidad, en el presente proyecto esta no debe ser inferior a 156°C.

Se deben realizar pruebas más exhaustivas a la fibra de bambú para solventar el problema de la poca información técnica de este agregado específicamente en la utilización de mezclas asfálticas.

Es conveniente no permitir un incremento de temperatura en la mezcla mayor a un rango de 160°C-170°, pues la fibra podría empezar a perder mayor porcentaje de masa que compromete la resistencia de esta.

Como trabajo exploratorio se requiere una investigación más exhaustiva sobre el posible proceso de mezclado y colocación en campo, tanto para controlar los niveles de densificación de la mezcla como la trabajabilidad de la fibra.

Se recomienda asimismo realizar estudios estadísticos de las pruebas con el fin de evaluar la confiabilidad de los datos y obtener percentiles adecuados.

Además, es pertinente el estudio de la dispersión de la fibra en la matriz de la mezcla, esto para observar el volumen, comportamiento de esta y su adherencia con los agregados.

Apéndices

Apéndice 1: Cálculo de bache con 6.32 % de asfalto, 1 % de fibra y agregado de Río Claro.

Apéndice 2: Cálculo de bache con 5.5 % de asfalto, 1 % de fibra y agregado de Guápiles.

Apéndice 3: Cálculo de bache con 6.20 % de asfalto, agregado de Guápiles y 0.5 % de fibra.

Apéndice 4: Cálculo de bache con 6.20 % de asfalto, agregado de Guápiles y 0.1 % de fibra.

Apéndice 5. Curva granulométrica agregado combinado Río Claro.

Apéndice 6. Curva granulométrica agregado combinado Guápiles.

Apéndice 7. Tabla de análisis granulométrico de la fibra de bambú.

Apéndice 8. Deformación permanente vs número de pasadas eje derecho Rueda de Hamburgo.

Apéndice 9. Deformación permanente vs número de pasadas eje izquierdo Rueda de Hamburgo.

Apéndice 10. Gráfico VMA mezcla de control.

Apéndice 11. Gráfico VFA mezcla de control.

Cálculo de cantidades para baches

Datos iniciales en gramos		Porcentajes iniciales de agregado	
Wmm =	14000	Polvo de Piedra =	55
% P.T.M =	6.32	Cuartilla =	15
% Fibra =	1	Quintilla =	30

Cantidades en gramos		Peso de agregado y porcentajes con fibra		Cantidades en gramos
Wa =	12993.48	Wa más fibra =	13123.41	
Peso fibra =	129.93	Polvo de Piedra =	54.450	7145.70
Peso asfalto =	876.59	Cuartilla =	14.85	1949.02
Polvo de Piedra =	7146.412	Quintila =	29.70	3898.04
Cuartilla =	1949.022			
Quintilla =	3898.043			

Cálculo de cantidades para baches

Datos iniciales en gramos		Porcentajes iniciales de agregado	
Wmm =	14000	Polvo de Piedra =	55
% P.T.M =	5.5	Cuartilla =	15
% Fibra =	1	Quintilla =	30

Cantidades en gramos		Peso de agregado y porcentajes con fibra		Cantidades en gramos
Wa =	13106.15	Wa más fibra =	13237.21	
Peso fibra =	131.06	Polvo de Piedra =	54.450	7207.66
Peso asfalto =	762.79	Cuartilla =	14.85	1965.92
Polvo de Piedra =	7208.381	Quintila =	29.70	3931.84
Cuartilla =	1965.922			
Quintilla =	3931.844			

Cálculo de cantidades para baches

Datos iniciales en gramos		Porcentajes iniciales de agregado	
Wmm =	14000	Polvo de Piedra =	55
% P.T.M =	6.2	Cuartilla =	15
% Fibra =	0.5	Quintilla =	30

Cantidades en gramos		Peso de agregado y porcentajes con fibra		Cantidades en gramos
Wa =	13070.70	Wa más fibra =	13136.05	
Peso fibra =	65.35	Polvo de Piedra =	54.450	7152.58
Peso asfalto =	863.95	Cuartilla =	14.93	1960.60
Polvo de Piedra =	7188.884	Quintila =	29.85	3921.21
Cuartilla =	1960.605			
Quintilla =	3921.210			

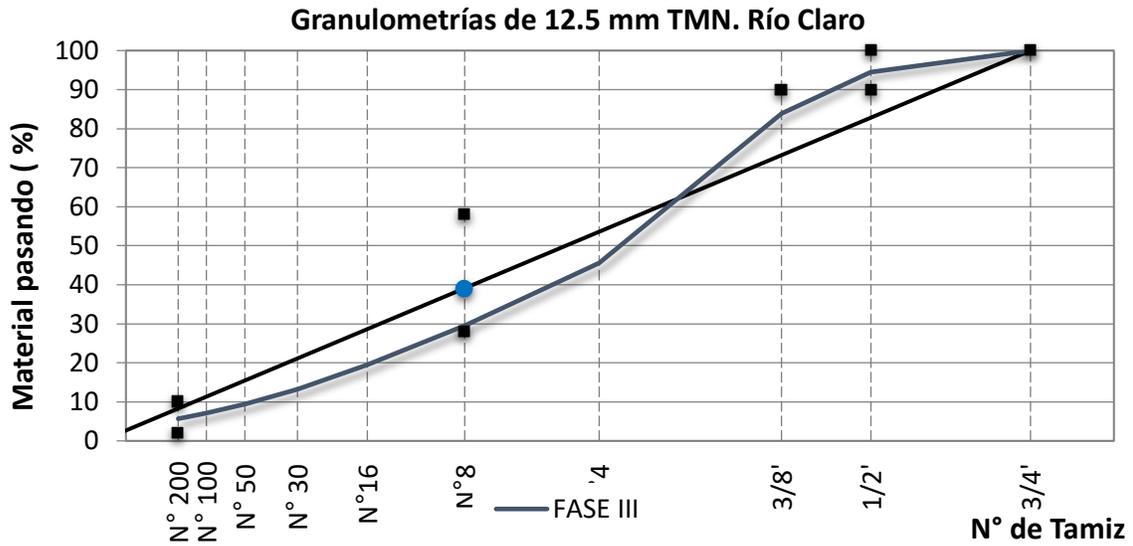
Cálculo de cantidades para baches

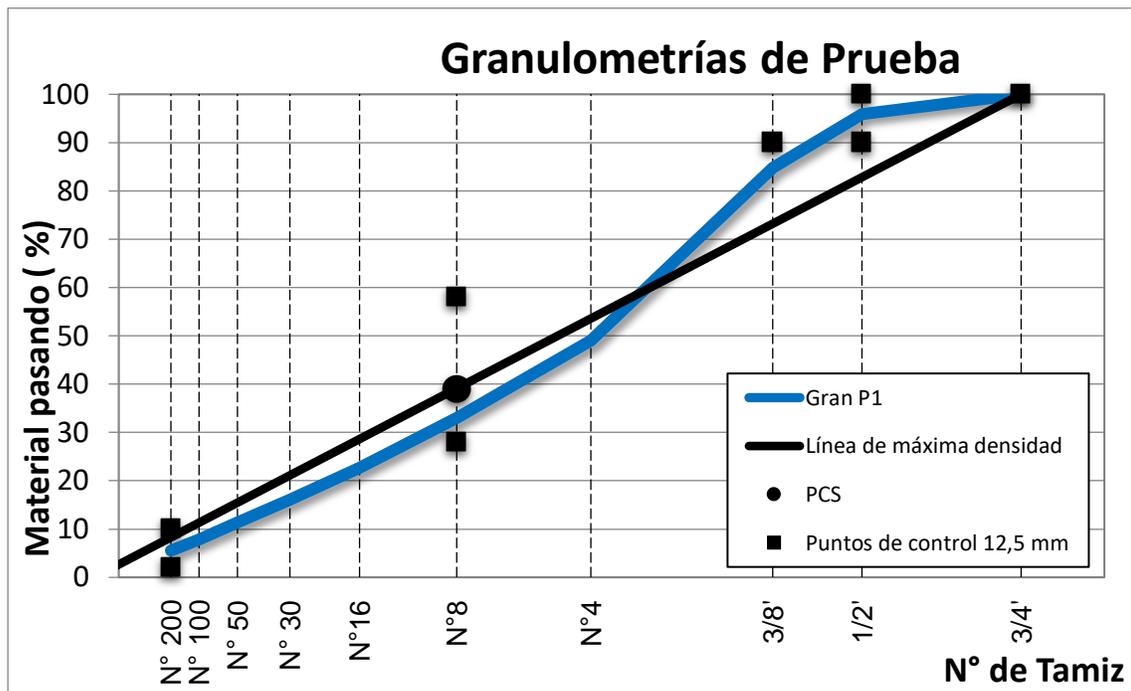
Datos iniciales en gramos	
Wmm =	14000
% P.T.M =	6.2
% Fibra =	0.1

Porcentajes iniciales de agregado	
Polvo de Piedra =	55
Cuartilla =	15
Quintilla =	30

Cantidades en gramos	
Wa =	13119.69
Peso fibra =	13.12
Peso asfalto =	867.19
Polvo de Piedra =	7215.832
Cuartilla =	1967.954
Quintilla =	3935.908

Peso de agregado y porcentajes con fibra		Cantidades en gramos
Wa más fibra =	13132.81	
Polvo de Piedra =	54.450	7150.82
Cuartilla =	14.99	1967.95
Quintilla =	29.97	3935.91

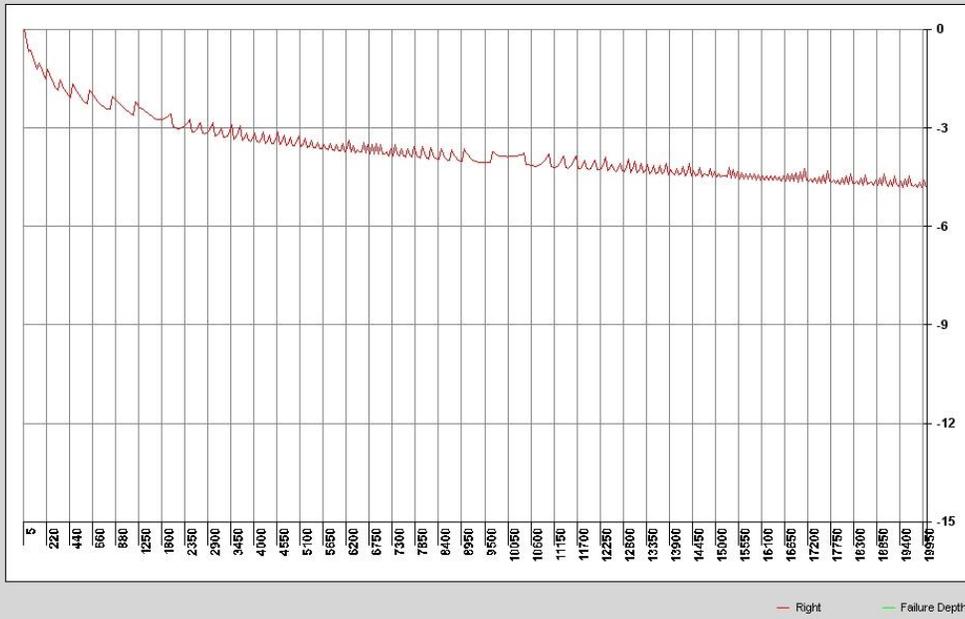




Análisis granulométrico de la fibra de bambú							Especificación	
Malla	Wret+ban (g)	Wret (g)	% Retenido	% Ret. Acom.	Pasando (g)	% Pasando	Mínimo %	Máximo%
							100	100
#4	0	0	0	0	75.5	100	95	100
#8	292.75	20.37	26.732	26.732	56.7	73.268	80	100
#16	293.39	21.01	27.572	54.304	35.58	45.696	50	85
#30	292.19	19.81	25.997	80.302	15.58	19.698	25	60
#50	282.4	10.02	13.150	93.451	5.4	6.549	10	30
#100	275.83	3.45	4.528	97.979	1.89	2.021	2	10
#200	273.92	1.54	2.021	100.0	0.28	0.000	0	4
Charola					0.000	0.000	0	0
Σ		76.2						

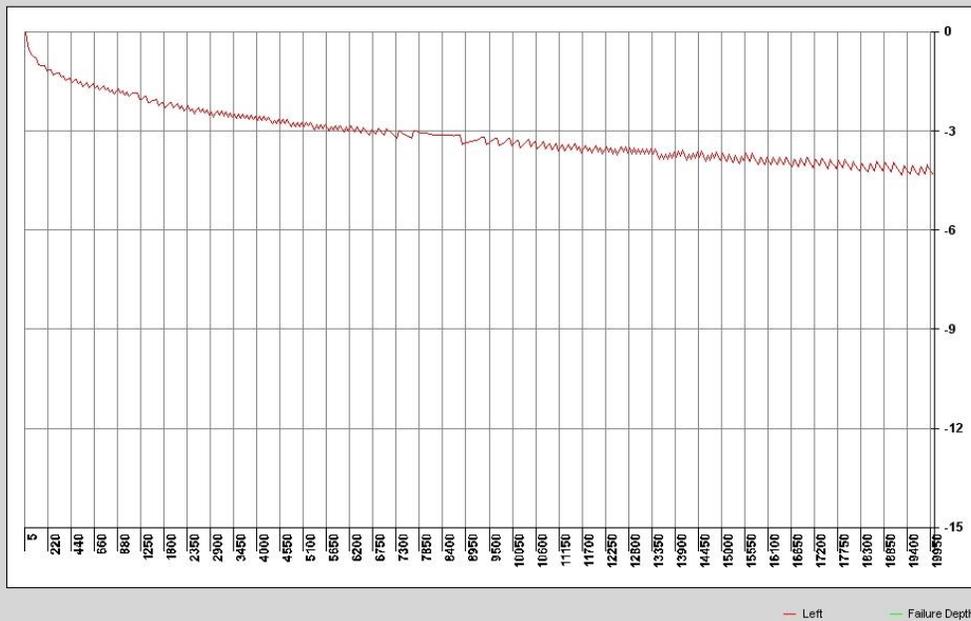
PMW WheelTracking Test

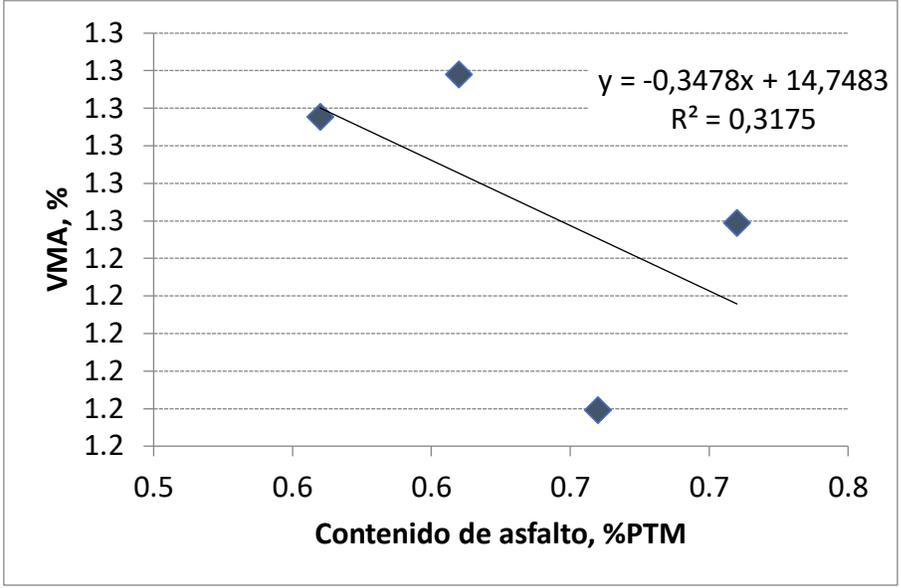
Test Number: 59 Project Name: Angle Tesis Start Date: 9/3/2019 Test Point: 8



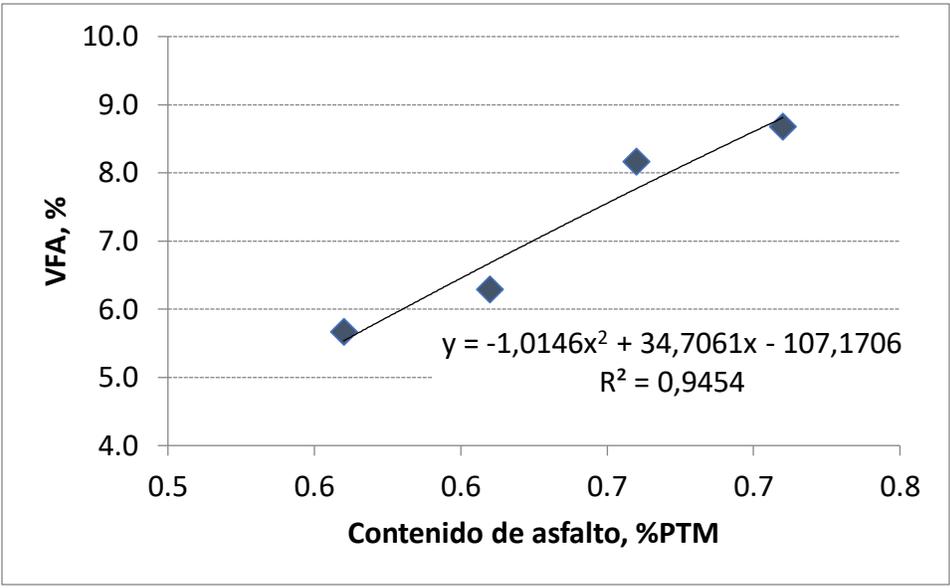
PMW WheelTracking Test

Test Number: 59 Project Name: Angle Tesis Start Date: 9/3/2019 Test Point: 9





14.9 % VMA



73.3 % VFA

Anexos

Anexo 1: Agregados con requerimientos SUPERPAVE para pavimentos bituminosos. CR-2010.

Anexo 2: Tabla 703-14. Requerimiento de caras fracturadas en el agregado. CR-2010.

Anexo 3. Requerimiento de Superpave para los agregados. Contenido de vacíos en el agregado fino. CR-2010.

Anexo 4. Tabla N°2: Requerimientos físicos para los cementos asfálticos AC-10, AC-20 y AC-30. Apéndice 2.2.

703.17 Agregados con requerimientos SUPERPAVE para pavimentos bituminosos.

Los agregados deben ser duros, durables, partículas provenientes de piedra o grava quebradas que cumplan con las siguientes especificaciones:

- | | |
|--|--------------|
| (a) Abrasión de los Ángeles, AASHTO T 96 | 35 % máx. |
| (b) Pérdida por disgregabilidad (sanidad) en sulfato de sodio (5 ciclos), AASHTO T 104 | 12 % máx. |
| (c) Índice de durabilidad (grueso y fino) | 35 mín. |
| (d) Caras fracturadas, ASTM D 5821 | Tabla 703-14 |
| (e) Angularidad del agregado fino, AASHTO T 304 | Tabla 703-15 |
| (f) Partículas con caras planas y alargadas, proporción de 3:1, ASTM D 4791 | Tabla 703-15 |
| (g) Equivalente de arena, AASHTO T 176 | Tabla 703-15 |
| (h) Granulometría. Ver Tabla 703-16. Tamaño, grado y las proporciones de mezcla de las fracciones de los agregados, debe quedar dentro de los puntos de control para el tamaño nominal de los agregados de acuerdo a las pruebas que establece AASHTO T 27 y T 11. | |

Tabla 703-14

Requerimiento de caras fracturadas en el agregado

Tránsito, en 10 ⁶ ESALs	Caras fracturadas (1 cara % mín. / 2 caras % mín)	
	Profundidad desde la superficie	
	≤ 100 mm	> 100 mm
< 0,3	55/-	- / -
0,3 a < 1	65/-	- / -
1 a < 3	75/-	50/-
3 a < 10	85 / 80	60/-
10 a < 30	95 / 90	80 / 75
30 a < 100	100 / 100	95 / 90
> 100	100 / 100	100 / 100

Tabla 703-15

Requerimientos de Superpave para los agregados

Tránsito, en 10 ⁶ ESALs	Contenido de vacíos en el agregado fino sin compactar (% mínimo)		Equivalente de arena, (% mínimo)	Caras planas y alargadas (% máx.) Proporción 3:1
	Profundidad desde la superficie			
	≤ 100 mm	> 100 mm		
< 3	40	40	40	10
3 a < 10	45	40	45	
10 a < 30	45	40	45	
≥ 30	45	45	50	

Tabla No. 2: Requerimientos físicos para los cementos asfálticos AC-10, AC-20 y AC-30.

Ensayos	Grado de viscosidad absoluta a 60°C		
	AC - 10	AC - 20	AC - 30
Viscosidad absoluta a 60°C	800 – 1200 P	1600 – 2400 P	2400 – 3600 P
Viscosidad cinemática a 135°C	Mín. 250 cSt	Mín. 300 cSt	Mín. 350 cSt
Penetración a 25°C	Mín. 80 (1/100 cm)	Mín. 60 (1/100 cm)	Mín. 50 (1/100 cm)
Punto de inflamación	Mín. 219°C	Mín. 232°C	Mín. 232°C
Solubilidad en tricloroetileno	Mín. 99°C	Mín. 99°C	Mín. 99°C
Índice de susceptibilidad térmica (VTS)	3.3 – 3.9	3.3 – 3.9	3.3 – 3.9
Ensayos en el residuo del ensayo de calentamiento en película delgada (TFO)			
Pérdida de masa	Máx. 0.50 %	Máx. 0.50 %	Máx. 0.50 %
Ductilidad a 25°C	Mín. 75 cm	Mín. 50 cm	Mín. 40 cm
Relación de viscosidades absolutas a 60°C (original / envejecido en TFO)	Máx. 3.00	Máx. 3.00	Máx. 3.00

Referencias

ASTM International. (2015). *ASTM D6925-15 Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Asphalt Mix Specimens by Means of the Superpave Gyrotory Compactor*. Retrieved from <https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.1520/D6925-15>

The American Association of State Highway and Transportation Officials. (2017). AASHTO M323-17 Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design. Retrieved from <https://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?3PC+AASHTO+AASHTO M323-17+en-US>

The American Association of State Highway and Transportation Officials. (2017). AASHTO R35-17 Standard Practice for Superpave Volumetric Design for Asphalt Mixtures. Retrieved from <https://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?3PC+AASHTO+AASHTO R35-17+en-US>

The American Association of State Highway and Transportation Officials. (2018). AASHTO T283-14(2018) Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage. Retrieved from [https://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?3PC+AASHTO+AASHTO T283-14\(2018\)+en-US](https://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?3PC+AASHTO+AASHTO T283-14(2018)+en-US)

The American Association of State Highway and Transportation Officials. (2017). AASHTO T321-17 Standard Method of Test for Determining the

Fatigue Life of Compacted Asphalt Mixtures Subjected to Repeated Flexural Bending. Retrieved from <https://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?3PC+AASHTO+AASHTO T321-17+en-US>

The American Association of State Highway and Transportation Officials. (2019). AASHTO T324-19 Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Asphalt Mixtures. Retrieved from <https://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?3PC+AASHTO+AASHTO T324-19+en-US>

Asphalt Institute. (2001). Capítulo III: Diseño de mezclas asfálticas. In Asphalt Institute (Ed.), (pp. 57)

Cáceres. *Capítulo III: Desarrollo del método de diseño Superpave*. Universidad de las Américas Puebla:

Castro, P. *Concreto asfáltico*. Material curso Pavimentos. Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica:

Castro, P. *Diseño de mezcla SUPERPAVE para mezcla asfáltica en caliente*. Material curso Pavimentos. Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica:

Castro, P. *Ligantes asfálticos*. Material curso Pavimentos. Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica:

- Castro, P. (2000). Deformación plástica en capas asfálticas: Roderas y corrugaciones [Abstract]. (Infraestructura Vial) 32.
- Elizondo, F., Badilla, G., Bonilla, E., & Rodríguez, E. (2013). In Lanamme UCR (Ed.), *Zonificación climática de costa rica para la determinación del tipo de ligante asfáltico clasificado por grado de desempeño (PG)*. San José, Costa Rica.: Recuperado de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/742/Zonificaci%C3%B3n%20clim%C3%A1tica%20de%20Costa%20Rica%20para%20la%20determinaci%C3%B3n%20del%20tipo%20de%20ligante%20asf%C3%A1tico%20clasificado%20por%20grado%20de%20desempe%C3%B1o%20PG.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Flores, M., Delgado, H., Garnica, P., & García, E. (2013). *Determinación de la resistencia a la fatiga en mezclas asfálticas*. (). México: Retrieved from http://www.amaac.org.mx/archivos/eventos/8cma_2013/mezclas_asfalticas/mezclas05.pdf
- Gálvez, D. (2015). *Adherencia superficial*. Dirección de Vialidad Laboratorio Nacional: Recuperado de http://www.vialidad.cl/areasdevialidad/laboratorio_nacional/MaterialCursos/Adherencia%20Superficial.pdf
- Granados, D. (2012). *Evaluación del daño por humedad en mezclas asfálticas típicas en costa rica, mediante el ensayo de la rueda de Hamburgo*. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica.
- Jiménez, C. (2016). *Análisis comparativo de la estabilidad y la deformación del pavimento asfáltico con fibras celulosas y pavimento asfáltico tradicional* Retrieved from <http://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/25151>
- Lanamme UCR. (2009). *Análisis de los porcentajes de vacíos de la mezcla asfáltica para la concesión de la carretera san José-Caldera*. (No. UI-PE-04-09). San José, Costa Rica: Retrieved from <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/sitio-nuevo/images/productos-PITRA/Asesorias/Asesorias%20Vaci%C3%81os%20San%20Jose%20Caldera.pdf>
- Lanamme UCR. (2019). *Catálogo de ensayos para mezclas asfálticas*. San José, Costa Rica: Recuperado de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/1624/catalogo%20mezclas.pdf>
- Lanamme UCR. (s.f). *Método de ensayo para la determinación de la vida de fatiga de mezclas asfálticas en caliente compactadas (MAC) sujetas a carga dinámica a flexo-compresión*. (Método para realizar el ensayo de fatiga en mezclas asfálticas). San José, Costa Rica:
- López, D., & Puma, C. (2017). *Caracterización de mezclas asfálticas en caliente elaboradas con cemento asfáltico modificado con polímeros SBS y RET, mediante la determinación del módulo de rigidez* (Universidad Central del Ecuador). Retrieved from file:///C:/Users/Usuario/Downloads/T-UCE-0011-IC324-2017.pdf
- Lucidchart. *Plantillas para documentos* [computer software]
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (Sección 401.) *descripción mezcla asfáltica en caliente*. San José, Costa Rica:
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (2010). In Lanamme UCR-MOPT (Ed.), *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes CR-2010*. San José, Costa Rica:
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (2017). (Sección 402.) *DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA POR EL MÉTODO SUPERPAVE*. San José, Costa Rica:
- Salazar, J. (2008). *Evaluación de la factibilidad del uso en costa rica de polímeros modificantes de asfalto incorporados en planta*. (No. UI-

01-07). San José, Costa Rica: Retrieved from <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/1464/UI-01-07%20Evaluaci%C3%B3n%20de%20la%20Factibilidad%20del%20uso%20en%20Costa%20Rica%20de%20pol%c3%admeros%20modificantes%20de%20asfalto%20incorporados.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Retana, M. (2019). *Proveedor fibra de bambú*. San José, Costa Rica:

Trujillo, Efraín & Trujillo, Eduardo & Montoya, Luis. (2007). *Estudio de las características físicas de haces de fibra de Guadua Angustifolia*. Scientia Et Technica. 1.

Unidad de Materiales y Pavimentos Lanamme UCR. (2015). *Metodología de diseño de mezclas asfálticas en caliente para costa rica*. (No. LM-PI-UMP-026-R1). San José, Costa Rica. (Diseño Mezcla, Desempeño, Superpave)

Zúñiga, R., & Aguila, M. *Estudio y evaluación preliminar de la mezcla Stone Mastic Asphalt mediante un tramo de prueba*. Universidad Andrés Bello: