



Infraestructura Vial

Número 42 | Volumen 23 | ISSN 2215-3705



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

LanammeUCR

Laboratorio Nacional de
Materiales y Modelos Estructurales

DEFINICIÓN DE LA REVISTA

La revista *Infraestructura Vial* pertenece al Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR). Fue creada en el año 1999, su primer número se publicó en diciembre de ese mismo año.

La revista publica artículos de carácter técnico e investigaciones realizadas en el área de la infraestructura vial. También incluye otros contenidos relacionados con nuevas tecnologías que se aplican en la ingeniería de carreteras y para el mejoramiento del aprendizaje continuo. Además, divulga artículos de opinión que permiten compartir las experiencias de los ingenieros de carreteras en el mundo.

REQUERIMIENTOS PARA PUBLICACIÓN DE ARTÍCULOS

1. Los artículos deben corresponder a investigaciones o estudios originales, casos de aplicación de nuevas tecnologías y artículos de opinión, en el campo de la infraestructura vial, ingeniería de transportes y temas afines.
2. El artículo debe presentarse en un documento de Microsoft Word y PDF, siguiendo los lineamientos definidos en el siguiente enlace: <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/normas-para-presentacion-de-articulos.pdf>
3. El título del artículo debe presentarse tanto en español como en inglés (máximo 85 caracteres, cada uno).
4. Se debe presentar un resumen del artículo en español y en inglés (máximo 300 palabras, cada uno).
5. Es necesario presentar al menos 4 palabras clave en español y 4 en inglés, que identifiquen el artículo para una posible búsqueda en un sistema de archivo.
6. Los artículos que corresponden a investigaciones deben poseer: introducción, objetivos, metodología, desarrollo, análisis de resultados y conclusiones. En caso de que no aplique este formato, el autor debe especificar en una introducción a qué tipo de artículo corresponde.
7. La extensión máxima del artículo es de 12 páginas, incluyendo tablas y figuras.

REVISIÓN DE ARTÍCULOS

El procedimiento que se utiliza para seleccionar los artículos que se publican es el siguiente:

1. Entrega de los artículos a la dirección ejecutiva, para revisar si cumplen con los requisitos mínimos de publicación.
2. Cumplido el punto anterior se someten a una preselección por parte del comité director de la revista.
3. Los artículos preseleccionados son revisados por al menos dos de los miembros del consejo editorial.
4. Por último se envían a evaluadores externos, especialistas en el tema.
5. Aprobadas estas etapas se incluye en la lista de artículos que se van a publicar.

En cada etapa se van eliminando los artículos que no cumplan con los requerimientos necesarios para su publicación. En caso de que requieran alguna modificación, se le informará al autor para que tenga la oportunidad de corregirla y continuar el proceso. Si el artículo es rechazado o aprobado para su publicación se le informa de inmediato al autor respectivo.

DIRECTORA GENERAL

Ing. Ana Luisa Elizondo Salas, M.Sc.
LanammeUCR
ana.elizondosalas@ucr.ac.cr

EDITORA

Quím. Alejandra Baldi, M.Sc.
LanammeUCR
alejandra.baldi@ucr.ac.cr

MAQUETACIÓN Y DIAGRAMACIÓN

Licda. Daniela Martínez Ortiz, LanammeUCR
daniela.martinezortiz@ucr.ac.cr

CONTROL DE CALIDAD

Óscar Rodríguez Quintana, LanammeUCR
oscar.rodriguezquintana@ucr.ac.cr

CONSEJO EDITORIAL

Dr. Jose Pablo Aguiar Moya
Universidad de Costa Rica, EIC

Dr. Jonathan Agüero Valverde
Universidad de Costa Rica, ProDus

Dr. Adrián Ricardo Archilla
Universidad de Hawaii, Estados Unidos

Dr. Fabricio Leiva Villacorta
Universidad de Auburn, Estados Unidos

M.Sc. Javier Zamora Rojas
Universidad de Costa Rica, LanammeUCR

FOTOGRAFÍA DE LA PORTADA:

Florian Steciuk

SUSCRIPCIÓN

*Ingrese sus datos personales en el sitio
oficial de la revista:*
<http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/vial>



EN ESTA EDICIÓN

EQUIPO PARA LA DETERMINACIÓN DE TIEMPOS DE ALMACENAMIENTO DE ASFALTO MODIFICADO A CONDICIONES CRÍTICAS

Equipment to determine storage times of modified asphalts at critical conditions

María Fernanda Abarca Jiménez Rafael Ernesto Villegas Villegas

01

EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON RESIDUOS DE PVC TIPO BLÍSTER

Performance evaluation of modified asphalt mix with blister PVC waste

Nicole Cajina Cruz Edgar Camacho Garita Alejandra Baldi José Pablo Aguiar Moya

13

MEDICIÓN DE PERCEPCIÓN DE LA CALIDAD DE VIDA CON RESPECTO A LA SATISFACCIÓN CON EL TRANSPORTE PÚBLICO EN COSTA RICA

Measurement of quality-of-life perception regarding satisfaction with public transport in Costa Rica

Andrea Zúñiga López Jaime Allen

23

MEJORAS AL ENSAYO DE RESISTENCIA DEL ENLACE ADHESIVO DE LIGANTE ASFÁLTICO EN MATERIALES PARA PAVIMENTOS

Improving reliability in the bitumen bond strength test on pavement materials

Daybis Tencio González Alejandra Baldi José Pablo Aguiar Moya Bárbara Miranda Morales

35

ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO MECÁNICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRA DE BAMBÚ

Mechanical performance analysis of an asphalt mixture modified with bamboo fibres

Angie Jiménez

44

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS PAVIMENTOS RÍGIDOS EN COSTA RICA

Performance evaluation of rigid pavements in Costa Rica

María Paula Montes de Oca Hidalgo Wendy Sequeira Rojas Tania Ávila Esquivel José Pablo Aguiar Moya

53

EFFECTO DE LAS DISTRACCIONES POR EL USO DEL TELÉFONO CELULAR DURANTE LA CONDUCCIÓN

Effect of distractions due to the use of the cell phone while driving

Oliver Alexander Tábor Cruz

61

EFFECTO DE POLÍMEROS Y ACEITE DE COCINA EN EL RANGO DE DESEMPEÑO DEL ASFALTO

Effect of polymers and waste cooking oil on asphalt performance range

Michelle Múnkel Jiménez Alejandra Baldi José Pablo Aguiar Moya

Rafael Ernesto Villegas Villegas Natalia Hernández Montero

71

AGRADECIMIENTO A EDITORES

Acknowledgments to editors

Equipo editorial de la Revista Infraestructura Vial (RIV) del Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

82

ESTA REVISTA ES PRODUCIDA POR:



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

PITRA
Programa de
Infraestructura
del Transporte

ESTA REVISTA ESTÁ INDEXADA EN:



UCRIndex



DOAJ

DIRECTORY OF
OPEN ACCESS
JOURNALS



Bibliografía Latinoamericana



Red Iberoamericana
de Innovación y Conocimiento Científico

Esta es una publicación del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR), ubicado en la Ciudad de la Investigación, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

Tel.: (506) 2511-2500, Fax: (506) 2511-4440, Código Postal: 11501-2060 San José, correo: revistaiv.lanamme@ucr.ac.cr

Los comentarios de los artículos firmados son responsabilidad de sus autores. La revista Infraestructura Vial y el LanammeUCR no necesariamente comparten los criterios expresados en ellos.

Equipo para la determinación de tiempos de almacenamiento de asfalto modificado a condiciones críticas

Equipment to determine storage times of modified asphalts at critical conditions

María Fernanda Abarca Jiménez

Asistente de Investigación
Unidad de Investigación en Infraestructura y Transporte
LANAMME, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica
fernanda.abarca@ucr.ac.cr

Rafael Ernesto Villegas Villegas

Investigador
Unidad de Investigación en Infraestructura y Transporte
LANAMME, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica
rafael.villegas@ucr.ac.cr

Fecha de recepción: 15 de enero de 2021 / **Fecha de aprobación:** 06 de mayo de 2021

RESUMEN

Teniendo el objetivo de estudiar el comportamiento del asfalto modificado durante su almacenamiento, se diseña un tanque para tal propósito dimensionado para su uso en laboratorio. El diseño del tanque pretende mantener la escala dimensional similar a las presentes en los tanques utilizados en la industria para este fin y, a la vez, propiciar la separación de sus fases para analizar el almacenamiento bajo condiciones críticas. Por este motivo, se realiza una comparativa de tanques disponibles comercialmente y sus relaciones dimensionales, además de un estudio sobre las teorías de la sedimentación y separaciones de fase. El principal objetivo de este documento es el diseño mecánico de un tanque de almacenamiento elaborable con materiales de fácil obtención, que permite la toma de muestras necesarias para estudiar el almacenamiento del asfalto modificado a condiciones críticas. Paralelamente, se establecen las bases para el planteamiento de un modelo que aporte en la determinación de tiempos de almacenamiento máximo con la pretensión de verificar la calidad del diseño del asfalto modificado.

Palabras clave: Almacenamiento, asfalto modificado, condiciones críticas de almacenamiento, diseño mecánico de tanques de almacenamiento, separación de fases, tiempo de almacenamiento.

ABSTRACT

This paper attempts to design a storage tank sized for laboratory use, aiming to study the stability of modified asphalt during storage. The tank design seeks to maintain similar dimensions to those of industrial tanks for asphalt storage. Also, it aims to promote phase separation to analyze the storage under critical conditions. For this reason, this research carries out a comparison of commercially available tanks and their dimensional ratios, as well as studying the theories of sedimentation and phase separation. The main objective of this document is to provide a mechanical design of a storage tank that can be manufactured with accessible materials, which allow to perform the necessary sampling to examine the stability of modified asphalt under critical conditions of storage. In addition, the document establishes bases for the approach of a model that contributes to the determination of maximum storage time. It pretends to verify the quality of the modified asphalt design.

Keywords: Critical storage conditions, mechanical design of storage tanks, modified asphalt, phase separation, storage, storage time.

INTRODUCCIÓN

En proyectos que implican la utilización de asfalto modificado cada detalle importa para obtener resultados duraderos que se adecúen a las condiciones de trabajo. Uno de los procesos intermedios al cual se debe prestar mucha atención es al almacenaje. Se sabe que, durante el tiempo de almacenamiento prolongado a altas temperaturas, las mezclas de asfalto con polímeros tienden a separarse en fases (Fu *et al.*, 2006).

Dicha tendencia hace que el tiempo y las condiciones a las cuales se almacena sean sumamente importantes de considerar, ya que las mismas son clave para asegurar las propiedades buscadas en el asfalto modificado. Sin embargo, conocer el comportamiento exacto de la mezcla en el tiempo es complicado y depende de varios factores.

El asfalto puede presentar un comportamiento viscoso, elástico o ambos según la temperatura. Lo anterior, considerando que no se trata solo de asfalto, sino que también entra en juego la presencia de un polímero, puede provocar en los ligantes modificados fenómenos de sedimentación o separación de fases debido a la diferencia de densidades. En consecuencia, resulta en el tanque un enriquecimiento en el ligante de polímeros en la parte inferior (si sedimentan) o en la superior (si floculan), según sus respectivas densidades (Angulo & Duarte, 2005). Según los mismos autores, Angulo y Duarte (2005), esto puede verse propiciado por una dispersión incorrecta del polímero o por incompatibilidad.

Se ha cuestionado sobre la reversibilidad del proceso de separación del asfalto durante el almacenamiento y se ha concluido que cada parámetro que afecta este fenómeno influye de manera diferente. En el estudio de Rassamdana (Rassamdana, Dabir, Nematy, Farhani, y Sahimi, 1996) se plantea el ejemplo de que, si la división es causada por un aumento en la presión, se puede considerar que el proceso es reversible. De manera contraria, si la separación se debe a efectos de la temperatura o la composición del crudo y el disolvente (en caso de precipitación específicamente), la influencia de estos es más fuerte, ocasionando que la separación sea, al menos, parcialmente reversible (Rassamdana, *et al.*, 1996).

Además, en otras investigaciones como la de Youtcheff y colaboradores, se ha observado la agitación como una práctica beneficiosa para evitar la separación de los componentes del modificado, sin embargo, puede implicar consecuencias como la degradación del asfalto modificado si es utilizada por mucho tiempo (Federal Highway Administration, 2005).

Todo lo anterior resulta de relevancia ya que una separación en la mezcla asfalto-polímero que resulte irreversible o parcialmente irreversible, implica que la calidad del asfalto se verá comprometida, y que pueda ocurrir una degradación en los componentes del material. Entonces, resulta importante considerar la influencia de los factores citados anteriormente durante el almacenamiento.

Tanques de Almacenamiento

Lo típico para almacenar asfalto modificado es la utilización de depósitos capaces de contener la mezcla en condiciones adecuadas para su posterior venta y/o uso. Estos depósitos o tanques de almacenamiento se fabrican en diferentes diseños, dimensiones y con distintas características según el material que van a contener. Usualmente incorporan dispositivos de agitación o calentamiento para mantener las propiedades del producto por más tiempo.

Generalmente, los tanques de almacenamiento se clasifican en cilíndricos horizontales (Figura 1) y cilíndricos verticales de fondo plano (Figura 2). Carreño y Hernández describen que los primeros son usualmente utilizados para contenidos de volúmenes bajos “debido a que presentan problemas por fallas de corte y flexión” (Carreño & Hernández, 2008, p. 10). En contraste, los segundos permiten almacenar cantidades más grandes a un bajo costo, con la limitante de que deben usarse a presiones atmosféricas o presiones internas relativamente pequeñas (Carreño & Hernández, 2008).

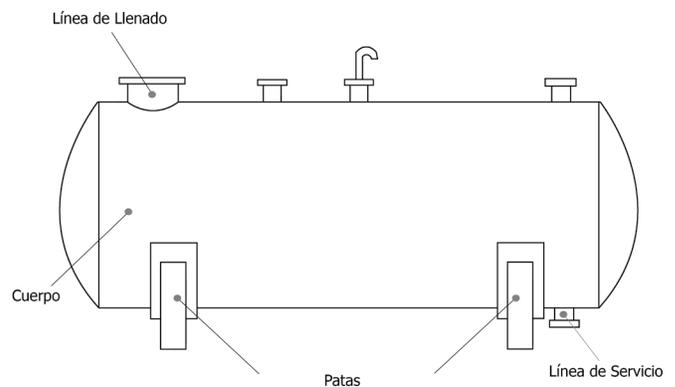


Figura 1. Tanque de almacenamiento horizontal con sus principales componentes señalados



Figura 2. Tanque vertical de fondo plano
(Foto cortesía de Daniel Murillo García)

El código API-650 es la base para el diseño, fabricación, montaje, pruebas y operación de los tanques de almacenamiento utilizados en la industria petrolera. Este código detalla las consideraciones y aspectos a cumplir por diseñadores, fabricantes, montadores y operadores (Carreño & Hernández, 2008). Aplica para tanques “grandes horizontales o verticales soldados en el campo, aéreos que operan a presiones en el espacio vapor menores a 1,5 psi y a temperaturas no superiores a 121 °C” (Carreño & Hernández, 2008, p. 49).

El material que usualmente se utiliza para la construcción de estos tanques es el acero. La selección de este dependerá del espesor a utilizar. Con respecto a la boquilla, los tanques pueden tener su boquilla inferior a nivel del fondo, abajo del tanque o en dirección a un sumidero (Carreño *et al.*, 2008). Lo anterior, debido a que la mayoría trabaja con descarga por gravedad.

Carreño *et al.* (2008) mencionan que, entre los datos que se deben conocer para la realización del diseño, los principales son los correspondientes al fluido a almacenar y las condiciones de trabajo. El volumen, temperatura, peso específico del líquido y corrosión permisible son parte de la información mínima necesaria para realizar el diseño.

En el mercado se puede encontrar gran variedad de fabricantes de tanques de almacenamiento de asfalto. Se manejan varios tipos, diferentes accesorios que benefician al modificado, un rango amplio de medidas y la posibilidad de adecuarse a las necesidades del cliente. A continuación, se presentan algunos tipos de tanque y sus características dimensionales, categorizados según su fabricante (Cuadro 1).

Como mencionan Spritzer & Guzey (2017a), los tanques tienen una caracterización la cual es referida como relación de aspecto. Para ésta se toma en cuenta la relación entre la altura y el radio. Las relaciones consideradas bajas corresponden a tanques anchos y las altas, a tanques delgados. Estos tanques se comportan de manera diferente en varios ámbitos.

Con base en lo mencionado por los mismos autores, los tanques anchos, o dicho de otra forma, tanques con radios grandes, almacenan más líquido por unidad de altura que los delgados. Por lo cual es de esperar que las fuerzas de inercia totales producidas en las paredes sean mayores a las que se tendrían en el caso de un tanque con menor radio y misma altura (Spritzer & Guzey, 2017a).

Separación de Partículas en Tanques

Existen tanques utilizados particularmente para sedimentar. La sedimentación es un proceso natural en el que las partículas más pesadas que el medio en el que se encuentran se separan por el efecto gravitacional, o dicho de otra forma se sedimentan en el fondo (Pérez, 2005).

El mismo autor indica que para el diseño de los tanques de sedimentación, se suele considerar de suma relevancia la definición del tamaño de partícula. La partícula se representa con su longitud característica, la cual es el radio o el diámetro según la ecuación que se utilice para el cálculo de su velocidad de separación. Con esta velocidad se establece un tiempo límite de sedimentación, dato que permite realizar diseños de tanques acordes a las posibilidades físicas y económicas de los proyectos (Pérez, 2005).

Cuando la separación entre partículas ocurre por efectos de la gravedad, la misma está regida por la Ley de Stokes. Esta ley establece que el deslizamiento de las partículas es limitado por las fuerzas de fricción entre fluidos (Revelo, 2015). De acuerdo con Revelo, la ecuación que expresa la velocidad de separación es la siguiente (Ecuación 1).

$$V_s = \frac{2g r^2 (\rho_p - \rho_l)}{9 \mu} \quad (1)$$

Donde,

V_s = velocidad de asentamiento (cm/s)

g = aceleración de la gravedad (cm/s²)

r = radio de la partícula (cm)

ρ_p = densidad del fluido pesado (g/cm³)

ρ_l = densidad del fluido liviano (g/cm³)

μ = viscosidad del medio continuo, cP

Cuadro 1. Comparación de tanques de almacenamiento

Tanque	Fabricante	Características Generales
Tanques Estacionarios	Hy-Way ¹	Capacidades desde 10 000 hasta 35 000 galones. Longitudes desde 21' 0" hasta 58' 0" Anchos desde 10' 10" hasta 11' 4" Alturas de 11' 4" hasta 11' 10"
Tanques Verticales		Capacidades desde 10 000 hasta 45 000 galones. Anchos desde 12' 0" hasta 14' 0" Alturas de 14' 9" hasta 46' 0"
Tanques Verticales	Heatec ²	Capacidades desde 10 000 hasta 35 000 galones. Diámetros de 11' 11" Alturas de 16' 11" hasta 50' 1"
Tanques Estacionarios Horizontales		Capacidades desde 10 000 hasta 40 000 galones. Longitudes desde 18' 4" hasta 66' 4" Anchos desde 11' 1-1/2" hasta 11' 6-1/2" Altura de 11' 11"
Tanques Horizontales	Highland Tank ³	Capacidades desde 185 hasta 70 000 galones. Diámetros desde 3' 2" hasta 13' Longitudes desde 3' 4" hasta 72'
Tanques Verticales		Capacidades desde 185 hasta 57 500 galones. Diámetros desde 3' 2" hasta 14' Alturas desde 3' 4" hasta 50'

¹Fuente: Gencor.com

²Fuente: Heatec.com

³Fuente: Can-am.net

Esta velocidad resulta útil para conocer acerca del posible comportamiento que presentarán los componentes del modificado ante la carencia de agitación en el tanque (caso crítico de almacenamiento). La ecuación anterior evidencia parámetros de peso para el diseño de asfaltos modificados, relacionando los asfaltos con los polímeros.

Diseño del Tanque

Inicialmente, se realiza un análisis de las relaciones altura/diámetro encontradas en las dimensiones de los

tanques comerciales, mostrado en el Cuadro 2. En el caso de los tanques horizontales, se realizó la variante de sacar las relaciones con la variable longitud en el numerador y, para el diámetro, la consideración especificada en la parte inferior del cuadro. Para efectos de comparación, se considera que las dimensiones dadas por el fabricante como ancho son homólogas al diámetro en el caso de los tanques verticales. Las dimensiones de los tanques fueron convertidas a metros previamente.

Cuadro 2. Relaciones dimensionales en tanques comerciales

	Fabricante	Altura/Diámetro	Dimensiones (m)
Tanques verticales	Hy-Way	1,23 – 3,28	Altura: 4,496 m hasta 14,021 m Diámetro: - Ancho: 3,658 m hasta 4,267 m
	Heatec	1,42 – 4,20	Altura: 5,156 m hasta 15,265 m Diámetro: 3,632 m Ancho: -
	Highland Tank	1,05 – 3,57	Altura: 1,016 m hasta 15,24 m Diámetro: 0,965 m hasta 4,267 m Ancho: -
Tanques Horizontales	Hy-Way	1,89 – 5,01 *	Altura: 3,454 m hasta 3,607 m Longitud: 6,401 m hasta 17,678 m Diámetro: - Ancho: 3,302 m hasta 3,454 m
	Heatec	1,60 – 5,68 *	Altura: 3,632 m Diámetro: - Longitud: 5,588 m hasta 20,218 m Ancho: 3,366 m hasta 3,492 m
	Highland Tank	1,05 – 5,54	Altura: - Diámetro: 0,965 m hasta 3,962 m Longitud: 1,016 m hasta 21,946 Ancho: -

*Para esta relación en tanques de diseño elíptico, se sacó un promedio entre el ancho y la altura de la base mínimos y máximos, para considerarlos como un rango de diámetros promedio.

(Hy-Way) Diámetro: 3,378 m hasta 3,530 m

(Heatec) Diámetro: 3,499 m hasta 3,562 m

Tal como es posible observar en el Cuadro 2, las relaciones dimensionales para el caso de los tanques de almacenamiento verticales oscilan entre 1,05 y 4,20. Paralelamente, las relaciones para tanques horizontales se encuentran en un rango entre 1,05 hasta 5,68. Ambas relaciones resultaron con

un mínimo igual y con valores máximos menores a 6,0. Para considerar la relación de aspecto de estos tanques comerciales tal y como lo señala la teoría de Spritzer y Guzey (2017a) se muestra el Cuadro 3.

Cuadro 3. Relaciones de aspecto de los tanques comerciales encontrados

Fabricante	Relaciones de Aspecto	
	Verticales Altura/Radio	Horizontales Longitud/Radio
Hy-Way	2,46 – 6,56	3,78 – 10,02
Heatec	2,84 – 8,40	3,20 – 11,36
Highland Tank	2,10 – 7,14	2,10 – 11,08

En otro artículo de Spritzer y Guzey (2017b), los autores señalan una distinción de 0,4 (anchos) y 2,0 (delgados). A partir de esto se puede decir que los tanques comerciales consultados son todos considerados delgados.

Se destaca el hecho de que se buscan condiciones críticas para obtener resultados para los peores escenarios, en este caso omitiendo la agitación en el producto durante su almacenamiento. El comportamiento del modificado en un tanque sin agitación puede presentar separación de fases, lo cual se puede relacionar con el comportamiento de una mezcla en almacenamiento que experimenta sedimentación. Ante este fenómeno es necesario mencionar que la acumulación de partículas separadas en ciertas secciones del fluido aumenta la concentración de las mismas, lo que resultará en una disminución de su velocidad de separación, razón por la que no puede estudiarse como una simple caída de sólidos en un líquido (Martín, Salcedo & Font, 2011). En la Figura 3 se muestra la sedimentación discontinua mediante un experimento en una probeta de vidrio.

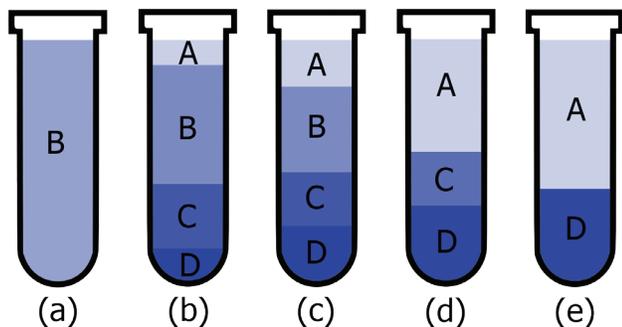


Figura 3. Fases de un experimento de sedimentación discontinua, desde los 0 segundos hasta su completa sedimentación. Se describen las secciones: B, concentración inicial; A, libre de sólidos; C, sólidos sedimentan sin contacto continuo; D, lodo concentrado (Basada en Martín et al., 2011)

La Figura 3.a representa el momento inicial del proceso, en la secuencia de imágenes se observan las fases con distintas concentraciones de la suspensión. El color más oscuro representa la zona con más concentración. Conforme transcurre el tiempo el espesor de las capas varía (Martín et al., 2011).

Con el fin de propiciar la concentración crítica para obtener espesores de capa más distinguibles entre sí, se considera más adecuado diseñar un tanque vertical delgado (alto y de diámetro pequeño). Al tener una concentración crítica, se entra en el rango de sedimentación impedida, rango en el cual las mismas partículas de la suspensión interactúan unas con otras, lo que disminuye la velocidad en que sedimentan (Martín et al., 2011). Dicho en otras palabras, las mismas partículas ralentizan su propia sedimentación. Por lo que un área de base pequeña evidenciará mejor las diferentes concentraciones mediante espesores de capas más gruesos que los que puedan ocurrir en tanques anchos u horizontales.

Ahora, para la construcción del tanque de almacenamiento para estudio, considerando diámetros de tubos comerciales de acero, se seleccionó un diámetro de base de 3 pulgadas (7,62 cm) y, acorde a la cantidad de asfalto modificado con el que se trabajará, una altura de 22 cm de volumen contenido. En lo que respecta a la altura real del tanque, la misma será de 25 cm, considerando un área libre y espacio para colocar una tapa. En conjunto con los soportes la altura total del tanque de almacenamiento diseñado es de 35,15 cm.

La cantidad total de asfalto con la cual se contará es de 1 galón (3,78541 L). Este se repartirá hasta tener tres tanques de almacenamiento a escala con un litro de asfalto modificado cada uno.

Evaluando las relaciones del tanque diseñado para trabajar a nivel de laboratorio se obtiene la información detallada en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Relaciones de tanque diseñado para trabajo en laboratorio

Dimensiones	Altura/Radio	Altura/Diámetro
Diámetro: 0,0762 m		
Altura: 0,25 m	6,56	3,28
Capacidad: 0,001 m ³		

Con las relaciones obtenidas en el Cuadro 4 se observa que la relación de altura entre el diámetro está dentro del rango que cumplen los tanques comerciales verticales, es decir entre 1,05 a 4,20. La relación de aspecto es mayor a 2, por lo que se trata de un tanque delgado, acorde a lo buscado para propiciar una buena distinción entre las capas al separarse.

Para la toma de muestras en el diseño se instalan tres válvulas. Estas son colocadas a los tres niveles de interés para el presente estudio, los cuales son: al tope del volumen contenido, a la mitad y una inferior de la cual se tomarán las muestras del fondo. Se eligen válvulas de $\frac{1}{4}$ " tipo llave italiana, por su diámetro pequeño, cuyo volumen a obtener alcanza para las muestras a estudiar y por su simpleza de uso al momento de recolectar los especímenes.

Se trabaja con acero inoxidable debido a su resistencia al calor y a la corrosión, así como su facilidad de limpieza. La utilización de un tubo y válvulas de medidas comerciales se debe a su fácil accesibilidad.

Debido al diseño, cabe mencionar que una base estable que dé un buen soporte es necesaria para poder mantener estos tanques adecuadamente en el horno y tomar las muestras sin inconvenientes. Esta base fue diseñada de planchuelas de hierro soldadas a un cinturón metálico de refuerzo rodeando al tubo.

El diseño propuesto del tanque de almacenamiento de asfalto modificado a escala se detalla en los planos adjuntos como anexos. Allí, se muestran las cotas dimensionales y ciertas especificaciones, con el propósito de detallar ciertos aspectos relevantes de diseño. La vista del tanque que se propone en este documento se presenta en la Figura 4.

Una particularidad del tanque se encuentra en la toma de muestras inferior. Con el fin de sacar realmente lo que se encuentra en el fondo, la misma se ubicó saliendo de un agujero en el medio del fondo, direccionando el fluido por un conducto que se ajusta a un ángulo de 45° , tal como se puede observar en la Figura 5.

El principal interés radica en contrastar las diferencias que van a ir ocurriendo entre el asfalto modificado encontrado en la parte más alta del tanque y la más baja, considerando también el comportamiento al medio. Para las muestras a nivel superior, se utilizará una salida (válvula) colocada para que coincida lo mejor posible con lo que será el tope del volumen contenido, en este caso coincidiendo la parte superior del agujero de la válvula con los 22 centímetros que respectan al tope del volumen de muestra. La salida del medio tendrá su centro concéntrico a la mitad, lo que resulta en 11 centímetros de la altura del volumen de asfalto modificado contenido. Lo anterior se puede evidenciar más fácilmente en la Figura 6.



Figura 4. Tanque de almacenamiento de asfalto a escala para estudio de separación

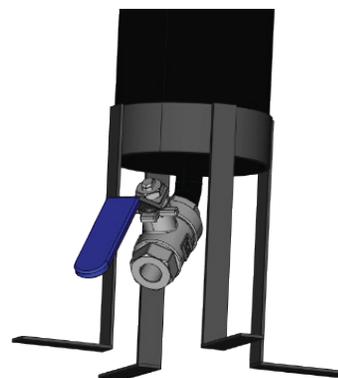


Figura 5. Diseño de toma de muestras inferior del tanque de almacenamiento de asfalto

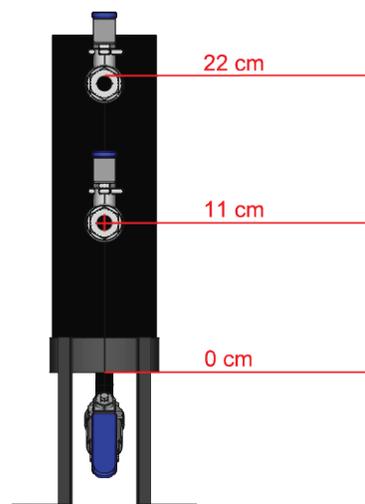


Figura 6. Ubicación de los agujeros superior y medio en el tanque

Propuesta para el estudio de separación de fases del asfalto modificado

Con respecto al análisis de datos, utilizando la ecuación 1, considerando las propiedades del asfalto a evaluar y las del polímero con el cual se modificará y de acuerdo con las temperaturas de almacenamiento, se puede calcular una velocidad a la cual las partículas se separarán en condiciones de reposo. Se debe tomar en cuenta, además, la profundidad que el asfalto modificado tendrá en el tanque diseñado. Así, se tendrá una idea de la composición que se espera encontrar después de los diferentes intervalos de tiempo.

Es recomendado que, según este análisis, el lector establezca los tiempos de toma de muestra y estudio del asfalto modificado, para que se adecúe más a las condiciones que su caso presente. Otra consideración referente a los tiempos a los cuales realizar las pruebas propuestas en la presente investigación, es la que aportan los tiempos utilizados en el artículo de Villegas-Villegas *et al.* (LanammeUCR, 2013). En este documento el ensayo se realizó considerando desde las 2 horas hasta las 196 que transcurrieron. También se considera pertinente rescatar que en esa investigación se obtuvo que aproximadamente después de las 24 horas ya todo el polímero se encontraba separado del asfalto.

Este estudio propone que se realice la comparación de muestras recolectadas en diferentes lapsos de tiempo por cada tanque para el análisis de la cinética del asfalto modificado. Para esto, se debe tomar la muestra inicial del asfalto recién modificado. Luego, distribuir la mezcla en los tres tanques de manera equitativa, identificarlos bien y colocarlos en el horno. Según los lapsos definidos para toma de muestras, tomar una muestra por nivel del tanque que corresponda (tres muestras en total) durante el tiempo transcurrido. Es importante que dicha acción se realice en el siguiente orden: muestra superior, muestra del medio y muestra inferior. En este orden se alterará mínimamente la mezcla. Al concluir, realizar un estudio de las viscosidades e identificar las diferencias entre las nueve muestras obtenidas, considerando sus concentraciones. Se deben analizar después por nivel y según el tiempo transcurrido desde el inicio de su almacenamiento.

El principal propósito del presente estudio radica en estudiar el comportamiento de asfaltos modificados durante su almacenamiento ya que, cuando este producto no tiene las características adecuadas, se repercute enormemente en los proyectos para los cuales es seleccionado y, durante el periodo de almacenamiento se corre el riesgo de que pierda

sus propiedades. Los autores del presente documento se han propuesto el objetivo de crear un modelo que brinde información con respecto a la calidad y la vida útil del modificado, determinando tiempos en los cuales, ante escenarios críticos, su composición no se vea comprometida con respecto a la del diseño original. Dicho proyecto se está trabajando en busca de aportar a los diseños de laboratorio y al control de calidad del proceso en planta, mediante la utilización de este diseño y de la propuesta de análisis de las muestras dada.

CONCLUSIONES

Como parte del objetivo principal del documento, se propone el estudio de la cinética del asfalto modificado, describiendo los pasos a seguir para la toma de muestras y los análisis a realizar. Siguiendo esta propuesta, se tienen los primeros pasos para el planteamiento de un modelo que pretende identificar el comportamiento que presenta un asfalto modificado durante su almacenamiento, con el fin de definir tiempos máximos de almacenaje del producto en los cuales sus propiedades de diseño no se vean comprometidas.

Siendo este estudio a condiciones críticas, se espera el peor de los escenarios, por lo que se recomienda que la última toma de muestras no se realice más allá del día en almacenamiento transcurrido, ya que no aportaría mucho al estudio. También se recuerda al lector que la ecuación que determina la velocidad de separación de partícula, presentada en este documento, puede ser utilizada para la selección de los tiempos de toma de muestras a definir para este ensayo.

Para propiciar la separación de fases y facilitar el estudio del fenómeno, se decidió diseñar un tanque delgado, es decir alto y de base pequeña. Sus relaciones dimensionales de altura/diámetro y altura/radio fueron 3,28 y 6,56, respectivamente. Estas relaciones están dentro del rango presente en los tanques comerciales y lo categorizan como un tanque delgado.

El tanque diseñado considera tres alturas diferentes para la toma de muestras con la intención de alterar mínimamente el volumen almacenado. Se construye con componentes de fácil obtención y dimensiones normalizadas, buscando asegurar su óptimo desempeño, así como simpleza al utilizar. Entre su diseño destaca la válvula inferior, la cual permite facilitar la salida del polímero por la misma en caso de que este sedimentara, asegurando una concentración real de la muestra y, por tanto, sus propiedades viscoelásticas.

Entre las recomendaciones para investigaciones relacionadas se tiene que, aunque la selección del tanque vertical para el estudio del caso crítico se debe a que su diseño acelera los tiempos de separación de las fases en el asfalto modificado, un estudio del comportamiento de este material en un tanque horizontal puede ser valioso. Siendo que, a nivel industrial, los tanques verticales son más usados para almacenar grandes cantidades del material, se destaca también que la representación y el estudio en un tanque no vertical va ligado más a la realidad del

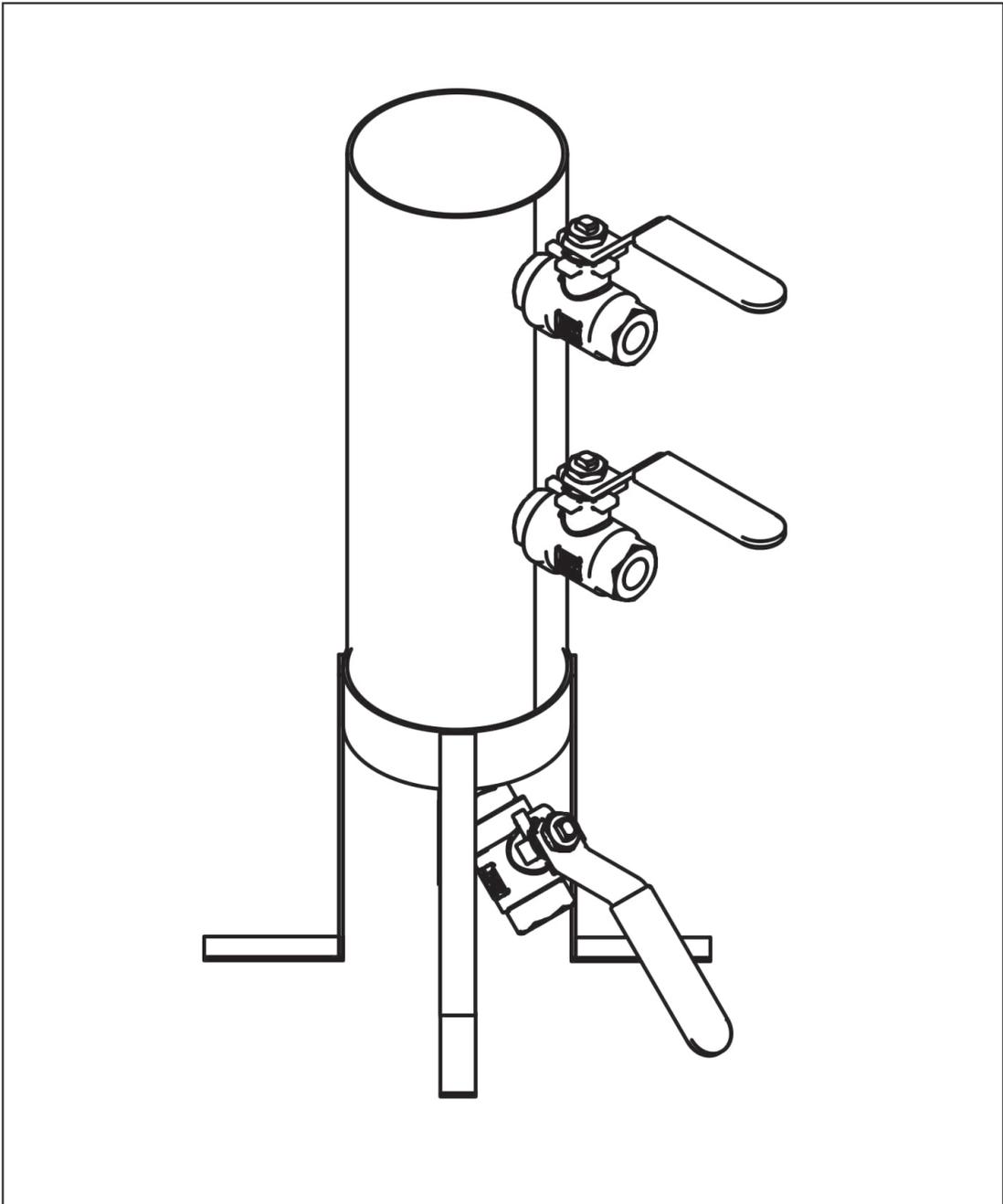
cómo se transporta y se almacena en pequeñas plantas, por lo que se podría estudiar el efecto de su tiempo de almacenado y traslado en el mismo, así como también evaluar la incidencia que puede tener en la separación de fases.

De ser posible, se podría también considerar el uso de software de simulación para el estudio del comportamiento del asfalto modificado en las condiciones a las cuales viaja el fluido en el tanque horizontal para su posterior utilización.

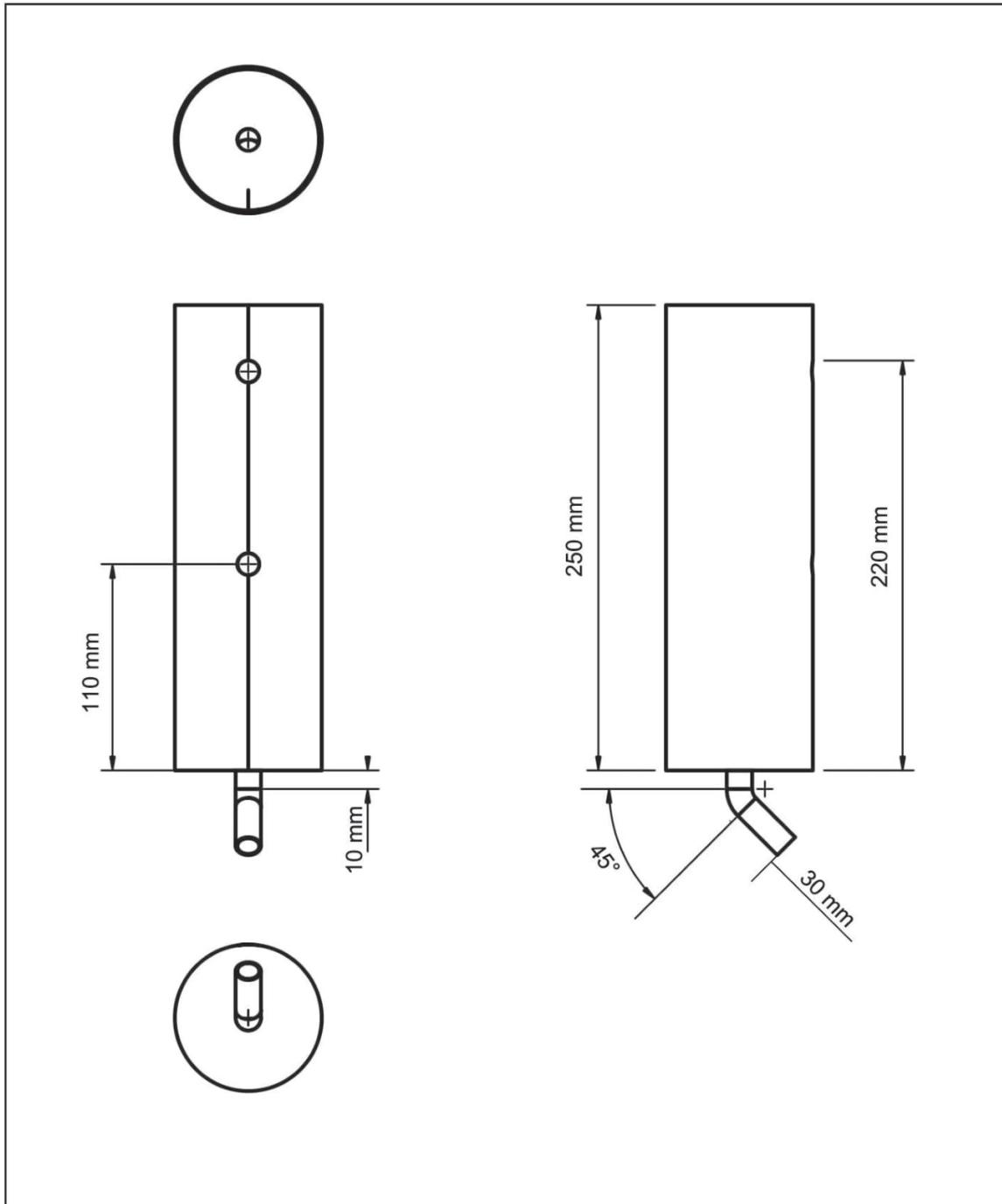
REFERENCIAS

- Angulo, R. y Duarte, J. (2005). *Modificación de un asfalto con caucho reciclado de llanta para su aplicación en pavimentos*. (Tesis de grado), Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- Carreño, G. y Hernández, J. (2008). *Diseño y Cálculo de un Tanque de Almacenamiento para Nafta con Diámetro de 70ft x 30ft de Altura Bajo la Norma API 650*. (Tesis de grado). Instituto Politécnico Nacional, México.
- Fu, H., Xie, L., Dou, D., Li, L., Yu, M., y Yao, S. (2006). Storage stability and compatibility of asphalt binder modified by SBS graft copolymer. *Construction and Building Materials*, 21(7), 1528–1533. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.03.008
- Heatec. (s.f.). *Asphalt Storage Tanks*. Chattanooga, EU.:Astec Industries Company. Recuperado el 09 de junio de 2020, de: <http://heatec.com/literature/brochures/HeatecAsphaltTanks.pdf>
- Highland Tank. (s.f.). *Petroleum & Chemical Storage Tanks*. Recuperado el 09 de junio de 2020, de: https://can-am.net/wp-content/uploads/petroleum_chemical_storage_tanks.pdf
- Hy-Way. (s.f.). *Liquid Storage Tanks*. Florida, EU.: GENCOR. Recuperado el 09 de junio de 2020, de: <https://www.gencor.com/wp-content/uploads/2019/04/Liquid-Storage-Tank-REV18.pdf>
- Martín, I., Salcedo, R., y Font, R. (2011). *Mecánica de Fluidos Tema 5. Operaciones separación sólido-fluido*. Universidad de Alicante.
- Pérez, L. (2005). *Teoría de la sedimentación*. Instituto de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Recuperado de: http://www.fi.uba.ar/archivos/institutos_teoria_sedimentacion.pdf
- Rassamdana, H., Dabir, B., Nematy, M., Farhani, M., y Sahimi, M. (1996). Asphalt flocculation and deposition: I. The onset of precipitation. *AIChE Journal*, 42(1), 10–22. doi:10.1002/aic.690420104
- Revelo, I. (2015). *Diseño de tanques, usados en la separación del agua de formación para el proceso de reinyección, estación Secoya*. (Tesis de grado). Universidad Central del Ecuador, Quito.
- Spritzer, J., y Guzey, S. (2017a). Review of API 650 Annex E: Design of large steel welded aboveground storage tanks excited by seismic loads. *Thin-Walled Structures*, 112, 41–65. doi:10.1016/j.tws.2016.11.013
- Spritzer, J. M., y Guzey, S. (2017b). Nonlinear numerical evaluation of large open-top aboveground steel welded liquid storage tanks excited by seismic loads. *Thin-Walled Structures*, 119, 662–676. doi:10.1016/j.tws.2017.07.017
- LanammeUCR. (2013). *Estabilidad al almacenamiento de asfaltos modificados en función del cambio en sus propiedades reológicas y su distribución de partículas según la microscopía de fuerza atómica*. Recuperado de: <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/537>
- Federal Highway Administration. (2005). *Evaluation of the laboratory asphalt stability test* (No. FHWA-HRT-04-111)

ANEXO. Tanque de almacenamiento de asfalto laboratorio.

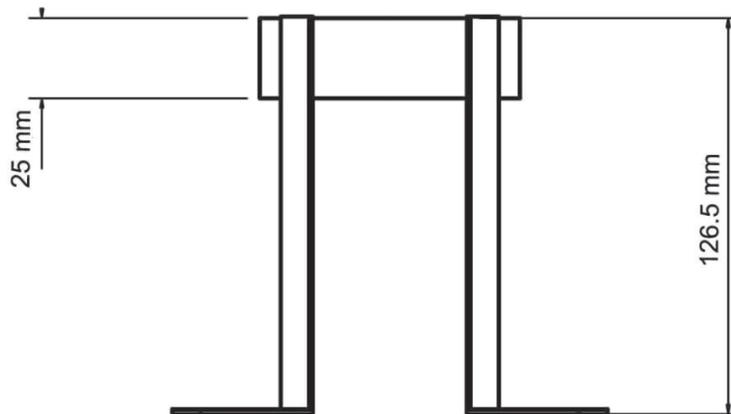
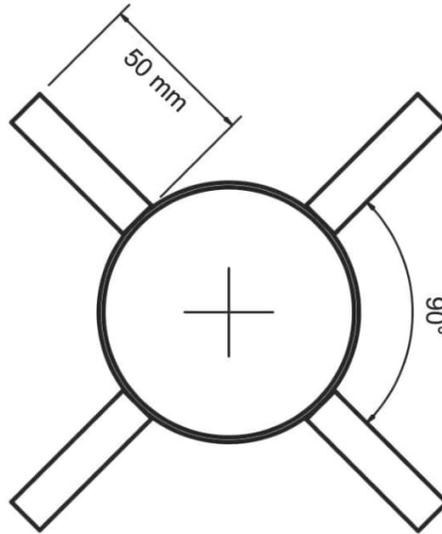


Created by: M. Fernanda Abarca J.		Title: Tanque Almacenamiento Asfalto Laboratorio		
Supplementary information: Materiales: Acero Inoxidable y Hierro		Size: A4	Sheet: 1/3	Scale: 1:2
Válvulas de llave italiana 1/4"		Part number: -		
		Drawing number: # 1		
		Date: 27/08/2020	Revision: REV A	



Created by: M. Fernanda Abarca J.	Title: Tanque Almacenamiento Asfalto Laboratorio		
Supplementary information: Material: Acero Inoxidable Base, tubo de 3 pulgadas. Agujeros y tubo inferior: 1/4 pulgada Codo 45° 1/4 pulgada	Size: A4	Sheet: 2 / 3	Scale: 1:3
	Part number: # 1		
	Drawing number: # 1		
	Date: 27/08/2020	Revision: REV A	





Created by: M. Fernanda Abarca J.		Title: Tanque Almacenamiento Asfalto Laboratorio		
Supplementary information: Material: Hierro		Size: A4	Sheet: 3/3	Scale: 1:2
Espesor minimo: 1.5 mm		Part number: # 2		
		Drawing number: # 1		
		Date: 31/08/2020	Revision: REV A	



Evaluación de desempeño de la mezcla asfáltica modificada con residuos de PVC tipo blíster

Performance evaluation of modified asphalt mix with blister PVC waste

Nicole Cajina Cruz

Asistente de investigación
 Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
 Universidad de Costa Rica, Costa Rica
nico.cajina@gmail.com

Alejandra Baldi

Investigadora
 Unidad de Investigación en Infraestructura y Transporte
 Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
 Universidad de Costa Rica, Costa Rica
alejandra.baldi@ucr.ac.cr

Edgar Camacho Garita

Jefe de Laboratorio de Ensayos a Escala Natural
 Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
 Universidad de Costa Rica, Costa Rica
edgar.camachogarita@ucr.ac.cr

José Pablo Aguiar Moya

Profesor asociado
 Escuela de Ingeniería Civil
 Universidad de Costa Rica, Costa Rica
jose.aguiar@ucr.ac.cr

Fecha de recepción: 17 de noviembre de 2020 / **Fecha de aprobación:** 08 de junio de 2021

RESUMEN

La modificación de mezclas asfálticas con polímeros de desecho brinda diversos beneficios. Entre los más importantes se encuentra la optimización del desempeño de la mezcla y el incremento en su vida útil. Esto sin considerar una reducción en la cantidad de residuos plásticos que no poseen un adecuado manejo de desecho.

El presente artículo muestra los resultados obtenidos de una investigación en donde se incorporó a una mezcla asfáltica un material de desecho tipo blíster (compuesto por polímeros como el PVC) por medio de la vía seca. Método en donde, previo a la adhesión del asfalto, se incorpora a la mezcla el modificante en sustitución de parte del agregado fino. Esto con el propósito de evaluar el desempeño de esta mezcla y comparar su comportamiento mecánico con el de una mezcla convencional.

Para la ejecución del proyecto se caracterizó el modificante (blíster) y se seleccionó el porcentaje adecuado para que el diseño de la mezcla modificada cumpliera con las especificaciones de la metodología Superpave. Con el diseño definido se realizaron los especímenes de ensayo y se evaluó su desempeño con las pruebas de: fatiga a cuatro puntos, rueda de Hamburgo, resistencia retenida a la tensión diametral y módulo dinámico. Como se identificó un adecuado comportamiento de la mezcla modificada, se evaluó su sensibilidad en una estructura de pavimento; identificando en qué capas de la mezcla asfáltica sería conveniente utilizarla.

Palabras clave: Mezcla asfáltica modificada, blíster, método seco, fatiga, deformación permanente, daño por humedad.

ABSTRACT

The modification of asphalt mix with waste polymers provides several benefits. Among the most important is the optimization of the performance of the mix and the increase in its useful life. Not to mention a reduction in the amount of plastic waste that does not have an adequate waste management.

This article shows the results obtained from a study where a blister type waste material (composed of polymers such as PVC) was incorporated into an asphalt mixture by the dry method. Method in which, prior to the asphalt adhesion, the modifier is incorporated to the mix in substitution of part of the fine aggregate. The purpose of the study was to evaluate the performance of the mix and compare its mechanical behavior with a conventional mix.

For the project development, the modifier was characterized, and the appropriate percentage was selected so that the design of the modified mixture would comply with Superpave requirements. With the optimized design the test specimens were prepared, and their performance was evaluated based on the following tests: four-point beam bending, Hamburg wheel, retained tensile strength (moisture damage) and dynamic modulus. Since an adequate behavior of the modified mix was observed, its sensitivity was evaluated in a pavement structure; identifying in which layers of the asphalt mix should the material be used.

Keywords: Modified asphaltic mix, blister, waste materials, fatigue, permanent deformation, moisture damage.

INTRODUCCIÓN

Las mezclas asfálticas pueden presentar problemas en su desempeño debido a las propiedades de los materiales utilizados en el diseño, a las cargas aplicadas y a las condiciones climáticas a las que se exponen. Por lo que, al realizar el diseño de una mezcla, se deben considerar estos factores y procurar que la mezcla sea capaz de soportar la deformación permanente, el agrietamiento a fatiga y el daño por humedad.

La deformación permanente se asocia a las elevadas cargas de tránsito y a las altas temperaturas que experimenta el pavimento durante su vida útil (Mendoza *et al.*, 2019). En cuanto al agrietamiento por fatiga, es provocado por las repeticiones de carga vehicular y suele presentarse en las áreas donde se perciben las mayores deflexiones con altas frecuencias, no se da una adecuada transferencia de las cargas hacia las capas inferiores del pavimento o no existe una óptima adherencia entre las capas (Muñoz, 2020).

Por otro lado, la disminución de adherencia entre el agregado y el asfalto producido por la presencia del agua en la mezcla se conoce como daño por humedad. Este deterioro puede manifestarse como una pérdida del recubrimiento del ligante asfáltico de la superficie del agregado (conocido como “*stripping*”) o como un desprendimiento gradual de los agregados de la superficie de la mezcla (conocido como “*raveling*”) (Caro y Álvarez, 2011).

Al no considerar los elementos anteriormente expuestos, se podrían presenciar deformaciones excesivas en la estructura. Cuando las mezclas asfálticas convencionales experimentan algún problema en su desempeño, es posible mitigarlo con metodologías alternativas de diseño, añadiendo aditivos o materiales de desecho. No obstante, al utilizar aditivos se pueden incrementar los costos de producción de la mezcla, por lo que emplear materiales de desecho se vuelve una opción más atractiva (Aguilar, Villegas, Loría y Salazar, 2013).

La incorporación de materiales de desecho se puede realizar por medio de la vía húmeda o la vía seca. El primer método, consiste en mezclar el material de desecho con el ligante asfáltico previo a su incorporación con los agregados y el segundo, en integrar el material con los agregados antes de añadir el asfalto (Rodríguez, 2016).

Rondón *et al.* (2009) mencionan que la modificación de mezclas asfálticas por medio de la adhesión de polímeros (producto de desechos industriales), es una técnica muy utilizada para mejorar propiedades mecánicas y reológicas de las mezclas convencionales, como lo son la susceptibilidad térmica, la rigidez y la resistencia al envejecimiento, a la deformación plástica y a la fatiga. Además de reducir el impacto ambiental que estos materiales generan (Rondón *et al.*, 2009).

Por otro lado, el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) indica que en Costa Rica se desechan aproximadamente 550 t de plástico diario y únicamente el 9 % es reciclado (Grajales, 2018). Además, aproximadamente el 10 % de estos desechos son incinerados lo que puede generar emisiones de gases tóxicos, como ocurre con el PVC que libera cloruro de hidrógeno (Carranza *et al.*, 2010).

Por lo que utilizar materiales derivados de los polímeros para la modificación de mezcla asfáltica, es una propuesta que promueve reutilizar este material y reducir la contaminación. Además, permite el cumplimiento de la Ley de la República de Costa Rica N°9828 (Asamblea Legislativa, 2020), la cual indica que al menos el 50 % del volumen total de los materiales utilizados en los proyectos de infraestructura vial del Estado, deben incluir algún porcentaje de materiales reutilizables.

En la investigación de Cajina (2020), se diseñó una mezcla asfáltica modificada con material de desecho tipo blíster por medio de la vía seca (sustitución de agregados). El blíster es un recipiente empleado en la industria farmacéutica, para almacenar medicamentos sólidos. Está compuesto por una lámina de polímero moldeada con cavidades, que son recubiertas con una lámina de aluminio.

Para la fabricación de los blísters se utilizan polímeros como polietileno (PE), el cloruro de polivinilideno (PVDC) y el cloruro de polivinilo (PVC), siendo este último el más empleado (Ávila, 2020). Ciertos de estos polímeros presentan dificultad para ser reciclados como el PVC que, por ejemplo, presenta contenidos elevados de cloro que dificultan el proceso de reciclaje (Camacho, 2013).

El objetivo principal del presente artículo es presentar un resumen de los hallazgos de la investigación de Cajina (2020), donde se evaluó el desempeño de una mezcla asfáltica modificada con material de desecho tipo blíster, a partir de una comparación del comportamiento mecánico de esta mezcla con el de una convencional.

METODOLOGÍA

El diseño de la mezcla asfáltica modificada se basó en el de una mezcla convencional (control o patrón). Esta última fue elaborada por el LanammeUCR previo a la investigación, y tanto el diseño, como los resultados de desempeño, fueron brindados por esta institución para la ejecución del proyecto, de manera que fueran utilizados como parámetro de comparación (Lanamme, 2017).

Los diseños se realizaron según la metodología de diseño Superpave, basado en las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica: los vacíos de la mezcla (Va), los vacíos en el agregado mineral (VMA) y los vacíos rellenos de asfalto (VFA).

El asfalto y el agregado utilizado en las mezclas asfálticas fue caracterizado previamente por el Lanamme UCR. El asfalto fue el AC-30, con un grado de desempeño (PG) de 64-22. Y la fuente de agregado fue la proveniente del quebrador Río Claro (Zona Sur de Costa Rica), con un tamaño máximo nominal de 12,5 mm.

En la Figura 1, se puede observar la curva granulométrica de los apilamientos definidos para el agregado de Río Claro siendo estos: agregado fino (2137-16), agregado intermedio A (2138-16), agregado intermedio B (2139-16) y agregado grueso (2140-16). Los números entre paréntesis indican la codificación asignada en el laboratorio a estas muestras.

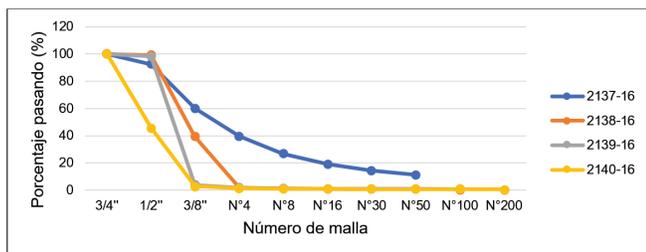


Figura 1. Granulometría de los agregados utilizados (Lanamme, 2016)



Figura 2. Material de desecho tipo blíster

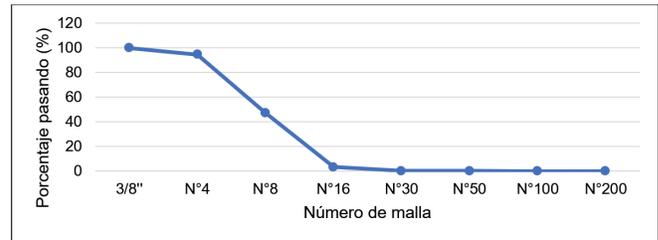


Figura 3. Granulometría del material de desecho tipo blíster

Para el caso de la mezcla asfáltica modificada, se incorporó el material de desecho tipo blíster (observar Figura 2), con una densidad de 1,401 g/mL, por medio de la vía seca. El 91,12 % de las partículas utilizadas en la mezcla, presentaron un tamaño entre la malla N°4 (4,75 mm) y la malla N°16 (1,18 mm) (ver Figura 3), permitiendo una mezcla uniforme y una trabajabilidad adecuada.

Como se mencionó anteriormente, la modificación se dio por medio de la vía seca, en la cual se sustituye parte del agregado fino por el material modificante. Por lo que, una vez caracterizado el material, se procedió a elegir el porcentaje óptimo del blíster, el cual se determinó según el porcentaje de diseño teórico de vacíos de la metodología Superpave (4±1) %. Para esto, se realizaron tres mezclas con distintos porcentajes de blíster (en peso de agregado seco): 0,5 %, 1,0 % y 1,5 %. Y cada una con un porcentaje de asfalto por peso total de la mezcla (% PTM) de 6,32 %; mismo porcentaje utilizado en el diseño de la mezcla control, lo que permitió una mejor comparación entre las mezclas.

En el Cuadro 1 se muestran las propiedades volumétricas de la mezcla control y de las tres mezclas modificadas, además del cumplimiento de las especificaciones de la metodología Superpave.

Cuadro 1. Propiedades volumétricas de la mezcla control y de las mezclas modificadas con 0,5 %, 1,0 % y 1,5 % de blíster

Propiedad	Control	0,5 %	1,0 %	1,5 %	Requisitos diseño Superpave (CR-2010)
PTM ¹ (%)	6,32	6,32	6,32	6,32	-
VTM ² (%)	4,00	4,30	4,40	5,30*	-
VMA ³ (%)	14,94	14,90	14,90	15,30	> 14
VFA ⁴ (%)	73,31	71,20	70,40	65,60	65 - 75
P/A ⁵	1,19	1,00	1,01	1,05	0,6 - 1,3

¹ PTM (%): Porcentaje de asfalto por peso total de la mezcla

² VTM (%): Porcentaje total de vacíos de la mezcla

³ VMA (%): Porcentaje de vacíos en el agregado mineral

⁴ VFA (%): Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto

⁵ P/A: Relación polvo asfalto

* No cumple con el porcentaje de diseño teórico de vacíos de la metodología Superpave (4±1) %

A pesar de que la mezcla con 0,5 % presentó un porcentaje de vacíos más cercano al teórico, se decidió utilizar el 1,0 % como porcentaje óptimo para el proyecto; ya que, además de cumplir con los requisitos de diseño de la metodología Superpave, permitió utilizar una mayor cantidad de modificante, dándole un mayor uso a este desecho. Mientras que, si se utilizaba un porcentaje más alto de modificante como lo es el 1,5 %, el volumen total de vacíos se alejaba del teórico.

Al tener el diseño establecido, se procedió a elaborar los especímenes de ensayo con el propósito de determinar su desempeño y comparar los resultados con los de la mezcla control. Los ensayos utilizados para realizar la comparación del comportamiento mecánico de las mezclas fueron: fatiga a flexotracción en cuatro puntos, rueda de Hamburgo, resistencia retenida a la tensión diametral y módulo dinámico.

Para realizar los especímenes, se calculó la cantidad de mezcla requerida, definiendo los pesos de cada material (agregado, asfalto y material de desecho). Conociendo esta información, fue necesario, previo a la elaboración de los especímenes, asegurarse que los agregados utilizados en la mezcla no presentaran humedad, por lo que se colocó el agregado de Río Claro al horno durante 16 h a una temperatura de 110 °C.

La mezcla se realizó en una mezcladora con agitación mecánica, la cual debía de llevarse a temperatura de mezclado con el propósito de evitar que la mezcla se adhiriera al equipo y se diera un desperdicio de material (proceso que se debió realizar para cada utensilio que estuviera en contacto con la mezcla). A la vez, se debió llevar el asfalto a 162 °C y los agregados a 180 °C, para asegurar que se mantuvieran en los rangos de temperatura de mezclado (160 °C).

La temperatura del agregado es mayor, contemplando la pérdida de temperatura al momento de sacarlos del horno y preparar el lote de la mezcla.

Una vez preparados los materiales se procedió a la elaboración de la mezcla modificada, colocando inicialmente el agregado grueso, seguido del material de desecho tipo blíster. Ambos materiales se mezclaron y, posteriormente, se incorporó el agregado fino. Al mezclarse estos agregados, se añadió el asfalto y se mezcló hasta lograr una mezcla homogénea. El tiempo de mezclado para la mezcla modificada no difirió con respecto al de la mezcla convencional.

Seguidamente, se curó la mezcla, método que consiste en colocar la mezcla a temperatura de compactación (152 °C) por 2 h para que el agregado finalice de absorber el asfalto. Al concluir este periodo, se procedió a compactar los especímenes. Para las muestras del ensayo de fatiga en cuatro puntos se requirió del equipo *Asphalt Shear Box Compactor* y para el módulo dinámico, rueda de Hamburgo y resistencia retenida a la tensión diametral, el Compactador Gíatorio Superpave (los moldes de estos equipos debían estar a temperatura de compactación).

Los especímenes se compactaron hasta alcanzar el porcentaje de vacíos requeridos. Siendo este de (7±1) % para los destinados a rueda de Hamburgo y resistencia retenida a la tensión diametral. Y de 8 % para los de módulo dinámico y fatiga a cuatro puntos; con el propósito de asegurar que al ser cortados (como se especifica en las normas) alcanzaran el (7±1) %. Al finalizar la elaboración de dichos especímenes se procedió a realizar la falla de las muestras. En la Figura 4 se muestran los especímenes realizados para cada ensayo.

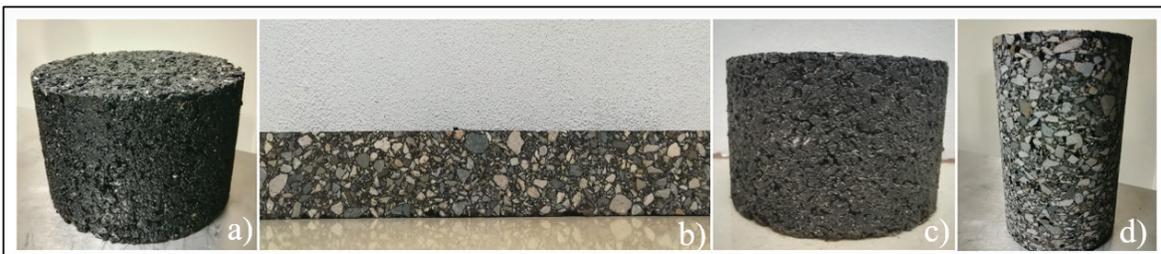


Figura 4. Especímenes elaborados con la mezcla asfáltica modificada para las pruebas de a) rueda de Hamburgo; b) fatiga a cuatro puntos; c) tensión diametral; d) módulo dinámico

RESULTADOS

Caracterización del modificante

Para asegurar una correcta incorporación del material modificante, es de suma importancia tener identificado la temperatura de degradación del material, ya que esta debe ser mayor a la temperatura de modificación y de mezclado (Villegas y Aguiar, 2013).

Debido a esto, se caracterizó el material con las pruebas de: espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), análisis termogravimétrico (TGA) y calorimetría de barrido diferencial (DSC).

El ensayo de FTIR permite caracterizar materiales por medio de espectros infrarrojos que muestran señales de absorción de la muestra analizada. Al analizar los espectros infrarrojos obtenidos de las muestras de blíster, se asoció con diferentes polímeros: polimetacrilato, cloruro de polivinilo (PVC) y polietileno de baja densidad (LDPE).

Por medio de la prueba del TGA, se logra determinar la estabilidad térmica del material y su temperatura de descomposición. Para el caso del blíster se pudo observar que antes de los 200 °C la muestra presenta pérdidas de humedad y de volátiles livianos; y entre los 200 °C y los 800 °C ocurre la mayor descomposición del material.

Por otro lado, la técnica del DSC permite identificar las transiciones térmicas (fusión, cristalización y transiciones vítreas) del material analizado. Con esta prueba se pudo identificar que el blíster experimenta transiciones vítreas entre

los 50 °C y los 100 °C. Y entre los 90 °C y los 120 °C, presenta un proceso endotérmico asociado a la fusión del material.

Con los resultados obtenidos se pudo determinar que a temperaturas de mezclado (160 °C) no se da la degradación del material, ni un cambio de fase que dificulte su mezclado, de esta forma se evalúa que el blíster sea apto para la modificación de mezcla asfáltica a las condiciones de mezclado y colocación.

Desempeño de la mezcla asfáltica modificada

Fatiga a cuatro puntos

La prueba de fatiga a cuatro puntos (AASHTO T 321-17) consiste en someter a flexotracción repetidamente una viga con el propósito de alcanzar la fatiga y determinar los ciclos de falla (AASHTO, 2017). Para la mezcla control y modificada, el ensayo se realizó a deformaciones controladas, 400 micro strain y 600 micro strain y a una temperatura de 20 °C. Esto con el propósito de verificar el cumplimiento de los requisitos de desempeño y aceptación de diseño, del Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes de Costa Rica (CR-2010), establecidos en la sección 402, donde se detallan las especificaciones para el diseño de una mezcla asfáltica utilizando el método Superpave.

En el Cuadro 2 se pueden observar los resultados promedio de la rigidez inicial, de la rigidez en el ciclo de falla y de los números de ciclos alcanzados para llegar a la falla, de ambas mezclas bajo las dos deformaciones unitarias analizadas (en el Cuadro se resaltan los valores más altos entre los resultados de la mezcla control y la modificada para cada estado de deformación).

Cuadro 2. Resultados promedio del ensayo de fatiga a deformación controlada

Deformación	400 micro strain		600 micro strain	
Mezcla	Modificada	Control	Modificada	Control
Rigidez inicial (MPa)	7296	6513	6881	6326
Rigidez en ciclo de falla (MPa)	2955	3380	1991	3264
Nº Ciclos para la falla	524077	190149	59295	19461

Los datos reflejan que, para ambas deformaciones controladas, la mezcla modificada presenta una rigidez inicial mayor. Además de una mayor pérdida de rigidez, lo que se asocia a que esta mezcla requiera de una mayor cantidad de ciclos para alcanzar la falla.

Al realizar una comparación de las medias de los ciclos de falla según el tipo de mezcla y la deformación controlada, por medio de un análisis estadístico tipo ANOVA con un nivel de confianza de 95 %, se logró concluir que el tipo de mezcla y la deformación afectan los ciclos de falla, y que entre estas variables existe una dependencia. Es decir, el cambio relacionado con la deformación es función del tipo de mezcla.

Por otro lado, se observa que la mezcla modificada es más susceptible a cambios en las deformaciones unitarias generadas por cargas, comportamiento que puede verse reflejado en la Figura 5. Donde también se ilustra que la mezcla modificada posee un comportamiento óptimo a fatiga para los estados de deformación analizados; ya que, para alcanzar un mismo estado de deformación, la mezcla requiere una mayor cantidad de ciclos.

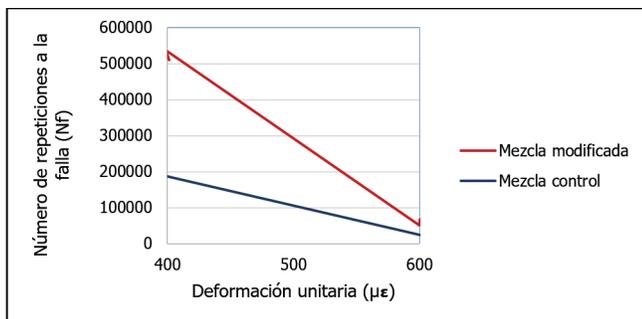


Figura 5. Deformación unitaria contra número de repeticiones a la falla

Se debe recalcar que según las especificaciones del CR-2010, la mezcla modificada cumple los ciclos promedio para la falla por fatiga para los niveles de deformación unitaria controlada en mezclas asfálticas de alto desempeño (mezcla C aplicadas en capas asfálticas intermedias y mezcla D aplicadas en capas asfálticas de rodadura, ambas para un alto volumen de tránsito, es decir, más de 10 millones ESAL 's), mientras que la de control no lo hace.

Módulo dinámico

El ensayo de módulo dinámico (ASTM D3496 y D3497, AASHTO TP62) permite determinar las propiedades elásticas de la mezcla. La prueba consiste en aplicarle al espécimen, a temperaturas y frecuencias definidas, un esfuerzo de

compresión axial sinusoidal y la deformación asociada a este esfuerzo es la que permite calcular el módulo dinámico.

Los módulos dinámicos obtenidos de la mezcla analizada pueden ser utilizados para elaborar una curva maestra, la cual permite identificar el desempeño de las mezclas a diferentes frecuencias y a una temperatura de referencia (21,1 °C para el presente estudio). Las curvas maestras de las mezclas control y modificada se pueden observar en la Figura 6.

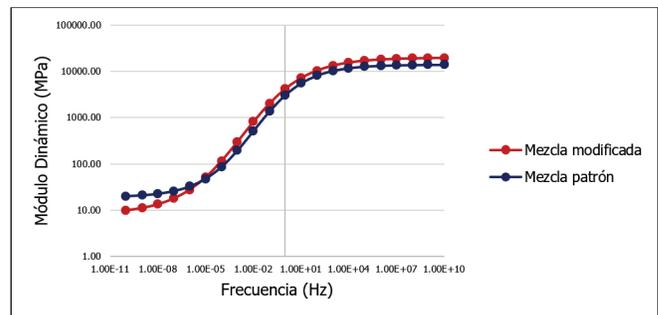


Figura 6. Curvas maestras de la mezcla control y la mezcla modificada

En las curvas maestras se ve que la mezcla modificada presenta mayoritariamente módulos superiores, reflejando una menor deformación bajo un mismo estado de esfuerzo. Por otro lado, se identifica que a frecuencias muy altas la mezcla modificada presenta módulos superiores a la de control, pero a frecuencias muy bajas el comportamiento se invierte. Específicamente, en las colas de estas curvas la diferencia es alta, a una frecuencia de 1,00E-10 la mezcla modificada posee 51 % menos rigidez que la de control y a 1,00E10, 40 % más rigidez. No obstante, los módulos obtenidos en las colas de las curvas no son exactos; ya que, los valores de los extremos de la curva son una extrapolación de los resultados obtenidos en el ensayo. Por lo que estas diferencias no son de tanta relevancia para la comparación entre las mezclas.

Se realizó además una comparación estadística (por medio de un ANOVA con un nivel de confianza de 95 %) de los módulos dinámicos obtenidos en cada mezcla, considerando tres factores: tipo de mezcla, temperatura y frecuencia. De este análisis se concluyó que los tres factores afectan el valor del módulo dinámico, provocando que las medias de los módulos difieran. A la vez, se dedujo que el módulo dinámico depende de la interacción entre la temperatura y la frecuencia, y de la interacción de la temperatura y el tipo de mezcla.

Rueda de Hamburgo

El ensayo de Rueda de Hamburgo (AASHTO T 324-19) permite determinar la susceptibilidad a la deformación permanente y al daño por humedad. Para la prueba, los especímenes se sumergen en agua y se someten a una carga repetitiva. La deformación se define con la profundidad de impresión (rutina) la cuál se manifiesta según los números de pasadas de la rueda. Y la falla asociada al daño por humedad se determina según el punto de inflexión, el cual está relacionado con la cantidad de ciclos para llegar a la falla; al ser este valor más alto, mejor es la mezcla. El ensayo finaliza cuando la rutina llega su máximo (20 mm) o cuando se alcanzan 20 000 ciclos.

En el Cuadro 3 se detallan los resultados de esta prueba. La mezcla modificada presenta una impresión máxima promedio menor a la profundidad de falla de 20 mm, por lo que el ensayo continuó hasta alcanzar los 20 000 ciclos. Mientras que la mezcla control, alcanzó un valor promedio de la impresión máxima superior a la profundidad de falla, finalizando en este punto el ensayo, que fue aproximadamente a los 10 000 ciclos, siendo esta la mitad de ciclos alcanzados por la mezcla modificada. De igual manera, para la mezcla

control la cantidad de ciclos reportados para alcanzar el punto de inflexión fue aproximadamente la mitad de los de la mezcla modificada, reflejando un mejor comportamiento de la mezcla modificada.

Resistencia retenida a la tensión diametral (RRTD)

Con el ensayo de RRTD (AASHTO T283, ASTM D4867) se logra determinar la susceptibilidad al daño por humedad, evaluando el impacto del agua en la resistencia a la tracción de la mezcla. El ensayo consiste en dividir los especímenes en dos condiciones, seca y parcialmente saturada. A estos especímenes se les aplica una carga y se registra la máxima soportada. Con estos valores, se calcula el porcentaje de resistencia de muestras secas, que alcanzan los especímenes saturados.

En el Cuadro 4 se muestran los resultados de este ensayo para las mezclas analizadas (en el cuadro se resaltan los valores más altos entre los resultados de la mezcla control y la modificada). Para ambas condiciones, la mezcla modificada presenta un promedio de carga máxima superior. Además, se puede notar que el promedio de la resistencia retenida a la tensión diametral es mayor en la mezcla modificada.

Cuadro 3. Impresión máxima y cantidad de ciclos del punto de inflexión

Mezcla	Grupo	Impresión máxima (mm)	Número de pasadas	Profundidad de falla (20 mm)	Ciclos del punto de inflexión
Modificada	Llanta izquierda	-20,45	19950	Falla	12785
	Llanta derecha	-12,66	19950	Pasa	
	Promedio	-16,55	-	Pasa	
Control	Llanta izquierda	-20,03	10005	Falla	5929
	Llanta derecha	-20,10	10579	Falla	
	Promedio	-20,06	-	Falla	

Cuadro 4. Resultados de resistencia retenida a la tensión diametral

Condición Seca		
Mezcla	Modificada	Control
Promedio de carga máx (N)	21156	15048
Condición Saturada		
Mezcla	Modificada	Control
Promedio del % Saturación	76,7	75,7
Promedio de carga máx (N)	18729	12573
Promedio RRTD (%)	88,6	84,0

Sin embargo, se realizó un ANOVA a un 95 % de confianza para determinar si las medias de los porcentajes de resistencia retenida de las mezclas diferían. De este análisis, se concluyó que no existe estadísticamente una diferencia entre la resistencia de la mezcla control y la de la mezcla modificada. Sin embargo, es importante recalcar que si se analiza este valor con las especificaciones del CR-2010, la mezcla modificada cumple con las especificaciones para mezclas de alto desempeño y la de control, no.

Evaluación de sensibilidad de la mezcla modificada

La evaluación de la sensibilidad de la mezcla se basó en los deterioros estructurales y en la degradación del blíster. Como se mencionó anteriormente, el blíster está compuesto por un conjunto de polímeros (principalmente PVC), por lo que se identificaron los tipos de degradaciones que podrían afectar este material; siendo estos la degradación térmica y la degradación fotoquímica.

La degradación térmica se da a altas temperaturas, y provoca una separación de las cadenas del polímero. Este proceso ocurre a dos temperaturas, la inicial (T_d) y la media (T_m). En la temperatura inicial se pierde el 10 % de las propiedades físicas y en la temperatura media (T_m) se pierde el 50 % de su peso luego de ser calentado por 30 min. Para el polímero tipo PVC la T_d ocurre a los 170 °C y la T_m a los 279 °C (Carranza, *et al.*, 2010). Es decir, el blíster al estar compuesto principalmente por este polímero, no se vería afectado por este tipo de degradación a la hora de producir y colocar la mezcla.

No obstante, el blíster expuesto a rayos ultravioleta es susceptible a la degradación fotoquímica, degradación en la que se da la separación molecular por la incidencia de radiación electromagnética. Generalmente, la radiación ultravioleta se da entre los 300 nm y los 400 nm, y los polímeros sintéticos puros (como el PVC) no absorben longitudes mayores a los 300 nm. Sin embargo, la radiación solar puede deteriorar el material por presencia de impurezas o defectos en su estructura (Carranza, *et al.*, 2010).

Con los resultados obtenidos de los ensayos de desempeño, se pudo observar que la mezcla modificada es menos susceptible a la deformación permanente, que el daño por humedad se alcanza a mayores ciclos en la mezcla modificada y que esta resiste mayores cargas, por lo que esta mezcla tiene características aptas para ser colocada en capas superficiales. Se debe resaltar que, según un estudio elaborado por el LanammeUCR, la fuente de agregado utilizada en el diseño

presenta alta susceptibilidad al daño por humedad, comparado con otras fuentes utilizadas en el país (Lanamme, 2017).

Por otro lado, se pudo observar que la deformación alcanzada por la mezcla modificada es inferior a la de la mezcla control ante un mismo estado de esfuerzo y que la mezcla modificada, requiere mayor cantidad de ciclos de carga para alcanzar la falla por fatiga. Con estos resultados, se recomienda utilizar la mezcla modificada en capas inferiores. También se determinó que la modificada cumplió con las especificaciones del CR-2010 (MOPT, 2017) de mezclas de alto desempeño, por lo que podría utilizarse para carreteras con alto tránsito.

Finalmente, es importante recalcar que al utilizar la mezcla asfáltica modificada con 1% de blíster (cuya densidad es de 2,4 t/m³) en proyectos de infraestructura vial, se estaría aportando a reducir la contaminación y a ayudar al medio ambiente, ya que se utilizaría gran proporción del desecho en la mezcla, por lo que se le estaría dando un uso al blíster que actualmente posee pocas alternativas para ser reutilizado o reciclado. Por ejemplo, en un kilómetro de carretera, con dos carriles de 3,6 m de ancho cada uno y un espesor de 5 cm, se necesitarían 863 t de mezcla; de las cuales 8 t serían de blíster.

CONCLUSIONES

La mezcla asfáltica modificada con material de desecho tipo blíster bajo las condiciones y la dosificación utilizadas presentó mejores resultados que la mezcla convencional. Además, la granulometría utilizada con el desecho presentó una buena trabajabilidad y se obtuvo una mezcla homogénea.

A la vez, la mezcla modificada reflejó una mejora en el desempeño comparado con la mezcla control, la modificada presentó mayor resistencia a la fatiga, a la humedad y a la deformación permanente. Específicamente en cuanto a la fatiga, la mezcla modificada requirió de más ciclos para alcanzar la falla, y estos ciclos dependen del estado de deformación, del tipo de mezcla y de la interacción entre estos factores. Además, la mezcla modificada presentó mayor sensibilidad ante los cambios en la deformación (para las deformaciones controladas en estudio).

Por otro lado, se determinó que la mezcla modificada registra módulos dinámicos superiores a frecuencias altas, traducido en menos deformación bajo un mismo estado de esfuerzo. Y se identificó que los módulos varían según la temperatura, la frecuencia, el tipo de mezcla y según la interacción entre la temperatura y la frecuencia, y entre la temperatura y el tipo de mezcla.

La mejora en la susceptibilidad al daño por humedad se vio reflejada en una mayor cantidad de ciclos para llegar a la falla, siendo la de la mezcla modificada el doble que la de control.

Por otro lado, a pesar de que estadísticamente la resistencia retenida a la tensión diametral no difiere entre las mezclas, la mezcla modificada puede ser utilizada como mezcla de alto desempeño, debido a que cumple con las especificaciones del CR-2010 en la resistencia retenida a la tensión diametral (al igual que con la fatiga) y la mezcla control no las cumple.

Así mismo, se logró identificar que, aunque la degradación térmica no afecta el blíster, este material podría verse afectado por los rayos ultravioleta, en caso de quedar expuesto (no recubierto) en la mezcla. No obstante, analizar la ocurrencia de la foto-degradación del material se sale del alcance de esta investigación.

Además, se notó que, a pesar de que la mezcla modificada resultó ser menos susceptible al daño por humedad y a la deformación permanente, está elaborada con un agregado que es altamente susceptible al daño por humedad, por lo que se debe considerar este factor para colocar esta mezcla en capas superficiales. Por otro lado, si se desea colocar en capas inferiores se debe tomar en cuenta el buen resultado que presentó a fatiga.

Este estudio permitió identificar que el blíster es apto para ser utilizado en proyectos de infraestructura vial, generando una alternativa de reutilización y promoviendo los pavimentos verdes en el país.

En general, el proyecto permite profundizar en el tema de la incorporación de este desecho en mezclas asfálticas. Sin embargo, es importante recalcar que los resultados obtenidos son exclusivamente para el diseño utilizado. A la vez, como la modificación se realizó a escala de laboratorio, se recomienda discreción, ya que los resultados podrían diferir al implementarlos en escala real.

REFERENCIAS

- AASHTO. (2017). AASHTO T 321-17: *Standard Method of Test for Determining the Fatigue Life of Compacted Asphalt Mixtures Subjected to Repeated Flexural Bending*. United States.
- Aguilar, J., Villegas, R., Loría, L., y Salazar, J. (2013). Use of waste products as bitumen modifiers in Costa Rica. *EATA Conference*. Recuperado de: <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/535>
- Asamblea Legislativa, República de Costa Rica. (2020). *Ley N° 9828. Ley (Uso de materiales reutilizables en pavimentos y obras de infraestructura vial)*. Versión de la norma 1 de 1, 21 mayo 2020. Gaceta No. 148 publicada el 21 junio 2020. Recuperado de: http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=91662&nValor3=121125&strTipM=TC
- Ávila, J. (2020). *Diseño de un proceso de recuperación de aluminio por fusión de los empaques tipo blíster*. (Tesis de grado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Cajina, N. (2020). *Diseño y evaluación de desempeño de la mezcla asfáltica modificada con material de desecho*. (Tesis de grado). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Camacho, C. (17 de febrero 2013). PVC, un plástico incómodo de reciclar. *El Financiero CR*. Recuperado de <https://www.elfinancierocr.com/negocios/pvc-un-plastico-incomodo-de-reciclar/EYFG46ASWFDQ3KPHCYHECEYBZU/story/>
- Caro, S. y Álvarez, A. (2011). Evaluación de la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas empleando propiedades termodinámicas. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 58, 95-104.
- Carranza, R., Duffó, G. y Farina, S. (2010). *Nada es para siempre. Química de la degradación de los materiales*. Recuperado de <http://www.bnm.me.gov.ar/giga1/documentos/EL001847.pdf>
- Grajales, I. (5 de Junio del 2018). Costa Rica tira al mar 15 camiones de plástico por día. *Hoy en el TEC*. Recuperado de <https://www.tec.ac.cr/hoyeneltec/2018/06/05/costa-rica-tira-mar-15-camiones-plastico-dia#:~:text=De%20acuerdo%20con%20el%20Programa,toneladas%20de%20pl%C3%A1stico%20por%20d%C3%ADa.&text=A%20pesar%20de%20ello%2C%20el,camiones%20de%20pl%C3%A1stico%20por%20d%C3%ADa>

- Lanamme (2016). *Informe de Ensayo para el proyecto: Daño por humedad, fase N3* (I-1264-16).
- Lanamme. (2017). *Daño por humedad en mezclas asfálticas*. (LM-PI-UMP-044-R4).
- Mendoza, D.; Ruiz, D. y Cantillo, S. (2019). *Automatización de equipo de pista para la evaluación de deformación permanente en mezclas asfálticas*. (Tesis de grado). Universidad Piloto de Colombia, Bogotá, Colombia.
- MOPT. (2017). Repositorio Sección 402) Diseño de mezcla asfáltica por el método superpave. Recuperado de <http://repositorio.mopt.go.cr:8080/xmlui/123456789/3601>
- Muñoz, M. (2020). *Evaluación de procedimientos de ensayo y análisis de la influencia del envejecimiento en la resistencia al agrietamiento por fatiga en mezclas asfálticas en laboratorio*. (Tesis de grado). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Rodríguez, E. (2016). Uso de polvo de caucho de llantas en pavimentos asfálticos. *Boletín técnico PITRA-LanammeUCR*. 7(4), 1-7. Recuperado de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/316>
- Rondón, H., Moreno, L., Rodríguez, D. y Lee, J. (2009). Experiencias sobre el estudio de materiales alternativos para modificar asfaltos. *Ingeniería*, 14(2), 19-33.
- Villegas, R. y Aguiar, J. (2013). Metodología integral de incorporación eficaz de modificantes en matrices asfálticas. Recuperado de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/542>

Medición de percepción de la calidad de vida con respecto a la satisfacción con el transporte público en Costa Rica

Measurement of quality-of-life perception regarding satisfaction with public transport in Costa Rica

Andrea Zúñiga López

Escuela de Ingeniería Civil
Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
andrea.zunigalopez@ucr.ac.cr

Jaime Allen

LanammeUCR
Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
jaime.allenmonge@ucr.ac.cr

Fecha de recepción: 14 de diciembre de 2020 / **Fecha de aprobación:** 25 de junio de 2021

RESUMEN

El tema de movilidad es cada vez de mayor importancia en Costa Rica, por tanto, se vuelve cada vez más relevante mejorar el sistema del transporte público en el país. Para determinar cuáles elementos del sistema de transporte público en Costa Rica afectan la calidad de vida según la percepción del usuario es necesario conocer su opinión respecto a las condiciones en que se le proporciona el servicio. Para la identificación de los componentes de la estructura del sistema de transporte público en Costa Rica que tienen una mayor afectación en la calidad de vida de sus usuarios, se analizaron los resultados de una Encuesta de percepción sobre el efecto del uso del transporte público en la calidad de vida, este estudio se llevó a cabo por medio de un cuestionario aplicado a funcionarios y estudiantes de la Universidad de Costa Rica (UCR). Se utilizó como herramienta de análisis los Modelos de Ecuaciones Estructurales (SEM), los cuales son una herramienta estadística multivariada que permite estudiar la relación que hay entre variables latentes y observadas. Se verificó con el modelo de ecuaciones estructurales que la satisfacción con el uso del transporte público es un dominio que afecta la satisfacción con la calidad de vida, es decir, para los costarricenses la percepción de estar satisfechos con su calidad de vida se ve influenciada por la percepción de satisfacción que tengan del uso del transporte público.

Palabras clave: calidad de vida, modelos de ecuaciones estructurales, transporte público, percepción, satisfacción.

ABSTRACT

The issue of mobility is increasingly important in Costa Rica; therefore, it becomes relevant to improve the public transport system in the country. To determine which elements of the public transport system in Costa Rica affect the quality of life according to the users' perception, it is essential to know their opinion regarding the conditions in which the service is provided. To identify the components of the structure of the public transport system in Costa Rica that have a greater impact on the quality of life of its users, the results of a survey on the effect of the use of public transport on quality of life were analysed. The data were collected by means of a questionnaire applied to workers and students at the University of Costa Rica (UCR). Structural Equation Models (SEM) were used as an analysis tool, which are a multivariate statistical tool that allows studying the relationship between latent and observed variables. The SEM allowed verifying that satisfaction with the use of public transport is a domain that affects satisfaction with the quality of life, in other words, for Costa Ricans, the perception of being satisfied with their quality of life is influenced by the perception of satisfaction they have with the use of public transport.

Keywords: Quality of life, structural equations model, public transport, perception, satisfaction.

INTRODUCCIÓN

La movilidad es el conjunto de desplazamientos de personas y bienes que se producen en un entorno físico. En el presente estudio resulta de interés la movilidad producida por el transporte, que se da cuando personas se desplazan de un lugar a otro utilizando un medio o sistema que utiliza una determinada infraestructura o red de transporte (Castro, Picado, y Rodríguez, 2018). El tema de movilidad es cada vez de mayor importancia en el país y una considerable mayoría de las y los costarricenses opinan que el congestionamiento vial que se vive en el país cada día será aún mayor conforme avanzan los años (Marín, 2017). Pero ¿cómo relacionar la afectación de la calidad de vida con el uso del transporte público?, se plantea que esta pregunta se podría contestar midiendo el nivel de satisfacción de los usuarios de transporte público.

Primero, es necesario definir los conceptos de satisfacción y calidad de vida. La Universidad de Oxford ha definido satisfacción como el sentimiento de bienestar o placer que se tiene cuando se ha completado un deseo o cubierto una necesidad (Universidad de Oxford, 2019). Por otra parte, según la Organización Mundial de la Salud (1996), la calidad de vida es la percepción que un individuo tiene de su lugar en la existencia, en el contexto de la cultura y del sistema de valores en los que vive y en relación con sus objetivos, sus expectativas, sus normas, y sus inquietudes. Se trata de un concepto que está influido por la salud física del sujeto, su estado psicológico, su nivel de independencia, sus relaciones sociales, así como su relación con el entorno.

El bienestar subjetivo (*Subjective Well-Being*, SWB por sus siglas en inglés) se mide tanto como una evaluación de la satisfacción con la vida, como del bienestar emocional. Aunque estas medidas están positivamente correlacionadas, evalúan aspectos independientes (Bussari y Sadava, 2011). Tanto la satisfacción con la vida como el bienestar emocional están además relacionados con la satisfacción en un dominio específico (Schimmack, 2008), incluida la satisfacción con el trabajo, la vida familiar y el ocio. Se identificó que viajar es potencialmente otro dominio específico de satisfacción que puede afectar el SWB (Ettema, Gärling, Olsson, y Friman, 2010).

Para determinar el efecto del uso del transporte público en la calidad de vida específicamente, se hizo una medición del SWB, que actualmente se propone como la herramienta más apropiada para medir calidad de vida debido al uso del transporte. Investigaciones han demostrado que cambios en el

contexto de viaje o mejoras del nivel del servicio de transporte causarán cambios en el SWB (Ettema *et al.*, 2010). Para la medición del SWB se debe hacer una serie de evaluaciones afectivas y cognitivas de la vida en general de cada individuo. En el caso particular de esta investigación estas evaluaciones se realizaron por medio de un cuestionario de medición de satisfacción con los distintos aspectos de la vida de las personas. Esta satisfacción se midió por medio de una escala de medición o puntuación tipo Likert.

De acuerdo con el Informe del Estado de la Nación en desarrollo humano sostenible (2018), para la Gran Área Metropolitana las pérdidas por externalidades negativas debido al modelo de transporte no sustentable en Costa Rica han sido estimadas en alrededor de 10 % del PIB al año. De este porcentaje, 4 % correspondería al impacto en salud por efecto de accidentes de tránsito, contaminación del aire e inactividad física. Otro 4 % se debería al impacto en transporte por congestión vehicular, desperdicio de combustible y mal uso de infraestructura y equipamiento. Finalmente, 2 % se derivaría de las pérdidas en productividad y competitividad que se expresa en menores inversiones, empleos e impuestos. Por tanto, se busca con el desarrollo del presente trabajo de investigación dimensionar la relación existente entre satisfacción con el transporte público y percepción de la calidad de vida y sus efectos.

METODOLOGÍA

Para explicar o medir la percepción de afectación del uso del transporte en la calidad de vida se construyó un Modelo de Ecuaciones Estructurales (*Structural Equation Model - SEM*), el cual representa una herramienta estadística multivariada que permite estudiar la relación que hay entre variables latentes y observadas. Las variables observadas son aquellas que se miden directamente. Una variable puede ser llamada observada si y solo si su valor es obtenido por medio de un experimento muestral real (Haenlein y Kaplan, 2004). Por otro lado, las variables latentes son aquellas que no pueden ser medidas directamente, sino que son inferidas estadísticamente a partir de las variables observadas. Las variables latentes son factores que, aunque influyen en el comportamiento y las percepciones individuales, no pueden cuantificarse en la práctica (por ejemplo, seguridad, comodidad, fiabilidad). Esto se debe a su intangibilidad, ya que estas variables no tienen una escala de medición y diferentes personas pueden percibirlos de manera distinta. La identificación de variables latentes se da a partir de la recolección de variables observadas por medio de un instrumento de recolección de datos. Las respuestas a

las preguntas generan indicadores de percepción que sirven para identificar las variables latentes, de lo contrario estas no se podrían medir (Ortúzar y Willumsen, 2011).

Para la realización de un modelo de ecuaciones estructurales se requiere de una base de datos en la que se incluyan las respuestas a determinado instrumento de recolección de datos, dicha base de datos se trabaja como una matriz de preguntas y respuestas.

La Figura 1 muestra un diagrama del modelo que se pretende construir, se harán dos modelos, uno que explique satisfacción con transporte público (SAT.TP) y otro que explique la satisfacción con la calidad de vida (SAT.CV), por separado. Una vez construidos los modelos, se incluye la relación SAT.TP afecta SAT.CV para verificar si existe algún efecto y en qué medida sucede.

Para lograr el modelo propuesto en la Figura 1 se diseñó un cuestionario enfocado a satisfacción con el uso del transporte público y la percepción de la calidad de vida, dicho instrumento se aplicó a personas relacionadas (estudiantes y funcionarios) con la Universidad de Costa Rica y sus respuestas se analizaron haciendo uso del software de análisis Estadístico R.

Recopilación de la información

Respecto al diseño del instrumento de recolección de información se optó por la construcción de un cuestionario, el cual se dispuso en la web por medio de un formulario electrónico desde el 28 de agosto de 2019 y se mantuvo hasta el 6 de diciembre del mismo año, este se completaba en un tiempo de cuatro a seis minutos. La calidad de vida se explica por múltiples factores, por lo que, para explicar cómo el uso del transporte público incide en la percepción de satisfacción con la calidad de vida, se debe tener un panorama general de la satisfacción de los encuestados con diversas áreas de su vida.

Respecto a la población de estudio esta corresponde a la totalidad de unidades de estudio analizadas. De acuerdo con el reporte “UCR en cifras”, para finales del 2018 se encontraban matriculados 51871 estudiantes y para el año 2013 la universidad contaba con más de 5000 profesores, se estima entonces una población de 57000 unidades estadísticas. Se pretende que los resultados de la investigación sean aplicables a toda la población, es por ello que se valoró la necesidad de una muestra compuesta por al menos 382 respuestas para obtener una confiabilidad del 95 % y un margen de error del 5 %, tal como se muestra a continuación (Ecuación 1).

$$n = \frac{z^2(p*q)}{e^2 + \frac{(z^2(p*q))}{N}} \quad (1)$$

Donde,

n = tamaño de la muestra = 382

N = tamaño de la población = 57000

p = probabilidad a favor (0,5 al ser desconocida)

q = probabilidad no favor (1 - p)

z = Nivel de confianza = 95 %

e = margen de error muestral = 5 %

De la encuesta aplicada se lograron 623 respuestas, por lo que los resultados serán representativos. Se elige como población de estudio miembros de la Universidad de Costa Rica debido a la alta heterogeneidad de quienes componen esta institución, al estar integrada por personas de todas las provincias, edades y estratos socioeconómicos. Adicionalmente, se considera la factibilidad de aplicar el instrumento de recolección de datos, al contar con unidades académicas que tienen los datos de sus integrantes.



Figura 1. Diagrama de modelo propuesto

En cuanto a la estructura del cuestionario aplicado, este constituía de una sección introductoria y 81 preguntas repartidas en ocho módulos en total que son los siguientes:

- Módulo 1- Estado de ánimo: esta sección es un filtro inicial para identificar el estado de ánimo de las personas al realizar el cuestionario. Mingote, Gálvez, del Pino, y Gutiérrez (2009) señalan que, cuando las personas están de mal humor o son depresivas, tienden a tener una mala actitud hacia su entorno, es decir, es de esperar de personas que completen el cuestionario en un mal momento respondan de forma negativa la evaluación de aspectos tanto afectivos como cognitivos.
- Módulo 2 - Calidad del servicio de transporte público: se busca conocer la opinión general de los participantes sobre su percepción de la calidad del transporte público. La pregunta o bloque general se coloca al inicio para evitar “contaminación” (Gómez, 2011), es decir, se requiere la opinión inmediata de los usuarios antes de ser sometidos a reflexión sobre aspectos específicos del servicio de transporte público.
- Módulo 3 - Servicios públicos: el objetivo de preguntar por satisfacción con servicios básicos es conocer las condiciones de vida generales de los participantes.
- Módulo 4 - Satisfacción con transporte público (Bloque cognitivo y bloque afectivo): este módulo corresponde al de mayor importancia para la investigación. En este apartado se hace una división de dos grupos, el primero corresponde al bloque cognitivo donde se solicita una calificación de aspectos concernientes a las condiciones del servicio de transporte, es decir se pide juzgar aspectos como la seguridad, accesibilidad, comodidad, entre otros, con base en su experiencia personal. Por otra parte, se encuentra el bloque afectivo, el cual está constituido por preguntas sobre estados de ánimos o emociones experimentadas tras sus viajes en transporte público. La diferencia entre las preguntas cognitivas y afectivas radica en que la sección cognitiva solicita calificar los asientos, los choferes, el trato a personas con discapacidad y adultos mayores, entre otros aspectos. Las preguntas afectivas buscan determinar cómo el conjunto de elementos cognitivos colabora para tener una buena o mala experiencia al viajar.
- Módulo 5 - Satisfacción general con transporte público: esta sección está diseñada para contrastar los resultados del “Módulo 2” con las respuestas tras un análisis detallado por parte de los encuestados de cada uno de los aspectos del transporte público.
- Módulo 6 - Satisfacción general con nivel de vida: el SWB se mide tanto como una evaluación de la satisfacción con la vida, como del bienestar emocional. Aunque estas medidas están positivamente correlacionadas, en parte evalúan aspectos independientes (Busseri y Sadava, 2011). Tanto la satisfacción con la vida como el bienestar emocional están además relacionados con la satisfacción en un dominio específico (Schimmack, 2008), incluida la satisfacción con el trabajo, la vida familiar y el ocio.
- Módulo 7 - Información demográfica: el SWB depende de las circunstancias de la vida, explicando aproximadamente el 10 % de la variación (Lyubomirsky, Sheldon, y Schkade, 2005). La edad, la vida en pareja, el empleo, el sexo, entre otros, influyen en un SWB más alto o bajo.
- Módulo 8 - Información socioeconómica: en este módulo se determina el nivel socioeconómico de los encuestados de manera indirecta al preguntar si se cuenta con ciertos servicios o bienes.
- Se obtuvieron 623 respuestas, respecto a la descripción de la muestra se detalla en el Cuadro 1.

Construcción del modelo de ecuaciones estructurales

Para la formulación del modelo de ecuaciones estructurales se debe seguir una serie de procedimientos, los cuales se detallan a continuación.

Análisis de componentes principales (PCA)

El PCA es una herramienta utilizada en el análisis de datos multivariantes para la reducción de la dimensionalidad donde, al tener una cantidad de n variables, se busca describir con precisión los valores de esas n variables en un subconjunto $r < n$ de ellas. Se reduce la dimensión de los datos a analizar a costa de una pequeña pérdida de información. Supóngase que existe una muestra con n individuos cada uno con p variables (X_1, X_2, \dots, X_p) , es decir, el espacio muestral tiene p dimensiones. PCA permite encontrar un número de factores subyacentes ($z < p$) que explican aproximadamente lo mismo que las p variables originales. Donde antes se necesitaban p valores para caracterizar a cada individuo, ahora bastan z valores. Cada una de estas z nuevas variables reciben el nombre de componente principal (Amat, 2017). Este análisis se hace identificando variables de alta interdependencia y agrupándolas.

Cuadro 1. Descripción de muestra

Sexo		Nacionalidad	
Mujer	50%	Costarricense	98%
Hombre	50%	Otro	2%
Ocupación		Edad	
Estudia	41%	19 o menos	10%
Trabaja tiempo completo	32%	20-22	20%
Trabaja y estudia	19%	23-25	31%
Trabaja medio tiempo	3%	26-35	6%
Desempleado	3%	36-49	10%
Otro	2%	50 o más	7%
Tiempo de viaje		Medio de transporte que más utiliza	
Menos de 30 min	25%	Automóvil	30%
De 30 min a 1 h	19%	Bus	51%
De 1 h a 2 h	33%	Otro	20%
Más de 2 h	23%		
Provincia		Educación	
San José	63%	Primaria completa	0,5%
Alajuela	33%	Secundaria incompleta	2%
Cartago	18%	Secundaria completa	7%
Heredia	22%	Universitaria incompleta	51%
Guanacaste	11%	Universitaria completa	40%
Puntarenas	20%		
Limón	9%		

Respecto al cálculo de las componentes principales, Amat (2017) señala que cada componente principal (Z_i) se obtiene por combinación lineal de las variables originales. Se pueden entender como nuevas variables obtenidas al combinar de una determinada forma las variables originales. La primera componente principal de un grupo de variables (X_1, X_2, \dots, X_p) es la combinación lineal normalizada de dichas variables que tiene mayor varianza (Ecuación 2).

$$Z_1 = \phi_{11}X_1 + \phi_{21}X_2 + \dots + \phi_{p1}X_p \quad (2)$$

Que la combinación lineal sea normalizada implica lo que se muestra en la Ecuación 3.

$$\sum_{j=1}^p \phi_{j1}^2 = 1 \quad (3)$$

Los términos $\phi_{11}, \dots, \phi_{p1}$ reciben en el nombre de *loadings*, en español cargas, y son los que definen a la componente. ϕ_{11} es la carga de la variable X_1 de la primera componente principal. Las cargas pueden interpretarse como el peso/importancia

que tiene cada variable en cada componente y, por lo tanto, ayudan a conocer qué tipo de información recoge cada una de las componentes.

En este punto se analizan las preguntas por grupos, de acuerdo con los módulos en que dividimos el cuestionario. De acuerdo con las varianzas obtenidas del programa R, se formaron subconjuntos los cuales corresponden a los factores del modelo, por ejemplo, los servicios públicos pasarán de ser explicados por ocho variables a ser explicados por dos factores o componentes principales. El proceso de PCA debería generar siempre las mismas componentes principales independientemente del software utilizado, es decir, el valor de las cargas resultantes es el mismo (Amat, 2017).

Este procedimiento se hace con las variables de cada uno de los módulos. Con el PCA se logró reducir las 81 preguntas del cuestionario a 10 componentes principales para explicar satisfacción con el transporte público; y a cinco componentes, para satisfacción con calidad de vida.

Análisis del sistema de medición

En este punto se emplean indicadores para evaluar el ajuste del modelo. El más utilizado es cuando valor- $p < 0,1$, para cada parámetro, y el RMSEA (error cuadrático medio de aproximación) $< 0,05$, para el modelo general; siempre y cuando se asocien a una hipótesis específica. Dado que el modelo presentado tiene variables latentes o no observadas, es necesario identificar cada una de estas con un valor estadístico para poder calcular los estimados de sus efectos. De acuerdo con Escobedo, Hernández, Estebané, y Martínez (2016) los valores estimados evalúan un parámetro que caracteriza a la población a través de una muestra. Si esta representa fielmente a la población, se supone que el estadístico representa bien el parámetro. Se expone una breve explicación de cada uno de los valores utilizados en la evaluación de los criterios de calidad de ajuste.

Tipos de valores estadísticos:

- Índice de ajuste comparativo (CFI): Es una medida de ajuste del modelo en relación con otros modelos, que funciona bien con todos los tamaños de muestra. Son deseables valores superiores a 0,95 y entre más se acerque a uno es mejor (Bentler, 1990).
- El índice No normalizado de ajuste (TLI), o índice Tucker Lewis, compara el ajuste por grados de libertad del modelo propuesto y nulo (modelo de ausencia de relación entre las variables). Este índice tiende a 1 para modelos con muy buen ajuste, considerándose aceptables valores superiores a 0,90, aunque lo ideal sería valores mayores a 0,95 (Torres, 2011).
- El Error de Aproximación Cuadrático Medio (RMSEA), representa el ajuste anticipado con el valor total de la población y ya no con el de la muestra (Torres, 2011). Si RMSEA es menor o igual a 0,05 indica un error de aproximación del modelo con la realidad.
- El índice de error cuadrático medio (SRMR) mide las varianzas y covarianzas de la muestra y si éstas difieren de las estimaciones obtenidas. Si este indicador se acerca a 0, puede considerarse un ajuste casi perfecto (Kline, 2005). Se utiliza como límite SRMR $< 0,08$ (Bentler y Hu, 1999).

Estos índices se determinan para el modelo resultante, es decir, dichos índices de ajuste permiten decidir si el modelo tal y como se encuentra especificado guarda coherencia estadística. El análisis del sistema de medición es de gran importancia para mejorar el posible modelo, eliminando aquellas variables

que muestren valores en sus ajustes que no llegan a ser del todo satisfactorios, previo a la construcción del SEM.

Construcción del modelo de ecuaciones estructurales

La construcción del SEM propiamente dicho corresponde a la fase en que se forman las ecuaciones de regresión para acomodar relaciones de regresión entre variables latentes y entre variables observadas y latentes (Allen, Muñoz, y Ortúzar, 2018). En este caso, se identifican cuáles son los componentes o factores que efectivamente explican la variable latente que se busca responder. El procedimiento de construcción del SEM difiere con el análisis del sistema de medición únicamente en la construcción de las regresiones, ya que se utilizan los mismos parámetros de análisis para identificar aquellas variables de significancia. Por ejemplo, se analiza el conjunto de variables que explican la satisfacción con el uso del transporte público y en qué medida lo hacen, es decir, se encuentra un modelo de regresión. Se utilizan los coeficientes estandarizados, índices de bondad de ajuste, el valor- p como parámetros de aceptación. Adicionalmente, con el SEM se obtiene el valor del coeficiente de determinación. López (2020) define el coeficiente de determinación como la proporción de la varianza total de la variable explicada por la regresión. El coeficiente de determinación, también llamado R-cuadrado, refleja la bondad del ajuste de un modelo a la variable que pretender explicar. Con el software R se obtienen los valores de R-cuadrado para todas aquellas regresiones que se quiera establecer y sus variables.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Resultados SEM

En cuanto al SEM de satisfacción con uso del transporte público para los datos recolectados de la población universitaria, se encuentra que la satisfacción con el transporte público es una variable latente que se hace manifiesta por medio de cuatro componentes: la “Comodidad” o confort al viajar, la “Confiabilidad” que ofrece el servicio, la “Conectividad” entre los diferentes servicios o rutas y la percepción hacia los servicios públicos enfocados en la “Sociedad”. Dichos componentes son identificados por un total de 11 variables observadas. Se debe destacar que adicionalmente los componentes principales son explicados por seis variables latentes que no tienen un impacto directo sobre SAT.TP, sino indirecto, estos corresponden a: “Seguridad personal”, “Ambiente”, “Gobierno”, “Agrado”, “Accesibilidad” e “Interacción social”. En la Figura 2, se explica la relación mencionada.

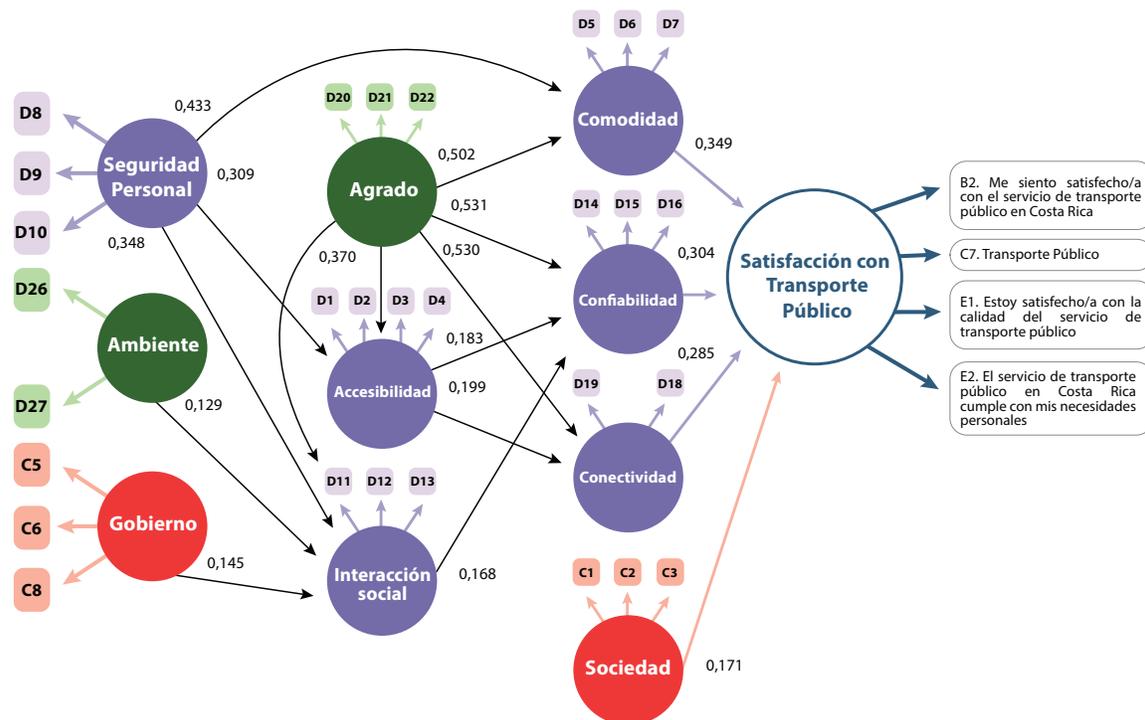


Figura 2. Modelo de ecuaciones estructurales para satisfacción con transporte público

Las siguientes ecuaciones de regresión (4 a 7) representan los cuatro componentes principales de efecto directo sobre la satisfacción con el uso del transporte público. En cada una de ellas se indica el impacto o pesos de las variables observadas sobre las cuatro principales variables latentes.

$$COMODIDAD = 0,760 * D5 + 0,817 * D6 + 0,773 * D7 \quad (4)$$

$$CONFIABILIDAD = 0,883 * D14 + 0,851 * D15 + 0,781 * D16 \quad (5)$$

$$CONECTIVIDAD = 0,969 * D18 + 0,763 * D19 \quad (6)$$

$$SOCIEDAD = 0,668 * C1 + 0,683 * C2 + 0,779 * C3 \quad (7)$$

En el Cuadro 2 se muestra la descripción de las variables indicadas con una letra y número.

Cuadro 2. Componente de mayor afectación en satisfacción con transporte público

Variable latente	Ítem	Variable observada	Coefficiente estandarizado
Comodidad (0,349)	D5	Las unidades son cómodas para ir de pie	0,760
	D6	Las unidades son cómodas para ir sentado	0,817
	D7	Las unidades son modernas	0,773
Confiabilidad (0,304)	D14	Mi tiempo de espera es adecuado	0,883
	D15	Se cumple con los horarios establecidos	0,851
	D16	Conozco aproximadamente mi tiempo de viaje	0,781
Conectividad (0,285)	D18	La conexión entre los servicios de bus(es) y tren es rápida (expedita)	0,969
	D19	Los horarios de los buses y trenes están integrados	0,763
Sociedad (0,171)	C1	Educación	0,668
	C2	Justicia	0,683
	C3	Seguridad	0,779

En la Figura 2 el componente “Comodidad” es el elemento con mayor peso para medir la satisfacción con el uso del transporte público, con un coeficiente de 0,349. A pesar de que este valor es medio-bajo, sus indicadores o variables observadas explican con mucha fuerza dicho componente. En primer lugar, si las unidades son cómodas para ir sentado, en segundo lugar, si las unidades son modernas y por último si las unidades son cómodas para ir de pie.

Los cuatro factores que afectan directamente SAT.TP reciben impactos de otras variables latentes, las cuales a su vez se explican por otras variables de la misma naturaleza. Lo anterior se debe a la condición de dependencia e independencia de dichas variables. Si la Figura 2 se analiza de derecha a izquierda se encuentra que el comportamiento de “Comodidad” sobre el modelo se ve influenciado por el agrado al viajar y la percepción de seguridad. La “Confiabilidad” la explican el agrado, la accesibilidad y la interacción social entre los usuarios y el chofer. Finalmente, la “Conectividad” se ve influenciada por el agrado a viajar, y la accesibilidad al servicio. El resto de los componentes muestran la alta relación que todas las variables latentes evaluadas guardan entre sí.

Adicionalmente, las siguientes ecuaciones (8 a 12) muestran los efectos indirectos de otros componentes en el modelo SAT.TP:

$$ACCESIBILIDAD \sim 0,309 * SEGURIDAD PERSONAL + 0,370 * AGRADO \quad (8)$$

$$INTERACCIÓN SOCIAL \sim 0,348 * SEGURIDAD PERSONAL + 0,311 * AGRADO + 0,129 * AMBIENTE + 0,145 * GOBIERNO \quad (9)$$

$$COMODIDAD \sim 0,433 * SEGURIDAD + 0,502 * AGRADO \quad (10)$$

$$CONFIABILIDAD \sim 0,183 * ACCESIBILIDAD + 0,168 * INTSOCIAL + 0,531 * AGRADO \quad (11)$$

$$CONECTIVIDAD \sim 0,199 * ACCESIBILIDAD + 0,530 * AGRADO \quad (12)$$

En el Cuadro 3 se detalla cuáles variables observadas hacen manifiestas a las variables latentes de efecto indirecto. La simbología de letra y número corresponde a la misma que se presenta en la Figura 2.

Cuadro 3. Componentes de efecto indirecto en satisfacción con transporte público

Variable latente	Ítem	Variable observada	Coefficiente estandarizado
Seguridad personal	D8	Las unidades son cómodas para ir de pie	0,759
	D9	Las unidades son cómodas para ir sentado	0,900
	D10	Las unidades son modernas	0,909
Ambiente	D26	El transporte público ayuda a disminuir la congestión	0,940
	D27	El transporte público es favorable para el ambiente	0,861
Gobierno	C5	Servicios básicos (agua, electricidad)	0,693
	C6	Salud	0,663
	C8	Transporte público	0,729
Agrado	D20	Me agrada usar el transporte público porque viajo cómodamente	0,867
	D21	Me agrada usar el transporte público porque es limpio	0,800
	D22	Me agrada viajar en transporte público porque sé a qué hora debo tomarlo y a qué hora llego a mi destino	0,772
Accesibilidad	D1	El servicio de transporte público está cerca de mi casa	0,608
	D2	Cuento con dos o más opciones de transporte público	0,557
	D3	Las personas adultas mayores, con discapacidad, o alguna condición especial pueden acceder al servicio	0,801
	D4	Las paradas son de fácil acceso	0,784
Interacción Social	D11	Los choferes son amables y respetuosos	0,856
	D12	Los choferes conducen responsablemente	0,864
	D13	Las personas adultas mayores, con discapacidad, o alguna condición especial son tratadas con amabilidad al usar el servicio	0,793

Para nuestro modelo de satisfacción con transporte público la ecuación de regresión resultante es la siguiente (Ecuación 13).

$$\begin{aligned}
 \text{SAT.TP} &= 0,349 * \text{COMODIDAD} + 0,304 \\
 &* \text{CONFIABILIDAD} + 0,285 \\
 &* \text{CONECTIVIDAD} + 0,171 * \text{SOCIEDAD}
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

Una vez que se ha construido el modelo de satisfacción con transporte público y el de calidad de vida, se procede a unirlos. La estructura resultante se muestra en la Figura 3, donde el modelo completo SAT.TP se incluye como una variable latente más. Gráficamente, se muestra SAT.TP como una variable aislada, sin embargo, en el modelo de SAT.CV, se incluyen todos sus componentes.

El SEM de calidad de vida revela que la satisfacción con la calidad de vida es una variable latente que es concebida por cuatro componentes: Familiar, Pareja, Personal y Satisfacción con transporte público. Los tres primeros componentes son conformados por un total de nueve variables observadas, tomando en cuenta que SAT.TP es una variable que se explica por un modelo completo. Para este caso se tiene solo una

variable latente adicional, Amistades, la cual es explicada por el componente Pareja y a su vez influye sobre el factor Familiar.

Los cuatro componentes influyen de manera positiva en la percepción de satisfacción, aunque sus efectos de diferente magnitud. En las siguientes ecuaciones (14 a 17) se exhiben los coeficientes estandarizados de regresión que indican la magnitud del impacto de una variable sobre otra. Adicionalmente, en el Cuadro 4 se detalla el nombre de las variables que componen las ecuaciones.

$$\text{FAMILIAR} = 0,802 * F2 + 0,721 * F3
 \tag{14}$$

$$\text{PAREJA} = 0,931 * F6 + 0,881 * F7
 \tag{15}$$

$$\begin{aligned}
 \text{PERSONAL} &= 0,770 * H6 + 0,614 * \\
 &H7 + 0,606 * H10
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

$$\begin{aligned}
 \text{SAT.CV} &= 0,798 * \text{FAMILIAR} + 0,191 \\
 &* \text{PAREJA} + 0,199 * \text{PERSONAL} \\
 &+ 0,091 * \text{SAT.TP}
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

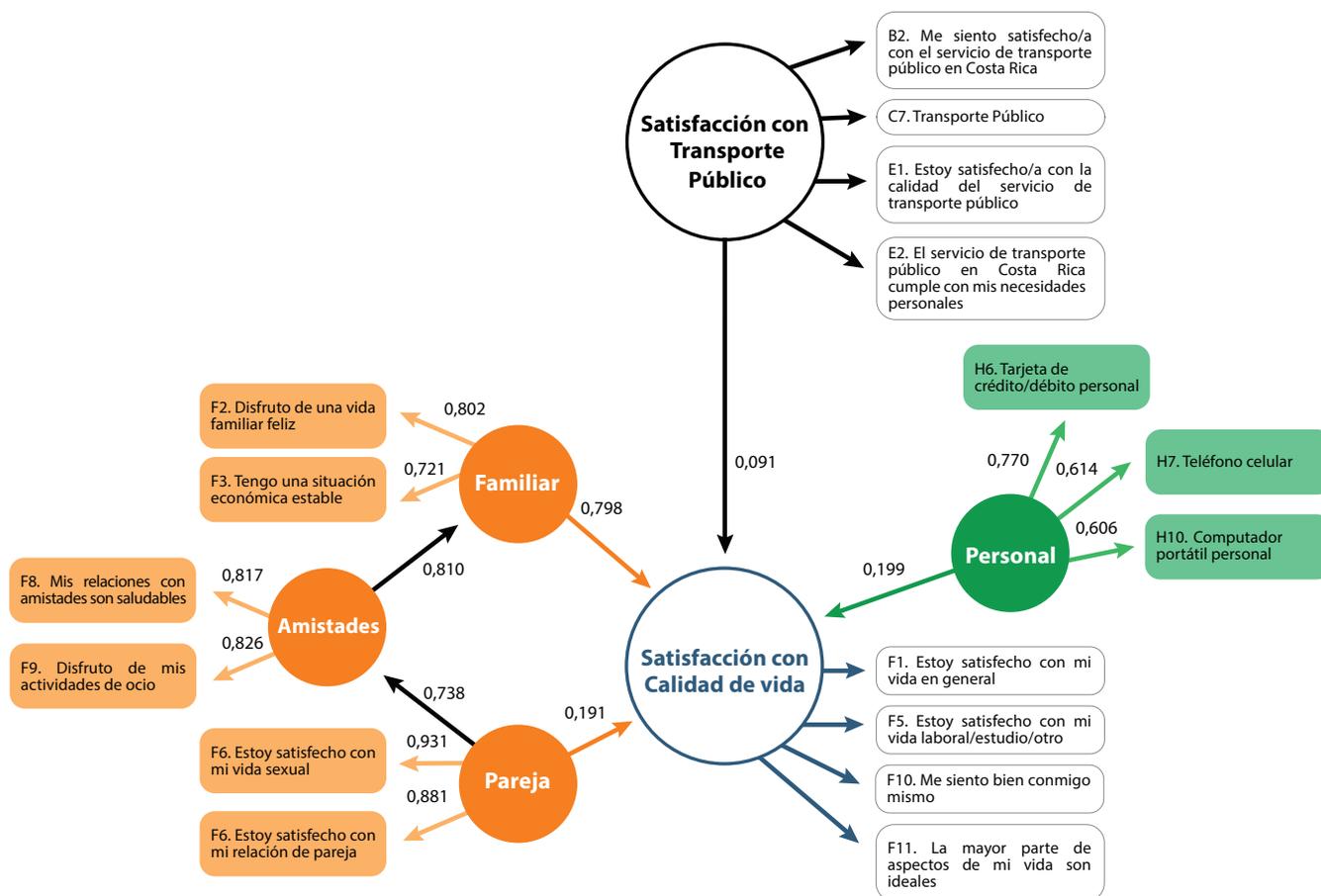


Figura 3. Modelo de ecuaciones estructurales para determinar el efecto de la satisfacción con transporte público en la satisfacción con calidad de vida

Cuadro 4. Componentes de mayor afectación en satisfacción con calidad de vida

Variable latente	Ítem	Variable observada	Coefficiente estandarizado
Familiar	F2	Disfruto de una vida familiar feliz	0,802
	F3	Tengo una situación económica estable	0,721
Pareja	F6	Estoy satisfecho con mi vida sexual	0,931
	F7	Estoy satisfecho con mi relación de pareja	0,881
Personal	H6	Tarjeta de crédito/ débito personal	0,770
	H7	Teléfono celular	0,614
	H10	Computador portátil personal	0,606
SAT.TP	-	-	-

Cuadro 5. Componentes de mayor afectación en satisfacción con calidad de vida

Variable latente	Ítem	Variable observada	Coefficiente estandarizado
Amistades	F8	Mis relaciones con amistades son saludables	0,817
	F9	Disfruto de mis actividades de ocio	0,826

Adicionalmente, el componente “Amistades”, cuyo efecto sobre el modelo SAT.CV es indirecto, se hace manifiesta mediante las variables observadas en el Cuadro 5.

En el modelo, el nivel de vida familiar es el factor de mayor relevancia para explicar la satisfacción con calidad de vida, con un coeficiente estandarizado de relación de 0,798, lo cual representa una relación muy alta. El nivel de vida familiar se explica por el disfrutar una vida familiar feliz y tener una situación económica estable. La percepción de una buena vida familiar es influenciada también por las relaciones de amistad que se mantenga.

Es interesante analizar el ítem Personal, ya que las variables concernientes al estatus socioeconómico no guardaron relación ni con el modelo de SAT.TP ni con el de SAT.CV de manera individual, pero al integrarlos se observó que el elemento Personal es significativo y tiene un coeficiente de 0,199 que es una afectación muy similar a la del componente Pareja. En este caso se denomina Personal, ya que se mide por medio de bienes que son de uso personal, como el tener una tarjeta de crédito o débito, un teléfono celular y un computador portátil; y no de uso de toda la familia.

Los datos obtenidos coinciden con el estudio realizado por Rojas y Elizondo (2012) respecto a la satisfacción de vida en Costa Rica, en dicho estudio se evaluaron únicamente los dominios de vida: económico, laboral familiar, resto de familia, amistad, tiempo y comunal. En su estudio, Rojas y Elizondo (2012) mostraron que en Costa Rica los dominios familiares,

resto de familia y amistad son los que tienen mayor peso al explicar la satisfacción de vida de los costarricenses.

Según Rojas y Elizondo (2012), Costa Rica es un país que de manera sistemática ha mostrado altos niveles de satisfacción de vida a pesar de que su ingreso per cápita no es alto, es medio-alto. Para los costarricenses la satisfacción de vida es el resultado de la satisfacción personal en cada una de las diferentes áreas concretas donde se ejerce como ser humano. La investigación muestra que el ingreso no es determinante de la satisfacción económica, y que la satisfacción económica no necesariamente determina la satisfacción de vida.

Finalmente, el componente de mayor relevancia para el análisis realizado resulta ser la satisfacción con el transporte público, el cual con un coeficiente de 0,091 es significativo para explicar la satisfacción con la calidad de vida. El coeficiente estandarizado expresa que cada desviación estándar que se mueva SAT.TP, SAT.CV se mueva 0,091 desviaciones estándar, dicho argumento se puede interpretar como que la percepción de tener una buena calidad de vida es explicada por el uso del servicio de transporte público en aproximadamente un 9 %.

El nivel de ajuste estadístico del modelo se analizó por medio de cuatro índices: el índice comparativo de ajuste (CFI), el índice de Tucker Lewis (TLI), el error medio cuadrático de aproximación (RMSEA) y el índice de error medio cuadrático (SRMR). En el Cuadro 6 se muestran los valores que se utilizaron como parámetro de aceptación y los valores obtenidos en el modelo final.

Cuadro 6. Indicadores de ajuste

Índice	Límite	Valor obtenido
CFI	CFI \geq 0,95	0,990
TLI	TLI \geq 0,95	0,989
RMSEA	RMSEA \leq 0,05	0,042
SRMR	SRMR $<$ 0,08	0,124

En el modelo bajo análisis, los resultados obtenidos en los índices de ajuste señalan que se consigue información que apoya el modelo propuesto. Al comparar los niveles de ajuste estadístico del modelo final de calidad de vida, con el modelo de satisfacción con transporte público incluido como una variable latente, se tiene que la calidad de vida es un modelo de ajuste muy apropiado, medido con otra variable que de igual manera tiene una coherencia estadística que es conveniente para explicar el fenómeno de estudio.

Se utilizó también el coeficiente de determinación, conocido como R-cuadrado, como parámetro adicional para medir la fiabilidad del modelo estimado. Para la regresión de satisfacción con transporte público se obtuvo un valor de $R^2 = 0,896$ lo que indica que un 89,6 % de la variabilidad de la satisfacción con el uso del transporte público es manifestada con el modelo construido. Una vez que se construye el modelo final de calidad de vida, incluyendo el modelo o variable de satisfacción con el uso de transporte público, se obtuvo un valor de $R^2 = 0,934$, es decir, cuando se forma el modelo SAT.CV explicado por SAT.TP se obtiene un modelo más robusto en cuanto a su capacidad explicativa y se logra con éxito entablar un modelo que exprese la medida en que el uso del servicio de transporte público en Costa Rica tiene una afectación sobre la calidad de vida de sus usuarios.

CONCLUSIONES

Los componentes de mayor importancia para el modelo son la comodidad, confiabilidad, conectividad y servicios públicos. La comodidad está por encima del resto de los aspectos del transporte público, desde el punto de vista de calidad de vida esto tiene sentido ya que la percepción de satisfacción se relaciona no solo con un viaje rápido o conexiones expeditas sino también con una experiencia de viaje agradable una vez se está en la unidad de transporte.

Respecto al 9 % de afectación que se encontró, si se reflexiona al respecto, dicho valor resulta ser verdaderamente una cifra de importancia. El transporte es una necesidad derivada, es decir se utiliza por la necesidad de movilizarse para trabajar, estudiar, entre otras actividades. El transporte es el medio que se utiliza para desarrollar una vida, no es la vida en sí y cuando se obtiene que la calidad de vida está siendo afectada por la percepción de las diferentes características de un servicio de uso diario es una evidencia que aquellos factores que sean significativos para explicar la satisfacción con el transporte público deben ser atendidos y mejorados.

De lo anterior resulta de interés proponer la construcción de un modelo enfocado en aspectos relacionados a comodidad, como sobrecupo, limpieza, ventilación, entre otros aspectos para así proponer soluciones puntuales para mejorar la comodidad. Los modelos planteados funcionan sobre una base de datos, pero los códigos de programación son los mismos; por lo que se puede aplicar la encuesta de manera periódica como mecanismo de control del servicio de transporte. Para mejorar la robustez del modelo y su capacidad explicativa, se recomienda aplicar a una población con mayor heterogeneidad, incluso de manera nacional.

REFERENCIAS

- Allen, J., Muñoz, J. y Ortúzar, J. (2018). Modelling service-specific and global transit satisfaction under travel and user heterogeneity. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 113, 509–528. DOI: 10.1016/j.tra.2018.05.009
- Amat, J. (2017). *Análisis de Componentes Principales (Principal Component Analysis, PCA) y t-SNE*. Recuperado de https://rpubs.com/Joaquin_AR/287787
- Bentler, P. (1990). *Comparative fit indexes in structural models*. *Psychological Bulletin*, 107(2), 238–246. DOI: 10.1037/0033-2909.107.2.238
- Bentler, P. y Hu, L. (1999). Cutoff criteria for fit indexes in covariance structure analysis: Conventional criteria versus new alternatives. *Structural Equation Modeling*, 6(1), 1–55. DOI: 10.1080/10705519909540118
- Busseri, M. y Sadava, S. (2011). A review of the tripartite structure of subjective well-being: implications for conceptualization, operationalization, analysis, and synthesis. *Personality and social psychology review*, 15, 290–314. DOI: 10.1177/1088868310391271
- Castro Rodríguez, L., Rodríguez Shum, S., y Picado Aguilar, G. (2018). Modelación de demanda de transporte urbano en Costa Rica, de Emme a TransCAD. *Infraestructura Vial*, 19(33), 45-53.
- Escobedo, M., Hernández, J., Estebané, V. y Martínez, G. (2016). Modelos de ecuaciones estructurales: Características, fases, construcción, aplicación y resultados. *Ciencia & Trabajo*, 18(55), 16–22. DOI: 10.4067/S0718-24492016000100004
- Ettema, D., Gärling, T., Olsson, L. y Friman, M. (2010). Out-of-home activities, daily travel, and subjective well-being. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 44(9), 723–732. DOI: 10.1016/j.tra.2010.07.005
- Gómez, M. (2011). *Elementos de Estadística Descriptiva*. Costa Rica: EUNED.
- Haenlein, M. y Kaplan, A. (2004). A beginner's guide to partial least squares analysis. *Understanding statistics*. 3(4), 283–297. DOI: 10.1207/s15328031us0304_4
- Kline, R. (2005). *Principles and practice of structural equation modeling*. New York: Guilford Press.
- López, J. (2020). *Coeficiente de determinación (R cuadrado)*. Extraído el 3 de febrero, 2020 de <https://economipedia.com/definiciones/r-cuadrado-coeficiente-determinacion.html>
- Lyubomirsky, S., Sheldon, K. y Schkade, D. (2005). Pursuing Happiness: The Architecture of Sustainable Change. *Review of General Psychology*, 9(2), 111–131. DOI: 10.1037/1089-2680.9.2.111
- Marín, R. (2017). *Ticos perciben que congestiónamiento vial se agravará en el futuro*. Universidad de Costa Rica. Extraído el 11 de abril, 2019 de <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2017/02/01/ticos-perciben-que-congestionamiento-vial-se-agravara-en-el-futuro.html>
- Mingote, J., Gálvez, M., del Pino, P. y Gutiérrez, M. D. (2009). El paciente que padece un trastorno depresivo en el trabajo. *Medicina y Seguridad del Trabajo*, 55(214), 41–63.
- Organización Mundial de la Salud. (1996). ¿Qué es calidad de vida? Foro mundial de la salud 1996, 17, 385-387.
- Ortúzar, J. y Willumsen, L. (2011). *Modelling Transport*. Chichester: John Wiley & Sons. DOI: 10.1002/9781119993308.
- Estado de la Nación (2018). *Estado de La Nación en Desarrollo Humano Sostenible*. (Informe 2018). Recuperado de: <https://estadonacion.or.cr/informe/?id=28797234-99af-4c53-b436-7c9a57fb1fe1>
- Rojas, M. y Elizondo, M. (2012). Satisfacción de vida en Costa Rica: Un enfoque de dominios de vida. *Latin American Research Review*, 47(1), 78-94. DOI: 10.1353/lar.2012.0019
- Schimmack, U. (2008). The structure of subjective well-being. En Eid, M., y Larsen, R. (Eds.), *The Science of Subjective Well-being* (97–123). New York: Guilford Press.
- Torres, G. (2011). *Una aproximación al análisis de competitividad aplicando la técnica del modelo de ecuaciones estructurales*. Extraído el 27 de enero, 2020 de http://www.tesco.edu.mx/gem/DOC/PDF/publicaciones/tescoat1/tesco_pdf_tescoat131_4_analisiscompetitividad.pdf
- Universidad de Oxford. (2019). *Satisfacción*. Oxford Living Dictionaries. Extraído el 6 de mayo, 2019 de <https://es.oxforddictionaries.com/definicion/satisfaccion>

Mejoras al ensayo de resistencia del enlace adhesivo de ligante asfáltico en materiales para pavimentos

Improving reliability in the bitumen bond strength test on pavement materials

Daybis Tencio González

Escuela de Ingeniería Química
Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
daybis.tencio@ucr.ac.cr

Alejandra Baldi

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
alejandra.baldi@ucr.ac.cr

José Pablo Aguiar Moya

Escuela de Ingeniería Civil
Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
jose.aguiar@ucr.ac.cr

Bárbara Miranda Morales

Escuela de Ingeniería Química
Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
barbara.mirandamoraes@ucr.ac.cr

Fecha de recepción: 27 de mayo de 2021 / **Fecha de aprobación:** 07 de julio de 2021

RESUMEN

El estudio de las propiedades mecánicas de los materiales usados en pavimentos forma parte esencial de su caracterización inicial. Por ello, la reproducibilidad y la constante mejora de ensayos permite obtener resultados confiables, reduciendo errores que se puedan dar durante la preparación del material. Es por esto que el presente estudio permite establecer criterios y valores nominales para un adecuado acabado del agregado usado en pavimentos, con el fin de reducir la desviación de los resultados del ensayo de tracción uniaxial en base seca, realizados con ligante asfáltico virgen. Para el ensayo, se expuso a las muestras de agregado a un proceso de pulido por 60 segundos con un número de 10 pasadas, para lo cual se utilizaron bandas abrasivas de distintos números de grano, hasta el #320. Se pudo obtener un esfuerzo de tracción de 2,39 (0,29) MPa, donde el valor entre paréntesis corresponde a la desviación estándar y el mismo corresponde a las condiciones donde se obtuvo un mejor esfuerzo de tracción, aunado a una disminución de desviación estándar. Adicionalmente, un modelo lineal entre los factores de preparación de superficie y el valor de resistencia de enlace adhesivo (POTS por sus siglas en inglés) obtenido por un diseño factorial 2⁴, mostró que los efectos principales aportan hasta un 84 % de correlación con el esfuerzo de tracción y hasta un 78 % con su desviación estándar, lo cual es considerado satisfactorio, ya que su valor p, el cual es una medida directa de la probabilidad de aceptar las condiciones recomendadas en este documento, es de $6,56 \cdot 10^{-4}$, demostrando una adecuada significancia estadística.

Palabras clave: Ensayo de resistencia del enlace adhesivo, esfuerzo de tracción, agregado, pulido.

ABSTRACT

The study of mechanical properties of pavement materials is an essential part for their initial characterization. Therefore, the reproducibility and constant improvement of the tests involved allow to obtain faithful results, reducing the potential errors and variability that might occur during sample preparation. For this reason, this study focuses in establishing criteria and nominal values to obtain an adequate finish in the aggregate sources. This intends to reduce the standard deviation of the uniaxial tensile test, carried out by means of the bitumen bond strength test on dry conditions. The aggregates were treated by a sanding process for 60 seconds, repeating such cycles 10 times per sample. Also, abrasive bands of varying grain numbers were used. A Pull-Off Tensile Strength (POTS) of 2,39 (0,29) MPa was achieved, where the value in parentheses corresponds to the standard deviation. This value was selected due to the best conditions found in the experiment. Furthermore, a linear model obtained by a factorial design demonstrated the main effects provide up to 84 % correlation with the pneumatic stress and up to 78 % with its standard deviation, which is considered satisfactorily since the p-value defined in this research as the approval probability for the recommended conditions is $6,56 \cdot 10^{-4}$, demonstrating statistical significance.

Keywords: Bitumen bond strength test, pull off tensile stress, aggregate, sanding.

INTRODUCCIÓN

Los fenómenos de cohesión y adhesión interfacial se han estudiado por diferentes autores, en especial, para materiales utilizados en la construcción de pavimentos, donde los fenómenos antes mencionados se pueden estudiar mediante dos enfoques distintos: el químico y el mecánico. Este estudio gira en torno del análisis mecánico de la adhesión en materiales como el agregado y el ligante asfáltico, donde se ha demostrado que la adhesión tiene un efecto importante en el desempeño y vida útil de los materiales.

Las propiedades adhesivas se pueden determinar directamente con técnicas para la medición del ángulo de contacto, como la energía superficial o el trabajo de desplazamiento del agua en interfaz ligante-agregado, o también otros métodos con acercamientos prácticos como el ensayo de resistencia del enlace adhesivo de ligantes asfálticos, BBS (del inglés *Bitumen Bond Strength*).

El ensayo BBS resulta ser un método ampliamente utilizado para cuantificar el enlace entre el ligante asfáltico y el sustrato sólido: el agregado. El BBS es una prueba selectiva ya que determina la adhesión mecánica de los materiales ensayados según sus propiedades mecánicas y reológicas, y según la sensibilidad que posea el material a la tracción uniaxial y a la humedad. El BBS tiene la capacidad de diferenciar entre la susceptibilidad a la humedad en diferentes muestras de ligantes asfálticos con diversas propiedades físicas y químicas (Sarkar, Rahman, Elseifi, Mayeux, y Cooper, 2020).

En la actualidad, esta es una prueba que se ha modificado para ser aplicada a ligantes asfálticos y se incorporó a la norma AASHTO T361 (Cardone, Virgili, y Graziani, 2018). Según Tausif y colaboradores (Tausif, Zaidi, Ahmad, y Jameel, 2020), el ensayo BBS se realiza bajo la modificación de las especificaciones de la norma ASTM D-4541.

En el ensayo BBS los punzones de extracción experimentan carga neumática en tracción y si esta carga es mayor a la energía de adhesión o cohesión mecánica, entonces, ocurre la falla del material en la interfase entre ligante y agregado (Tausif *et al.*, 2020). La caracterización de dicha falla debe ser estudiada cuidadosamente, ya que depende directamente de un control visual estricto del espécimen fallado, la misma puede presentarse como falla cohesiva, falla adhesiva o una mezcla de ambas.

El ensayo BBS se evalúa tomando en cuenta tres factores principales: la fuerza de tracción (o POTS, del inglés Pull Off

Tensile Strength), el porcentaje de pérdida de la fuerza de tracción, y el modo de falla. La fuerza de tracción o POTS se puede calcular empleando la ecuación 1 (Das y Singh, 2018).

$$POTS = \frac{(BP \cdot A_g) - C}{A_{ps}} \quad (1)$$

donde,

POTS: fuerza de tracción, kPa.

BP: esfuerzo de rotura, kPa.

A_g: área de contacto entre la empaquetadura y la placa de reacción, mm².

C: constante del equipo, N.

A_{ps}: área del punzón extraíble, mm².

El efecto de la superficie de la muestra en el ensayo BBS es importante debido a que ésta afecta directamente las mediciones macroscópicas de la resistencia axial por la presencia de vacíos, imperfecciones o cualquier otro disturbio en la superficie.

En el ensayo se utilizan estos materiales usuales en pavimentos, donde se deposita una muestra de ligante asfáltico como agente adhesivo sobre el agregado mineral. La carga neumática uniaxial es aplicada sobre el punzón y el ensayo genera tres resultados principales:

1. El perfil de la fuerza de tensión a través del tiempo.
2. La resistencia máxima ante falla.
3. El tipo de falla por análisis visual o de imágenes.

Como se mencionó previamente, el ensayo BBS posee la particularidad de que la distribución de la carga neumática en las muestras permite tres posibles modos de falla: adhesión, cohesión o una combinación de ambos. El modo de falla es el resultado de la resistencia interfacial máxima permitida por los materiales durante el esfuerzo proporcionado por la carga.

Con respecto a la adhesión entre dos superficies, ésta se define como el proceso en donde partículas o superficies dispares se encuentran unidas por fuerzas de valencia o fuerzas de enclavamiento (Moraes, Velasquez, y Bahia, 2011). Por tanto, una mala adhesión interfacial en una mezcla asfáltica en presencia de agua afectará sus propiedades, teniendo algunas consecuencias mecánicas como:

1. Pérdida de cohesión en la mezcla asfáltica.
2. Falla del enlace adhesivo entre el agregado y el ligante asfáltico, también se conoce como desnudamiento.
3. Degradación del agregado.

En consecuencia, el daño por humedad contribuye altamente al agrietamiento del pavimento, mediante cinco mecanismos que son: desprendimiento, desplazamiento, emulsificación espontánea, presión de poros e hidráulica (Strategic Highway Research Program, 1991).

A este punto se resalta la necesidad de disminuir la variabilidad del ensayo de tracción uniaxial al ser un indicador directo del esfuerzo de tracción interfacial entre agregado y ligante asfáltico. Por tanto, el objetivo del presente estudio es determinar las condiciones de preparación superficial que mejoren los resultados del ensayo BBS. Este objetivo se puede lograr minimizando inicialmente la desviación estándar y obteniendo las mejores condiciones para ese propósito. Posteriormente, se deben registrar las condiciones que maximicen el esfuerzo de enlace del ligante y contrastar ambas condiciones para determinar la preparación superficial adecuada para el agregado mineral.

Aplicabilidad

Es importante detallar que el ensayo BBS puede determinar el esfuerzo de tracción en condiciones de humectación completa, por lo que se puede determinar el porcentaje de pérdida de fuerza del enlace de adhesión, el cual es un parámetro de estudio que pretende estimar la resistencia al daño por humedad del material y se calcula mediante la ecuación 2 (Das y Singh, 2018):

$$\% \text{ de pérdida de fuerza del enlace} = \frac{POTS_{seco} - POTS_{húmedo}}{POTS_{seco}} \quad (2)$$

El esfuerzo de tracción en seco se mide a temperatura ambiente, mientras que para la fuerza de tracción en húmedo se necesita agua a 40 °C. En el caso del último parámetro, el modo de falla se determina con inspección visual de la superficie del agregado (Das y Singh, 2018).

Tanto la determinación en base seca como húmeda dependen de la preparación de la superficie de la muestra de agregado, debido al esparcimiento del ligante sobre la misma, donde los vacíos internos e imperfecciones superficiales pueden llegar

a exponer nuevas microestructuras de soporte después de un pulido agresivo y descontrolado. Estas microestructuras afectan el valor de esfuerzo durante la ejecución del ensayo tal como se observa en la Figura 1. Razón por la cual es importante estudiar las condiciones de preparación de superficie y su efecto sobre la resistencia de enlace adhesivo de estos materiales.

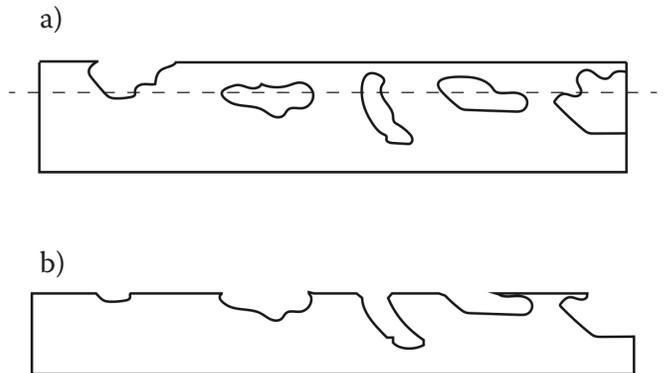


Figura 1. Vacíos internos expuestos en la superficie una vez que se pule, a) muestra de agregado mineral sin pulir y b) muestra de agregado mineral pulida

Con lo anterior, se observa que la preparación de la superficie es un factor importante para el ensayo BBS por lo que controlar, estudiar y buscar las mejores condiciones para las variables de pulimento como: ciclos de pulido, grano nominal y tiempo de exposición provocarían una reducción de la variabilidad del ensayo y un mejor desempeño de esta.

METODOLOGÍA

Tanto los requerimientos como equipos necesarios para el ensayo de tracción uniaxial se describen en la norma ASTM D4541-17, o bien, su correspondiente AASHTO T361. En resumen, se tomó una muestra de agregado con dimensiones de 140 mm·70 mm·10 mm para un espaciamiento entre punzones de 35 mm, luego se agregó 0,40 g de ligante asfáltico y se procedió a armar el equipo para su posterior falla, como se muestra en la Figura 2. Para un mayor detalle sobre el protocolo puede encontrarse más información en el proyecto de graduación titulado “Determinación de las mejores condiciones de preparado de muestra para las pruebas de energía superficial y adhesión neumática en agregado con análisis topológico superficial para la generación de un protocolo” (Tencio, 2019).

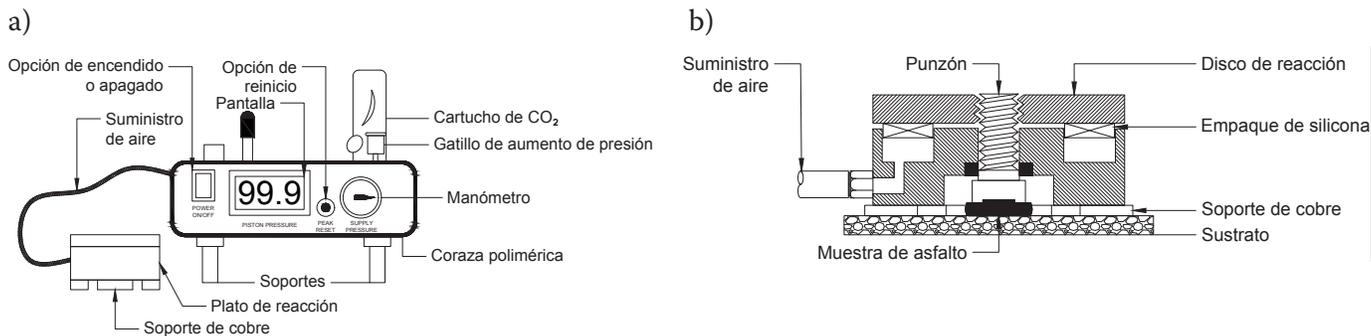


Figura 2. Descripciones gráficas de las partes que conforman el ensayo enlace adhesivo con agregado y ligante asfáltico

Las condiciones superficiales se regulan según un set de variables en la preparación del pulido; las cuales son: tipo de agregado, grano nominal, corridas y tiempo de exposición. En el Cuadro 1 se detalla cada una de las variables del diseño factorial 2^4 .

Las condiciones mencionadas en el Cuadro 1 fueron escogidas luego de efectuar estudios de sensibilidad del ensayo de BBS. Lo anterior fue necesario ya que tal ensayo tiene un carácter destructivo para las muestras, por lo que se consideró variar los niveles de los factores a analizar y elegir aquellos que tuviesen un efecto en el valor de POTS.

Con el fin de obtener las mejores condiciones que minimicen la variabilidad del ensayo, así como conocer los efectos principales e interacciones con las variables respuesta del ensayo, se utiliza un diseño de experimentos tipo factorial con 2 niveles y 4 factores.

El pulido superficial se debe realizar de manera progresiva; es decir, se debe pulir la superficie con cada banda abrasiva existente hasta alcanzar el valor nominal señalado en el diseño estadístico del Cuadro 1. Una vez que se obtienen las distintas condiciones superficiales para el agregado mineral, este se limpió y acondicionó.

La limpieza inicia al colocar las muestras de agregado con agua destilada dentro de un baño ultrasónico durante 60 minutos a $60\text{ }^\circ\text{C}$, con el fin de evitar que impurezas y agregados finos se encuentren en la superficie. Una vez que la muestra se encuentre limpia, se procede a secar la muestra en un horno de convección a $60\text{ }^\circ\text{C}$ durante 3 horas.

En lo que respecta a la preparación de la interfase ligante-agregado, se utilizó un solo tipo de ligante asfáltico virgen y se colocaron 0,40 g de ligante asfáltico en la cabeza de cada punzón y se esperó a que se dispersara adecuadamente. Posteriormente, los punzones se colocaron sobre la muestra de agregado manteniendo una distancia entre ellos de 35 mm.

Luego, las muestras se dejaron reposar hasta que alcancen la temperatura ambiente y se calibra el equipo marca Quantum Gold para el ensayo BBS, en el cual se procede a dar paso de una corriente neumática que genera tracción sobre el punzón para alcanzar una tasa de aumento de presión constante. Luego de ello, se procede a realizar el ensayo a cada muestra con ligante asfáltico monitoreando y almacenando la presión durante el ensayo hasta el fallo de éste. Es importante mencionar que el ligante asfáltico se preparó según la norma AASHTO T361 (equivalente a ASTM D4541), no se omite indicar que a la fecha de este estudio no existe una correspondencia nacional para dicho ensayo.

Cuadro 1. Descripción de las variables de pulimiento del agregado para el diseño factorial 2^4

Factor	Símbolo	Descripción	Nivel bajo	Nivel alto
Tipo de agregado	M	Naturaleza química del agregado mineral	Calizo	Silíceo
Grano nominal	N	Tamaño de grano nominal de la banda abrasiva (banda abrasiva)	#120	#320
Corridas	R	Número de veces que la banda abrasiva se pasa sobre la superficie de la muestra	1 vez	10 veces
Tiempo de exposición	t	Duración de cada corrida	10 segundos	60 segundos

Las determinaciones de rugosidad constan del uso de un perfilómetro de contacto marca Bruker modelo Dektak XT el cual utiliza una punta de cuarzo donde la misma mapea una superficie cuadrada de 2500 μm con una resolución de 0,833 $\mu\text{m}/\text{pt}$ durante 10 s por traza y un total de 500 trazas, se utilizó una fuerza de 2 mg_f basada en criterios del fabricante y desgaste de la punta de cuarzo sobre la muestra de agregado.

En el Cuadro 2 se muestra la identificación de las muestras con los niveles utilizados en el experimento para cada una de las variables en estudio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La norma AASHTO T361 que establece el protocolo del ensayo BBS indica que la preparación de la superficie del agregado se debe realizar con una banda abrasiva cuyo tamaño de grano nominal es 280. Por esta razón, en este estudio se eligieron valores de banda abrasiva de 120 y 320 como niveles bajo y alto, respectivamente, de modo que se obtuviese un acabado superficial más pulido y otro más rugoso que el indicado en la norma. Lo anterior permite analizar si existe un efecto en los valores de POTS y en la desviación estándar resultante al ensayar muestras de agregado con distintos acabados.

Con el objetivo de dimensionar la calidad del acabado superficial, se midió la rugosidad de cada muestra, permitiendo así conocer si en efecto los tratamientos aplicados generan superficies diferentes en el agregado. En el Cuadro 3 se muestran los resultados del ensayo BBS y se incluye cada valor obtenido de rugosidad absoluta. Es importante resaltar que los tipos de agregados utilizados en este estudio corresponden a las dos fuentes principales existentes en el país, sílica y caliza, siendo esta última poco utilizada en mezclas asfálticas. Adicionalmente, fueron seleccionadas ya que difieren en la resistencia al pulimento de cada una, ya que la caliza es altamente conocida por pulirse con facilidad.

De acuerdo con los resultados del Cuadro 3, se observa que algunas muestras con menos rugosidad suelen mostrar valores elevados de POTS. Este fenómeno es ocasionado por la reducción de material en la superficie tras el pulido, lo que genera la exposición de vacíos internos que aparecen en la superficie de la muestra y pueden dar paso a la aparición de nuevas imperfecciones; como se observa en la Figura 1. Esto significa que cada vez que se exponen más defectos los mismos ejercen nuevos micro-soportes ante la acción del esfuerzo neumático en tracción. Cabe destacar que este efecto no fue cuantificado debido a que depende enteramente de la topología de los vacíos y de los defectos expuestos en el material.

Cuadro 2. Descripción de las muestras en el diseño experimental utilizado

Iden	Grado nominal, N	Tiempo de exposición, t/(s)	Tipo de agregado, M	Cantidad de carreras, C
A1	320	10	Calizo	1
A2	320	10	Calizo	10
A3	320	10	Silícico	1
A4	320	10	Silícico	10
A5	320	60	Calizo	1
A6	320	60	Calizo	10
A7	320	60	Silícico	1
A8	320	60	Silícico	10
B1	120	10	Calizo	1
B2	120	10	Calizo	10
B3	120	10	Silícico	1
B4	120	10	Silícico	10
B5	120	60	Calizo	1
B6	120	60	Calizo	10
B7	120	60	Silícico	1
B8	120	60	Silícico	10

Cuadro 3. Valores de fuerza de tracción (POTS), desviación estándar y rugosidad absoluta asociadas a las interfaces de agregado y ligante asfáltico

Identificador	POTS, σ /(MPa)	Desv. Estándar, $SD\sigma$ /(MPa)	Rugosidad absoluta, R_a /(μm)
A1	1,94	0,16	1,0884
A2	2,19	0,17	1,2465
A3	1,89	0,21	1,1900
A4	1,88	0,44	0,8616
A5	1,91	0,23	1,8058
A6	2,39	0,29	1,3935
A7	2,01	0,66	4,6777
A8	2,26	0,35	0,6017
B1	1,53	0,47	3,6243
B2	2,08	0,48	2,2613
B3	1,74	0,49	1,7247
B4	1,87	0,49	3,2713
B5	1,98	0,26	1,6203
B6	1,52	0,23	0,6790
B7	2,40	0,12	1,8193
B8	2,09	0,09	0,9950

Otro factor que afecta el caso de estudio es la heterogeneidad composicional de los agregados, la cual afecta la tracción mecánica debido a la diferencia de dureza y propiedades físicas de éstos y los misceláneos dentro del agregado, ya que la muestra al contener diferentes compuestos, estos ejercen una interacción adhesiva diferenciada, para la cual se recomienda mapear con el fin de determinar su efecto. A pesar de estas diferencias, los valores de rugosidad y POTS demuestran que, para la mayoría de las muestras, el nivel alto de #320 de grano nominal de banda abrasiva usada en la preparación superficial produce una superficie con mejor adhesión.

Ahora bien, en la Figura 3 se observa que la variación en la cantidad de corridas (entre 1 y 10) produce un aumento promedio en POTS de 0,138 MPa; si se cambia el tiempo de exposición de cada corrida de 10 s a 60 s, el aumento es de 0,188 MPa. Por su parte, el número de grano nominal aumenta la fuerza de tracción en 0,163 MPa, cuando se cambian las bandas de abrasión de #120 a #320. De acuerdo con el análisis de sensibilidad anterior, se puede observar que el efecto del

tiempo de exposición tiene gran impacto sobre el valor del esfuerzo de adhesión, esto indica que si se toma mucho más tiempo para preparar la superficie se necesitará mayor energía para la ruptura lo cual es beneficioso en la mezcla asfáltica. La Figura 3b muestra que si se usan menor cantidad de ciclos de pulimiento la desviación estándar disminuirá importantemente, dato que se puede observar en el valor p en el Cuadro 4 y el Cuadro 5.

Con el objetivo de analizar el efecto que tiene cada uno de los factores sobre el valor de la fuerza de tracción para cada combinación, se propone un modelo estadístico, el cual se detalla en el Cuadro 4. El modelo descrito busca relacionar los valores de POTS obtenidos, y la desviación estándar asociada, con los factores analizados.

En el Cuadro 4 se aprecia que, de acuerdo con el diseño factorial aplicado, el factor tiempo de exposición tiene el mayor efecto sobre el valor de POTS, ya que posee el valor p más bajo, lo que indica que existe confianza suficiente para afirmar que tiene una mayor significancia estadística.

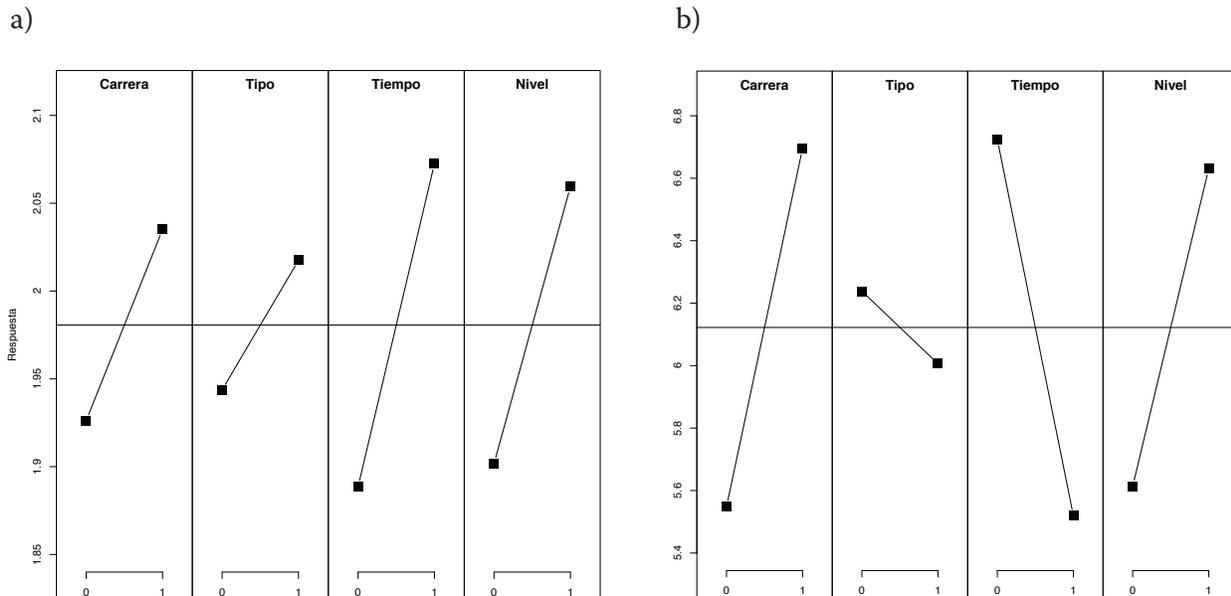


Figura 3. Análisis de sensibilidad y comportamiento de los efectos para: a) Resistencia de enlace adhesivo, b) Desviación estándar

Cuadro 4. Modelo estadístico con coeficientes w_i lineales para la medición de la resistencia de enlace adhesivo (σ) y su desviación estándar (SD_σ)

Modelo Lineal	$\frac{\sigma}{(MPa)} = \sum \omega_i E_i + \epsilon$			$\frac{SD_\sigma}{(MPa)} = \sum \omega_i^* E_i + \epsilon$		
	Residuo, ϵ 0,9197			Residuo, ϵ 3,466		
	<i>p</i> -value $9,83 \times 10^{-5}$	$F_{4,12 \text{ df}}$ 15,85	R^2 0,8408	<i>p</i> -value $6,56 \times 10^{-4}$	$F_{4,12 \text{ df}}$ 10,59	R^2 0,7793
Factor, E_i	Estimado, $w_i (SD_w)$	t-value	Pr(> t)	Estimado, $w_i^* (SD_{w^*})$	t-value	Pr(> t)
Corridas, R (número de veces)	0,7963 (0,41)	1,936	0,0768	3,451 (1,550)	2,226	0,0459
Tipo de agregado, M (adimensional)	0,7611 (0,41)	1,850	0,0890	2,071 (1,550)	1,336	0,2063
Tiempo de exposición, T (s)	0,8714 (0,41)	2,119	0,0557	1,098 (1,550)	0,708	0,4923
Grano nominal, N (#)	0,8451 (0,41)	2,055	0,0624	3,321 (1,550)	2,142	0,0534

Por otro lado, los resultados muestran que una banda abrasiva de grano nominal #320 posee un valor mayor de fuerza de tracción y que la fiabilidad del ensayo BBS es mayor que en una superficie que se encuentra preparada de forma menos detallada (niveles bajos del diseño factorial). Lo anterior se puede ver evidenciado en el Cuadro 3, donde los valores de carrera menores producen una disminución promedio considerablemente menor de la desviación estándar, alrededor de 0,32 MPa.

En general, el modelo propuesto para la fuerza de tracción posee una relación del 84 % entre el valor medido experimentalmente y el estimado de acuerdo con el diseño factorial. Asimismo, el valor p que se determinó para el modelo permite establecer con una confianza estadística significativa que el modelo

tiene validez. El mismo análisis se realizó para la desviación estándar y se determinó que las condiciones presentadas por el modelo satisfacen la disminución de la desviación estándar y, por ende, permiten una reproducibilidad fiel del ensayo.

Es importante indicar que no todos los efectos individuales del diseño experimental afectan de forma positiva, es decir incrementando el valor de POTS y disminuyendo la desviación estándar. Adicionalmente, en este estudio no se encontró interacción entre los efectos por lo que el modelo lineal se considera estadísticamente suficiente para estimar el valor de POTS y la desviación estándar para las interfases de agregado y ligante virgen. El análisis estadístico realizado permitió establecer las mejores condiciones de preparación de muestra de agregado para el ensayo BBS (Cuadro 5).

Cuadro 5. Condiciones recomendadas de preparación superficial para ambos agregados calizo y silíceo para el ensayo BBS

Factor, E_i	Niveles de los factores	
	POTS	Desviación Estándar
Corridas, R (número de veces)	10	1
Tiempo de exposición, t (s)	60	10
Grano nominal, N (#)	320	320

En el Cuadro 5, se aprecian los resultados del diseño factorial, los cuales revelan que las mejores condiciones para el valor de POTS desde el punto de vista estadístico para ambos agregados minerales son: 10 corridas por cada banda abrasiva usada, durante 60 segundos de tiempo de exposición y con un acabado final logrado con el abrasivo #320.

Mediante el análisis del diseño experimental se encontró que no existe diferencia en las condiciones de preparación de la superficie para ambos tipos de agregado mineral para la medición de POTS. Lo cual implica que ambos tipos de agregado, calizo o silíceo, pueden prepararse de la misma manera sin variar los resultados de POTS que se obtienen.

Finalmente, en la Figura 4 se puede observar que las condiciones de preparación que permiten obtener valores de POTS con menor desviación estándar son: 1 corrida de

duración de 10 segundos y un acabado final dado con la banda #320.

Es importante resaltar que las condiciones de nivel bajo representan un tratamiento descuidado de la superficie, en donde el pulimiento se hace de manera rápida, mientras que el nivel alto representa un tratamiento más detallado, buscando una superficie más homogénea. En consecuencia, y de acuerdo con el Cuadro 5, los valores de POTS se ven mejorados al aplicar un acabado superficial correspondiente a los niveles altos de corridas y tiempo de exposición, mientras que la desviación estándar del ensayo se reduce al aplicar un tratamiento con niveles bajos de estos mismos factores.

Se encontró que el mejor grano nominal de abrasión correspondió a la banda abrasiva de grano nominal #320 en ambos casos y se determinó que el tipo de banda es importante en la preparación superficial mediante la comparación del valor p relacionado con dicho efecto ($p=0,0534$).

Por lo tanto, se logró disminuir la desviación estándar del ensayo BBS para diferentes acabados superficiales, esto se deduce al observar la gran disminución de la desviación estándar de los valores de POTS. Por lo que, el tratamiento descrito para las muestras de agregado bajo las condiciones analizadas y resumidas en el Cuadro 5, sirven de insumo para el establecimiento de un protocolo de preparación, adicional al estándar actual.

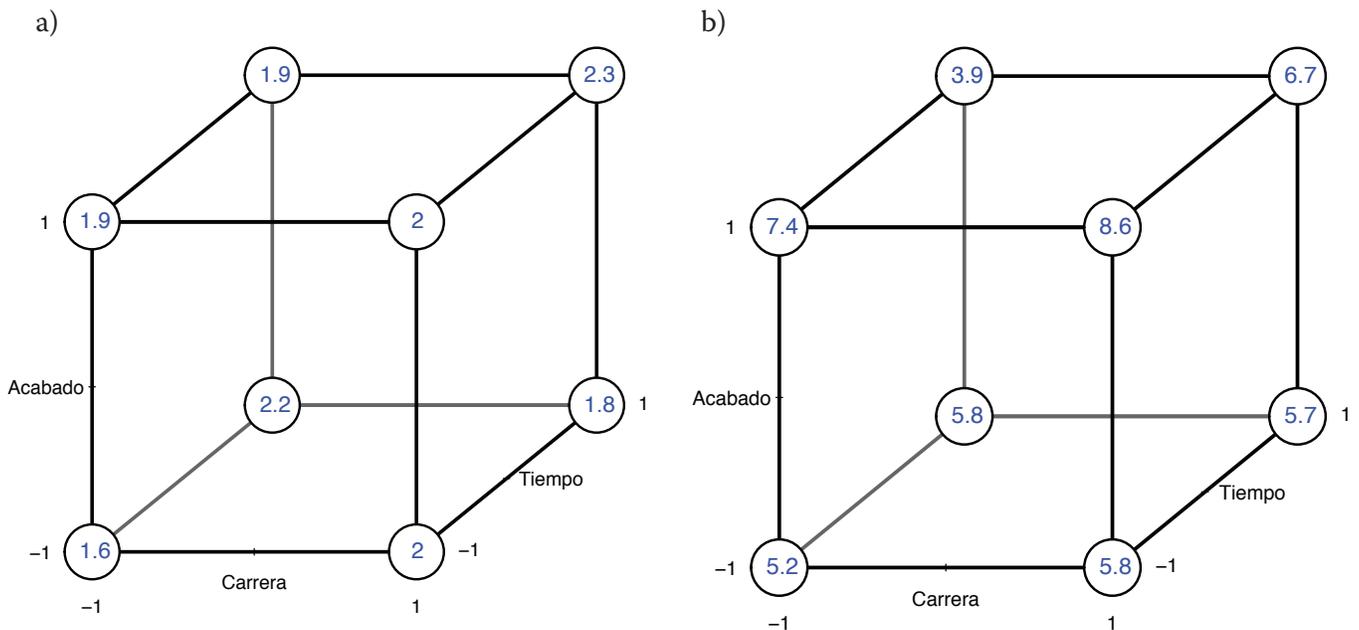


Figura 4. Gráfico de cubo del diseño factorial para: a) Resistencia de enlace adhesivo, b) Desviación estándar.

CONCLUSIONES

Los hallazgos del presente estudio permiten concluir:

- Las condiciones recomendadas de preparado superficial para mejorar el valor de POTS de los agregados minerales estudiados son 10 corridas en cada banda abrasiva por debajo e incluyendo la banda #320 con un tiempo de exposición a la banda de 60 s en cada corrida.
- La operación de preparado superficial combinado con las irregularidades superficiales preexistentes, vacíos superficiales, imperfecciones y porosidad determinan la calidad del acabado final de la muestra de agregado.
- A partir de una preparación adecuada de las muestras de agregado (sin diferenciar entre calizo o silíceo) es posible mejorar la calidad de los datos de POTS en base seca obtenidos, lo cual se traduce en una reducción de la desviación estándar asociada a los mismos.

REFERENCIAS

- The American Association of State Highway and Transportation Officials (2020). *Standard Method of Test for Determining Asphalt Binder Bond Strength by Means of the Binder Bond Strength (BBS) Test* (AASHTO T361-16).
- ASTM International (2018). *Standard Test Method for Coating Flexibility of Prepainted Sheet* (D4145-10). DOI: 10.1520/D4145-10R18
- Cardone, F., Virgili, A., y Graziani, A. (2018). Evaluation of bonding between reclaimed asphalt aggregate and bitumen emulsion composites. *Construction and Building Materials*, 184, 565-574. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.016
- Das, A., y Singh, D. (2018). Effects of Regular and Nano Sized Hydrated Lime Fillers on Fatigue and Bond Strength Behavior of Asphalt Mastic. *Transportation Research Record*, 2672(28), 31-41. DOI: 10.1177/0361198118759064.
- Moraes, R., Velasquez, R., y Bahia, H. U. (2011). Measuring the effect of moisture on asphalt-aggregate bond with the bitumen bond strength test. *Transportation Research Record* 2209(1), 70-81. DOI: 10.3141/2209-09
- Sarkar, M., Rahman, M., Elseifi, M., Mayeux, C., y Cooper, S. (2020). Rheological and Molecular Characterizations of Tire Rubber Modified Asphalt Emulsion. *Transportation Research Record*, 2674(3), 12-26. DOI: 10.1177/0361198120908871
- Strategic Highway Research Program (1991). *The effect of the physical and chemical characteristics of the aggregate on bonding* (SHRP-A/UIR-91-507). Recuperado de: <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp/SHRP-91-507.pdf>
- Tausif, M., Zaidi, S., Ahmad, N., y Jameel, M. (2020). Influence of Natural Zeolite and Paraffin Wax on Adhesion Strength Between Bitumen and Aggregate. *Civil Engineering Journal*, 6(4), 733-742. DOI: 10.28991/cej-2020-03091505.
- Tencio, S. (2019). *Determinación de las mejores condiciones de preparado de muestra para las pruebas de energía superficial y adhesión neumática en agregado con análisis topológico superficial para la generación de un protocolo* (Tesis de grado). Universidad de Costa Rica, San José.

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

Mechanical performance analysis of an asphalt mixture modified with bamboo fibres

Angie Jiménez

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Cartago, Costa Rica
angiey2395j@gmail.com

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

RESUMEN

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

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

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

ABSTRACT

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

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

Keywords: bamboo fibres, asphalt mixture, mechanical performance.

INTRODUCCIÓN

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

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

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

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

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

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

METODOLOGÍA

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

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

Cuadro 1. Datos de la mezcla de control

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

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

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

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

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



Figura 1. Fibra de Bambú

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

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

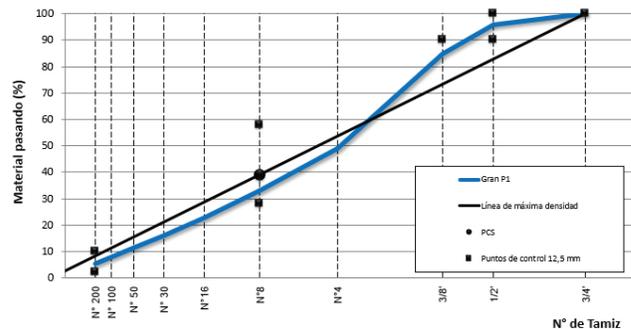


Figura 2. Granulometría de agregados utilizados más la fibra de bambú

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

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

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

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

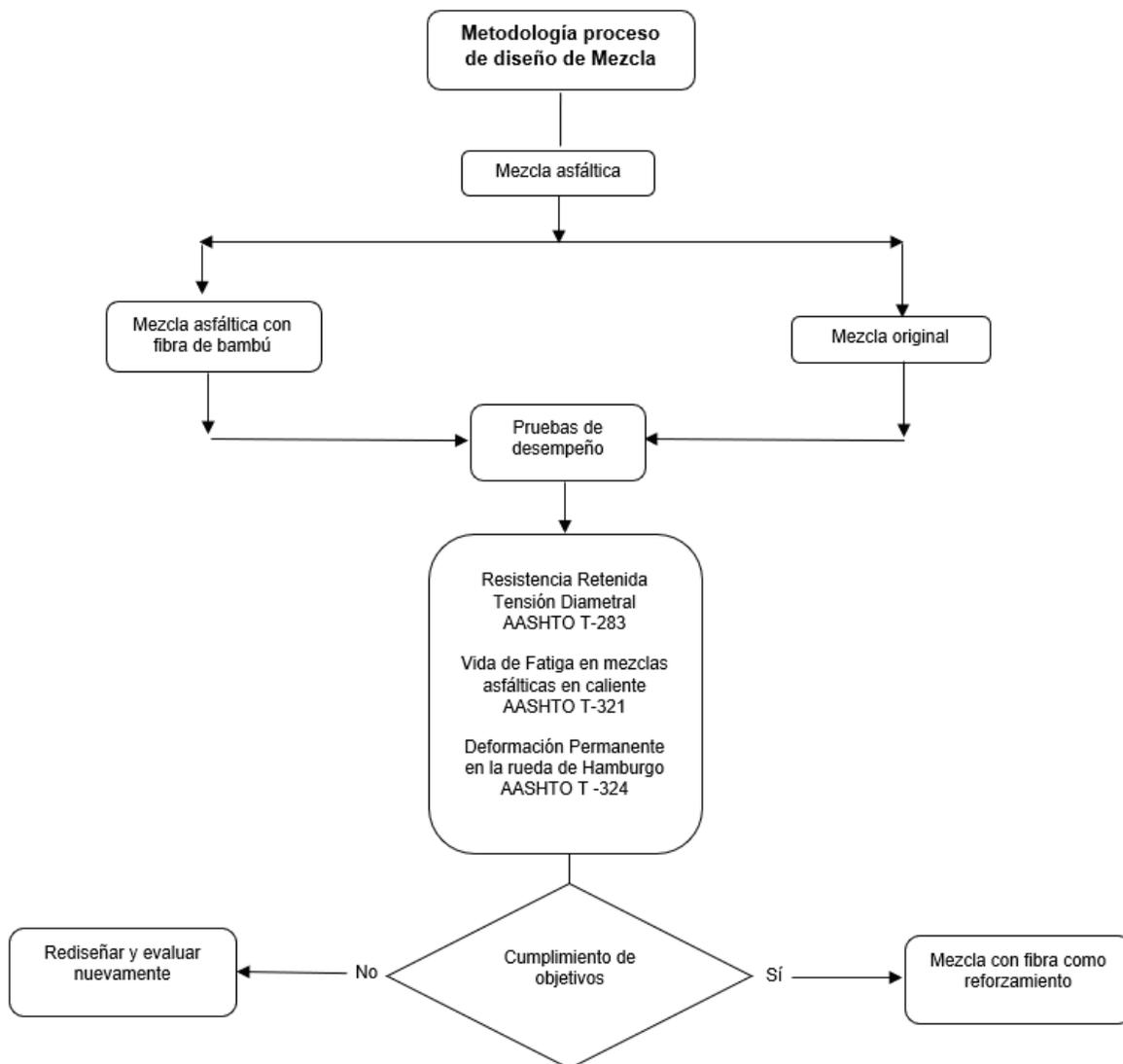


Figura 3. Esquema metodológico del proyecto de investigación (Jiménez, 2019)

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

RESULTADOS

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

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

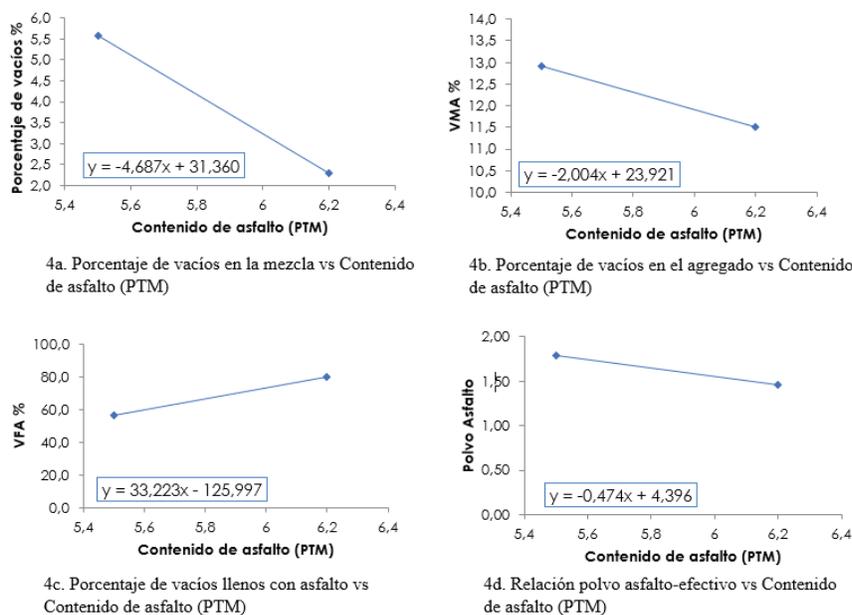


Figura 4. Relación de distintos parámetros con respecto al contenido de asfalto de la mezcla (Jiménez, 2019)

Cuadro 2. Parámetros volumétricos de mezcla con fibra

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

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

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

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

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

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

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

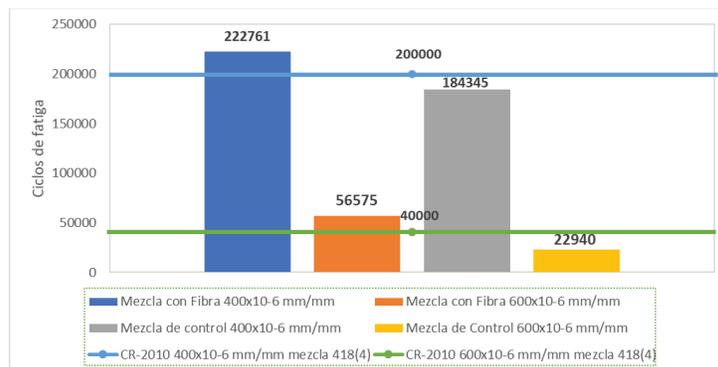


Figura 5. Gráfico comparativo de la prueba de ciclos de fatiga vs especificaciones técnicas

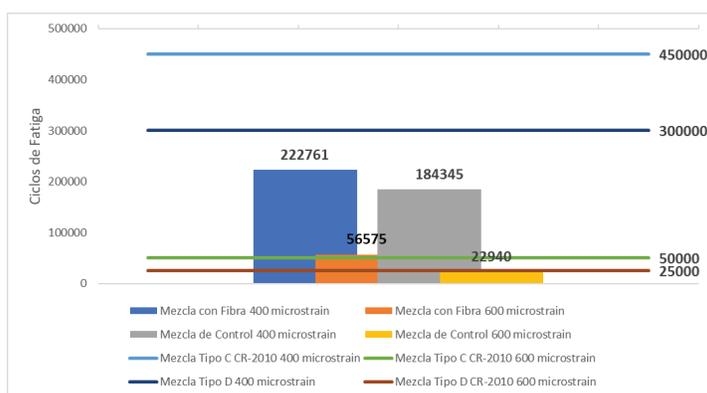


Figura 6. Gráfico comparativo de la prueba de ciclos de fatiga vs tipo de mezcla

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

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

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

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

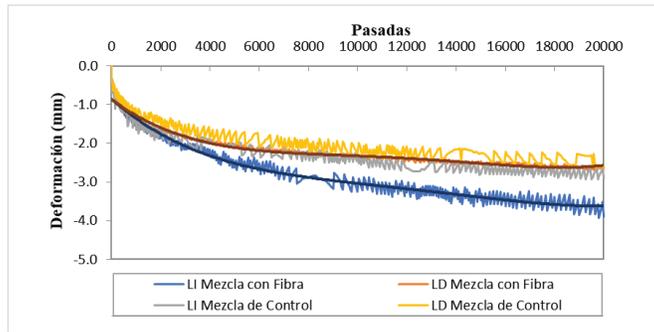


Figura 7. Gráfico comparativo de la prueba de deformación permanente para ambas mezclas

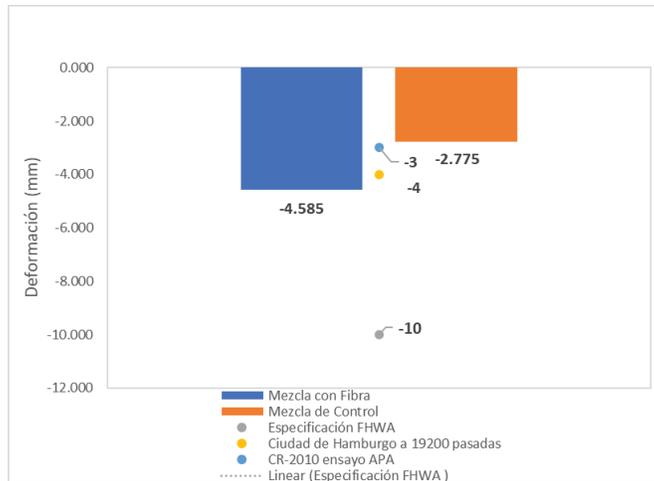


Figura 8. Gráfico comparativo de la prueba de deformación vs especificaciones técnicas

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

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

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

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

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

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

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

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

REFERENCIAS

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

Evaluación del desempeño de los pavimentos rígidos en Costa Rica

Performance evaluation of rigid pavements in Costa Rica

María Paula Montes de Oca Hidalgo

Escuela de Ingeniería Civil
Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
mpaulamh@gmail.com

Tania Ávila Esquivel

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
tania.avilaesquivel@ucr.ac.cr

Wendy Sequeira Rojas

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
wendy.sequeira@ucr.ac.cr

José Pablo Aguiar Moya

Escuela de Ingeniería Civil
Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
jose.aguiar@ucr.ac.cr

Fecha de recepción: 11 de mayo de 2021 / **Fecha de aprobación:** 09 de julio de 2021

RESUMEN

Se reconoce la necesidad de conocer los deterioros típicos de los pavimentos rígidos en Costa Rica, ya que no existen técnicas de diseño ni información a nivel constructivo que tomen en cuenta las variables climatológicas ni de tránsito del país. Con el objetivo de complementar la información existente, se propone una evaluación para determinar los deterioros típicos de los pavimentos rígidos en Costa Rica.

La evaluación de los pavimentos rígidos se basó en una auscultación visual y en un levantamiento automático mediante el Geo 3D. Inicialmente, se realizó el levantamiento de los deterioros de cada uno de los siete proyectos, los cuales se utilizaron para calcular el PCI (del inglés *Pavement Condition Index*) de cada uno y determinar los deterioros típicos. Luego, se identificaron las características climatológicas y de tránsito de cada proyecto y se relacionaron con los deterioros. Finalmente, se crearon los modelos iniciales de predicción de deterioros con las relaciones obtenidas.

Se observó que los deterioros típicos de Costa Rica son el daño de sello de junta (21,22 %), desprendimiento de agregados (13,58 %), pulimiento de agregado (13,10 %) y agrietamiento lineal (7,08 %), además los deterioros se relacionan con la precipitación, temperatura y ejes equivalentes. Por lo tanto, se recomienda tomar como base los resultados de esta investigación para futuros modelos de predicción de deterioros.

Palabras clave: Deterioros típicos, PCI, auscultación visual, pavimento rígido.

ABSTRACT

The need to understand the typical deterioration of rigid pavements in Costa Rica is recognized, since there are no design techniques or information at a constructive level that considers the country's climatological and traffic variables. To complement the existing information, an evaluation is proposed to determine the typical deterioration of rigid pavements in Costa Rica.

The evaluation of rigid pavements was based on a visual auscultation and an automatic survey using Geo 3D. Initially, the deterioration of each of the seven projects was surveyed and used to calculate their PCI (Pavement Condition Index) and to determine the typical deterioration. Then, the climatological and traffic characteristics of each project were identified and related to the deteriorations. Finally, the relationships obtained were used to create the initial deterioration prediction models.

It was observed that the typical deteriorations in Costa Rica are joint seal damage (21,22 %), aggregate spalling (13,58 %), aggregate polishing (13,10 %) and linear cracking (7,08 %). In addition, the deteriorations are related to precipitation, temperature, and equivalent axis. Therefore, it is recommended that the results of this research serve as a basis for future deterioration prediction models.

Keywords: *Typical deterioration, PCI, visual auscultation, rigid pavement.*

INTRODUCCIÓN

El presente artículo se basa en el trabajo final de graduación titulado: “Evaluación del desempeño de los pavimentos rígidos en Costa Rica” (Montes de Oca, 2020). En este documento se abarcan los principales resultados de los deterioros encontrados en los siete proyectos de pavimento rígido que se evaluaron, los cuales fueron: Cañas – Liberia, San Francisco – La Colina, Zapote – San Francisco, Universal – La Salle, las losas cortas de Cartago, Guadalupe – El Alto y Limonal – Tempisque. La necesidad de la investigación nace a partir del aumento de pavimentos de concreto que se han construido tanto en la Red Vial Nacional, como en las vías municipales. Es importante mencionar que, para diseñarlos, se siguen utilizando metodologías extranjeras, las cuales no consideran las condiciones climáticas ni de tránsito propias de Costa Rica. Es por esto que instituciones como el LanammeUCR se han dado a la tarea desde hace varios años de ir generando los insumos necesarios para desarrollar una metodología de diseño mecánico empírica aplicable a nuestro país.

En los últimos años se ha presentado una constante queja de la población costarricense con respecto al mal estado de los pavimentos de las vías nacionales. La presencia de deterioros y fallas tempranas se ha vuelto uno de los principales problemas a la hora de realizar un diseño de pavimentos, ya que los deterioros se toman en cuenta en los diseños a través de la aplicación de modelos de desempeño que no consideran las condiciones típicas del país y esto impide predecir con mayor precisión cuándo va a fallar el pavimento.

Existe un desconocimiento a nivel nacional de cuál es el tipo de deterioro típico en pavimentos rígidos para las condiciones climatológicas y de tránsito de Costa Rica, es por eso que no hay claridad si el modelo existente de fatiga para pavimentos rígidos es el adecuado para aplicarlo en la mayoría de los proyectos, puesto que, si no lo es, se debe desarrollar un modelo para otro tipo de deterioro y, en caso de que sí lo sea, puede requerir una calibración para que sea el adecuado. Al no contar con un modelo aplicable en Costa Rica, se presentan los deterioros y fallas tempranas que se mencionan con anterioridad, lo que genera un costo mayor a futuro por darle un mantenimiento anticipado a los pavimentos (LanammeUCR, 2017).

METODOLOGÍA

Para el presente trabajo se utilizó la metodología de la norma ASTM D6433-20 (2020) para determinar el PCI (del inglés *Pavement Condition Index*) de los proyectos evaluados. Algunos de los levantamientos se realizaron mediante la auscultación visual mientras que otros se realizaron utilizando el Geo 3D. Sin embargo, en ambos casos se utilizaron sistemas de información geográfica para registrar los deterioros existentes en cada proyecto. Asimismo, es importante mencionar que se utilizaron los valores de temperatura y precipitación proporcionados por el Instituto Meteorológico Nacional (Instituto Meteorológico Nacional, 2020) y los valores del Tránsito Promedio Diario registrados en las bases de datos del Ministerio de Obras Públicas y Transportes del año 2020 (Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 2020) para realizar las regresiones lineales y las correlaciones entre las variables. Por último, con el levantamiento de los deterioros y con la información de tránsito, clima y estimaciones recopilada, se procedió a analizar estadísticamente la información, y generar los modelos de regresión lineal que correlacionan cada una de las variables estudiadas con los deterioros observados.

A continuación, se ejemplifica la metodología que se utilizó para realizar el levantamiento de los deterioros en cada uno de los proyectos. El levantamiento de los deterioros en Universal – La Salle (Ruta Nacional 167) se realizó mediante la metodología de la norma ASTM D6433-20 de auscultación visual. En este proyecto se utilizaron 19 unidades de muestreo por sentido, cada una con 20 losas de 3,5 m de longitud, la ubicación de las unidades de muestreo se puede observar en la Figura 1. El total de deterioros se muestra en el Cuadro 1.



Figura 1. Unidades de muestreo

Cuadro 1. Total de deterioros en La Salle – Universal

Losas evaluadas		760	
Deterioro		Cantidad de deterioros	%
22	Grieta de Esquina	3	0,4
26	Daño en sello de junta	330	43,4
28	Agrietamiento Lineal	3	0,4
29	Parches (Grandes)	3	0,4
31	Pulimiento de Agregado	167	22,0
32	Desprendimiento de Agregado	39	5,1
37	Grietas por contracción	1	0,1
38	Fractura de junta	27	3,6
39	Fractura de esquina	131	17,2
-	Sin deterioro	-	7,4

Evaluación del pavimento rígido

Para definir el número mínimo de unidades de muestreo a analizar para pavimentos rígidos se utilizó el método establecido en la norma ASTM D6433-20. Este proceso se realizó para todos los proyectos, sin embargo, es importante mencionar que los levantamientos de los deterioros de los proyectos Cañas – Liberia (Ruta Nacional 1), Zapote – San Francisco (Ruta Nacional 204) y San Francisco – La Colina (Ruta Nacional 211) fueron facilitados por la Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional del LanammeUCR.

Datos obtenidos

A continuación, se muestra el total de deterioros registrados en todos los proyectos (Cuadro 2). En la Figura 2, se muestra la distribución de los deterioros en cada uno de los proyectos.

Cuadro 2. Total de deterioros registrados

Deterioro		Bajo	Medio	Alto	N/A	Total de deterioros	%
22	Grieta de Esquina	97	33	13	-	143	0,71
23	Losa Dividida	8	71	134	-	213	1,06
25	Escalonamiento entre calzada y juntas	35	-	3	-	38	0,19
26	Daño en sello de junta	3155	1013	94	-	4262	21,22
27	Escalonamiento entre calzada y espaldón	6	6	-	-	12	0,06
28	Agrietamiento lineal	744	411	266	-	1421	7,08
29	Parches (Grandes)	28	32	16	-	76	0,38
30	Parches (Pequeños)	1266	23	8	-	1297	6,46
31	Pulimiento de agregado	-	-	-	2630	2630	13,10
32	Desprendimiento de agregados	-	-	-	2728	2728	13,58
34	Punchout	3	7	10	-	20	0,10
36	Grietas en malla o Resquebrajadura	169	4	-	-	173	0,86
37	Grietas por contracción	-	-	-	1341	1341	6,68
38	Fractura de esquina	108	24	25	-	157	0,78
39	Fractura de junta	518	53	47	-	618	3,08
-	Sin deterioro	-	-	-	-	-	24,67
Total de losas auscultadas						20084	

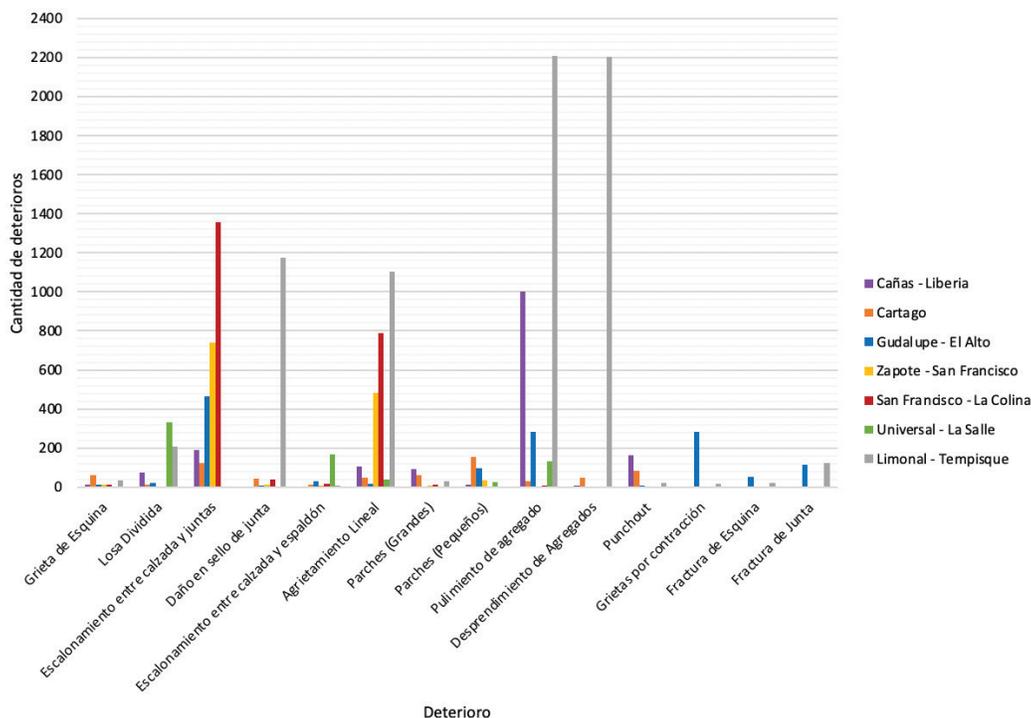


Figura 2. Gráfico de distribución de los deterioros totales por proyecto

Además, para cada proyecto se calculó el PCI de acuerdo con la metodología establecida en la norma ASTM D6433-20. A continuación, se muestran los resultados (Cuadro 3).

Cuadro 3. PCI de los proyectos

Proyecto	PCI	Condición
Cañas – Liberia (Ruta Nacional 1)	98	Bueno
Zapote – San Francisco (Ruta 204)	91	Bueno
San Francisco – La Colina (Ruta 211)	92	Bueno
Universal – La Salle (Ruta Nacional 167)	89	Bueno
Guadalupe – El Alto (Ruta Nacional 218)	81	Satisfactorio
Losas cortas de Cartago (Ruta Nacional 2)	81	Satisfactorio
Limal - Tempisque (Ruta Nacional 18)	56	Pobre

ANÁLISIS DE RESULTADOS

El proyecto más deteriorado es el de Limonal – Tempisque con un PCI de 56, esto no solo se debe a la falta de mantenimiento, también se pueden presentar estos deterioros por condiciones del suelo de la zona que no se consideraron de manera adecuada a la hora de diseñar la estructura de pavimento para esta sección de la Ruta Nacional 18. Luego, los proyectos de Cartago y Guadalupe – El Alto tienen el mismo valor de PCI, el cual es de 81, por lo tanto, el estado del pavimento es satisfactorio. Para el caso de las losas de Guadalupe – El Alto,

es importante mencionar que tienen más de 18 años, por lo tanto, se les ha dado un mantenimiento adecuado y el diseño que se optó para estas losas fue el apropiado. Por otro lado, el caso de las losas de Cartago es bastante inferior de lo esperado, ya que estas losas son de las más nuevas en esta evaluación, tienen 8 años; sin embargo, están más deterioradas que otras losas de otros proyectos más antiguos. El proyecto de Universal – La Salle tiene un PCI 89, lo que indica que el pavimento está en buen estado, lo mismo para los pavimentos de los proyectos de Zapote – San Francisco y San Francisco – La Colina que tienen un PCI de 91 y 92, respectivamente. El resultado de PCI del proyecto ubicado en Cañas – Liberia era de esperarse, ya que es el proyecto más nuevo de los siete que se evaluaron. Este pavimento tuvo un PCI de 98 lo que indica que está en muy buen estado.

Como se observa en la Figura 3, los deterioros más frecuentes son daño de sello de junta, desprendimiento de agregados, pulimiento de agregados y agrietamiento lineal. El daño de sello de junta se relaciona con la falta de mantenimiento que se le ha dado a las losas de estos proyectos. El desprendimiento de agregados puede ser ocasionado por un uso inadecuado de agregados ya que, si se utilizaron agregados redondeados, estos pierden adherencia a la mezcla. El pulimiento de agregados se puede dar por la utilización de un concreto pobre y por una resistencia baja a la abrasión por parte de los agregados. Por último, el agrietamiento lineal podría estar asociado a la pérdida de soporte por erosión y por fisuras por fatiga, las

cuales pueden ser causadas por un espesor de losa inadecuado para las condiciones de cada uno de los proyectos.

Caracterización de los proyectos

Cálculo de los ejes equivalentes

Primeramente, se realizó el cálculo de los ejes equivalentes, ESAL (del inglés *Equivalent Single Axis Load*) de cada uno de

los proyectos. Para este cálculo se obtuvieron los datos de TPD del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (Cuadro 4).

Precipitación y temperatura

A continuación en el Cuadro 5, se muestra el diferencial de temperatura y la precipitación registrada en cada uno de los proyectos, esto para poder realizar las correlaciones correspondientes.

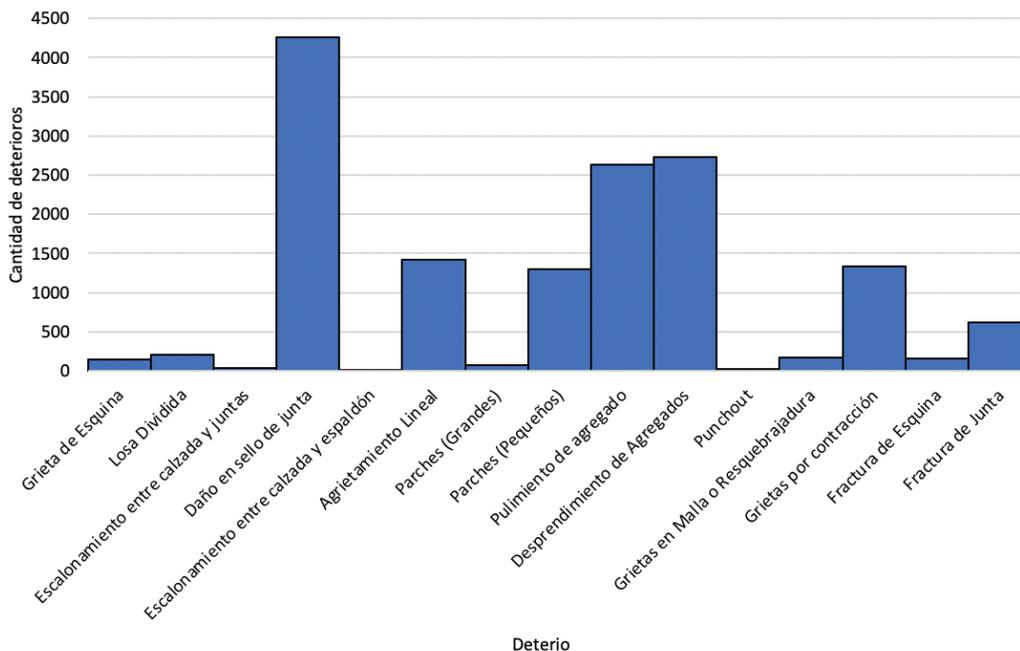


Figura 3. Gráfico de distribución de los deterioros totales

Cuadro 4. ESAL de los proyectos

Proyecto	ESAL
Cañas – Liberia	2 200 000
Zapote – San Francisco	3 206 318
San Francisco – La Colina	11 234 006
Universal – La Salle	1 651 486
Guadalupe – El Alto	15 262 402
Cartago	21 363 858
Limonal – Tempisque	6 565 780

Cuadro 5. Datos climatológicos de los proyectos

Proyecto	Estación Meteorológica	Precipitación (mm)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	ΔT (°C)
Cañas – Liberia	74051	1541,7	33	22,1	11
Zapote – San Francisco	84203	2299	26,7	17,3	9,4
San Francisco – La Colina	84203	2299	26,7	17,3	9,4
Universal – La Salle	84193	1576,3	27,1	18,7	8,4
Guadalupe – El Alto	84139	1834,5	25,3	16,6	8,7
Cartago	73129	1367,3	22,5	13,7	8,8
Limal – Tempisque	74051	1541,7	33	22,1	11

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional, 2020.

Correlaciones con precipitación, ESAL, ΔT y espesor de losa

Inicialmente, se calculó el coeficiente de correlación existente entre las variables precipitación, diferencial de temperatura (ΔT), ejes equivalentes, espesor de losa y los diferentes deterioros que se contabilizaron. Cabe mencionar que, para los casos de precipitación y ΔT únicamente, se consideraron coeficientes de correlación mayores de 0,6 puesto que si es menor, no existía una correlación tan clara, lo anterior se muestra en el Cuadro 6 y Cuadro 7. En el caso de los ejes equivalentes y espesor de losa, se utilizaron los deterioros que presentaron una correlación mayor a 0,7 como se muestra en el Cuadro 8 y el Cuadro 9. Los números indicados entre paréntesis en los cuadros del 6 al 9 corresponden a las designaciones indicadas en el Cuadro 2.

Cuadro 6. Correlación entre deterioros y precipitación

Deterioro	Coefficiente de correlación
Losa dividida (23)	-1,00
Daño de sello de junta (26)	0,76
Parches pequeños (30)	0,93
Escalonamiento entre calzada y juntas (25)	0,60
Grietas en malla (36)	-0,65

Cuadro 7. Correlación entre deterioros y ΔT

Deterioro	Coefficiente de correlación
Losa dividida (23)	1,00
Escalonamiento entre calzada y juntas (25)	-0,90
Fractura de esquina (38)	-0,70
Fractura de junta (39)	-0,72
Agrietamiento Lineal (28)	0,60

Cuadro 8. Correlación entre deterioros y ESAL

Deterioro	Coefficiente de correlación
Grieta de esquina (22)	0,81
Parche grande (29)	0,88
Grietas en malla (36)	0,76

Cuadro 9. Correlación entre deterioros y el espesor de losa

Deterioro	Coefficiente de correlación
Losa dividida (23)	1,00

Modelos para la determinación de deterioros

Con las correlaciones obtenidas se calcularon modelos por medio del *software* Microsoft Excel para poder determinar el porcentaje de deterioro que se puede llegar a presentar en un pavimento rígido al tener el valor de las variables precipitación, ESAL, ΔT y espesor de losa. Es importante mencionar que para cada uno de los modelos se obtuvo una probabilidad inferior a 0,15. Por lo tanto, para todas las variables hubo una significancia estadística. Con lo anterior, se obtuvieron los siguientes modelos (ecuaciones 1 a 8).

Grieta de esquina

La relación de la ecuación 1 se puede explicar porque en las losas de concreto, las deflexiones mayores se dan en las esquinas y con el aumento de la carga de tránsito, las grietas en las esquinas van a ir apareciendo.

$$\%grieta\ de\ esquina = 10^{-0,590+5,70*10^{-8}*ESAL} \quad (1)$$

$$R^2=0,51$$

Escalonamiento entre calzada y juntas

La relación encontrada en la ecuación 2 se puede explicar ya que conforme a las losas se les vayan haciendo grietas, el agua puede comenzar a infiltrarse a las subcapas del pavimento, lo que con el tiempo provoca que el soporte del pavimento se vaya perdiendo y se genera el escalonamiento.

$$\% \text{ escalonamiento entre calzada y juntas} = 10^{-2,676+0,001 \cdot \text{Precipitación}} \quad (2)$$
$$R^2=0,91$$

Daño de sello de junta

En este caso, la relación hallada en la ecuación 3 se puede explicar por una pérdida de adherencia entre el material de la junta y la losa, por la presencia constante de agua.

$$\% \text{ daño sello de junta} = -668,996 + 219,111 * \log_{10}(\text{Precipitación}) \quad (3)$$
$$R^2=0,52$$

Parches grandes

La relación de la ecuación 4 se puede explicar ya que, con el paso de las cargas de tránsito, las losas se van agrietando y cuando ya existen varias grietas interconectadas surge la necesidad de colocar un parche.

$$\% \text{ parches grandes} = -9,679 + 1,58 * \log_{10}(\text{ESAL}) \quad (4)$$
$$R^2=0,67$$

Parches pequeños

En este caso, la relación encontrada en la ecuación 5 se puede explicar porque con la presencia de precipitación, el agua se puede infiltrarse a capas inferiores del pavimento, lo que provoca que se pierda soporte. Al perder el soporte, aparecen grietas por el aumento de los esfuerzos al que está sometida la sección de la losa que perdió el soporte. Por lo tanto, al igual que en el caso anterior, se generan grietas interconectadas, que luego de un tiempo tienen que ser intervenidas mediante parches.

$$\% \text{ parches pequeños} = -69,333 + 0,046 * \text{Precipitación} \quad (5)$$
$$R^2=0,82$$

Grietas en malla

Al igual que los casos anteriores, la relación de la ecuación 6 se puede explicar por la infiltración del agua y la pérdida de soporte, ya que provocan la aparición de grietas interconectadas que, en este caso, serían grietas en malla. Con el caso de los ejes equivalentes, con el paso de la carga de los vehículos, en la losa se generan esfuerzos y deflexiones, por lo tanto, con el paso del tiempo, estas deflexiones y esfuerzos se ven reflejados en grietas.

$$\% \text{ grietas en malla} = 10^{0,690+1,02 \cdot 10^{-7} \cdot \text{ESAL} - 0,001 \cdot \text{Precipitación}} \quad (6)$$
$$R^2=0,996$$

Fractura de esquina

$$\% \text{ fractura de esquina} = 17,861 - 1,636 * \Delta T \quad (7)$$
$$R^2=0,37$$

Fractura de junta

$$\% \text{ fractura de junta} = 48,705 - 4,287 * \Delta T \quad (8)$$
$$R^2=0,40$$

Tanto el modelo de fractura de esquina (ecuación 7), como para el de fractura de junta (ecuación 8), se pueden explicar mediante la contracción y expansión térmica que sufre la losa. En el caso de estas fracturas, se pueden deber a que, si en la etapa constructiva las dovelas no fueron alineadas correctamente, conforme la losa se expande y se contrae en las zonas tanto de la junta como en las esquinas, se pueden llegar a generar esfuerzos muy altos, por lo que puede provocar la fractura.

CONCLUSIONES

- Los deterioros más frecuentes en los pavimentos rígidos evaluados son daño de sello de junta, desprendimiento de agregados, pulimiento de agregado y agrietamiento lineal.
- Las losas más deterioradas son las del proyecto de Limonal – Tempisque ya que esta sección de la ruta obtuvo un PCI de 56, esto se puede deber a los problemas geotécnicos que existen en la zona.
- Las losas cortas de Cartago son de las más recientes; sin embargo, son de las más deterioradas, presentan un PCI de 81. Una de las razones por las que se podría justificar dicha condición es que se ha evidenciado que en este sitio existen problemas con la calidad de los suelos y la evacuación de aguas, lo podría haber generado gran parte de los deterioros observados.
- El PCI promedio de las losas es de 84, lo que indica que el estado de los pavimentos rígidos evaluados es satisfactorio.
- En las losas cortas de Cartago es por donde circula una mayor cantidad de vehículos pesados en comparación a los demás proyectos, esto podría dar explicación a que el deterioro más frecuente sean las grietas en malla.
- Los proyectos de San Francisco – La Colina y Zapote – San Francisco son los que presentan mayor cantidad que precipitación, se podría relacionar con el daño de sello

- junta por una pérdida de adherencia entre el material de la junta y la losa, por la presencia constante de agua.
- Existe una relación entre los deterioros losa dividida, daño de sello de junta, parches pequeños, escalonamiento entre calzada y juntas y grietas en malla con la variable de precipitación.
 - Existe una relación entre los deterioros grieta de esquina, parches grandes y grietas en malla con la variable de ejes equivalentes.
 - Existe una relación entre la variable cambio de temperatura y los deterioros fractura de junta, fractura de esquina y agrietamiento lineal.
 - El R^2 ajustado obtenido para los modelos de precipitación, ejes equivalentes y cambio de temperatura fue mayor a 0,9, lo que indica que existe un ajuste lineal casi perfecto y que se explica de manera adecuada la variación de la variable.
 - La variable espesor de losa se relaciona únicamente con el deterioro losa dividida, además se obtuvo un R^2 ajustado de 0,54, lo que indica que existe un ajuste lineal moderado.
 - Los modelos de grieta de esquina y de parches grandes, únicamente se lograron relacionar con la variable de ejes equivalentes.
 - Los modelos de escalonamiento entre calzada y juntas, daño de sello de junta y parches pequeños, únicamente se relacionan con la variable de precipitación.
 - Los modelos de fractura de esquina y fractura de junta, únicamente se relacionan con la variable de cambio de temperatura.
 - El modelo de grietas en malla se relaciona con las variables precipitación y ejes equivalentes y se obtuvo un R^2 ajustado de 0,996 lo que indica que existe un ajuste lineal perfecto.

REFERENCIAS

- ASTM (2020). *Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys*. (D6433-20). ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania.
- Instituto Meteorológico Nacional (2020). *Estaciones Automáticas*. Recuperado de: <https://www.imn.ac.cr/estaciones-automaticas>
- LanammeUCR (2017). Evaluación del estado de las Rutas Nacionales 204 y 211, tramo Zapote – San Francisco – La Colina (Informe LM-PI-UGERVN-3-2017).
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes (2020). *Anuario de Información de Tránsito*. Recuperado de: <https://www.mopt.go.cr/wps/wcm/connect/724c5cd7-31e8-415f-9e86-bd0571cfd9b9/AnuarioTransito2019.pdf?MOD=AJPERES>
- Montes de Oca Hidalgo, M. P. (2020). *Evaluación del desempeño de los pavimentos rígidos en Costa Rica*. (Tesis de grado). Universidad de Costa Rica, San José.

Efecto de las distracciones por el uso del teléfono celular durante la conducción

Effect of distractions due to the use of the cell phone while driving

Oliver Alexander Tábor Cruz

Lanamme
 Universidad de Costa Rica
 San José, Costa Rica
oliver.tabora@ucr.ac.cr

Fecha de recepción: 09 de mayo de 2021 / **Fecha de aprobación:** 15 de julio de 2021

RESUMEN

La conducción distraída es uno de los factores humanos más importantes en la seguridad del transporte y, por ende, es un riesgo que se está convirtiendo en una creciente preocupación para la seguridad vial. La investigación establece que el uso del teléfono celular puede ser la fuente de distracción más importante para los conductores dentro del vehículo, dado que su uso añade demandas cognitivas, físicas o visuales al conductor hacia una tarea secundaria que desvía la atención de las actividades críticas para una conducción segura y, por tanto, puede afectar negativamente el comportamiento y desempeño del conductor. El objetivo de la presente investigación fue estudiar los efectos de las distracciones debido al uso del teléfono celular en las respuestas del conductor durante la tarea de conducción y su vínculo con la ocurrencia de accidentes de tránsito. Los resultados sugieren que el uso del teléfono celular, independientemente de las tareas y modalidad utilizada tienen un efecto negativo en el comportamiento y desempeño de los conductores y, por tanto, los usuarios que usan el teléfono celular mientras conducen corren un mayor riesgo de estar involucrado en un accidente de tránsito, principalmente los conductores mayores y los jóvenes, siendo estos últimos los que están sujetos a una mayor exposición y altos riesgos ante esta distracción.

Palabras clave: Seguridad vial, teléfono celular, desempeño, accidentes de tránsito.

ABSTRACT

Distracted driving is one of the most important human factors in transportation safety and it is, therefore, a risk that is becoming a growing concern for road safety. Research establishes that cell phone use may be the most important source of distraction for drivers inside the vehicle since its use adds cognitive, physical, or visual demands on the driver towards a secondary task that diverts attention from critical activities for a safe driving, and then, can adversely affect driver behavior and performance. The objective of this research was to study the effects of distractions due to cell phone use on the driver's responses during the driving task and its link with the occurrence of traffic accidents. The results suggest that cell phone use, regardless of the tasks and modality used, has a negative effect on the behavior and performance of drivers and, therefore, users who use cell phones while driving are at greater risk of being involved. In a traffic accident, mainly older and younger drivers, the latter being those who are subject to greater exposure and high risks in the face of this distraction.

Keywords: Road safety, cell phone, performance, traffic accidents.

INTRODUCCIÓN

La tarea de conducción es una de las actividades más riesgosas en las que se involucran las personas en términos de lesiones, muerte o costos relacionados. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), las colisiones de vehículos motorizados causan más de 1,35 millones de muertes anuales en el mundo y un número mayor de lesiones no fatales cada año (OMS, 2018). Los factores humanos son considerados una de las causas básicas de los accidentes relacionados con los accidentes de tránsito, los cuales incluyen un gran número de factores específicos que pueden considerarse causas de accidentes, entre ellos la distracción del conductor durante la tarea de conducción. La conducción distraída es uno de los factores humanos más importantes en la seguridad del transporte (Oviedo, Haque, King, y Washington, 2016). Las distracciones durante la conducción suelen dividirse en externas e internas, siendo estas últimas las que se encuentran dentro del vehículo, tal como el uso del teléfono celular.

El uso del teléfono celular mientras se conduce es una de las distracciones más comunes en las que se involucran los conductores de vehículos motorizados (Huisinigh, Griffin, y McGwin, 2014). Diferentes estudios coinciden en que el uso de teléfonos celulares durante la ejecución de la tarea de conducción puede afectar significativamente el desempeño, lo cual resulta en un riesgo para la seguridad del conductor (OMS, 2011). Los diferentes estudios realizados para estimar el riesgo de un accidente muestran que los conductores que usan el celular mientras conducen corren un mayor riesgo de sufrir un accidente que los que no lo hacen.

La distracción durante la conducción es un tema relevante para la seguridad vial y considerando que actualmente la adquisición de teléfonos móviles cada vez es más factible para la población y que su uso durante la conducción se ha vuelto en una actividad cotidiana para muchos conductores, se considera de importancia visibilizar la distracción generada por el uso de los teléfonos celulares como un factor humano y conocer el efecto en el desempeño del conductor.

Considerando lo comentado anteriormente y bajo el entendido que, para tener avances en la seguridad vial, es necesario identificar las causas evitables de los accidentes de tránsito y el establecimiento de medidas de prevención, mitigación y control por parte de las autoridades basadas en la evidencia científica, el estudio de estos temas es fundamental. Por tanto, la presente investigación tiene como objetivo estudiar los efectos de las distracciones debido al uso del teléfono celular

en las respuestas del conductor durante la tarea de conducción y su vínculo con la ocurrencia de accidentes de tránsito con lo cual se pretende generar conciencia de los efectos negativos y riesgos del uso del teléfono celular durante dicha tarea.

DISTRACCIÓN GENERADA POR EL USO DEL TELÉFONO CELULAR

La distracción durante la conducción es un riesgo que se está convirtiendo en una creciente preocupación para la seguridad vial. La distracción del conductor puede definirse como una desviación de la atención de las actividades críticas para una conducción segura hacia una actividad secundaria (Lipovac, Đerić, Tešić, Andrić, y Marić, 2017). La mayor parte de la investigación y la atención en esta área se relaciona con la distracción del conductor, en gran parte debido al uso cada vez mayor de teléfonos celulares y otras tecnologías (OMS, 2011).

La investigación internacional establece que el uso del teléfono celular para realizar diferentes tareas puede ser la fuente de distracción más importante para los conductores dentro del vehículo (Oviedo *et al.*, 2016). Según Lipovac *et al.* (2017) las categorías de distracción que pueden estar asociadas con el uso del teléfono móvil se pueden definir de la siguiente manera:

- La distracción física: ocurre cuando el conductor requiere usar una o ambas manos para operar un teléfono celular para marcar un número, responder o rechazar una llamada entrante en lugar de enfocarse en la tarea de conducir.
- La distracción visual: implica desviar la mirada de la carretera hacia el teléfono móvil y, por tanto, una pérdida de “atención” visual.
- La distracción auditiva: se relaciona con la concentración del conductor en escuchar sonidos no relacionados con la conducción tales como el timbre del teléfono o los audios relacionados con la llamada o nota de voz.
- La distracción cognitiva: implica lapsos de atención y juicio, ocurre cuando se realizan dos o más tareas mentales al mismo tiempo (conducir y manipular el teléfono celular) que hacen que el conductor aparte la mente de la carretera.

Según la literatura, entre las categorías mencionadas la distracción física, visual y cognitiva constituyen las principales relacionadas con el uso del teléfono celular. La utilización de teléfonos celulares durante la conducción se

ha convertido en una tarea cotidiana para los conductores de todos los rangos de edad, lo cual es considerado alarmante dados los riesgos asociados a dicha actividad. En términos generales, la distracción por el uso del teléfono celular forma parte de la rutina diaria de los conductores y, por tanto, constituyen un factor importante de aumento del riesgo en la ocurrencia de accidentes de tránsito en todo el mundo.

EFFECTO EN EL DESEMPEÑO DEL CONDUCTOR POR EL USO DEL TELÉFONO CELULAR DURANTE LA TAREA DE CONDUCCIÓN

Las demandas cognitivas, físicas o visuales que una tarea secundaria como el uso del teléfono celular añade al conductor tendrán una influencia significativa en el grado de deterioro del desempeño de la tarea primaria de conducción y, por ende, en la seguridad del conductor. El teléfono celular como distractor incluye diferentes condiciones de uso tales como conversaciones, envío de mensajes, notas de voz, etc. El efecto de la distracción en el desempeño del conductor generado por estos dispositivos ha sido estudiado a través de diferentes diseños de estudios a través del tiempo entre ellos los estudios experimentales por medio de simuladores, estudios observacionales con observadores fijos en la carretera, estudios naturalistas basados en la participación de conductores en vehículos instrumentados para capturar sus comportamientos y estudios basados en la ocurrencia de choques (OMS, 2011). A continuación, se muestran los resultados de un conjunto de estudios que muestran el efecto del uso del teléfono celular bajo diferentes condiciones frecuentes de uso por parte del conductor.

Conversación a través de llamadas telefónicas

Las conversaciones por teléfono celular interrumpen el desempeño de la conducción al desviar la atención hacia las tareas cognitivas (Strayer, Drews, y Johnston, 2003). Strayer *et al.* (2003) establecen que los conductores que conversan en un teléfono celular procesan hasta un 50 % menos de la información en su entorno que un conductor que no está involucrado en una conversación a través de este dispositivo.

Diferentes diseños de estudios han encontrado que los conductores tienden a disminuir su velocidad media cuando hacen uso del celular mientras conducen. En un estudio de simulador, Haigney, Taylor y Westerman (2000) estudiaron los efectos sobre el desempeño de conducción al realizar llamadas por medio del teléfono en mano y manos libres donde 30 participantes completaron recorridos simulados

mientras completaban una tarea de razonamiento gramatical diseñada para simular una conversación por teléfono. Los resultados revelaron que la velocidad media y la desviación estándar del recorrido del acelerador disminuyeron mientras los participantes conversaban por teléfono. Rakauskas, Gugerty y Ward (2004) llevaron a cabo un estudio naturalista con 24 participantes donde también se detectó una reducción en la velocidad media de los conductores y un incremento en la variabilidad de la velocidad mientras mantenían una conversación telefónica en comparación con escenarios base (sin el uso del teléfono celular).

Algunos estudios han detectado disminuciones en su capacidad para mantener la posición en el carril mientras realizan actividades con el celular. Stavrinou *et al.* (2013) a través de estudios de simulación de conducción bajo diferentes escenarios de niveles de servicio (A, C y E) de 75 participantes con edades entre los 16 y 25 años respalda estos hallazgos al informar una mayor variabilidad en la velocidad de conducción, mayores desviaciones laterales del carril en la conducción distraída comparado con el escenario base (sin el uso del teléfono celular).

Otros efectos generados debido al uso del teléfono celular es el incremento en los tiempos de reacción. Drews y Strayer (2008) reportaron resultados de estudios naturalistas que reflejan un incremento de 6,5% en el tiempo de reacción al encendido de las luces de frenado, una menor frecuencia de verificación del espejo retrovisor y una adaptación retardada a la velocidad de un automóvil delantero mientras hace uso del teléfono, en comparación con un escenario base (sin el uso del teléfono celular).

Patten, Kircher, Östlund y Nilsson (2004) llevaron a cabo un estudio naturalista con 40 participantes con el objetivo de estudiar el efecto de la complejidad de las conversaciones telefónicas en la tarea de conducción, se midió el tiempo medio de reacción a través de las respuestas a tareas de detección periférica (PDT por sus siglas en inglés), se detectó que dicho tiempo aumentó en un 45 % con conversaciones complejas y, por tanto, el conductor también tendría (al menos) un 45 % menos de tiempo para detectar nueva información. Los autores establecieron que cuanto más difícil y compleja sea la conversación, es probable que ocurran las consecuencias más negativas de la distracción del conductor. Dula, Martin, Fox y Leonard (2011) también comentan que, en situaciones de tener una llamada telefónica emocional mientras conducen, los conductores se ven involucrados en situaciones más riesgosas, en comparación con situaciones en las que tienen una conversación telefónica normal y obviamente bajo situaciones donde no se hace uso del teléfono celular.

Envío de mensajes de texto

El envío de mensajes de texto mientras se conduce implica la distracción visual, manual y cognitiva, por ello generalmente se establece que enviar mensajes de texto mientras se conduce podría distraer más que una conversación (Hosking, Young, y Regan, 2009). Según Stavrinou *et al.* (2013) la actividad de enviar mensajes de texto durante la conducción genera un incremento de la distracción, principalmente debido a que esta actividad implica desviar la mirada del conductor de la carretera durante un tiempo considerable, por tanto, se espera que la capacidad de conducir de manera segura se vea afectada. Según el laboratorio de investigación en Transportes (TRL, por sus siglas en inglés) de Reino Unido, los conductores más jóvenes tienen más probabilidades de enviar mensajes de texto en comparación con los conductores de mayor edad (TRL, 2008; OMS, 2011).

Los resultados de encuestas realizadas por McEvoy, Stevenson y Woodward (2006) en estados de Australia con la participación de 1347 conductores con edades entre los 18 y 65 años establecieron que la proporción de conductores jóvenes que envían mensajes de texto mientras conducen es 31 % mayor que la de los conductores mayores. Hosking *et al.* (2009) llevó a cabo estudios de simulación en una población de conductores jóvenes (18 a 21 años) para evaluar el efecto de los mensajes de texto durante la conducción, los autores comentan que los adolescentes pasaban un 400 % más del tiempo del simulador sin mirar a la carretera mientras enviaban mensajes de texto en comparación con la condición base, es decir, cuando no estaban distraídos.

Stavrinou *et al.* (2013) a través del estudio de simulación comentado en la sección anterior también evaluó el impacto del envío de mensajes de textos mientras conducían en 75 conductores divididos en dos grupos por rangos de edad (16-18 años y 19-25 años). Los autores comentan que la distracción por el envío de mensajes de texto mostró que los participantes exhibieron una mayor fluctuación en la velocidad y tardaron más en completar los escenarios simulados. En este estudio también se destaca que no se detectaron diferencias significativas del efecto mencionado entre los grupos de edad, lo que sugiere que todos los conductores, independientemente de su edad se ven afectados negativamente.

El TRL (2008) llevó a cabo estudios de simulación con la participación de 17 conductores con edades entre 17 y 24 años. Los resultados mostraron que la actividad de escribir mensajes de texto creó un impedimento mayor que leer mensajes de texto durante la conducción. Los tiempos de

reacción tendieron a ser mayores al leer o escribir un mensaje. El tiempo de reacción promedio más lento se observó para los conductores que intentaban escribir un mensaje de texto en el que los tiempos de reacción aumentaron de 1,2 a 1,6 segundos (incremento del 35 %), mientras que los tiempos para completar el texto cuando conducían eran casi 3 veces más largos que cuando escribían mensajes similares sin distracciones, según el estudio el aumento en el tiempo de reacción resultaría en una mayor distancia de frenado de 12,5 m. En este estudio también se observó que los participantes tendían a reducir la velocidad cuando enviaban mensajes de texto, eran menos capaces de mantener una distancia constante detrás de un vehículo delantero y mostraban una mayor variabilidad en la posición lateral del carril cuando seguían a dicho vehículo.

En términos generales, la combinación de una mayor carga de trabajo mental necesaria para escribir un mensaje de texto, la falta de control causada por el acto físico de sostener el teléfono y el impedimento visual causado por el cambio continuo de la orientación visual entre la pantalla del teléfono y la carretera por delante ha mostrado una reducción significativa en el comportamiento y desempeño de los conductores.

Uso del celular de mano vs manos libres

En términos de distracción, es posible que existan tareas que demanden menos atención de los conductores que otras y, por ende, podrían tener un menor efecto en el deterioro del desempeño de conducción. En términos de teléfonos celulares, un factor que se cree que influye en las características de la demanda de atención es el diseño físico y el tipo de teléfono. Numerosos estudios han intentado estudiar los efectos relativos de los teléfonos móviles de mano y manos libres en el desempeño del conductor.

Diferentes estudios han coincidido en que el uso del teléfono de manos libres tiene un impacto similar en la conducción que el uso de un teléfono de mano (Haigney *et al.*, 2000; Mazzae, Ranney, Watson, y Wightman, 2004; OMS, 2011). Mazzae *et al.* (2004) por medio de estudios de simulación de 54 participantes estableció que conversar por un teléfono móvil mientras se conduce impone una mayor carga de trabajo a los conductores independientemente del tipo de teléfono utilizado (de mano o manos libres) y que los conductores tienden a sobrestimar la facilidad de usar teléfonos manos libres mientras conducen. Es importante señalar que el uso de manos libres fue una distracción menor que los teléfonos de mano al marcar y contestar llamadas.

También se ha tratado de determinar si diferentes tipos de dispositivos de manos libres afectan de manera diferente el desempeño de la conducción. Matthews, Legg y Charlton (2003) llevaron a cabo actividades de conducción en carreteras rurales con 13 participantes para comparar la carga de trabajo mental subjetiva al mantener una conversación por medio de auriculares y un altavoz externo, según los autores el hecho de usar un teléfono con dispositivos a través de auriculares permitía a los conductores conducir a niveles más bajos de carga de trabajo mental y niveles más altos de inteligibilidad de la conversación con respecto al uso del teléfono con un altavoz externo.

Envío de mensajes manualmente vs mensajes de voz

Las tareas secundarias como enviar mensajes de texto requieren períodos prolongados de duración que pueden afectar el desempeño de conducción de manera más grave que otras tareas de corta duración como el envío de mensajes de voz (He *et al.*, 2014). He *et al.* (2014) llevó a cabo estudios de simulación con la participación de 35 conductores con el propósito de comparar el efecto del envío de mensajes de texto mediante el método manual o métodos basados en voz. Los autores comentan que los resultados mostraron que ambos métodos afectaban el desempeño de la conducción en relación con la condición base (sin distracciones) al provocar una mayor variación en la velocidad y la posición lateral del carril. Sin embargo, el método manual adicionalmente aumentó el tiempo de respuesta de frenado y aumentó la variación en la distancia de seguimiento, lo cual coincide con los resultados mostrados en la sección anterior. En términos generales, el método basado en voz fue menos perjudicial en el desempeño que el método manual.

VÍNCULO ENTRE EL USO DEL CELULAR Y LA OCURRENCIA DE ACCIDENTES

Según la OMS (2011) determinar la relación causal entre el uso del teléfono celular y el riesgo de accidentes es una tarea compleja. La dificultad consiste en la falta de registro de la información con respecto al uso del teléfono celular por parte del conductor al momento de un accidente, sin embargo, tal como se ha mencionado en el desarrollo de este artículo, los diferentes estudios para estimar el riesgo de accidente hacen referencia a que los conductores que usan el celular mientras conducen corren un mayor riesgo de accidente que los que no lo hacen.

La evaluación de los riesgos de accidentes relacionados con el uso de teléfonos se ha realizado aplicando diferentes diseños de estudio tales como los estudios naturalistas, considerados como uno de los métodos más confiables para analizar el riesgo del conductor (OMS, 2011; Klauer *et al.*, 2014) y los estudios epidemiológicos basados en el estudio de datos para determinar si una actividad distractora estuvo involucrada en el accidente o podría ser la causa del mismo (Redelmeier, y Tibshirani, 1997; Redelmeier, y Weinstein, 1999; Asbridge, Brubacher, y Chan, 2012).

Según el estudio epidemiológico realizado por Redelmeier y Tibshirani (1997) existe evidencia de estudios que sugieren que los conductores que utilizan teléfonos celulares mientras conducen se enfrentan a un riesgo de accidente 4 veces mayor que el riesgo de los conductores que no los utilizan. Redelmeier y Weinstein (1999) informaron que el riesgo de accidente cuando se usaba un teléfono celular era 4,3 veces mayor que cuando no se usaba. Asbridge *et al.* (2012) comentan que la culpabilidad por choques está significativamente asociada con el uso de teléfonos celulares por parte de los conductores, el cual aumenta las probabilidades en un 70 % de tener culpabilidad en un choque en comparación con los conductores que no usan un teléfono. Este riesgo fue particularmente alto para los conductores de mediana edad incluidos entre el rango de 26 a 65 años.

Klauer *et al.* (2014) llevó a cabo estudios naturalistas, en el cual participaron 42 conductores jóvenes con licencia de conducir, el estudio tuvo una duración de 18 meses, se utilizó un enfoque de diseño caso-cohorte. Se estudió el riesgo de la ejecución de tareas secundarias con la probabilidad de tener accidentes o casi accidentes a través de razones probabilidad (OR al 95 % de confianza) de diferentes actividades. La actividad de marcar el teléfono se asoció con el mayor riesgo de un accidente o casi accidente (OR 8,32), buscar el teléfono (OR 7,05) y enviar mensajes de texto o usar internet (OR 3,87); hablar no se asoció con un alto riesgo de accidente (OR 0,61). El análisis secundario de estos datos reveló que la duración de desviar la vista de la carretera aumenta constantemente el riesgo de un choque comenzando con distracciones de más de 1 segundo. Las distracciones de 2 segundos o más mientras usaba el teléfono celular de mano se asociaron con un aumento de 5,5 veces en el riesgo de accidente o casi accidente. Enviar mensajes de texto mientras se conduce aumenta el riesgo de accidentes sustancialmente.

La relación entre el uso del teléfono celular durante la tarea de conducción y la ocurrencia de accidentes de tránsito se puede ver reflejado a través de reportes generados anualmente en países como Estados Unidos. La Administración Nacional de Seguridad en el Transporte en Carreteras de los Estados Unidos (NHTSA, por sus siglas en inglés) (NHTSA, 2020) informó que en el año 2018 hubo 349 choques fatales que involucraron el uso de teléfonos celulares (13 % del total de choques generados por distracciones). Para estos choques, el informe policial del evento indicó que el conductor estaba hablando, escuchando o participando en alguna otra actividad a través del celular en el momento del choque. Un total de 385 personas murieron en accidentes fatales que involucraron actividades relacionadas con el teléfono, 354 conductores con edades entre el rango 15 a más de 70 años se vieron involucrados entre los cuales el 45 % representaba a conductores en un rango de edad de 15-29 años. Por tanto, el uso de teléfonos móviles mientras se conduce es más frecuente entre los conductores jóvenes (menos experimentados), que generalmente presentan un riesgo elevado de accidentes.

RELACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS Y REPUESTAS DEL CONDUCTOR CON EL GRADO DE DETERIORO DEL DESEMPEÑO

Existe una serie de factores relacionados con el conductor que también pueden ser importantes de cara a determinar el grado en qué la distracción afecta al comportamiento y desempeño del conductor. A continuación, se describirá brevemente la relación entre las características más determinantes según la literatura.

Edad y experiencia

La edad y la experiencia son considerados características de alta importancia en el efecto del teléfono celular durante la conducción. Los conductores más jóvenes tienen menos experiencia y corren mayores riesgos en comparación con los conductores en el rango de edad de 35 a 60 años. Los efectos de la distracción debido al uso del teléfono celular en el desempeño del conductor son más extremos tanto en el caso de los conductores jóvenes como en las personas de mayor edad, sin embargo, diversos estudios coinciden que el uso del teléfono celular es más frecuente en los conductores jóvenes que en los adultos mayores (OMS, 2011; Stavrinou *et al.*, 2013; TRL, 2008; Hosking *et al.*, 2009; NHTSA, 2020).

En el caso de las conversaciones telefónicas, a un conductor joven con poca experiencia le resulta más difícil dividir

su atención adecuadamente entre la conducción y la tarea secundaria, dado que asignan la mayor parte de sus recursos de atención a las habilidades necesarias para operar un vehículo dejando menos recursos para realizar tareas secundarias (Hosking *et al.*, 2009). Los conductores de mayor edad tienen menor destreza manual, capacidad visual y cognitiva, por tanto, les resulta más difícil realizar dos tareas simultáneamente, lo cual se ve reflejado en un incremento en los tiempos de reacción (OMS, 2011). Horberry, Anderson, Regan, Triggs, y Brown (2006) por medio de estudios de simulación encontraron que el desempeño de los conductores mayores a 60 años experimentó un mayor deterioro al interactuar con un teléfono móvil que los conductores más jóvenes, pero que los conductores mayores intentaron, consciente o inconscientemente, compensar dicho deterioro reduciendo su velocidad.

Con respecto al envío de mensajes, algunos estudios establecen que se espera que los conductores mayores muestren mayores reducciones en el desempeño debido a la falta de experiencia y menor destreza manual (TRL, 2008). En términos generales el uso del teléfono tiene efectos negativos en el desempeño de conducción de todas las edades, sin embargo, los hallazgos son consistentes entre investigaciones que muestran que los conductores jóvenes debido a tener mayor exposición ante el uso del teléfono celular tienen un mayor riesgo de sufrir accidentes relacionados con este tipo de distracción (Hosking *et al.*, 2009; NHTSA, 2020; Guo *et al.*, 2016).

Género

Algunos estudios indican que el uso del teléfono celular podría tener efectos mayores en el comportamiento de las conductoras (Irwin, Chekaluk, y Geaghan, 2011) en particular de las jóvenes, pero otros indican que no hay diferencias (Hancock, Lesch, y Simmons, 2003). Irwin *et al.* (2011) llevó a cabo estudios de simulación de conducción donde estudió los efectos de conversar a través de un teléfono móvil en conductores jóvenes (18-25 años). Los autores comentan que se observó una diferencia de género en el sentido de que las mujeres conductoras parecían estar más distraídas cuando conversaban por teléfono móvil que los hombres. En general, tanto hombres como mujeres cometieron más errores cuando la conversación tenía un contenido emotivo en lugar de cognitivo, especialmente para las mujeres conductoras.

Cabe destacar que algunos autores sugieren que el hecho de diferir en cuanto al efecto del género podría deberse a diferencias de edad en las muestras utilizadas en los distintos estudios. Hancock *et al.* (2003) encontraron una interacción

entre la edad y el género, donde no se encontraron diferencias en el efecto de la distracción entre los conductores hombres y mujeres más jóvenes, mientras la distracción tuvo un efecto mayor en las mujeres mayores que en los hombres mayores.

Comportamientos Compensatorios

Un factor importante en el comportamiento de los conductores es la posible autorregulación para compensar la disminución de la atención a la tarea de conducción. Según se describió anteriormente, la investigación se ha enfocado en identificar los efectos en el desempeño asociadas con el uso de teléfonos celulares, sin embargo, algunos estudios sugieren que los conductores participan en conductas compensatorias conscientes e inconscientes (OMS, 2011, Stavrinou *et al.*, 2013). Según Pöysti, Rajalin y Summala (2005), el comportamiento compensatorio puede atribuirse a conductas que se reflejan en varios niveles, los cuales van desde el estratégico (elegir no usar un teléfono móvil mientras se conduce) al nivel operativo (reducción de la velocidad, incremento de la distancia de seguimiento, permitir el paso de los vehículos, etc.). Las acciones mencionadas anteriormente con respecto al comportamiento compensatorio de los participantes puede ser un reflejo de que son conscientes del deterioro en el desempeño causado por la distracción generada por el uso del teléfono mientras conducen y se muestran como intentos por mantener un nivel adecuado de conducción “segura”.

ESTABLECIMIENTO DE MEDIDAS DE INTERVENCIÓN Y RESULTADOS

La alta frecuencia de desarrollos tecnológicos dificulta poder regular el uso del teléfono celular fácilmente. Generalmente, las medidas establecidas para optimizar la seguridad vial relacionada con este tema consisten en imponer medidas legales como la prohibición del uso del teléfono celular tal como es el caso en los Estados Unidos y la mayoría de los países latinoamericanos. También se ha implementado sanciones compuestas a los conductores en forma de multas y puntos en su licencia cuando se determina que están infringiendo la ley, tal es el caso de Reino Unido y Argentina (OMS, 2011; Parnell, Stanton, y Plant, 2017).

La legislación y la aplicación de leyes para las diferentes condiciones de uso o tareas que se pueden realizar con el teléfono celular en los países desarrollados como Estados

Unidos también reflejan una falta de congruencia o uniformidad en las medidas que se han ido aplicando para mitigar este problema ya que las leyes se establecen a nivel nacional o estatal hacia ciertas tareas. Se destaca que ningún estado prohíbe todas las condiciones de uso del teléfono celular para todos los conductores, únicamente el 75 % de los estados lo hacen para todos los conductores jóvenes o adolescentes. La mayoría de los estados priorizan en primer lugar el envío de los mensajes de texto seguido del uso del teléfono de mano (Rudisill, Zhu, y Chu, 2019). Actualmente, se permite el uso de manos libres para la mayoría de los conductores a excepción de los conductores de autobuses escolares y conductores jóvenes a pesar de los efectos negativos en el desempeño evidenciados en el presente estudio.

Algunas investigaciones han sugerido que la prohibición de actividades como el uso de teléfonos de mano y envío de mensajes de texto reduce la tasa de uso de teléfonos mientras se conduce hasta en un 50 % a corto plazo, antes de que las cifras vuelvan a subir a los niveles previos a la legislación (McCartt, 2004; Cheng, 2014), también se han realizado estudios que, si bien detectan una reducción en el uso del teléfono, no significa una reducción de los accidentes de tránsito (Bhargava y Pathania, 2013; Cheng, 2014;). Otros estudios realizados en Estados Unidos a nivel estatal (Nueva York y Pennsylvania) han mostrado resultados contrarios a los comentados y han mostrado una reducción de los accidentes con la implementación de las prohibiciones del teléfono de mano (Nikolaev, Robbins, y Jacobson, 2010).

Con respecto a lo planteado anteriormente, Cheng (2014) plantea la teoría de que las prohibiciones pueden inducir el uso oculto de teléfonos celulares, lo cual podría conducir a un aumento en la probabilidad de estar involucrado en un accidente de tránsito. El posterior aumento y retorno de los niveles de uso previos a la legislación pueden deberse a que después de un breve período de cumplimiento, los conductores consideran que el riesgo de ser atrapados es mínimo, por lo que vuelven a usar sus dispositivos.

La efectividad de las prohibiciones del envío de mensajes de texto es una tarea difícil de medir debido a que es difícil para los observadores en la carretera diferenciar los mensajes de texto de otras manipulaciones telefónicas. Sin embargo, se han realizado algunos estudios al respecto que detectan reducciones en el envío de mensajes de texto para los conductores jóvenes que viven en estados con regulaciones del uso del teléfono celular (Rudisill y Zhu, 2015).

CONCLUSIONES

La investigación internacional se ha centrado en el estudio del desempeño del conductor mientras participa en conversaciones telefónicas, mensajes de texto y en la comparación entre los efectos de los tipos de teléfonos. Los resultados de la revisión bibliográfica establecen que el uso del teléfono celular, independientemente de su uso y modalidad tienen un efecto negativo en el desempeño de los conductores. Cabe destacar que, en la actualidad, además del uso de los teléfonos celulares para el envío de mensajes de texto y llamadas telefónicas, el crecimiento de las redes sociales en los conductores es evidente. Por tanto, debido a la cantidad limitada de estudios de investigación con respecto al efecto de otros usos como las redes sociales en la conducción, se considera una brecha importante para investigaciones futuras.

Los resultados de la presente investigación con respecto al vínculo existente entre el uso del teléfono celular y el riesgo de la ocurrencia de accidentes coinciden en que los conductores que usan el celular mientras conducen, independientemente

de la tarea corren un mayor riesgo de estar involucrado en un accidente.

La edad y la experiencia se establecen como las características del conductor que presentan correlaciones más altas con el riesgo de accidentes y afectación en el desempeño principalmente para los conductores jóvenes. Por tanto, debe priorizarse el establecimiento de medidas de mitigación y control efectivas para reducir los niveles de prevalencia.

La investigación con respecto a la efectividad de la legislación y la aplicación de las leyes que limitan el uso de los teléfonos indican que no hay consistencia en los resultados con respecto a la reducción de accidentes. La efectividad en la reducción del uso del celular es incierta, principalmente a largo plazo.

La recolección de información en los reportes de accidentes relacionada con la distracción representa un elemento importante para poder tener bases sólidas del nivel de prevalencia de los accidentes debido al uso del teléfono celular y con base en ello buscar el establecimiento de medidas efectivas que permitan disminuir el uso y los riesgos de uso del teléfono celular.

REFERENCIAS

- Asbridge, M., Brubacher, J. R., y Chan, H. (2012). Cell phone use and traffic crash risk: a culpability analysis. *International Journal of Epidemiology*, 42(1), 259–267. DOI: 10.1093/ije/dys180 .
- Bhargava, V., y Pathania, S. (2013). Driving under the (Cellular) Influence. *American Economic Journal: Economic Policy*, 5(3), 92–125. DOI: 10.1257/pol.5.3.92.
- Cheng, C. (2014). Do cell phone bans change driver behavior? *Economic Inquiry*, 53(3), 1420–1436. DOI: 10.1111/ecin.12166.
- Drews, F., y Strayer, D. (2008). *Cellular phones and driver distraction*. In M. A. Regan, J. D. Lee, y K. L. Young (Eds.), *Driver distraction: Theory, effects, and mitigation*. Chapter 11 (pp.169–190). Recuperado de: <https://www.taylorfrancis.com/books/9780429121869>.
- Dula, C. S., Martin, B. A., Fox, R. T., y Leonard, R. L. (2011). Differing types of cellular phone conversations and dangerous driving. *Accident Analysis & Prevention*, 43(1), 187–193. DOI: 10.1016/j.aap.2010.08.008.
- Guo, F., Klauer, S. G., Fang, Y., Hankey, J. M., Antin, J. F., Perez, M. A., y Dingus, T. A. (2016). The effects of age on crash risk associated with driver distraction. *International Journal of Epidemiology*, 46(1) 258–265. DOI: 10.1093/ije/dyw234.
- Haigney, D., Taylor, R., y Westerman, S. (2000). Concurrent mobile (cellular) phone use and driving performance: task demand characteristics and compensatory processes. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 3(3), 113–121. DOI: 10.1016/s1369-8478(00)00020-6.
- Hancock, P. A., Lesch, M., y Simmons, L. (2003). The distraction effects of phone use during a crucial driving maneuver. *Accident Analysis & Prevention*, 35(4), 501–514. DOI: 10.1016/s0001-4575(02)00028-3.
- He, J., Chaparro, A., Nguyen, B., Burge, R. J., Crandall, J., Chaparro, B., y Cao, S. (2014). Texting while driving: Is speech-based text entry less risky than handheld text entry? *Accident Analysis & Prevention*, 72, 287–295. DOI: 10.1016/j.aap.2014.07.014.

- Horberry, T., Anderson, J., Regan, M. A., Triggs, T. J., y Brown, J. (2006). Driver distraction: The effects of concurrent in-vehicle tasks, road environment complexity and age on driving performance. *Accident Analysis & Prevention*, 38(1), 185–191. DOI: 10.1016/j.aap.2005.09.007.
- Hosking, S. G., Young, K. L., y Regan, M. A. (2009). The Effects of Text Messaging on Young Drivers. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 51(4), 582–592. DOI: 10.1177/0018720809341575.
- Huisinigh, C., Griffin, R., y McGwin, G. (2014). The Prevalence of Distraction Among Passenger Vehicle Drivers: A Roadside Observational Approach. *Traffic Injury Prevention*, 16(2), 140–146. DOI: 10.1080/15389588.2014.916797.
- Irwin, J. D., Chekaluk, E., y Geaghan, L. (2011). *Gender effects in mobile phone distraction from driving*. In D. Hennessy (Ed.), *Traffic Psychology: An International Perspective* (pp. 113-128). Nova Science Publishers. Recuperado de 2020 de: <https://researchers.mq.edu.au/en/publications/gender-effects-in-mobile-phone-distraction-from-driving>.
- Klauer, S. G., Guo, F., Simons-Morton, B. G., Ouimet, M. C., Lee, S. E., y Dingus, T. A. (2014). Distracted Driving and Risk of Road Crashes among Novice and Experienced Drivers. *New England Journal of Medicine*, 370(1), 54–59. DOI: 10.1056/nejmsa1204142 .
- Lipovac, K., Đerić, M., Tešić, M., Andrić, Z., y Marić, B. (2017). Mobile phone use while driving-literary review. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 47, 132–142. DOI: 10.1016/j.trf.2017.04.015.
- Matthews, R., Legg, S., y Charlton, S. (2003). The effect of cell phone type on drivers subjective workload during concurrent driving and conversing. *Accident Analysis & Prevention*, 35(4), 451–457. DOI: 10.1016/s0001-4575(02)00023-4 .
- Mazzae, E. N., Ranney, T. A., Watson, G. S., y Wightman, J. A. (2004). Hand-Held or Hands-Free? The Effects of Wireless Phone Interface Type on Phone Task Performance and Driver Preference. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 48(19), 2218–2222. DOI: 10.1177/154193120404801903 .
- McCartt, A. T. (2004). Longer term effects of New York State's law on drivers' handheld cell phone use. *Injury Prevention*, 10(1), 11–15. DOI: 10.1136/ip.2003.003731.
- McEvoy, S. P. (2006). The impact of driver distraction on road safety: results from a representative survey in two Australian states. *Injury Prevention*, 12(4), 242–247. DOI: 10.1136/ip.2006.012336 .
- NHTSA (2020). *Distracted Driving 2018. Traffic Safety Facts. Paper No. DOT HS 812 818. National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA)*. Recuperado de: <https://crashstats.nhtsa.dot.gov/Api/Public/ViewPublication/812926>.
- Nikolaev, A. G., Robbins, M. J., y Jacobson, S. H. (2010). Evaluating the impact of legislation prohibiting hand-held cell phone use while driving. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 44(3), 182–193. DOI: 10.1016/j.tra.2010.01.006.
- OMS (2011). *Mobile phone use: a growing problem of driver distraction*. Organización Mundial de la Salud (OMS). Recuperado de: https://www.who.int/violence_injury_prevention/publications/road_traffic/distracted_driving_en.pdf.
- OMS (2018). *Reporte del estado de la seguridad vial en el mundo en el 2018*. Organización Mundial de la Salud (OMS). Recuperado de: https://www.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/report/web_version_es.pdf?ua=1.
- Oviedo, O., Haque, M., King, M., y Washington, S. (2016). Understanding the impacts of mobile phone distraction on driving performance: A systematic review. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 72, 360–380. DOI: 10.1016/j.trc.2016.01.006.
- Parnell, K. J., Stanton, N. A., y Plant, K. L. (2017). What's the law got to do with it? Legislation regarding in-vehicle technology use and its impact on driver distraction. *Accident Analysis & Prevention*, 100(2017), 1–14. DOI: 10.1016/j.aap.2016.12.015.
- Patten, C. J., Kircher, A., Östlund, J., y Nilsson, L. (2004). Using mobile telephones: cognitive workload and attention resource allocation. *Accident Analysis & Prevention*, 36(3), 341–350. DOI: 10.1016/s0001-4575(03)00014-9.
- Pöysti, L., Rajalin, S., y Summala, H. (2005). Factors influencing the use of cellular (mobile) phone during driving and hazards while using it. *Accident Analysis & Prevention*, 37(1), 47–51. DOI: 10.1016/j.aap.2004.06.003.
- Rakauskas, M. E., Gugerty, L. J., y Ward, N. J. (2004). Effects of naturalistic cell phone conversations on driving performance. *Journal of Safety Research*, 35(4), 453–464. DOI: 10.1016/j.jsr.2004.06.00.

- Redelmeier, D. A., y Tibshirani, R. J. (1997). Association between Cellular-Telephone Calls and Motor Vehicle Collisions. *New England Journal of Medicine*, 336(7), 453–458. DOI: 10.1056/nejm199702133360701.
- Redelmeier, D. A., y Weinstein, M. C. (1999). Cost—Effectiveness of Regulations against Using a Cellular Telephone while Driving. *Medical Decision Making*, 19(1), 1–8. DOI: 10.1177/0272989x9901900101.
- Rudisill, T. M., y Zhu, M. (2015). The association between states' texting regulations and the prevalence of texting while driving among U.S. high school students. *Annals of Epidemiology*, 25(12), 888–893. DOI: 10.1016/j.annepidem.2015.09.004 .
- Rudisill, T., Zhu, M., y Chu, H. (2019). Association between cellphone use while driving legislation and self-reported behaviour among adult drivers in USA: a cross-sectional study. *BMJ Open*, 9(2), e023456. DOI: 10.1136/bmjopen-2018-023456.
- Stavrinos, D., Jones, J. L., Garner, A. A., Griffin, R., Franklin, C. A., Ball, D., y Fine, P. R. (2013). Impact of distracted driving on safety and traffic flow. *Accident Analysis & Prevention*, 61, 63–70. DOI: 10.1016/j.aap.2013.02.003.
- Strayer, D. L., Drews, F. A., y Johnston, W. A. (2003). Cell phone-induced failures of visual attention during simulated driving. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 9(1), 23–32. DOI: 10.1037/1076-898x.9.1.23.
- TRL (2008). *The effect of text messaging on driver behaviour: A simulation study*. Transport Research Laboratory (TRL). Report. PPR 3672008. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/259254727_The_effect_of_text_messaging_on_driver_behaviour.

Efecto de polímeros y aceite de cocina en el rango de desempeño del asfalto

Effect of polymers and waste cooking oil on asphalt performance range

Michelle Munkel Jiménez

LanammeUCR
Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
paula.munkel@ucr.ac.cr

José Pablo Aguiar Moya

Escuela de Ingeniería Civil
Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
jose.aguiar@ucr.ac.cr

Natalia Hernández Montero

Escuela de Ingeniería Química
Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
natalia.hernandezmontero@ucr.ac.cr

Alejandra Baldi

LanammeUCR
Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
alejandra.baldi@ucr.ac.cr

Rafael Ernesto Villegas Villegas

LanammeUCR
Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
rafael.villegas@ucr.ac.cr

Fecha de recepción: 19 de mayo de 2021 / **Fecha de aprobación:** 22 de julio de 2021

RESUMEN

Este estudio busca estudiar el uso de aceite reciclado de cocina (WCO, por sus siglas en inglés) para mejorar el desempeño en fatiga y deformación permanente del asfalto modificado con polímeros comerciales. Se seleccionaron y caracterizaron los materiales a utilizar con este fin. La metodología consistió en realizar pruebas previas para determinar el comportamiento del asfalto con el WCO. Luego, se modificó el asfalto a distintas dosificaciones de WCO y de polímero comercial (SBS o RET). Por último, se acondicionaron las muestras, se midió el grado de desempeño (PG) y se evaluó su resistencia a la deformación y a la fatiga mediante ensayos avanzados de reología. Se encontró que el aceite disminuye el grado superior e inferior del PG. Además, se evidenció que la presencia del WCO afectó la interacción del asfalto con el SBS. No obstante, con la incorporación del RET al asfalto con aceite, el límite superior de PG aumentó 2 grados sin afectar las temperaturas intermedia y baja. El análisis estadístico determinó que el polímero utilizado en cada muestra (SBS o RET) fue el factor que generó diferencias más significativas en la resistencia a deformación permanente y fatiga. La dosificación de cada polímero influyó mayormente en la recuperación elástica. Además, se determinó que la diferencia en la cantidad de WCO utilizado en las muestras del diseño experimental no generó cambios significativos en las variables medidas. Por último, se determinaron los rangos de dosificación de polímero y WCO necesarios para alcanzar los PG requeridos en Costa Rica. Generalmente, las guías de diseño de asfalto utilizadas en el país se establecen para suplir distintos requerimientos a los presentes en las carreteras nacionales. Por lo que este estudio permite sentar las bases de una metodología que oriente en el proceso de modificación de asfaltos y brinde mayor detalle de cómo garantizar un buen desempeño de los asfaltos nacionales.

Palabras clave: asfalto modificado, grado de desempeño, aceite reciclado, polímeros, SBS, RET.

ABSTRACT

Permanent deformation and fatigue are the main problems on Costa Rica's highways, and these are directly related to the asphalt binder. This study seeks to define dosage ranges for polymers and Waste Cooking Oil (WCO) to improve the performance of modified asphalt by improving resistance to fatigue and permanent deformation. The used materials were then characterized. Tests were carried out to determine how the binder would interact with the WCO. Then, the different dosage combinations of both WCO and commercial polymer, SBS or RET in each sample of modified asphalt were selected based on the experimental design. Finally, the sample performance grades (PG) were measured, and their resistance to deformation was evaluated by advanced rheology testing. Waste cooking oil was found to lower the upper and lower limit of the PG. It was also evidenced that the presence of the WCO affects the interaction of the asphalt with the SBS. However, the upper limit of PG increased 2 degrees without affecting the intermediate and low temperatures for the samples modified with RET and oil. Based on the statistical analysis it was determined that the polymer used in each sample (SBS or RET) was the factor that generated the most significant differences in resistance to permanent deformation and fatigue. The elastic recovery was mostly influenced by the polymer dosage. It was also determined that the difference in the amount of WCO used in the samples of the experimental design did not generate significant changes in the measured variables. Finally, the polymer and WCO dosage ranges needed to reach the PGs required in Costa Rica were determined. Generally, the asphalt design guidelines used in the country are established to meet different requirements to those present in Costa Rica. Therefore, this study allows to lay the foundations of a guideline for the asphalt modification process and provides more detail on how to guarantee a good performance of national asphalt.

Keywords: modified asphalt, performance grade, waste cooking oil, polymers, SBS, RET.

INTRODUCCIÓN

Costa Rica es un país tropical con condiciones climáticas variables y altas precipitaciones presentes a lo largo del año. Sumado a lo anterior, las exigencias de una carretera no admiten cualquier tipo de asfalto. Es imperativo, por lo tanto, que el país cuente con asfaltos que cumplan con ciertos requerimientos y se estudie con detenimiento el comportamiento del material ante estas condiciones para responder debidamente a las necesidades del país con alternativas que mejoren el estado de la red vial (Wang, 2019). En general, se debería buscar mejorar el desempeño en términos de las fallas más recurrentes en el país que son fatiga y deformación permanente (Loría, 2005).

Un parámetro que permite evaluar el comportamiento del pavimento asfáltico es el grado de desempeño, mejor conocido como PG (del inglés *performance grade*). Este está relacionado principalmente con las condiciones a las que estará expuesto el asfalto a lo largo de su vida útil. El PG establece un rango de temperaturas extremas dentro de las que mantendrá un buen comportamiento en términos de deformación permanente, fatiga y fisuración por contracción. El Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR) realizó un mapa por zonas del grado de desempeño de Costa Rica en el cual se establece que, para las temperaturas que predominan en cada zona y los correspondientes volúmenes de tránsito, en el país se requieren asfaltos con un grado de desempeño entre PG 58-22 y PG 76-22 (Elizondo, Rodríguez, Bonilla, y Badilla, 2013). El asfalto que se utiliza a nivel nacional es de PG 64-22 ya que este es el único que importa y comercializa la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE). Para alcanzar los otros valores requeridos por la especificación se debe modificar el asfalto.

La modificación del asfalto utilizando polímeros se ha estudiado y aplicado por años en diferentes países del mundo. El Lanamme se ha enfocado en estudiar y entender este tipo de modificación del asfalto disponible en el país. Al modificar con un polímero se puede alcanzar los PG requeridos para un asfalto, además de disminuir la susceptibilidad térmica, aumentar la cohesión interna, mejorar el comportamiento a fatiga, aumentar la durabilidad y la resistencia al envejecimiento e incrementar la resistencia al ahuellamiento (Salazar, 2008). Las ventajas del uso de asfaltos modificados son claras, por lo que su investigación continúa siendo relevante.

Sin embargo, al utilizar polímeros como el estireno-butadieno-estireno (SBS) o terpolímero elastomérico reactivo (RET) se corre el riesgo de que el rango de temperaturas del PG se

desplace hacia temperaturas más altas. En tal caso, es posible hacer una mezcla de aditivos para ampliar el rango de PG. Uno de los materiales que ha sido propuesto por diversos autores para estos efectos es el aceite usado de cocina (WCO, del inglés *waste cooking oil*) (Al-Omari, Khedaywi, y Khawneh, 2018).

Majid Zargar y Aslam Al-Omari en sus estudios analizan el uso del WCO como rejuvenecedor o simplemente como modificador para alcanzar especificaciones Superpave y utilizan fracciones másicas que van desde 1 % a 8 % (Al-Omari *et al.*, 2018; Zargar, Ahmadinia, Asli, y Karim, 2012). Ellos concluyen que, para mantener unas propiedades reológicas y físicas aceptables, la dosificación de WCO utilizada no debe sobrepasar el 4 % y uno de ellos concluye que para su asfalto con una viscosidad clasificado como 80/100, la dosificación idónea está entre 3 % y 4 % de WCO.

La modificación con aceite es un método que ha demostrado disminuir la susceptibilidad del ligante asfáltico a volverse más frágil a temperaturas bajas. Además, el material cambia de consistencia, disminuye la viscosidad y, por ende, disminuye el límite inferior del PG. Una temperatura baja de PG aún menor resulta en un ligante con mayor capacidad de relajarse al ser expuesto a cargas y almacenar menos tensión, por lo que el material se fatiga menos (Silla, 2015).

Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es definir rangos de dosificación de polímeros y aceite de cocina reciclado para mejorar el desempeño del asfalto modificado en términos de su comportamiento ante los fenómenos de fatiga y deformación permanente.

METODOLOGÍA

En una primera parte del estudio se realizó un análisis bibliográfico para conocer los requerimientos del país y seleccionar los materiales a utilizar. Seguidamente, se procedió con la parte experimental la cual consistió en la caracterización de los materiales seleccionados con ensayos de espectroscopía de absorción en el infrarrojo usando Transformada de Fourier (FTIR, por sus siglas en inglés), análisis termogravimétrico (TGA, por sus siglas en inglés) y calorimetría diferencial de barrido (DSC, por sus siglas en inglés). Una vez que se tuvo toda la información necesaria, se definió el diseño experimental apropiado para realizar el análisis y se modificó el asfalto según lo definido. Esas muestras de asfalto modificado se dejaron reposar a cierta temperatura por un tiempo específico (Cuadro 1), se sometieron a los tratamientos térmicos necesarios y se realizaron las mediciones reológicas para el

análisis estadístico. Por último, se analizaron los resultados y se determinaron los rangos de dosificación que cumplen con lo establecido para emitir las recomendaciones pertinentes. Cada uno de estos puntos se detalla a continuación.

MATERIALES

Los materiales utilizados en este estudio son: asfalto, los polímeros SBS y RET, los cuales son comerciales y se utilizan comúnmente a nivel de laboratorio, y aceite de cocina reciclado, donado por un restaurante.

El material de partida se clasifica como AC-30 y PG 64-22 (S), con un punto de ablandamiento de 49,7 °C y una recuperación elástica del 1 %.

En el caso de los polímeros, estos fueron seleccionados de acuerdo con las mejoras que proveen al asfalto una vez incorporados. El poli(estireno-butadieno-estireno) o SBS es un elastómero conocido por ser un caucho duro. El material se encuentra en polvo con un tamaño de partícula promedio de 2 mm y con carbonato de calcio como antiadherente. La ficha del fabricante indica que posee un contenido de poliestireno del 30 % másico. Según lo estudiado, la dosificación de SBS utilizada puede llegar hasta aproximadamente un 8 % (Airey, Singleton, y Collop, 2002). Por otro lado, se utilizó RET de alta reactividad y con diámetro promedio de partícula de 5 mm. Por lo general, se incorpora una dosificación entre 0,8 % y 1,8 % de la masa del asfalto utilizado y se recomienda que no sobrepase el 3 % (DuPont, 2011).

En este proyecto se utilizó aceite de cocina reciclado proveniente de un restaurante, referido por lo general en la literatura como WCO. Utilizar un material de desecho es de gran provecho y más aun siendo de difícil disposición. Se seleccionó este aceite de desecho en específico ya que, a diferencia del aceite usado de automóvil, los residuos de comida o demás compuestos que se generan por su uso no afectan al asfalto en el que se va a utilizar (Golalipour, 2013).

Modificación de Asfalto

Para la modificación se vertió una masa conocida de asfalto fluido en un recipiente caliente y se incorporó poco a poco el material modificante con agitación constante; tanto la rapidez de adición y la velocidad angular dependieron de la homogeneidad de la incorporación. El porcentaje de polímero a utilizar se eligió con base en la recomendación del fabricante. Adicionalmente, es necesario resaltar que el polímero RET requiere de la adición de ácido polifosfórico (PPA, por sus

siglas en inglés). Se añadió una cantidad máxima de PPA del 0,2 % de la masa de asfalto para evitar la gelificación del modificado.

Dependiendo del material utilizado se requiere el control de ciertas variables durante la modificación para garantizar una correcta incorporación. Además, algunos modificantes requieren un tiempo de reposo para garantizar los entrecruzamientos entre el asfalto y el polímero. Con base en la literatura (Airey *et al.*, 2002; DuPont, 2011; Hidayah, Hainin, Hassan y Abdullah, 2013; Rodríguez, 2018) y los resultados de la caracterización de los materiales, se establecen los tiempos y temperaturas de modificación para cada uno de los polímeros a utilizar. Esta información se muestra en el Cuadro 1. Además del control del tiempo, la temperatura y la agitación, se realizan pruebas visuales para comprobar la correcta homogeneización de la mezcla. Cabe destacar que en las muestras que contienen una mezcla de polímero y aceite, se adicionó el WCO primero y una vez transcurrido el tiempo necesario para producir una mezcla homogénea, se agregó el polímero, dejándolo en agitación durante el tiempo correspondiente.

Cuadro 1. Variables por controlar para cada modificación dependiendo del material modificante

Material modificante	Temperatura	Tiempo	Reposo	
	T_{mix} °C	t_{mix} h	T_{curado} °C	t_{curado} h
SBS	180	4	25	24
RET	185	1,5	163	24
PPA	163	0,5	163	24
Aceite	163	0,5	-	-

Por último, se acondicionaron las muestras, es decir, se sometieron los asfaltos a simulaciones de envejecimiento y oxidación conocidas como RTFO (del inglés *Rolling Thin Film Oven*) y PAV (del inglés *Pressure Aging Vessel*), respectivamente, para medir el PG completo, así como pruebas de desempeño como MSCR (del inglés *Multiple Stress Creep and Recovery*) y LAS (del inglés *Linear Amplitude Sweep*) a cada una de las muestras.

Diseño Experimental

Con el fin de encontrar un rango de dosificación de polímero adecuado que muestre una mejora en el desempeño del asfalto modificado al incorporarlo junto al WCO, se realizó un diseño experimental y análisis estadístico factorial de 2 niveles y 3 factores (Figura 1). Lo anterior permite evaluar el impacto del polímero utilizado, de la dosis de este y de la cantidad

de aceite añadida al asfalto original. En total se trabajó con 12 muestras de las cuales 8 son necesarias para el análisis estadístico y 4 extras que corresponden a los puntos centrales de dosificación para cada polímero. A continuación, se detalla los modificantes añadidos a cada muestra:

- M 0: 0 % WCO+ 0 % RET + 0 % PPA + 0 % SBS
- M 1: 3,5 % WCO + 0,8 % RET + 0,15 % PPA
- M 2: 3,5 % WCO + 1 % RET + 0,2 % PPA
- M 3: 3,5 % WCO + 1,8 % RET + 0,2 % PPA
- M 4: 4 % WCO + 0,8 % RET + 0,15 % PPA
- M 5: 4 % WCO + 1 % RET + 0,2 % PPA
- M 6: 4 % WCO + 1,8 % RET + 0,2 % PPA
- M 7: 3,5 % WCO + 1 % SBS
- M 8: 3,5 % WCO + 2 % SBS
- M 9: 3,5 % WCO + 4 % SBS
- M 10: 4 % WCO + 1 % SBS
- M 11: 4 % WCO + 2 % SBS
- M 12: 4 % WCO + 4 % SBS

El análisis brindó información sobre la interacción entre el polímero modificante y el aceite rebajador. Las propiedades de los polímeros, sus beneficios y desventajas al ser incorporado al asfalto se conocen bien, sin embargo, no se conoce cómo interaccionaría cada uno de polímeros seleccionados al ser incorporados al asfalto previamente rebajado con WCO. Por esa razón, es de gran importancia utilizar un diseño experimental que permita concluir con certeza si los cambios

en las variables medidas son estadísticamente significativos. Se realizó un análisis estadístico de las siguientes variables: límite superior del PG, $R_{3,2.kPa}$ y N_f al 10 % de deformación. Los resultados se presentan en la siguiente sección.

RESULTADOS

Las carreteras sufren dos deterioros principales que están directamente relacionados con el ligante asfáltico utilizado la deformación permanente y la fatiga. El enfoque en este análisis será evaluar el desempeño de las modificaciones con polímero y aceite, y la posibilidad de alcanzar los grados de PG requeridos en Costa Rica de modo que resistan adecuadamente estos fenómenos.

A continuación, se muestra el razonamiento detrás de la selección de los polímeros analizados, los resultados más importantes de su caracterización, la evaluación reológica de los asfaltos modificados, las dosificaciones recomendadas y el impacto económico que representa la utilización de estos asfaltos modificados en el país.

Selección de materiales

Para cumplir con el objetivo de este proyecto, se requirió incorporar materiales que mejoren al asfalto en términos de elasticidad. Por lo tanto, el reto inicia en la selección de los materiales adecuados. Como se mencionó anteriormente, los materiales involucrados fueron el asfalto, dos polímeros y aceite de cocina reciclado. A continuación, se comentará el proceso de selección, las especificaciones de los materiales seleccionados y los resultados de las pruebas previas.

El barrido de amplitud lineal (LAS) indica que el asfalto soporta 11 ciclos de carga hasta alcanzar una deformación del 10 %.

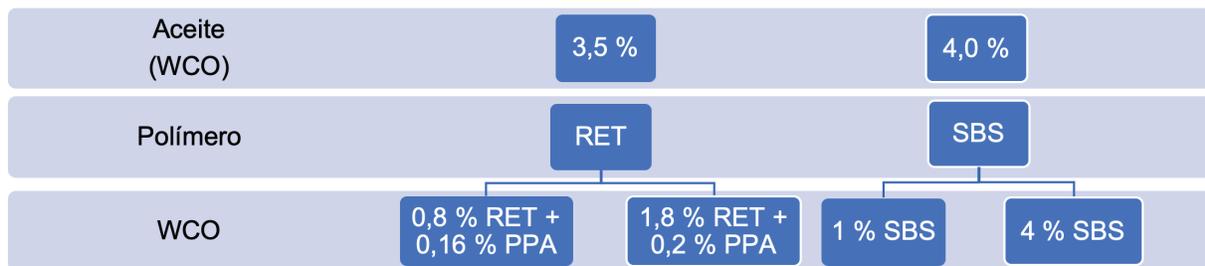


Figura 1. Factores y niveles para el análisis estadístico factorial

Estos resultados serán valores de partida para los siguientes análisis ya que se buscará alcanzar valores más favorables de elasticidad con la incorporación de los materiales en estudio.

Si bien los polímeros elegidos para el estudio promueven un comportamiento más elástico del asfalto una vez modificado, añadir polímero no suele tener un impacto en el límite inferior del grado de desempeño. Por ejemplo, una muestra de asfalto virgen posee un límite inferior de $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($m= 0,33$ y $s= 172,72$ MPa), al igual que ese mismo asfalto modificado con 2% de SBS ($m= 0,2$ y $s= 176,96$ MPa). Por lo tanto, se buscaron distintas alternativas para lograr disminuir el límite inferior del PG y utilizar el polímero para aumentar el límite superior del PG. Con esto, se obtendría un asfalto con un PG más amplio, es decir, un mejor desempeño en un rango más amplio de temperaturas.

Las ceras o aceites para rebajar el asfalto pueden ser añadidos vírgenes o previamente usados con otro fin (reciclados).

Pruebas previas

En estudios previos se ha experimentado con distintos porcentajes de los polímeros SBS y RET con el asfalto AC-30. Así que, con base en esos datos, se decidió realizar el análisis con una dosificación mayor y otra menor a la utilizada en el país sin sobrepasar las dosificaciones recomendadas por los proveedores.

En cuanto al WCO, dado que se desconocía cuál sería su comportamiento al mezclarse con el asfalto nacional, se realizaron pruebas previas para definir cuáles porcentajes se utilizarían junto con el polímero en el análisis. Se modificaron muestras con 1 %, 3 %, 3,5 % y 4 %. En el Cuadro 2 se muestran los resultados de PG para cada una de ellas.

Cuadro 2. PG completo para los asfaltos modificados con WCO a distintas dosificaciones de las pruebas previas

Muestra	Temperatura Superior $T_{SUB}\text{ }^{\circ}\text{C}$	Temperatura Intermedia $T_{INT}\text{ }^{\circ}\text{C}$	Temperatura Inferior $T_{INF}\text{ }^{\circ}\text{C}$
Control	70	25	-16
1% WCO	64	22	-22
3% WCO	64	19	-28
3,5% WCO	64	19	-28
4% WCO	58	19	-28

El límite superior del PG disminuyó dos grados al incorporar el porcentaje de WCO mayor, lo cual debería ser fácilmente recuperable con la ayuda del polímero. Basado en este resultado, cualquiera de las 4 opciones es aceptable. La temperatura

intermedia también se ve favorecida en todos los casos; esta disminuye de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ para el mayor porcentaje de aceite utilizado de cocina.

La muestra con 3,5 % se consideró un buen aporte ya que consume más material de desecho sin afectar el desempeño del asfalto. En general, es el porcentaje más favorecido ya que logra bajar 2 grados del límite inferior, bajando solo 1 grado del límite superior. Es decir, no solo mueve el rango, sino que lo amplía.

De las pruebas previas se observa que el aceite de cocina reciclado podría ser capaz de ampliar el rango de temperatura a la que el asfalto presenta un buen desempeño al combinarlo con el polímero ya que, a la dosificación adecuada de WCO varía únicamente la temperatura baja de PG. Se considera relevante para el análisis estadístico utilizar 3,5 % y 4 % como alternativas de la cantidad de WCO incorporable.

Evaluación de respuestas reológicas

Una vez que se modificaron y se acondicionaron las 12 muestras, se midieron sus respuestas reológicas. Primero, se midió el PG completo de las muestras para verificar que se alcancen los grados de desempeño necesarios para suplir las necesidades del país con las dosificaciones planteadas. Utilizar únicamente el grado PG no siempre es un buen parámetro para evaluar el comportamiento de asfaltos modificados ya que solo detecta qué tan endurecido se encuentra el asfalto (Anderson, D'Angelo, y Walker, 2010). Por esta razón, se completó la evaluación con las pruebas de LAS y MSCR. Como se mencionó anteriormente, con el MSCR se busca determinar el comportamiento del material ante diferentes esfuerzos de forma tal que identifique su propensión a la deformación permanente. Así mismo, por medio del ensayo LAS se obtiene la resistencia a la fatiga del asfalto. A continuación, se detallará los resultados esperados de cada ensayo y los resultados obtenidos para luego discutirlos desde un punto de vista estadístico en la siguiente sección.

En términos de PG, lo ideal es que el asfalto soporte una temperatura alta en el límite superior el límite inferior ya que eso lo haría menos susceptible a deformación permanente a temperaturas altas y a fatiga a temperaturas bajas o intermedias. En el Cuadro 3 se observa que los límites superiores más altos corresponden a las muestras con mayor cantidad de polímero. Esto quiere decir que, como se esperaba, el límite superior es manipulable con polímeros. No obstante, la temperatura intermedia y el límite inferior no se vieron afectados por la presencia del polímero, sino que el aceite añadido tiene un impacto suficiente para que domine en el desempeño del material a temperaturas bajas.

Cuadro 3. PG completo de muestras de asfalto modificado

Muestras (M)		Superior $T_{SUB}^{\circ}C$	Intermedia $T_{INT}^{\circ}C$	Inferior $T_{INF}^{\circ}C$
0	0 % WCO + 0 % RET + 0 % PPA + 0 % SBS	70	25	-16
1	3,5 % WCO + 0,8 % RET + 0,15 % PPA	64	19	-28
2	3,5 % WCO + 1 % RET + 0,2 % PPA	64	19	-28
3	3,5 % WCO + 1,8 % RET + 0,2 % PPA	70	19	-28
4	4 % WCO + 0,8 % RET + 0,15 % PPA	64	19	-28
5	4 % WCO + 1 % RET + 0,2 % PPA	64	19	-28
6	4 % WCO + 1,8 % RET + 0,2 % PPA	70	19	-28
7	3,5 % WCO + 1 % SBS	58	19	-28
8	3,5 % WCO + 2 % SBS	64	19	-22
9	3,5 % WCO + 4 % SBS	64	22	-22
10	4 % WCO + 1 % SBS	58	19	-28
11	4 % WCO + 2 % SBS	64	19	-28
12	4 % WCO + 4 % SBS	64	19	-28

Si bien no se logró superar el valor inicial para el límite superior con las modificaciones por haber utilizado el WCO, se alcanzó el PG 70 y se baja hasta dos grados el límite inferior. Es decir, el rango de temperaturas del PG no se traslada al agregarle el polímero, como sucede comúnmente, sino que al añadir el aceite junto con el polímero se amplía el rango de temperaturas a las cuáles se garantiza un buen desempeño del material. Esto sucede para las muestras 3 y 6 que contienen la mayor proporción de RET añadido a con 3,5 % y 4 % de WCO, respectivamente.

De los resultados obtenidos también se infiere que el SBS se ve afectado por la presencia del WCO. El comportamiento para el límite superior se reduce un grado PG en comparación

con las modificaciones con RET. Este comportamiento se evidenciará en los resultados de los posteriores ensayos.

Los resultados de MSCR para las muestras modificadas con RET (Cuadro 4) y SBS (Cuadro 5) refuerza los resultados anteriores. Las muestras clasificadas como aceptables bajo los criterios de conformidad y que, por ende, muestran una mayor resistencia al ahuellamiento y la deformación permanente son las muestras 2, 3 y 6. Estas muestras con una buena resistencia a la deformación poseen una clasificación de tránsito vehicular pesado (H) y muy pesado (VH) referido a un tránsito de entre 3 y 10 millones de ejes equivalentes y entre 10 y 30 millones de ejes equivalentes, respectivamente. Esto significa que el asfalto es resistente y estable al someter carga.

Cuadro 4. Resultados de MSCR para muestras de asfalto modificado con RET

Variables/Muestras	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Temperatura del ensayo T , °C	64	64	64	70	64	64	70
Porcentaje de recuperación a 3,2 kPa $R_{3,2}$, %	1,7	17	33	54	22	21	43
Fluencia no recuperable a 3,2 kPa $J_{nr3,2}$, kPa ⁻¹	2,3	1,9	1	0,7	1,4	1,5	1,1
J_{nr} entre 0,1 kPa y 3,2 kPa $J_{nr diff}$, kPa ⁻¹	9	28	25	21	24	30	20
Clasificación PG plus	S	H	VH	VH	H	H	H
Conformidad	-	NA	A	A	NA	NA	A

Cuadro 5. Resultados de MSCR para muestras de asfalto modificado con SBS

Variables/Muestras	M0	M7	M8	M9	M10	M11	M12
Temperatura del ensayo T, °C	64	58	64	64	58	64	64
Porcentaje de recuperación a 3,2 kPa $R_{3,2}$ %	1,7	3,2	2,7	13	4	3,6	7,5
Fluencia no recuperable a 3,2 kPa $J_{nr,3,2}$ kPa ⁻¹	2,3	1,7	2,7	1,4	1,6	3,1	1,6
J_{nr} entre 0,1 kPa y 3,2 kPa $J_{nr,diff}$ kPa ⁻¹	9	10	15	24	12	21	24
Clasificación PG plus	S	H	S	H	H	S	H
Conformidad	-	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Por otro lado, para el caso del SBS, nuevamente se obtuvieron resultados desfavorables. El porcentaje de recuperación elástica a 3,2 kPa para el asfalto original era de 1,7 % y los resultados para el asfalto modificado con SBS son muy cercanos a estos valores. De igual manera, la fluencia no recuperable del asfalto original (2,5 kPa⁻¹) es aún menor que para algunas de las muestras del Cuadro 5. Por lo tanto, estos resultados descartan nuevamente la posibilidad de utilizar las muestras 7 - 12.

Por último, el ensayo del barrido de amplitud lineal es indicativo de la resistencia a la fatiga que va a experimentar el material al evaluar los siguientes parámetros. El coeficiente A debe ser un valor alto y B lo más cercano a cero para garantizar que el asfalto tenga una mayor resistencia a la fatiga. Esto se traduce en un N_f mayor, es decir, que el asfalto soporte una mayor cantidad de ciclos antes de alcanzar una deformación del 10 %, que debido a este aumento esto se traduciría en un

incremento en el desempeño mecánico de la carpeta. De acuerdo con los resultados obtenidos (Cuadro 6), las muestras 3 y 6 se ven favorecidas por la modificación.

El asfalto original soporta 142 ciclos antes de fatigarse con una deformación del 10 %, por lo tanto, todas las muestras soportan mínimo 3,6 veces más ciclos que el asfalto original. El SBS es conocido por mejorar el asfalto en términos de flexibilidad a bajas temperaturas. Sin embargo, tomando en cuenta los resultados insatisfactorios que ha tenido el SBS al ser incorporado junto al WCO, se afirma que los beneficios obtenidos son resultado de la presencia del WCO. Este tiende a distribuir el esfuerzo dentro del ligante y por ende aumenta su habilidad de relajación. Al acumular menos tensión, aumenta la cantidad de ciclos que soporta el material antes de fatigarse y se reduce la tendencia a fisuras.

La modificación con SBS consiste en la formación de una red tridimensional altamente elástica en el ligante donde los

Cuadro 6. Resultados de LAS para muestra de asfalto modificado con RET y SBS

Muestras (M)	A	B	N_f	$N_{f,diff}$
0 0 % WCO + 0 % RET + 0 % PPA + 0 % SBS	1 137 216	3,904	142,0	-
1 3,5 % WCO + 0,8 % RET + 0,15 % PPA	5 299 000	3,731	985,5	594 %
2 3,5 % WCO + 1 % RET + 0,2 % PPA	3 381 500	3,682	703,5	395 %
3 3,5 % WCO + 1,8 % RET + 0,2 % PPA	8 707 500	6,785	1433,0	909 %
4 4 % WCO + 0,8 % RET + 0,15 % PPA	4 805 000	3,670	1023,0	620 %
5 4 % WCO + 1 % RET + 0,2 % PPA	4 859 000	3,706	956,5	574 %
6 4 % WCO + 1,8 % RET + 0,2 % PPA	6 991 500	3,698	1386,0	876 %
7 3,5 % WCO + 1 % SBS	3 196 000	3,729	595,5	319%
8 3,5 % WCO + 2 % SBS	3 729 000	3,860	517,0	264 %
9 3,5 % WCO + 4 % SBS	3 749 000	3,768	637,5	349 %
10 4 % WCO + 1 % SBS	2 601 000	3,623	623,5	339 %
11 4 % WCO + 2 % SBS	3 587 000	3,768	612,5	331 %
12 4 % WCO + 4 % SBS	5 503 000	3,921	661,5	366 %

bloques de PS forman entrecruzamientos físicos por fuerzas intermoleculares, entre el asfalto y el polímero. En este caso se usó un SBS radial así que la molécula cuenta con una cantidad mayor de puntos de entrecruzamiento, pero más impedimento estérico. Por lo tanto, un asfalto modificado con SBS radial posee una mayor viscosidad, mayor punto de ablandamiento y se le dificulta más la incorporación del polímero al asfalto (Hunter, Self, y Read, 2015). Se ha propuesto que algunos de los componentes del asfalto se introducen en la red polimérica y esta aumenta volumétricamente de 6 a 9 veces su tamaño inicial (Airey *et al.*, 2002); y una vez que se enfría, los bloques de PS se reacomodan formando la red (Pay, 2017). Cuando aumenta volumétricamente su tamaño, este absorbe los componentes aceitosos del asfalto, los maltenos. Al estar presente el WCO antes de incorporar el SBS, se infiere que el polímero tuvo más afinidad por el aceite y no por el asfalto, lo que evitó que se formara la red con este último. Lo anterior explicaría la respuesta desfavorable que tuvieron las muestras modificadas con este polímero y WCO.

Se concluye que las muestras que mejoran el asfalto de forma más significativa son la 3 y la 6. Todas corresponden a modificaciones con RET, a la mayor dosificación de polímero evaluada. La diferencia de 0,5 % en las dosificaciones de WCO no causó gran impacto en las modificaciones. Sin embargo, las muestras con alto porcentaje de polímero y mayor cantidad de WCO eran más trabajables que su homólogo con menos WCO.

Análisis estadístico

El análisis estadístico factorial permite determinar la importancia de los factores como el polímero utilizado, la dosificación de polímero y la dosificación de WCO sobre la respuesta mecánica del material. Las variables de respuesta analizadas son la temperatura del límite superior del PG, el porcentaje de recuperación elástica a 3,2 kPa y el número de ciclos que soporta el material antes de llegar a una deformación del 10 %, también conocido como vida de fatiga. De esta forma, se mejorará las recomendaciones en cuanto al tipo de material y las dosificaciones apropiadas para las carreteras nacionales.

Se comprueba con un 95 % de confianza que el polímero escogido genera la mayor diferencia en los resultados tanto para deformación permanente como para fatiga. En este caso, la gran diferencia, como se muestra en la Figura 2, se debe a que la interacción entre el asfalto y el SBS se vio afectada por la afinidad que tiene el polímero por el aceite. Por lo tanto, el SBS no formó los entrecruzamientos esperados con el asfalto y se vio beneficiado el RET en todos los casos. Aparte de eso, otros resultados importantes son que el cambio en la cantidad de WCO añadida afectó únicamente en términos de deformación permanente y que la cantidad de polímero utilizado es más importante en relación con el PG. Dicho comportamiento se asemeja al visto en las modificaciones de los materiales por separado, es decir, asfalto modificado únicamente con polímero o con WCO.

Definición de rangos de dosificación para alcanzar los PG requeridos

Las carreteras nacionales alcanzan temperaturas máximas de 64 °C. Sin embargo, si a eso se le suma los distintos volúmenes de tránsito de ciertas zonas del país, se requieren asfaltos: PG 58, PG 64, PG 70 y PG 76 (Elizondo *et al.*, 2013). Por otro lado, la temperatura más baja que alcanza el pavimento en el país es de 4 °C. Es decir, en el país no se esperan problemas de fisuramiento por baja temperatura. Sin embargo, menores temperaturas en el límite inferior e intermedio del PG refleja también mejoras en el desempeño en términos de fisuramiento por fatiga ya que se disipan mejor las cargas en el material. El asfalto tendría una vida más larga ya que tiene que oxidarse mucho más antes de alcanzar valores críticos para su desempeño. Por lo tanto, es beneficioso utilizar una temperatura baja e intermedia de PG menores a las que se reportan para el asfalto nacional.

En el Cuadro 7 se presentan los rangos de dosificación de WCO y polímero recomendados para alcanzar las temperaturas altas de PG requeridos en el país. Estos rangos se definen en base a los resultados obtenidos y analizados a lo largo de este proyecto.

Cuadro 7. Rangos de dosificaciones recomendadas según el análisis realizado para alcanzar los PG requeridos en el país ^{a,b}

PG requerido	Dosificación recomendada			Desempeño	
	% WCO	% RET	% PPA	N _r 10%	J _{nr,3.2 kPa}
58	3 – 3,5	-	-	623,5	1,61 – 1,62
64	3,5	0,8 – 1	0,16 – 0,2	703,5	0,96 – 0,98
70	4	1 – 1,8	0,2	1 386,0	1,11 – 1,90
76	-	1 – 1,8	0,2	-	-

^a Estos rangos se determinaron partiendo de un asfalto PG 70-16.

^b Se reportó una temperatura intermedia de 19 °C y una temperatura baja de PG de -28 °C para todos los casos excepto para el PG 76.

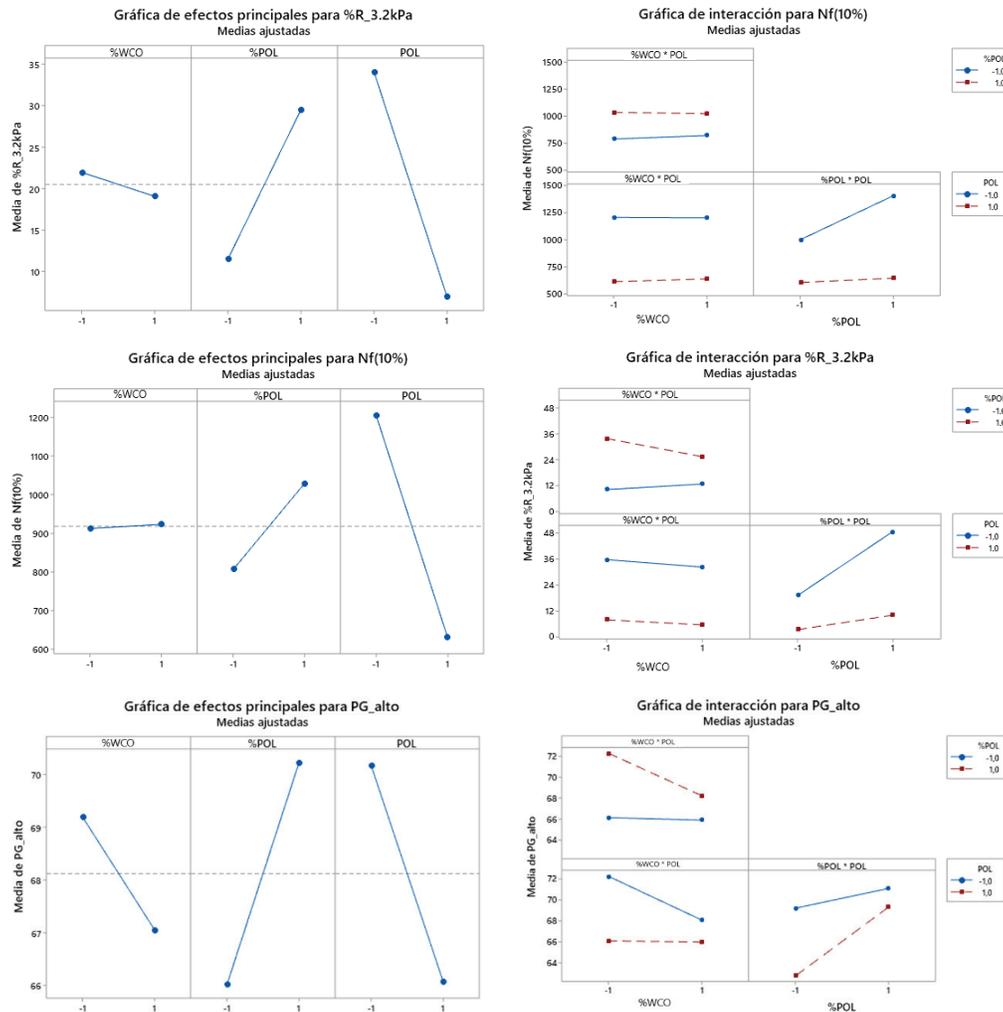


Figura 2. Efectos e interacciones entre las variables analizadas

La modificación del asfalto involucra un gasto mayor. Sin embargo, en casos que requieran un grado de desempeño menor al base, se considera que la adición de aceite resulta beneficiosa ya que con este estudio se comprobó que al añadir WCO hay un aumento en los ciclos que soporta el asfalto antes de fatigarse y estudios afirman que mejoran la adhesión entre el asfalto y el agregado en la mezcla (Airey *et al.*, 2002).

Además, se observó que la mezcla de polímero y aceite produce asfaltos aptos para cargas vehiculares mayores. Por ejemplo, el asfalto base comúnmente utilizado en el país tiene una clasificación PG 64-22 y soporta una carga vehicular estándar (S), no obstante, si se modifica con 1 % RET, 0,2 % PPA y 3,5 % WCO, además de mejorar la recuperación elástica, el asfalto soportará cargas muy pesadas (VH).

Las muestras con las dosificaciones seleccionadas como las mejores opciones para suplir las necesidades del país no están conformes a las especificaciones para asfaltos modificados según el Manual de Especificaciones Generales Para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes CR-2010; como se muestra en el Cuadro 7. Sin embargo, como se reportó en secciones anteriores, ensayos reológicos más modernos y específicos indican que hay una mejora considerable y beneficiosa con las modificaciones realizadas. Los datos obtenidos con el MSCR determinan que las modificaciones alcanzan los niveles de recuperación elástica y deformación permanente aceptables. Además, se alcanzan los grados de desempeño (PG) deseados y se obtiene una resistencia a la fatiga aún mayor que modificaciones con solo polímero. Por lo tanto, se recomienda una actualización de los criterios de conformidad utilizados en el país para la evaluación de asfaltos modificados.

Impacto económico

La adición de estos materiales significa un aumento en el costo de la carretera. En general, se estima que el aumento en los costos es de entre (40 - 45) % del costo del galón de asfalto. Y como en las mezclas se requiere alrededor de un 6 % de ligante, el aumento resulta en un 8 % del costo de la carretera. No obstante, estos costos representan una inversión, ya que la mejora en el desempeño del asfalto se ha estimado que aumenta la vida útil en un 20 - 30 %, lo que hace que se requieran mantenimientos más distanciados. Por otro lado, con la incorporación del aceite se obtienen ganancias en cuanto a la huella de carbono por el uso de material de desecho, en pocas palabras, es un modificante de bajo costo que mostró lograr la disminución en la temperatura baja del PG sin tener afectación en la temperatura alta, esto sin mencionar que es un material de desecho de difícil disposición. El aceite disminuye el punto de ablandamiento y la temperatura de compactación, es decir, se requiere menos diésel en el proceso de producción. Además, se podría hacer la mezcla aún más sostenible si se utilizara plástico reciclado en lugar de polímero virgen.

CONCLUSIONES

- Se seleccionaron como polímeros de estudio el SBS y el RET ya que son modificantes altamente utilizados en la industria del asfalto. Además, se seleccionó el aceite de cocina reciclado para lograr, junto al polímero, ampliar el rango del PG para el cual el asfalto modificado va a mostrar un desempeño favorable tanto en términos de deformación permanente como de fatiga. Se concluyó que el aceite puede afectar la formación de la red entre el polímero y el asfalto. Por lo tanto, se recomienda al utilizar polímeros diferentes a los utilizados en este estudio, evaluar la compatibilidad del polímero con el aceite o bien seleccionar adecuadamente el orden de incorporación de estos materiales al asfalto.

- Al incorporar el RET al asfalto previamente modificado con aceite se logró aumentar en 2 grados el límite superior de PG y no se vio afectada la temperatura intermedia ni la temperatura baja de PG. La buena incorporación del terpolímero reactivo demostró que este tipo de polímero forma una red más estable con el asfalto.
- Se observó que el grado de desempeño debe acompañarse con pruebas como MSCR y LAS para determinar adecuadamente el comportamiento mecánico del asfalto.
- El MSCR reveló que la clasificación por tráfico vehicular se vio beneficiada en todas las muestras evaluadas tras la modificación con aceite y RET.
- La totalidad de las muestras evaluadas mostró una mejora en la resistencia a la fatiga de al menos el 264 % según los resultados de LAS. Esto se le atribuye a la presencia del WCO, el cual rejuvenece el asfalto y promueve la mejor disipación de cargas dentro de la red asfáltica.
- El análisis estadístico factorial determinó, como era de esperar, que el polímero utilizado tuvo un impacto significativo. La dosificación de cada polímero influyó mayormente en la recuperación elástica (valor $p= 0,0001$; $R^2= 86 \%$). Además, determinó que la cantidad de WCO variada en el diseño experimental no es suficiente como para generar cambios significativos (Valor $p= 0,098$).
- Modificar asfalto con las dosificaciones adecuadas de polímero y aceite utilizado de cocina permite ampliar los rangos de temperatura de desempeño del asfalto.

En resumen, al producir asfaltos modificados, se tiene el objetivo de encontrar el mejor diseño al menor costo posible. Por lo tanto, con la presente investigación se comprobó que el uso de aceite utilizado de cocina es una buena alternativa de bajo costo para la mejora de las propiedades del asfalto en términos de fatiga. A su vez se ofrece una solución a una problemática de los gobiernos locales, relacionada con la compleja disposición de este residuo.

REFERENCIAS

- Airey, G., Singleton, T., y Collop, A. (2002). Properties of polymer modified bitumen after rubber-bitumen interaction. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14, 344-354. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:4(344)
- Al-Omari, A., Khedaywi, T., y Khasawneh, M. (2018). Laboratory characterization of asphalt binders modified with waste vegetable oil using SuperPave specifications. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11, 68-76. DOI: 10.1016/j.ijprt.2017.09.004
- Anderson, M., D'Angelo, J., y Walker, D. (2010). MSCR: A better tool for characterizing high temperature performance properties. *ASPHALT: The Magazine of the Asphalt Institute*, 25(2), 15-23.
- DuPont (2011). *DuPont Elvaloy RET Lab Screening guide: Technical Bulletin RET 1.1. Suggested Guidelines for Initial Screening of Elvaloy® RET in Asphalt for Paving Applications*.
- Elizondo, F., Rodríguez, E., Bonilla, E., y Badilla, G. (2013). *Zonificación climática de Costa Rica para la determinación del tipo de ligante asfáltico clasificado por Grado de Desempeño (PG)*. Recuperado de: <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/742>
- Golalipour, A. (2013). *Investigation of the effect of oil modification on critical characteristics of asphalt binders* (Tesis doctoral). Universidad de Winsconsin, Madison.
- Hidayah, N., Hainin, M., Hassan, N., y Abdullah, M. (2013). *A short review of waste oil application in pavement materials*. Malaysia: UTHM Institutional Repository.
- Hunter, R., Self, A., y Read, J. (2015). *The Shell Bitumen Handbook*. Thomas Telford Press: London.
- Loría, L. (2005). *Procuran elevar calidad de asfalto en carreteras*. Recuperado de: <https://historico.semanariouniversidad.com/suplementos/crisol/procuran-elevar-calidad-de-asfalto-en-carreteras/>
- Pay, P. (2017). *Effect of polymer modified bitumen on deformation characteristics of low-traffic asphalt pavements*. Norway: Norwegian University of Science and Technology.
- Rodríguez, E. (2018). *Guía rápida para la modificación de asfalto con polímeros comerciales*. Boletín Técnico PITRA-LanammeUCR, 9(4), 1-6.
- Salazar, J. (2008). *Evaluación de la factibilidad del uso en Costa Rica de polímeros modificantes de asfalto incorporados en planta*. Recuperado de: <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/1464>
- Sylla, R. (2015). *Effects of oil modification on aging characteristics of asphalt materials* (Tesis de Maestría). Universidad de Winsconsin, Madison.
- Wang, S. (2019). Generalidades y aplicaciones de la instrumentación de pavimentos en condiciones de campo en Costa Rica. *Infraestructura Vial*, 20(36), 5-14. DOI: 10.15517/IV.V20I36.37728
- Zargar, M., Ahmadiania, E., Asli, H., y Karim, M. (2012). Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen. *Journal of Hazardous Materials*, 233-234, 254-258. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2012.06.021

Agradecimiento a editores

El equipo editorial de la Revista Infraestructura Vial (RIV) del Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA) extiende un profundo agradecimiento a los estimados señores Kevin Wang y Piero Laurent Matamoros, por su excelente desempeño y extraordinarios aportes como editores de nuestra revista durante los periodos comprendidos entre abril de 2019 y junio de 2020 y, entre mayo de 2020 y abril de 2021, respectivamente.

Asimismo, de parte de todos los miembros del PITRA, les deseamos un buen porvenir profesional en el nuevo rumbo que eligieron en su vida laboral en la búsqueda de nuevos horizontes y metas.

UCR