



## 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.



## SUSCRIPCIÓN

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



La revista *Infraestructura Vial* del LanammeUCR se distribuye bajo la licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional

# EN ESTA EDICIÓN

## **MODIFICACIÓN DEL ASFALTO CON ORUJO DE UVA ROJA COMO MATERIAL ANTIOXIDANTE**

*Asphalt modification with red grape pomace as an antioxidant material*

Gabriel Rojas Rojas Eliécer Arias Barrantes José Pablo Aguiar Moya Alejandra Baldi

01

## **USO DEL CAUCHO GRANULADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS: UNA REVISIÓN LITERARIA**

*Use of granulated rubber in asphalt mixtures: A literary review*

Luz Magali Hoyos Díaz Katyuska del Carmen Puicon Herrera Sócrates Pedro Muñoz Pérez

11

## **ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ASOCIADA A ENSAYOS DE FATIGA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS**

*Analysis of the variability associated with fatigue tests in asphalt mixes*

Melissa Karina Mora Valverde José Pablo Aguiar Moya Mónica Jiménez Acuña Wendy Sequeira Rojas

20

## **FE DE ERRATAS**

*Aplica para los documentos descargados u obtenidos digitalmente antes del 17 de julio de 2020*

Revista Infraestructura Vial

31

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

latindex

Dialnet

biblat  
Bibliografía Latinoamericana

PERIÓDICA  
Revista de Historia y Geografía de Costa Rica

REDIB | 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.

En este número, 41 de la Revista Infraestructura Vial, se abordan temas variados y actuales relacionados con el diseño y la evaluación de pavimentos flexibles.

En el primer artículo los autores hacen una investigación en la que utilizan un aditivo natural a partir del orujo de uva roja, para retardar la oxidación del ligante asfáltico. El efecto del aditivo se prueba tanto en oxidación a la intemperie como en un horno UV, con el objetivo de hacer comparaciones entre ambos métodos. Los hallazgos establecen que efectivamente el orujo de uva roja retarda la oxidación y permiten proponer aditivos alternativos que sean recuperados de algún proceso industrial. Además, los autores presentan sus recomendaciones en cuanto a los dos métodos para medir la oxidación estudiados.

En el segundo artículo, los autores nos presentan una revisión bibliográfica del uso de caucho en mezclas asfálticas, para lo cual considera alrededor de 50 artículos citados. Los autores revisan aspectos como los métodos de modificación, el contenido óptimo de caucho y el efecto que este tiene en el desempeño del pavimento. Se destaca el uso de este material como una alternativa ecológica, ya que este tipo de aplicaciones le da un uso a los neumáticos que han sido utilizados y desechados al ambiente.

El tercer artículo, trata sobre la cuantificación y el análisis de la variabilidad de los ensayos de fatiga en mezclas asfálticas. En este estudio se relaciona el comportamiento de los resultados con factores propios de las mezclas, como lo es el contenido de asfalto. Tras las comparaciones, se ofrecen dos escalas de clasificación: por variabilidad y por duración de cada ensayo. Los autores definen el ensayo más variable y generan recomendaciones al respecto, con base en sus hallazgos.

Adicionalmente, la Revista Infraestructura Vial presenta una Fe de Erratas, en la que se aclara información concerniente a la pertenencia de los derechos de autor de cada artículo publicado en línea antes del 17 de julio de 2020.

Por último, el equipo editorial informa que la revista Infraestructura Vial ajusta su periodo de publicación, de tal manera que se publicará un número a principio de año (para el periodo que corresponde al primer semestre del año) y otro a mitad de año (para el periodo que corresponde al segundo semestre del año).

**Ing. Ana Luisa Elizondo Salas, M.Sc.**  
Directora de la Revista Infraestructura Vial  
LanammeUCR

#### 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

#### EDITOR

Ing. Piero Laurent Matamoros  
LanammeUCR  
piero.laurent@ucr.ac.cr

#### MAQUETACIÓN Y DIAGRAMACIÓN

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

#### CONTROL DE CALIDAD

Oscar 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

# Modificación del asfalto con orujo de uva roja como material antioxidante

*Asphalt modification with red grape pomace as an antioxidant material*

**Gabriel Rojas Rojas**

Dinaju S.A.

Costa Rica

[gabriel.rojas@dinaju.com](mailto:gabriel.rojas@dinaju.com)

**Eliécer Arias Barrantes**

LanammeUCR

Universidad de Costa Rica

Costa Rica

[eliecer.arias@ucr.ac.cr](mailto:eliecer.arias@ucr.ac.cr)

**José Pablo Aguiar Moya**

LanammeUCR

Universidad de Costa Rica

Costa Rica

[jose.aguiar@ucr.ac.cr](mailto:jose.aguiar@ucr.ac.cr)

**Alejandra Baldi**

LanammeUCR

Universidad de Costa Rica

Costa Rica

[alejandra.baldi@ucr.ac.cr](mailto:alejandra.baldi@ucr.ac.cr)

**Fecha de recepción:** 30 de octubre de 2020 / **Fecha de aprobación:** 25 de enero de 2021

## RESUMEN

El presente estudio evaluó las propiedades antioxidantes del orujo de uva roja y si este aportaba algún beneficio al adicionarlo al asfalto. Se modificó asfalto con orujo de uva roja en porcentajes de 1%, 2% y 3% como agente antioxidante. Las muestras preparadas se expusieron a oxidación natural a la intemperie durante 12 semanas. Adicionalmente, las muestras se envejecieron en un horno de radiación ultravioleta (UV) para comparar con el envejecimiento experimentado a la intemperie. El grado de oxidación se estimó a partir de espectroscopía infrarroja, tomándose tres grupos funcionales como parámetros de referencia: índice de carbonilos, índice de dobles enlaces carbono-carbono e índice de sulfóxidos. El asfalto modificado con 3% de orujo tuvo el menor incremento del índice de carbonilos con respecto a los otros asfaltos, indicando que este porcentaje logra retardar la oxidación en comparación con el asfalto sin modificar. Los índices asociados al material colocado en la intemperie resultan ser mayores que los obtenidos en el horno UV, por lo que se concluye que este método aún no simula correctamente la oxidación en la intemperie. Por estos motivos, se recomienda realizar una investigación con porcentajes de orujo mayores al 3% para determinar el efecto del aditivo a mayores concentraciones y realizar modificaciones al método de oxidación con radiación UV en laboratorio.

**Palabras clave:** Asfalto, orujo de uva roja, antioxidantes, oxidación, oxidación a intemperie, horno UV.

## ABSTRACT

*This study evaluated the antioxidant properties of red grape pomace and its benefits as an additive for asphalt binder. The samples were modified using red grape pomace as an antioxidant agent in concentrations of 1%, 2% and 3%. These samples were left outdoors to undergo natural oxidation for 12 weeks. Another set of samples were aged in an ultraviolet radiation (UV) chamber to compare the results between both oxidation methods. Three functional groups were taken in consideration to measure the degree of oxidation: the carbonyl, the carbon-carbon double bond and the sulfoxide indexes. The asphalt modified with 3% red grape pomace had the lowest increase in carbonyl index, showing that the additive works as an agent to delay the oxidation process in asphalt. The indexes obtained for the field aged samples were significantly larger than the ones associated to the UV chamber, consequently aging in a UV chamber did not properly reproduce environmental conditions. Further research analyzing higher percentages of red grape pomace (greater than 3%) to understand the effect of larger contents of additive is recommended, as well as to perform modifications to the oxidation processes with UV radiation on laboratory.*

**Keywords:** Asphalt, red grape pomace, antioxidant, oxidation, outdoor oxidation, UV oven.

## INTRODUCCIÓN

El proceso de envejecimiento del asfalto se relaciona con su grado de oxidación, causando modificaciones físicas y químicas en la estructura molecular de este. Asimismo, el envejecimiento altera propiedades intrínsecas del asfalto como la dureza, la rigidez y las propiedades de cohesión y adhesión respecto a un asfalto nuevo. El proceso de oxidación del asfalto corresponde a una reacción química irreversible del material con el oxígeno de la atmósfera (Apeageyi, 2011). Este proceso resulta en un aumento en la polaridad en las moléculas del asfalto; lo que se traduce en un incremento de la dureza y rigidez como respuesta física del material (Faisal, Ahmad, y Tarefder, 2018).

En la estructura química del asfalto, según las fracciones de Corbett, se encuentran: compuestos saturados, naftenos aromáticos, aromáticos polares y asfaltenos. Petersen (2009) asegura que, de estas fracciones, las más propensas -o las más reactivas- a la oxidación son los naftenos aromáticos y los aromáticos polares. Según varias investigaciones, durante la oxidación del asfalto ocurren reacciones que dan la formación de compuestos como sulfóxidos y carbonilos, que a su vez generan el apilamiento de grupos polares en el material; resultando en el ya mencionado aumento de la rigidez (Petersen y Glaser, 2011; Qin, Schabron, Boysen, y Farrar, 2013; Tang y Dong, 2020).

El envejecimiento del asfalto en el laboratorio se puede realizar mediante procesos a largo y a corto plazo. Para simular el proceso a corto plazo se emplea una prueba llamada *Rolling Thin Film Oven* o RTFO (ASTM D 2872), por sus siglas en inglés. Esta prueba busca representar el envejecimiento que sufre el asfalto durante la producción, almacenamiento, transporte y colocación del material. Por otro lado, el envejecimiento a largo plazo se simula con un equipo llamado *Pressurized Aging Vessel* o PAV (ASTM D 6521), por sus siglas en inglés; y busca simular el envejecimiento del asfalto en 7 a 10 años de servicio (Cheng, Han, Liu, y Xu, 2019).

Los métodos anteriormente mencionados corresponden a pruebas de envejecimiento térmico oxidativo del asfalto. Sin embargo, hay otra modalidad de oxidación importante que corresponde al envejecimiento UV (Sánchez, 2017; Rojas, Amado, Fernández y Reyes, 2012; Vargas y Reyes, 2010; Martínez y Caicedo, 2005). Esta técnica se utiliza comúnmente ya que algunos estudios determinaron que la radiación ultravioleta afecta directamente el ligante asfáltico, dependiendo del origen de la muestra (Rojas *et al.*, 2012). Para

esta prueba hay factores importantes que pueden afectar los resultados, tales como: la temperatura, densidad de radiación UV, tipo de radiación UV y el grosor de la muestra. Esta es una prueba necesaria para poder simular en el laboratorio las condiciones de la intemperie y donde el material servirá durante su vida útil (Zeng *et al.*, 2018).

Cabe resaltar que estos procedimientos buscan representar adecuadamente la oxidación del asfalto en el laboratorio. Esto es necesario ya que la oxidación es uno de los procesos más comunes que pueden llegar a causar fatiga y agrietamiento en la mezcla asfáltica, ya que las características de oxidación del ligante dictan el comportamiento y durabilidad del pavimento (Vargas y Reyes, 2010). De igual manera, al iniciar la oxidación del asfalto, se aumenta el número de moléculas polares y de mayor tamaño que alteran propiedades del material como el módulo viscoelástico y el ángulo de fase. A su vez, estas propiedades generan una respuesta en las propiedades físicas del asfalto al oxidarse, y se evidencian como presencia de fisuras y agrietamiento (Parada, Lepesqueur, y Caicedo, 2005).

Por lo tanto, es importante considerar que el asfalto puede modificarse con materiales que mejoren sus propiedades según se requiera. Entre los aditivos que buscan retardar el envejecimiento del asfalto se encuentran los antioxidantes. Estos se deben elegir adecuadamente para evitar problemas de degradación o volatilidad una vez que el asfalto se encuentre en la intemperie (Apeageyi, 2011).

En la literatura se encuentran varios estudios con diversos materiales considerados por los investigadores como antioxidantes, como el ditiocarbamato de zinc (Santucci, Goodrich, y Sundberg, 1981) o el plomo (Haxo y White, 1979). Una revisión más completa de los materiales empleados, así como de los fenómenos asociados, ha sido elaborada por Petersen (2009). De igual manera, en el estudio realizado por Apeageyi (2011), se empleó vitamina E como antioxidante por su estabilidad a temperaturas entre 30°C y 80°C, que corresponden a las temperaturas de servicio de pavimentos. Asimismo, es un compuesto que cuenta con alta resistencia a la extracción y bajo punto de fusión (entre 2,5°C y 3,5°C).

En este sentido, para el presente estudio se utilizó el orujo de la uva como aditivo antioxidante en el asfalto, ya que es un material que está compuesto de semillas y hollejos; y químicamente posee compuestos antioxidantes de tipo fenólicos, como ácidos fenólicos, las antocianinas, flavonoles, catequinas, entre otros. En especial, el hollejo que conforma el orujo posee compuestos antioxidantes como las flavonas (Zúñiga, 2005) y antiocianinas (Agustin, Medina, Soto,

Manzanares, y Gámez, 2014) y ha probado ser de utilidad como aditivo del asfalto previamente (Calabi, 2012). Por lo tanto, el objetivo del presente estudio es evaluar los efectos de la adición de orujo de uva roja al asfalto y las propiedades de este ante la oxidación a la intemperie y en el laboratorio.

## METODOLOGÍA

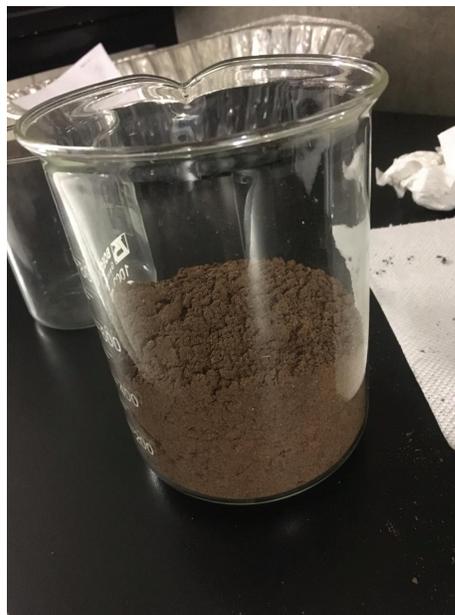
### Modificación de los asfaltos

La preparación del antioxidante inicia con el secado del orujo, donde este se coloca en un horno durante 3 días a una temperatura de 90 °C. Posteriormente, se pasó por dos molinos, el primero para obtener una consistencia más homogénea, y el segundo para lograr el tamaño requerido (malla con abertura de 0,5 mm). El cambio en la textura del orujo luego de este tratamiento se aprecia en la Figura 1, donde se muestra el orujo secado en el horno (Figura 1a) y luego de ser molido (Figura 1b).

El siguiente paso consiste en mezclar el orujo con asfalto: el porcentaje de orujo agregado correspondió a 1%, 2% y 3% por peso de asfalto. El asfalto modificado y original se colocó en bandejas antiadherentes para producir películas de 1 mm de espesor. El total se prepararon 192 muestras; de las 8 bandejas empleadas 7 se dejaron a la intemperie y la restante se envejeció con lámparas UV. Cada bandeja tiene capacidad para acomodar 24 muestras individuales.



a)



b)

Figura 1. El orujo de uva roja a) seco previo a molerse y b) luego del proceso de molido

### Oxidación del asfalto

Las muestras se colocaron a la intemperie durante tres meses y se fueron recolectando semanalmente para su evaluación. Sin embargo, para sintetizar la información, en el presente artículo se muestran únicamente las muestras correspondientes a 0, 4, 8 y 12 semanas de exposición.

Por otro lado, para las muestras que se envejecieron con la prueba UV se utilizó una temperatura de 30 °C y el tiempo de exposición se varió según el número de días que se deseaba simular, de acuerdo con lo detallado en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Equivalencia de exposición en el horno con lámparas UV

Tiempo que se desea simular (días)	Tiempo de exposición en el horno (minutos)
15	63
30	126
45	189
60	252
75	315
90	378

Basado en el trabajo de Sánchez (2017)

### Caracterización de los materiales

La caracterización tanto del asfalto modificado como del original se realizó mediante espectroscopía infrarroja, para esto se utilizó el espectrómetro de infrarrojo marca Thermo

Scientific modelo Nicolet iS50FT-IR. A ambos asfaltos se le realizaron tres pruebas de infrarrojo para conocer las condiciones iniciales, principalmente aquellas relacionadas con las señales asociadas con el avance de la oxidación en el material, como la de carbonilos, dobles enlaces y sulfóxidos.

En el caso del envejecimiento a la intemperie se realizaron 3 repeticiones de los espectros para cada muestra, por cada semana de exposición, completando un total de 156 espectros.

Por otro lado, para el envejecimiento en el horno con lámparas UV, se realizaron 3 espectros por muestra, para cada tiempo que se detalla en el Cuadro 1, completando un total de 72 espectros. A cada espectro obtenido se cuantificó el área bajo la curva de las señales de interés con el software Omnic (Thermo Scientific, 2012).

Finalmente, se calcularon índices para representar la intensidad de las bandas asociadas a las frecuencias de  $1700\text{ cm}^{-1}$ ,  $1030\text{ cm}^{-1}$  y  $1600\text{ cm}^{-1}$ ; que corresponden a las señales de carbonilos, sulfóxidos y dobles enlaces carbono-carbono (o insaturaciones), respectivamente (Ecuaciones 1, 2 y 3). Estos se consideran como parámetros de oxidación para el presente estudio ya que, en el caso de los carbonilos y sulfóxidos, estos son altamente reconocidos por aparecer cuando aumenta la cantidad de oxígeno en las moléculas del material, por lo que aportan polaridad y rigidez a las moléculas. Por otro lado, las insaturaciones se dan al perderse los enlaces entre el carbono y el hidrógeno, formándose así enlaces múltiples que restan flexibilidad al asfalto, por lo que se consideran de gran importancia como indicadores del comportamiento mecánico final del asfalto oxidado (Villegas-Villegas, Baldi-Sevilla, Aguiar-Moya, y Loria-Salazar, 2018).

$$\text{Índice carbonilos, } I_{C=O} = A_{C=O} / A_{\text{total}} \quad (1)$$

$$\text{Índice sulfóxidos, } I_{S=O} = A_{S=O} / A_{\text{total}} \quad (2)$$

$$\text{Índice insaturaciones, } I_{C=C} = A_{C=C} / A_{\text{total}} \quad (3)$$

Donde  $A_{C=O}$ ,  $A_{S=O}$  y  $A_{C=C}$  son las áreas de las señales en el espectro infrarrojo correspondientes a los grupos carbonilo, sulfóxido y doble enlace carbono-carbono, respectivamente; y  $A_{\text{total}}$  es la suma del área de todas las señales del espectro.

## RESULTADOS

La modificación de asfalto con orujo ocasiona la aparición de la señal de grupos funcionales ausentes en el asfalto sin modificar y sin haber aplicado ningún tipo de envejecimiento en el material. Esto es evidente en la Figura 2, donde se muestra la comparación entre el ligante control y el modificado con orujo, a manera de referencia.

Se observan algunas variaciones entre ambos asfaltos, por ejemplo, hay una señal en los  $1700\text{ cm}^{-1}$  en el espectro del asfalto modificado con orujo, ausente en el asfalto original, antes de los envejecimientos. Esto indica que al modificar el asfalto con orujo hay una fracción de los carbonilos que es aportada por el aditivo.

De igual manera, en la región de  $1030\text{ cm}^{-1}$ , el espectro obtenido para el asfalto modificado con orujo presenta una señal, ausente en el asfalto original. Por tanto, el índice de sulfóxidos que se obtuvo podría verse influenciado a causa de la adición de orujo. En el caso de la señal de  $1600\text{ cm}^{-1}$ , el comportamiento es similar para ambos asfaltos, por lo que no hubo formación de dobles enlaces al adicionar orujo al asfalto. Es importante mencionar que se observa un ligero desplazamiento a la derecha de los picos en las longitudes de onda entre  $1600\text{ cm}^{-1}$  y  $1700\text{ cm}^{-1}$  para el asfalto modificado en comparación con el original.

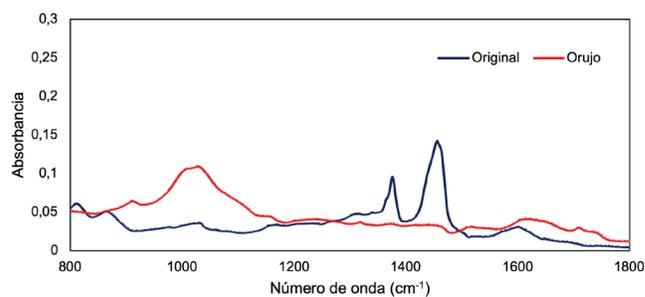
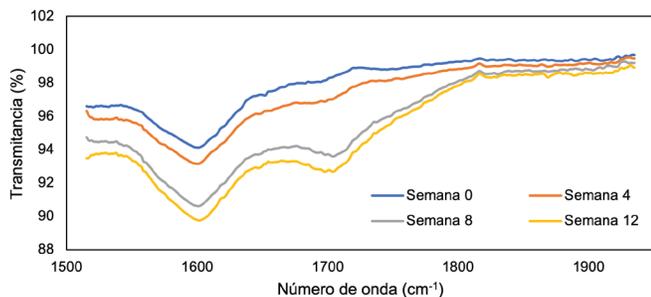


Figura 2. Espectro IR del asfalto original y del orujo empleado (ampliación de la región de interés entre 800 y 1800  $\text{cm}^{-1}$ )

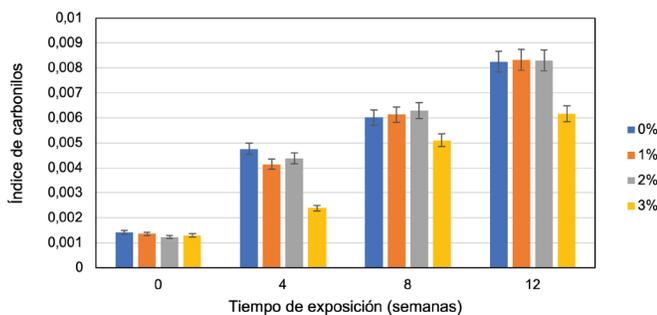
### Oxidación del asfalto a la intemperie

En la Figura 3, se observa el crecimiento en las señales de longitudes de onda  $1600\text{ cm}^{-1}$  y  $1700\text{ cm}^{-1}$  para uno de los asfaltos modificados con orujo, a manera de ejemplo. Se observa que para la semana 0 (tiempo inicial) hay una ausencia de estas señales. En las siguientes semanas, ambas empiezan a volverse notorias, hasta alcanzar un valor máximo en la semana 12. Esto indica el aumento de la presencia de carbonilos y un incremento de los dobles enlaces, que en conjunto brindan rigidez al material.



**Figura 3. Comparación de los espectros para las semanas 0, 4, 8 y 12 para la oxidación a la intemperie del asfalto modificado en las longitudes de onda de 1600 cm<sup>-1</sup> y 1700 cm<sup>-1</sup>**

En la Figura 4, se observan los índices de carbonilos, cuantificados mediante el cálculo del área bajo la curva de la señal a 1700 cm<sup>-1</sup> y la utilización de la ecuación 1. Este índice crece conforme pasa el tiempo de exposición, aunque se aprecia que el crecimiento para el asfalto modificado con 3% de orujo es menor. De igual manera, se aprecia en la figura que los asfaltos modificados con 1% y 2% de orujo se comportan de forma similar al asfalto original, pero para el 3% sí hubo una disminución en el crecimiento del índice de carbonilos.



**Figura 4. Comparación del índice de carbonilos para el asfalto original, y los asfaltos modificados con 1% de orujo, 2% de orujo y 3% de orujo a la intemperie**

El porcentaje de crecimiento entre las semanas de exposición para el índice de carbonilos se aprecia en el Cuadro 2, donde se observa que el mayor aumento (70%) en carbonilos ocurre entre la semana 0 y la semana 4. En las siguientes semanas la tasa de crecimiento es relativamente constante.

Al comparar el asfalto original con el asfalto modificado con 1% de orujo y con 2% de orujo, el comportamiento es similar; donde el mayor crecimiento ocurre entre las semanas 0 y 4 el menor crecimiento entre la semana 8 y 12. Por lo tanto, los

resultados sugieren que en el asfalto modificado con 3% de orujo se da un aumento del índice de carbonilos, al igual que las otras muestras; sin embargo, en comparación con el asfalto original, se aprecia que el aditivo logra reducir la incidencia de este grupo oxidado.

*Cuadro 2. Porcentajes de incremento semanales para el índice de carbonilo para el asfalto modificado y oxidado a la intemperie*

Período	Porcentaje de Crecimiento			
	Original	1% Orujo	2% Orujo	3% Orujo
Semanas 0 a 4	70%	67%	72%	45%
Semanas 4 a 8*	20%	33%	31%	54%
Semanas 8 a 12**	27%	26%	25%	17%

\*el porcentaje reportado corresponde al aumento observado desde el primer período (Semanas 0 a 4)

\*\* el porcentaje reportado corresponde al aumento observado desde el segundo período (Semanas 4 a 8)

En la Figura 5, se aprecia el crecimiento del índice de dobles enlaces, en donde el valor mayor para el índice se obtiene en la semana 12. Asimismo, en la semana 4 se observa que el índice de enlaces dobles para la muestra modificada con 1% de orujo tiene un valor mayor a la muestra de asfalto original, y en las semanas posteriores muestra valores menores al control.

Por su parte, las muestras modificadas con 2% y 3% de orujo muestran valores menores en comparación al asfalto original y similares entre sí. Adicionalmente, en el Cuadro 3, se observa el crecimiento porcentual del índice de dobles enlaces para el tiempo de exposición. El mayor incremento del índice ocurre para el asfalto original, entre las semanas 8 y 12 con un 15% y el menor también para el asfalto original entre las semanas 0 y 4 con un 2%.

Contrario a lo anterior, la muestra modificada con orujo obtuvo el mayor crecimiento del índice entre las semanas 0 y 4 con 11% y, similar a la muestra de asfalto original, el modificado con 2% de orujo obtuvo el mayor crecimiento entre las semanas 8 y 12, con un 14%. Asimismo, el asfalto modificado con 3% de orujo tiene un crecimiento significativo entre las semanas 8 y 12 con un 8%.

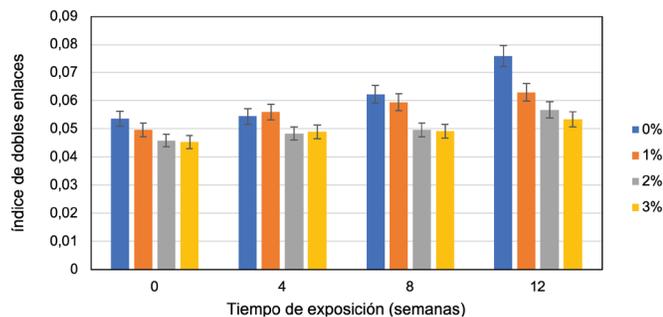


Figura 5. Comparación del índice de dobles enlaces para el asfalto original, y los asfaltos modificados con 1% de orujo, 2% de orujo y 3% de orujo a la intemperie

Cuadro 3. Porcentajes de crecimiento entre semanas de exposición para el índice de dobles enlaces

Período	Porcentaje de Crecimiento			
	Original	1% Orujo	2% Orujo	3% Orujo
Semanas 0 a 4	2%	11%	5%	7%
Semanas 4 a 8*	12%	6%	3%	1%
Semanas 8 a 12**	15%	5%	14%	8%

\*el porcentaje reportado corresponde al aumento observado desde el primer período (Semanas 0 a 4)

\*\* el porcentaje reportado corresponde al aumento observado desde el segundo período (Semanas 4 a 8)

Los resultados expuestos en el Cuadro 3 sugieren que durante las primeras 4 semanas de exposición se da la oxidación del asfalto para las muestras modificadas con el orujo. Sin embargo, en comparación con el asfalto sin orujo, se observa que a partir de la semana 4 el aditivo genera una disminución en la incidencia de dobles enlaces, lo cual es un indicio de que el material adicionado logra reducir la oxidación de este tipo de compuestos.

Con respecto a los sulfóxidos, en la Figura 6 se observa el aumento del índice de estos a través del tiempo de exposición. A diferencia de los otros índices, para este en particular no se observan cambios significativos entre la muestra de asfalto original y las muestras modificadas.

En el Cuadro 4 se aprecia el incremento porcentual del índice de sulfóxidos a través del tiempo de exposición, y para el asfalto original el mayor crecimiento se obtiene entre las semanas 0 y 4 con 68%; al igual que para el asfalto modificado con 1% de orujo. De igual forma, para los asfaltos modificados con 2% y 3% de orujo, el mayor crecimiento se obtuvo entre las semanas 0 y 4 con 43% y 60%, respectivamente.

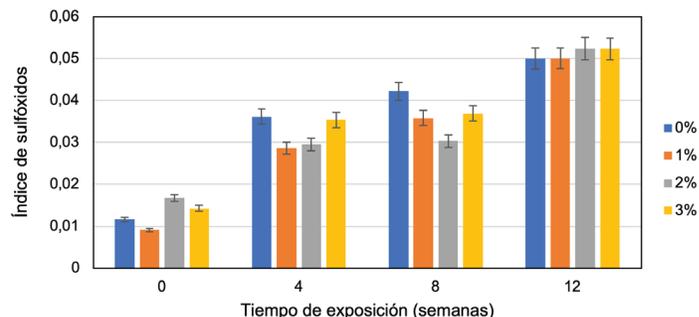


Figura 6. Comparación del índice de sulfóxidos para el asfalto original, y los asfaltos modificados con 1% de orujo, 2% de orujo y 3% de orujo a la intemperie

Cuadro 4. Porcentajes de crecimiento entre semanas de exposición para el índice de sulfóxidos

Período	Porcentaje de Crecimiento			
	Original	1% Orujo	2% Orujo	3% Orujo
Semana 0 a 4	68%	68%	43%	60%
Semana 4 a 8*	14%	15%	3%	4%
Semana 8 a 12**	16%	33%	42%	29%

\*el porcentaje reportado corresponde al aumento observado desde el primer período (Semanas 0 a 4)

\*\* el porcentaje reportado corresponde al aumento observado desde el segundo período (Semanas 4 a 8)

Los resultados anteriores se resumen en el Cuadro 5, donde se muestra una comparación en el crecimiento de cada índice con respecto al tiempo de envejecimiento a la intemperie, esto para todos los asfaltos utilizados.

Los resultados apuntan a que al agregar 1% o 2% de orujo no hay un beneficio real en las tasas de crecimiento de carbonilo. Sin embargo, al agregar 3% de orujo sí hubo una reducción en la ocurrencia de este índice. En el caso del índice de dobles enlaces se muestra que, al agregar orujo al asfalto, este no afecta las tasas de crecimiento de dobles enlaces a través del tiempo. También, al modificar el asfalto con 2% y 3% de orujo para el análisis del índice de sulfóxidos, sí hay una leve disminución de la presencia de este grupo funcional en comparación con el asfalto original o modificado con 1% de orujo.

Cuadro 5. Aumento del índice de carbonilos, dobles enlaces y sulfóxidos al terminar las 12 semanas con respecto a la semana 0 en la intemperie

Asfalto	Índice de Carbonilos	Índice de Dobles Enlaces	Índice de Sulfóxidos
Original	5,8 veces	1,4 veces	4,3 veces
1%	6,1 veces	1,3 veces	5,5 veces
2%	6,7 veces	1,2 veces	3,1 veces
3%	4,7 veces	1,2 veces	3,7 veces

De acuerdo con los resultados del Cuadro 5 es posible deducir que la adición de un 3% de orujo reduce la aparición de los grupos oxidados como carbonilos, sulfóxidos y enlaces dobles, en comparación con el asfalto sin el aditivo, siendo el índice de enlaces dobles carbono-carbono el menos afectado.

### Oxidación del asfalto en cámara ultravioleta (UV)

A continuación, se analizarán los resultados obtenidos para los asfaltos empleando el envejecimiento en horno UV, empezando con el índice de carbonilos obtenido para 12 semanas de exposición. En la Figura 7 se observa un cambio poco significativo entre las muestras modificadas en comparación con el asfalto original. Asimismo, se observa que el crecimiento de la semana 8 a la 12 es muy similar y dicho aumento es de 0,5%, únicamente. Para el asfalto modificado con 1% de orujo el mayor aumento del índice de carbonilos ocurre de la semana 0 a la 4 con un 15%. De igual manera, para el modificado con 2% de orujo el mayor aumento ocurre de la semana 0 a la 4 con un 40% y para el modificado con 3% de orujo que aumenta en 27%.

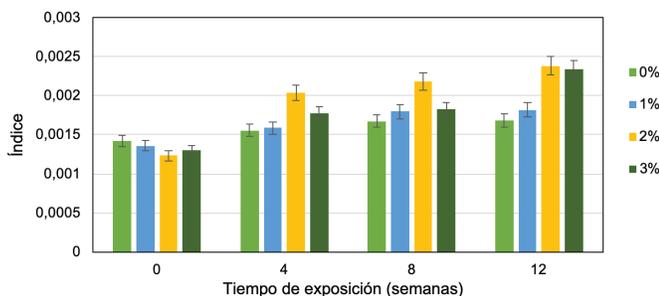


Figura 7. Comparación del índice de carbonilos para el asfalto original, y los asfaltos modificados con 1% de orujo, 2% de orujo y 3% de orujo en el horno UV

En la Figura 8, se aprecian los resultados obtenidos para el índice de dobles enlaces, donde dicho índice aumenta con el tiempo de exposición. Para el asfalto original el mayor aumento del índice ocurre de la semana 4 a la 8 con un 5%, al igual que para el asfalto modificado con 1% de orujo, con un 10% de aumento. El asfalto modificado con 2% orujo tuvo un crecimiento importante de la semana 0 a la 4 con 16%, al igual que el modificado con 3% de orujo con un 15% de incremento.

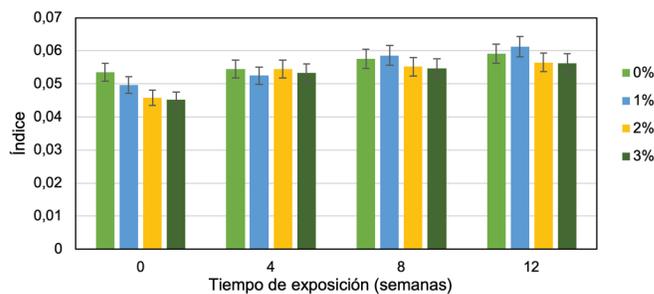


Figura 8. Comparación del índice de enlaces dobles para el asfalto original, y los asfaltos modificados con 1% de orujo, 2% de orujo y 3% de orujo en el horno UV

El comportamiento del índice de sulfóxidos se observa en la Figura 9, donde este crece conforme aumenta el tiempo de exposición. El asfalto original aumenta el índice de sulfóxidos de la semana 0 a la 4 en un 63,8%; también en esas semanas incrementa el índice para el asfalto modificado con 1% orujo en un 70%. Un comportamiento similar ocurrió con el orujo modificado con un 2%, que incrementó el índice de sulfóxidos en un 46% al igual que el modificado con 3% de orujo que incrementó en 67%.

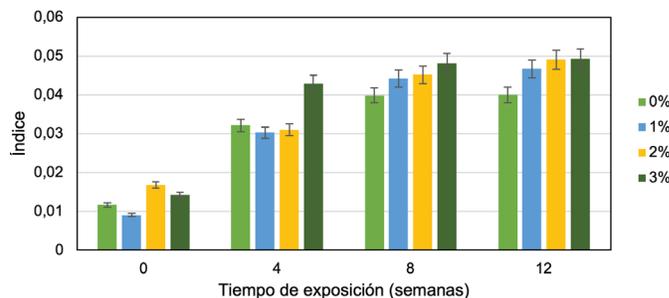


Figura 9. Comparación del índice de sulfóxidos para el asfalto original, y los asfaltos modificados con 1% de orujo, 2% de orujo y 3% de orujo en el horno UV

En el Cuadro 6 se muestran las comparaciones del asfalto original y modificados en la semana 0 y el asfalto envejecido en horno UV al final del período. Se observa que este tipo de envejecimiento, en donde se busca simular las 12 semanas de exposición a la intemperie, no ocurre un cambio significativo en la disminución de los grupos oxidados, por lo que se deducen dos observaciones principales al comparar la oxidación en ambos períodos: 1) la adición del orujo no tiene un efecto sobre la aparición o reducción de los índices, 2) la oxidación en el horno UV no favorece la formación de grupos carbonilo en el asfalto, en comparación con la oxidación a la intemperie.

Por tanto, al comparar el envejecimiento de las muestras en la intemperie y en el horno UV durante todo el período, se observa que el índice de carbonilos para la semana 12 es 5 veces mayor en el envejecimiento a la intemperie. También, el índice de dobles enlaces es 1,3 veces mayor que el obtenido en el horno UV y el índice de sulfóxidos 1,25 veces mayor que el simulado en el horno UV. Esto indica que las condiciones seleccionadas para simular el envejecimiento en el horno UV no simulan correctamente la oxidación que sufre el asfalto en la intemperie, por lo que es necesario hacer modificaciones al procedimiento, de modo que ambos métodos presenten el mismo nivel de oxidación.

Cuadro 6. Aumento del índice de carbonilos, dobles enlaces y sulfóxidos al terminar las 12 semanas con respecto a la semana 0 en el horno UV

Asfalto	Índice de Carbonilos	Índice de Dobles Enlaces	Índice de Sulfóxidos
Original	1,2 veces	1,2 veces	3,4 veces
1%	1,3 veces	1,2 veces	5,1 veces
2%	1,9 veces	1,2 veces	2,9 veces
3%	1,8 veces	1,2 veces	3,5 veces

### Predicción de la oxidación en el tiempo

A manera de complementar el análisis mostrado anteriormente, así como para cuantificar el efecto de cada variable en el estudio (tiempo y modo de envejecimiento, y porcentaje de orujo adicionado) sobre la aparición de las señales de oxidación en el material, se generó un modelo estadístico lineal con la siguiente forma estructural (Ecuación 4).

$$I_i = \beta_1 + \beta_2 t + \beta_3 M + \beta_4 \%R + \varepsilon \quad (4)$$

donde  $I_i$  corresponde al indicador de interés (ej.  $I_c=c$ ),  $t$  corresponde al tiempo de oxidación,  $M$  corresponde al método de oxidación (1 corresponde a oxidación a la intemperie, 0 oxidación en horno),  $\%R$  corresponde al porcentaje de rejuvenecedor,  $\beta_j$  son los parámetros estimados por el modelo y  $\varepsilon$  representa toda la variabilidad que no es capturada por el modelo. En el Cuadro 7 se presentan los modelos generados para el estudio de las señales de carbonilos, sulfóxidos y dobles enlaces sobre el modo de oxidación de cada lámina de asfalto a las condiciones estudiadas.

Cuadro 7. Estadísticos del modelo predictivo del crecimiento de carbonilos, sulfóxidos e insaturaciones con el tiempo, cantidad adicionada de orujo y modo de oxidación (intemperie vs. horno)

Señal	Factor	Coficiente del modelo	Error estándar	P-value
Carbonilo	$\beta_1$	0,0002103	0,00060581	0,7292749
	$\beta_2$	0,00029473	5,7244E-05	1,4819E-06
	$\beta_3$	0,00297553	0,000512	8,8237E-08
	$\beta_4$	-0,0001538	0,00022898	0,50345495
Sulfóxido	$\beta_1$	0,01524564	0,00245236	1,4673E-08
	$\beta_2$	0,00286002	0,00023173	3,206E-21
	$\beta_3$	-0,00120906	0,00207262	0,56108696
	$\beta_4$	0,00133256	0,0009269	0,15392777
Instauraciones	$\beta_1$	0,052919632	0,001510156	5,27726E-55
	$\beta_2$	0,000949777	0,000142696	1,99991E-09
	$\beta_3$	0,000213224	0,001276315	0,867687538
	$\beta_4$	-0,002888235	0,000570785	2,13475E-06

En el caso del grupo carbonilo, se encontró que las variables significativas para provocar una variación en la cantidad de estos grupos son el tiempo y el modo de oxidación. Entre los resultados, se tiene que cada semana adicional de exposición a la radiación genera un aumento del 0,03% en los carbonilos. Adicionalmente, oxidar el material a la intemperie tiene un efecto en la aparición de este grupo (un aumento del 0,3% en la cantidad detectada de carbonilos), en comparación con la utilización del horno UV. Lo anterior confirma la necesidad de modificar el método de envejecimiento en la cámara UV, para apegarse al proceso de campo. Por otro lado, el aumento en el antioxidante utilizado genera una disminución en la aparición de carbonilos, sin embargo, tal efecto no es significativo a niveles de confianza típicos (95%).

Para el modelo del grupo sulfóxido se observa que el tiempo de exposición es el factor más significativo en el cambio de este grupo químico, siendo que se espera que por cada semana de exposición la cantidad de sulfóxidos se incremente en un 0,3%. Por otro lado, el porcentaje de orujo utilizado para modificar el asfalto tiene un efecto un poco menos importante (un nivel de confianza del 85%), sin embargo, se encontró que con la adición de orujo el índice de sulfóxidos aumenta, lo cual es congruente a lo observado en las muestras. No se encuentra significancia en el efecto del tipo de envejecimiento que se utiliza para oxidar al material, por tanto, con respecto a los sulfóxidos, el horno UV sí es capaz de simular adecuadamente el cambio ocurrido en campo.

En el caso de los dobles enlaces (insaturaciones) se encontró que tanto el tiempo como el porcentaje de orujo adicionado tienen un impacto sobre el cambio en este índice. Se muestra que se da un aumento en la aparición de dobles enlaces de un 0,09% semanal, mientras que la adición de orujo hace que se reduzca la aparición de estos grupos en un 2% por punto porcentual de aditivo utilizado.

Los resultados del modelo son congruentes con las tendencias mostradas en las secciones anteriores donde, en general, se observó que el grupo carbonilo es el que se ve más afectado por la oxidación a la intemperie, en comparación con el envejecimiento en el horno UV. Por otro lado, los grupos de dobles enlaces y sulfóxidos sufrieron cambios similares bajo ambos tipos de acondicionamiento, lo que es evidente luego del análisis estadístico mostrado.

## CONCLUSIONES

El uso de un 3% de orujo tiene el efecto significativo de retardar la aparición de enlaces dobles y de sulfóxidos durante las primeras semanas de exposición a la intemperie, las cuales se consideran las más agresivas en términos de formación de especies oxidadas. Por lo tanto, el uso de este material resultaría beneficioso, y se recomienda que se pruebe en porcentajes mayores al 3%, verificando que se mantengan las propiedades reológicas que permitan al asfalto tener un buen desempeño en campo.

En cuanto al envejecimiento en el horno UV, se encontró que este es limitado en cuanto a la simulación adecuada de la oxidación que sufre el asfalto a la intemperie, sobre todo de la semana 8 a la semana 12, donde se observó que ocurren los mayores cambios. Por lo tanto, se recomienda revisar las características del horno, así como factores que puedan influenciar en la oxidación: la temperatura, tiempo de exposición, distancia entre las muestras y la fuente UV, potencia de la fuente UV y longitudes de onda de esta, entre otros. Esto con el objetivo de variar estas condiciones hasta conseguir una mejor aproximación al fenómeno natural.

## BIBLIOGRAFÍA

- Agustin, S., Medina, L. A., Soto, H., Manzanares, E., y Gámez, N. (2014). Influence of the solvent system on the composition of phenolic substances and antioxidant capacity of extracts of grape (*Vitis vinifera* L.) marc. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 20(2), 208-213. DOI: 10.1111/ajgw.12063
- Apeageyi, A. (2011). Laboratory evaluation of antioxidants for asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 25(1), 47-53. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.058
- Calabi Floody, A. T. (2012). *Control del envejecimiento del asfalto a través de la adición de polvo deshidratado de orujo, bioproducto de la industria enológica* [Tesis doctoral, Universidad Católica de Chile]. Recuperado de: <https://repositorio.uc.cl/handle/11534/2925>
- Cheng, X., Han, S., Liu, Y., y Xu, O. (2019). Laboratory investigation on low-temperature performance of asphalt at different aging stages. *Construction and Building Materials*, 229, 1-8. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116850
- Faisal, H., Ahmad, M., y Tarefder, R. (2018). *Effects of Pores and Oxidative Aging on the Nanomechanical Behavior of Asphalt Concrete*. En *International Conference on Transportation and Development 2018*. Pittsburgh, Pennsylvania.
- Haxo, H. E., y White, R. M. (1979). Reducing the Hardening of Paving Asphalts Through the Use of Lead Antioxidants. *Association of Asphalt Paving Technologist Proceedings*, 48, 611-645.
- Martínez, G., y Caicedo, B. (2005). *Efecto de la radiación ultravioleta en el envejecimiento de ligantes y mezclas asfálticas*. [Tesis de Maestría, Universidad de Los Andes].
- Parada, M. L., Lepesqueur, A. J., y Caicedo, B. (2005). *Estudio del envejecimiento de mezclas asfálticas por oxidación*. [Tesis, Universidad de Los Andes].
- Petersen, J. (2009). A Review of the Fundamentals of Asphalt Oxidation. *Transportation Research Circular, E-C140*.

- Petersen, C., y Glaser, R. (2011). Asphalt Oxidation Mechanisms and the role of Oxidation Products on Age Hardening Revisited. *Road Materials and Pavement Design*, 12(4), 795-819. DOI: 10.1080/14680629.2011.9713895
- Qin, Q., Schabron, J., Boysen, R., y Farrar, M. (2013). Field aging effect on chemistry and rheology of asphalt binders and rheological predictions for field aging. *Fuel*, 121, 86-94. DOI: 10.1016/j.fuel.2013.12.040
- Rojas, G. (2020). *Implementación de protocolo de análisis en laboratorio de materiales antioxidantes para el asfalto*. [Tesis de grado, Universidad de Costa Rica].
- Rojas, J., Amado, H., Fernández, W., y Reyes, F. (2012). Efectos de la radiación ultravioleta en asfaltos colombianos. *Ciencia e Ingeniería*, 15(1), 96-104. DOI: 10.14483/23448350.3947
- Sánchez, M. (2017). *Implementación de Metodología de Envejecimiento de Asfaltos Mediante Radiación UV*. [Tesis de grado, Universidad de Costa Rica]. Recuperado de: <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/handle/123456789/10368>
- Santucci, L. E., Goodrich, J. E., y Sundberg, J. E. (1981). The Effect of Crude Source and Additives on the Long-Term Oven Aging of Paving Asphalts. *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings*, 50, 560-571.
- Tang, N., y Dong, R. (2020). Anti-Aging potential of sulphur in terminal blend rubberized asphalt binder. *Construction and Building Materials*, 250, 1-10. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118858
- Thermo Scientific (2012). OMNIC 9 [Software]. Recuperado de: <https://www.thermofisher.com>
- Vargas, X., y Reyes, F. (2010). El fenómeno de envejecimiento de los asfaltos. *Ingeniería e Investigación*, 30(3), 27-44.
- Villegas-Villegas, R. E., Baldi-Sevilla, A., Aguiar-Moya, J. P., y Loria-Salazar, L. (2018). Analysis of asphalt oxidation by means of accelerated testing and environmental conditions. *Transportation Research Record*, 2672(28), 244-255. DOI: 10.1177/0361198118777630
- Zeng, W., Wu, S., Pang, L., Chen, H., Hu, J., Sun, Y., y Chen, Z. (2018). Research on Ultraviolet (UV) aging depth of asphalts. *Construction and Building Materials*, 160, 620-627. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.047
- Zúñiga, M. (2005). *Caracterización de fibra dietaria en orujo y capacidad antioxidante en vino, hollejo y semilla de uva*. [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Recuperado de: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/101763>

# Uso del caucho granulado en mezclas asfálticas: Una revisión literaria

*Use of granulated rubber in asphalt mixtures: A literary review*

## **Luz Magali Hoyos Díaz**

Escuela Profesional de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería Arquitectura y Urbanismo  
Universidad Señor de Sipan  
Perú  
[hdiazluzm@crece.uss.edu.pe](mailto:hdiazluzm@crece.uss.edu.pe)

## **Sócrates Pedro Muñoz Pérez**

Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil,  
Facultad de Ingeniería Arquitectura y Urbanismo  
Universidad Señor de Sipan  
Perú  
[msocrates@crece.uss.edu.pe](mailto:msocrates@crece.uss.edu.pe)

## **Katyuska del Carmen Puicon Herrera**

Escuela Profesional de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería Arquitectura y Urbanismo  
Universidad Señor de Sipan  
Perú  
[hepuiconka@crece.uss.edu.pe](mailto:hepuiconka@crece.uss.edu.pe)

**Fecha de recepción:** 29 de octubre de 2020 / **Fecha de aprobación:** 16 de febrero de 2021

## RESUMEN

Cada año se producen millones de toneladas de neumáticos desechados, lo cual presenta un grave problema ambiental. Debido a esto, en la actualidad se está usando el caucho granulado (CR) en el diseño de mezclas asfálticas, ya que proporcionan propiedades fundamentales en ello, como la durabilidad y la resistencia. En la presente recopilación literaria se analizaron diferentes artículos con el objetivo de descifrar los procesos y métodos que se emplean con el uso del CR, identificar los porcentajes óptimos y la mejora que éste proporciona en las mezclas asfálticas. Se halló que los porcentajes óptimos de CR en las mezclas asfálticas varían en un rango de 1%-20% en peso de la mezcla total. Asimismo, utilizar el CR aporta diferentes beneficios a la mezcla tales como: resistencia a la tracción indirecta, a la susceptibilidad, a la humedad, a la formación de surcos, a la permeabilidad y al envejecimiento; aumenta la vida útil de las mezclas a la fatiga y disminuye el ruido. Se revisaron 50 artículos indexados en la base de datos Scopus entre los años 2006 y 2020 sobre el uso de CR en mezclas asfálticas, daño por humedad, resistencia a la formación de surcos, resistencia a la fatiga y resistencia a baja temperatura.

**Palabras clave:** Caucho granulado, daño por humedad, proceso seco, proceso húmedo

## ABSTRACT

Millions of tons of discarded tires are produced each year, presenting a serious environmental problem. Due to this, granulated rubber (CR) is currently being used in the design of asphalt mixtures, since they provide fundamental properties in it, such as durability and resistance. In this research, different articles were analyzed with the aim of deciphering the processes and methods used with the use of CR, identifying the optimal percentages and the improvement it provides in asphalt mixtures. It was found that the optimum percentages of CR in the asphalt mixtures vary in a range of 1% -20% by weight of the total mixture. Likewise, using CR provides different benefits to the mixture such as: resistance to indirect traction, susceptibility, humidity, grooving, permeability, and aging; increases the useful life of the mixtures to fatigue; and reduces noise. Fifty articles indexed in the Scopus database between 2006 and 2020 were reviewed on the use of CR in asphalt mixtures, moisture damage, resistance to furrow formation, resistance to fatigue and resistance to low temperature.

**Keywords:** Granulated rubber, moisture damage, dry process, wet process

## INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, la gran mayoría de los neumáticos de desecho se depositan en vertederos, con consecuencias ecológicas catastróficas y, en particular, serias amenazas para la salud humana (por ejemplo, incendios, plagas y contaminación del suelo) (Rodríguez, Tarpoudi, Cavalli, Poulidakos y Bueno, 2020), debido a la creciente conciencia ambiental, y el afán por recuperar el caucho granulado (CR) y transformarlo en un material eficiente, por eso su uso ha ido aumentando en la producción de asfalto ya que varios investigadores han argumentado que el asfalto modificado con CR se comporta más eficazmente que el concreto asfáltico convencional (Wang y Zeng, 2006).

Según las experiencias obtenidas con el uso de CR en varios países mostraron el excelente comportamiento estructural y funcional de este tipo de material (Dantas, Farias, Pais y Pereira, 2006). La motivación más importante detrás de esta aplicación del CR fue la mejora del rendimiento del pavimento, incluida una mayor vida útil a través de la resistencia al agrietamiento y la formación de surcos, disminución del ruido del tráfico, reducción de los costos de mantenimiento y aumento de la seguridad del tráfico mediante la resistencia al deslizamiento y la reducción del rocío que daña la visión durante las inclemencias (Shen, Amirkhanian, Lee y Putman, 2006).

Existe una demanda considerable de uso de neumáticos de desecho en aplicaciones de ingeniería civil, que van a mitigar daños al medio ambiente, por eso no solo es una forma innovadora de reciclar neumáticos usados, sino también uno de los métodos más efectivos para extender la vida útil del pavimento. En consecuencia, los pavimentos construidos con mezclas de caucho asfáltico (AR) tienen muchos beneficios, como una durabilidad mejorada y una resistencia mejorada a la fatiga iniciada en la superficie y al agrietamiento por reflexión, resistencia mejorada al envejecimiento y a la oxidación debido a un mayor contenido de aglomerante (Bressette, Zhou, Stonex y Hicks, 2008).

La incorporación de CR de llantas de desecho en mezclas de pavimento asfáltico está diseñada para mejorar las propiedades del asfalto mediante la reducción de la susceptibilidad inherente a la temperatura del aglomerante (Kim, Lee y Amirkhanian, 2010), estas al ser modificadas con CR con más del 20% de migajas tiene mayor viscosidad, mejor flexibilidad, propiedades antifatiga y anti envejecimiento mejoradas (Dong y Tan, 2011). Asimismo, el CR se incorpora a las mezclas

asfálticas como una de las estrategias exitosas para mejorar la resistencia a la fatiga del pavimento asfáltico (Saeed, Aman, Ahmad, Yero y Chinade, 2018).

Se ha demostrado que la utilización de CR para producir AR para pavimentos de mezclas asfálticas es una forma económica y ambiental para la eliminación de llantas de desecho (Gong, *et al.*, 2019). Por lo tanto, estos residuos pueden reducirse transformándolos en un material adecuado para añadir a las mezclas de pavimentos de carreteras este material adicional hecho de neumáticos usados se llama CR (Kartika, Hadiwardoyo y Sumabrata, 2019). En consecuencia, el modificador de CR es uno de los modificadores del asfalto más populares debido a los beneficios económicos y las propiedades físicas y reológicas deseadas de los ligantes de asfalto y mezclas asfálticas (Khalili, Jadidi, Karakouzian y Amirkhanian, 2019).

## DESARROLLO Y DISCUSIÓN

### *Porcentaje óptimo de caucho granulado en mezclas asfálticas*

Cao (2007) realizó pruebas de laboratorio con tres tipos de mezclas asfálticas con adición de CR en diferentes contenidos de (1%, 2% y 3% en peso de la mezcla total) y una mezcla convencional sin caucho, denominada mezcla-control, las muestras fueron comprimidas por 75 golpes por cara con el martillo Marshall estándar. A partir de los ensayos de Marshall y tracción indirecta realizados por el autor, determinó que el contenido óptimo de CR en la mezcla asfáltica de 3% tiene el mejor rendimiento tanto a alta temperatura (60°C), como a baja temperatura (10°C).

Hamzani y colaboradores elaboraron una investigación para determinar la resistencia a la compresión de pavimentos semiflexibles mediante el uso de CR como sustituto de asfalto. El asfalto fue reemplazado por 3%, 4% y 5% de CR y se realizó la prueba Marshall. La prueba de resistencia a la compresión se realizó con base en ASTM D1074-02 a la edad de 14 días. Los resultados de la prueba mostraron que la mayor resistencia a la compresión se alcanza con el 5% CR, que es de 15,43 MPa (Hamzani, Munirwansyah, Hasan y Sugiarto, 2019). Si bien es cierto la norma ASTM D1074-02 no menciona el tiempo en el que se debe de ejecutar el ensayo los autores Hamzani, Munirwansyah, Hasan y Sugiarto, tomaron el criterio de realizar la prueba a los 14 días.

Ahmad y colaboradores realizaron un estudio con residuos de CR y baquelita para estudiar las propiedades mecánicas mediante una proporción de adición de 4,0%, 8,0%, 12,0%, 16,0% y 20,0%. Se diseñaron y probaron las mezclas Marshall para determinar la densidad, estabilidad Marshall, flujo, vacíos de aire y propiedades de rigidez para las muestras de control, CR baquelita. Concluyendo que la adición de CR y baquelita en un 12% mejora significativamente las propiedades de la mezcla de asfalto casi duplica la resistencia de estabilidad Marshall en comparación con la muestra de control (Ahmad, Beddu, Hussain, Manan y Itam, 2019).

Munir y colaboradores evaluaron las propiedades de los ligantes asfálticos modificados con CR reaccionado y activado en comparación con los ligantes asfálticos tradicionales que se utilizan en los EAU. Se diseñaron dos aglutinantes al 20% y al 30% con CR en peso de asfalto. El trabajo de prueba de laboratorio concluyó que las simulaciones de desempeño del pavimento mostraron que el aglomerante modificado con el 20% de CR es el más prometedor para producir el pavimento de mejor desempeño con la menor cantidad de grietas por fatiga y surcos, también ofrece una solución rentable al extender la vida útil del pavimento en un promedio de 8 años con actividades mínimas de mantenimiento y rehabilitación (Munir, Elnour, Huda y Zeiada, 2020).

### **Procesos principales para producir mezclas asfálticas modificadas con caucho granulado**

De acuerdo con la revisión bibliográfica, existen dos procesos más empleados para la producción del asfalto con la adición de CR, denominados: proceso húmedo, en el cual el CR modifica al asfalto y el proceso seco el CR es añadido como un porcentaje del agregado fino.

#### **Proceso caliente o húmedo**

El proceso húmedo original, inventado por Charles McDonald, conduce a un producto con una serie de beneficios que son básicamente todo relacionado con el aumento de elasticidad y viscosidad del asfalto a altas temperaturas que permite un mayor espesor de película en pavimento de mezclas sin drenaje excesivo o sangrado (Lo Presti, 2013).

Ma y colaboradores realizaron un estudio para evaluar los efectos de los aditivos de asfalto (denominados Sas y Evm) en la mezcla tibia, sobre la temperatura de compactación y las propiedades del asfalto y mezcla de asfalto modificado con CR, mediante el proceso húmedo, en el que se añadió un porcentaje de 25% de CR en peso del asfalto base, se tuvo como

resultado que los aditivos podrían reducir la temperatura de compactación de mezclas de asfalto con CR en 10°C a 20°C. Sin embargo, tienen diferentes influencias sobre las propiedades reológicas del asfalto con CR y rendimiento de la mezcla con CR (Ma, Wang, Zhao, Huang y Wang, 2016).

En su investigación, Al-Salih (2020) tuvo como objeto resolver dos problemas principales: la eliminación segura de los neumáticos desechados y estudiar el comportamiento de formación de surcos en mezclas asfálticas modificadas con CR, mediante el proceso húmedo, en el que se añadió un 6% del peso del asfalto, obtuvo como resultados que las mezclas preparadas con asfalto modificada con CR muestran buena resistencia a la formación de surcos y el beneficio de este estudio es que los desechos de llantas se eliminan de una forma ecológica (Al-Salih, 2020).

#### **Proceso seco**

En su investigación, Hernández y colaboradores determinaron el porcentaje óptimo de adición de CR en la mezcla, mediante el proceso seco, en la cual el CR se obtuvo mediante el método de trituración, el tamaño de CR es de 0,45mm que corresponde a un tamaño máximo nominal de 0,5 mm, a un tamaño de tamiz máximo de 1 mm, teniendo como resultado que el porcentaje óptimo de caucho en la mezcla por proceso seco (1% en peso de agregados - 20% en peso de betún), esto se obtuvo mediante un procedimiento de prueba secuencial en laboratorio, incluyendo: Marshall, sensibilidad a la humedad, tiempo de curado o envejecimiento (Hernández, Witoszek Schultz, Fernández y Moro, 2009).

Por otro lado, Tahami y colaboradores evaluaron el uso de altos contenidos de CR como relleno en mezclas asfálticas para proporcionar un mayor desarrollo mediante el proceso seco considerando el efecto del proceso de curado, el relleno convencional de mezclas se reemplazó con 20%, 40% y 60% de CR por peso de relleno y se evaluaron las propiedades mecánicas de las mezclas modificadas, incluyendo susceptibilidad a la humedad, módulo de rigidez, comportamiento de formación de surcos y vida a fatiga. Los resultados indicaron que la aplicación simultánea de un proceso de curado y CR muy fino en la mezcla asfáltica, mejoró considerablemente la resistencia de las mezclas asfálticas frente a fallas (Tahami, Mirhosseini, Dessouky, Mork y Kavussi, 2019).

Mohamed y colaboradores en su investigación evaluaron las propiedades mecánicas de las mezclas de CR en el asfalto denso graduado fabricadas usando el proceso seco, tuvieron como resultado que las propiedades mecánicas de todas las

mezclas evaluadas mediante un conjunto de pruebas como la de estabilidad y flujo Marshall, prueba de susceptibilidad a la humedad, ensayo de resistencia a la tracción indirecta, módulo dinámico y número de flujo, mostraron que el uso de CR en el asfalto con 0,75% del peso del agregado aumentó la estabilidad, el flujo y ha mejorado su resistencia al agrietamiento y deformación permanente (Mohamed, Hassan y Hamdy, 2019).

Hassan y colaboradores realizaron un estudio de laboratorio con el fin de evaluar las propiedades de la mezcla asfáltica modificada con CR utilizando el proceso seco, tuvieron como resultado que el CR mejoró la mayoría de las propiedades de las mezclas asfálticas en comparación con otros tipos de mezclas; esto podría deberse a la interacción parcial entre las partículas de caucho y el betún que actúan simultáneamente como un agregado elástico en la mezcla (Hassan *et al.*, 2019).

### **Uso del caucho granulado para la mejora de la resistencia y durabilidad de la mezcla asfáltica**

Según los estudios de laboratorio realizados sobre mezclas de asfalto de matriz de piedra (SMA) con fibras naturales y asfalto modificado con CR, se obtuvo que la resistencia a la tracción indirecta, la estabilidad retenida, la resistencia a la susceptibilidad a la humedad, la resistencia a la formación de surcos, la resistencia a la fluencia y la resistencia a la permeabilidad y al envejecimiento mejoran con las mezclas de SMA con CR en comparación con las mezclas de SMA con fibras como estabilizadores (Sharma y Goyal, 2006).

En una investigación realizada por Gallego y colaboradores indicaron que la adición del CR a una mezcla de asfalto graduada mejora la vida útil de las mezclas a la fatiga, la sensibilidad térmica de la mezcla disminuye a medida que aumenta el contenido de CR, mediante el proceso húmedo (Gallego, Castro, Prieto y Vassallo, 2007).

Un estudio realizado por Yang y colaboradores evaluó el desempeño ambiental y mecánico del asfalto de mezcla caliente modificado CR y con Evotherm de tercera generación. Se evaluó el desempeño ambiental que incluyó el ahorro de asfalto modificado con CR, el ahorro de combustible y la reducción de emisiones peligrosas. Por su parte, el desempeño mecánico evaluado incluyó resistencia a la tracción y susceptibilidad a la humedad, resistencia a la formación de surcos, desempeño anti-decapado, desempeño a la fatiga y desempeño a baja temperatura (Yang, *et al.*, 2017).

El estudio de Yang y otros encontró que el ahorro de asfalto con CR fue de 5,8% en comparación con el asfalto sin modificar, el ahorro de combustible fue de alrededor del 13% y también se observó una reducción visible de las emisiones peligrosas; asimismo los resultados de rendimiento mecánico mostraron que el asfalto con CR y Evotherm tenía una mejor resistencia a la formación de surcos, un rendimiento a baja temperatura y un mejor rendimiento a la fatiga y resistencia al daño por humedad en comparación con el asfalto sin CR (Yang, *et al.*, 2017).

El estado de la superficie de la carretera es un factor crítico que determina la seguridad vial, la cual debe tener suficiente resistencia al deslizamiento, para ello se desarrolló un estudio en el cual se analizó la resistencia al deslizamiento y el efecto de agregar CR a la mezcla asfáltica, esto se llevó a cabo mediante el proceso seco, se agregó CR a la mezcla asfáltica en proporciones de 0,5%, 1%, 1,5% y 2%, teniendo como resultado que la adición de 1% CR ha mostrado los mejores resultados y proporciona una mejor resistencia al deslizamiento (Ariyapijati, Hadiwardoyo, y Sumabrata, 2019).

Así mismo, Franesqui y colaboradores realizaron una investigación con el objetivo principal de reutilizar el CR, con el fin de reducir el impacto ambiental y alargar la durabilidad de los pavimentos. Mediante estudios experimentales demostraron que estas mezclas con CR mejoran significativamente la resistencia a la formación de surcos, la resistencia al daño por humedad y la estabilidad, cumpliendo así con las especificaciones estándar para pavimentos y ofreciendo suficiente módulo de rigidez dinámica (Franesqui, Yepes y García, 2019).

Liang y colaboradores investigaron un nuevo tipo de mezcla con CR de alta graduación que contiene un 5% y un 10% del modificador de CR, el asfalto modificado y no modificado con CR, los cuales se compararon con el mismo grado de rendimiento del asfalto para cumplir con el requisito climático específico, teniendo como resultados de las pruebas de laboratorio donde indicaron que la mezcla con CR de grado denso tenía una vida útil prolongada a la fatiga, mayor resistencia a la fractura y mejor resistencia al agrietamiento térmico que la mezcla sin modificar (Liang, Harvey, Wu, Jiao y Jones, 2020).

Abdulrahman y colaboradores afirman que el asfalto modificado con CR mejora la resistencia a la fatiga, la temperatura y estabilidad frente a la humedad del pavimento flexible, aumentando así su resistencia al surco, también reduce el agrietamiento asociado a baja temperatura del aglomerante mediante la absorción de tensiones. Además, el CR proporciona

una mejor cohesión y adherencia del betún con el agregado y mejora la recuperación elástica del ligante asfáltico. En conclusión, la superficie de la carretera se vuelve más duradera (Abdulrahman, Hainin, Idham, Hassan y Al, 2020).

Khaled y colaboradores realizaron un estudio con el objetivo de determinar el efecto de la mezcla con CR sobre el rendimiento y las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente, los resultados de la investigación mostraron que la adición de CR al aglutinante de asfalto en la mezcla fue útil para aumentar la resistencia al daño por humedad, mejorando el módulo resiliente y mejora el potencial para resistir la deformación permanente que se va a presentar con cualquier nivel de carga vehicular, se acelera su manifestación con el aumento de la carga de tráfico (Khaled, Aboud y Al-Hamd, 2020).

### **Tamaño óptimo del caucho granulado utilizado en las mezclas asfálticas**

Cao y Bai (2008) mencionan en su investigación, que el tamaño óptimo del CR es del tamaño de malla #20 asegurando que puede dar un mejor asfalto modificado con CR a diferencia del CR de malla #40 y #60. Por otro lado, Yu y colaboradores mencionan que para garantizar la coherencia del asfalto modificado con CR, el tamaño óptimo es la malla #40 (0,425 mm) (Yu, Leng y Wei, 2014), asimismo Pouranian y colaboradores afirman que el tamaño óptimo de CR es de la malla #40 (Pouranian, Notani, Tabesh, Nazeri y Shishehbor, 2019).

En su investigación realizada, Yildirim y Karacasu (2019) mencionan que el tamaño de las partículas de CR utilizado fue de malla #30 (0,600 mm) con el propósito de lograr su objetivo de investigar el efecto de la dosis de CR sobre las propiedades del aglutinante de asfalto.

Candra y Siswanto (2019) investigaron el efecto de agregar CR en diferentes porcentajes (0%, 0,5%, 1%, 1,5%, 3%, 4,5% y 6 % del peso agregado) a la mezcla, con tamaños de mallas #50 y #100. Demostraron que la mejor adición de CR es del tamaño de partículas de la malla #100, con un porcentaje de 1% proporciona un mejor rendimiento que el #50, según los valores mostrados en la prueba de estabilidad de Marshall.

El CR empleado en el pavimento asfáltico generalmente tiene una cierta finura obtenida triturando neumáticos de desecho de automóviles, es por esa razón que, para la elaboración de su investigación, se selecciona polvo de CR con un tamaño de malla de #60 como materia prima para la preparación de asfalto modificado compuesto (Li, 2019).

### **Métodos utilizados en las mezclas asfálticas con caucho granulado**

Se utiliza el método Marshall para seleccionar un contenido óptimo de asfalto para una mejor estabilidad (Aisien, Hymore y Ebewe, 2006), asimismo se aplica para evaluar las características de rendimiento de las mezclas en caliente (HMA). El método se lleva a cabo en un total de tres etapas que incluyen preparación, compresión y ruptura de las muestras, permitiendo determinar los valores de vacíos en la mezcla (Yildirim y Karacasu, 2019). Por otro lado, Yu y colaboradores mencionan que la estabilidad de Marshall es un indicador del rendimiento de la mezcla a alta temperatura (Yu *et al.*, 2019).

El método de resistencia a la tracción indirecta (IDT) modificado, es un método para medir la resistencia a la tracción que también permite determinar la energía hasta la falla y la energía total de fractura, se aplicó usando tres réplicas por mezcla, tanto a mezclas convencionales como mezclas con CR (Zborowski y Kaloush, 2007).

El método de prueba de surco se lleva a cabo mediante un movimiento relativo alternativo con ruedas de carro, lo que hace que la muestra de prueba produzca densificación, cizallamiento y desplazamiento bajo el efecto de repetición de las ruedas, puede simular la verdad física de la rueda del carro que corre bien en el pavimento y la operación es simple con resultados de prueba visuales (Yang, 2014).

La metodología de evaluación del ciclo de vida se utiliza para evaluar y comparar el desempeño ambiental relacionado con tres cursos de desgaste del pavimento de carreteras: mezclas de grado abierto, de grado de separación y de grado denso (Cao, Leng, Yu y Hsu, 2019).

El método de viscosidad de flujo de corte estable se emplea para que las viscosidades de muchos aglutinantes asfálticos modificados alcancen un estado estacionario a un esfuerzo cortante alto, alrededor de 500 Pa (Wen y Wang, 2019).

El método básico para evaluar el envejecimiento prolongado en horno se realiza tomando ejemplos de pavimento flexible en campo que presenta buen desempeño, aproximadamente después de 5 años de servicio que ha experimentado envejecimiento prolongado (Negoro, Setyawan y Pramesti, 2020).

En su estudio, Rodríguez y colaboradores utilizaron un asfalto B 50/70 (50/70 10mm de penetración), que se utiliza ampliamente para producir mezclas asfálticas a temperaturas normales (Rodríguez, Gallego, Pérez, Bonati y Giuliani, 2014). Se añadió un veinte por ciento en peso de caucho al B 50/70 para obtener el asfalto modificado con CR, el cual dio como resultado que las mezclas asfálticas preparadas con 20% de aglutinantes con CR se utilizan a menudo cuando se requiere resistencia al agrietamiento. Asimismo, Lopes y colaboradores realizaron su investigación con un asfalto AC 50/70 con caucho reaccionado y activado, obteniendo como resultado un aumento en grado de rendimiento positivo, en punto de reblandecimiento, viscosidad rotacional y densidad, y redujo la penetración (Lopes, Muniz y Rodrigues, 2020).

Bilema y colaboradores utilizaron un asfalto de grado de penetración 80/100, con CR de malla #20 (0.15mm) en diferentes porcentajes, obtuvieron como resultado de la prueba de penetración que a medida que aumentaban los porcentajes de CR, el asfalto tenía más dureza y rigidez debido a valores de penetración más bajos (Bilema, Aman y Ahmad, 2018).

Wang y otros realizaron una investigación con asfalto base de grado de penetración 70/100 comúnmente utilizado en los Países Bajos, con CR de tamaños de partículas que varían de 0 a 0,5 mm, teniendo como resultado que la interacción asfalto-caucho depende en gran medida de la temperatura de mezcla y del tiempo de mezclado (Wang *et al.*, 2018). Asimismo, Wang y colaboradores utilizaron un asfalto de penetración 70/100 como asfalto base para la modificación (Wang, Liu, Erkens y Skarpas, 2020), teniendo como resultado que con un mayor contenido de caucho tiene un espectro de relajación más amplio, lo que significa una transición más gradual del comportamiento elástico al comportamiento viscoso, teniendo en cuenta que una transición elástica-viscosa gradual es beneficiosa para la estabilidad del sistema cuando se encuentran cambios de temperatura.

Bakheit y Xiaoming (2019) utilizaron en su estudio un asfalto de grado de penetración 60/70, con diferentes adiciones de CR, mediante el proceso seco, obteniendo como resultado que la utilización del método seco, podría ser alentador para aumentar la vida útil del pavimento debido a las condiciones de alto tráfico. Por otro lado, Pirmohammad y Khanpour (2020) utilizaron en su investigación un asfalto grado de penetración de 60/70, que se emplea ampliamente en los sistemas de carreteras de Irán, adicionando el 15% de CR. Afirmaron que el CR mejoró significativamente la resistencia a la fractura del asfalto debido a que el aglutinante de base se volvió dúctil y aumentó la adherencia entre el aglutinante y los agregados.

La revisión literaria realizada sugiere que, al adicionar CR al asfalto, al agregado y a la mezcla, hay una mejora en las propiedades de la mezcla en cuanto a la resistencia a la tracción indirecta, la estabilidad retenida, la resistencia a la susceptibilidad a la humedad, la resistencia a la formación de surcos, la resistencia a la fluencia y la resistencia a la permeabilidad y al envejecimiento, aumenta la vida útil de las mezclas a la fatiga y disminuye el ruido.

En cuanto al porcentaje óptimo de CR en las mezclas asfálticas varían de acuerdo con la forma como se añade el CR a las mezclas asfálticas, cuando es agregado al asfalto es recomendado reemplazar un 20% del peso del asfalto, cuando se agrega al agregado usar 1% a 3% del peso total del agregado y cuando se agrega a la mezcla usar 1% del total de la mezcla, asegurando una resistencia y vida útil duradera.

Según los estudios analizados, es posible afirmar que existen dos procesos para incluir el CR en las mezclas asfálticas, el proceso húmedo y el seco.

El proceso húmedo, el CR se agrega al asfalto, donde el porcentaje más utilizado se encuentra entre un 14% y el 20% del peso total de la mezcla asfalto-caucho y tamaño recomendado es tamiz #60. En el proceso húmedo se debe tener en cuenta varios factores concluyentes en el resultado esperado de esta mezcla asfalto-caucho, dichos factores son: el tamaño, la textura y la proporción del RC, el tipo del cemento asfáltico, el tiempo y la temperatura de mezclado y el uso de otros aditivos. El proceso húmedo mejora la propiedad mecánica de resistencia a la formación de surcos.

El proceso seco se genera cuando existe una mezcla directa entre el CR con el agregado antes de agregar el ligante al mezclador de tal manera que el CR es usado como agregado en la mezcla asfáltica, los cuales pueden sumarse como parte del agregado fino y este representa entre el 1% a 3% del peso de los agregados. En este proceso para su aplicación no se necesita ningún equipo especial para poder realizar la mezcla ya que el CR entra a mezclarse con los agregados de manera directa. El proceso seco mejora las propiedades mecánicas de resistencia al agrietamiento, deformación permanente y mejora la adherencia entre el aglutinante y los agregados.

Es importante recordar que los resultados obtenidos y los beneficios que se hallaron tras el uso del CR, están ligados al objetivo de cada estudio analizado.

## REFERENCIAS

- Abdulrahman, S., Hainin, M., Idham, M., Hassan, N., y Al, Z. (2020). Review on the potentials of natural rubber in bitumen modification. *Earth and Environmental Science*, 476(012067), 1-12. doi:10.1088/1755-1315/476/1/012067
- Ahmad, M., Beddu, S., Hussain, S., Manan, A., y Itam, Z. (2019). Mechanical properties of hot-mix asphalt using waste crumber rubber and phenol formaldehyde polymer. *Materials Science*, 6(6), 1164–1175. doi:10.3934/matersci.2019.6.1164
- Aisien, F., Hymore, F., y Ebewele, R. (2006). Application of ground scrap tyre rubbers in asphalt concrete pavements. *Indian Journal of Engineering y Materials Sciences*, 13(4), 333-338.
- Al-Salih, A.-S. W. (2020). Using Crumb Rubber to Improve the Bituminous Mixes: Experimental Investigation of Rutting Behavior of Flexible Asphalt Mix for Road Construction. *International Conference on Rheology and Modeling of Materials*, 1527(1), 1-9. doi:10.1088 / 1742-6596 / 1527/1/012015
- Ariyapijati, R., Hadiwardoyo, S., y Sumabrata, R. (2019). Skid resistance of gap graded hot-mix asphalt with added crumb rubber. *Journal of Physics: Conference Series*, 1376(012010), 1-7. doi:10.1088/1742-6596/1376/1/012010
- Bakheit, I., y Xiaoming, H. (2019). Modification of the dry method for mixing crumb rubber modifier with aggregate and asphalt based on the binder mix design. *Construction and Building Materials*, 220(6), 278–284. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.06.050
- Bilema, M., Aman, M., y Ahmad, K. (2018). Investigating the Rheological and Physical Properties for Unaged of Crumb Rubber-Modified Binders Containing Warm Mix Asphalt Additive. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 9(1), 1389-1400. doi:10.1007/978-981-10-8016-6\_100
- Bressette, T., Zhou, H., Stonex, A., y Hicks, G. (2008). Asphalt Rubber and Its Potential Use in China. Lui, R., Yang, D y Lu, J. (Editores). En *Plan, Build, and Manage Transportation Infrastructure in China*, 776-785. doi:10.1061/40952(317)75
- Candra, P., y Siswanto, H. (2019). Marshall Characteristics of Asphalt Concrete Wearing Course Using Crumb Rubber Modified of Motorcycle Tire Waste As Additive. *Materials Science Forum*, 961, 57-61. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.961.57
- Cao, W. (2007). Study on properties of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using dry process. *Construction and Building Materials*, 21(5), 1011–1015. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.02.004
- Cao, R., y Bai, Q. (2008). Laboratory Evaluation of Performances of Asphalt Ruber and Gap Graded Mixtures. *Plan, Build, And Manage Transportation Infrastructure In China*, 317, 786-798. doi:10.1061/40952(317)76
- Cao, R., Leng, Z., Yu, H., y Hsu, S. C. (2019). Comparative life cycle assessment of warm mix technologies in asphalt rubber pavements with uncertainty analysis. *Resources, Conservation & Recycling*, 147, 137–144. doi:10.1016/j.resconrec.2019.04.031
- Dantas, S., Farias, M., Pais, J., y Pereira, P. (2006). Dense Graded Hot Mixes using Asphalt-Rubber Binders with High Rubber Contents. *Road Materials and Pavement Design*, 7(1), 29-46. doi:10.1080/14680629.2006.9690025
- Dong, Y., y Tan, Y. (2011). Mix Design and Performance of Crumb Rubber Modified Asphalt SMA. *Geotechnical Special Publication*, 212, 78-86. doi:10.1061/47623(402)10
- Fransqui, M., Yepes, J., y García, C. (2019). Improvement of moisture damage resistance and permanent deformation performance of asphalt mixtures with marginal porous volcanic aggregates using crumb rubber modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 201, 328–339. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.12.181
- Gallego, J., Castro, M., Prieto, J., y Vassallo, J. (2007). Thermal Sensitivity and Fatigue Life of Gap-Graded Asphalt Mixes Incorporating Crumb Rubber from Tire Waste. *Journal of the Transportation Research Board*, 1998, 132-139. doi:10.3141/1998-16
- Gong, J., Liu, Y., Wang, Q., Xi, Z., Cai, J., Ding, G., y Xie, H. (2019). Performance evaluation of warm mix asphalt additive modified epoxy asphalt rubbers. *Construction and Building Materials*, 204, 288–295. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.01.197
- Hamzani, Munirwansyah, Hasan, y Sugiarto. (2019). The influence of the using waste tire rubber and natural ziolite as Asphalt and Cement replacements to compressive strength of Semi-Flexible Pavement. *Materials Science and Engineering*, 523(1), 1-7. doi:10.1088/1757-899X/523/1/012037

- Hassan, N., Almusawi, A., Mahmud, M., Abdullah, A., Mohd, N., Mashros, N., Putra, R., y Yusoff, N. (2019). Engineering properties of crumb rubber modified dense-graded asphalt mixtures using dry process. *Earth and Environmental Science*, 220(1), 1-11. doi:10.1088/1755-1315/220/1/012009
- Hernández Olivares, F., Witoszek Schultz, B., Fernández, M., y Moro, C. (2009). Rubber-modified hot-mix asphalt pavement by dry process. *International Journal of Pavement Engineering*, 10(4), 277-288. doi:10.1080/10298430802169416
- Kartika, L., Hadiwardoyo, S., y Sumabrata, R. (2019). Rutting Deformation of Gap-Graded Hot-Mix Asphalt with Added of Waste Tire Rubber. *Process and Design for Sustainable Urban Development*, 2114(4), 1-8. doi:10.1063/1.5112442
- Khaled, T., Aboud, G., y Al-Hamd, R. (2020). Study the effect of adding crumb rubber on the performance of hot mix asphalt. *Materials science and engineering*, 737(1), 1-12. doi:10.1088/1757-899X/737/1/012129
- Khalili, M., Jadidi, K., Karakouzian, M., y Amirkhanian, S. (2019). Rheological properties of modified crumb rubber asphalt binder and selecting the best modified binder using AHP method. *Case Studies in Construction Materials*, 11, 1-20. doi:10.1016/j.cscm.2019.e00276
- Kim, H. S., Lee, S. J., y Amirkhanian, S. (2010). Rheology Investigation of Crumb Rubber Modified Asphalt Binders. *Journal of Civil Engineering*, 14(6), 839-843. doi:10.1007/s12205-010-1020-9
- Li, Y. (2019). Study on SBS/rubber composite modified asphalt ultra-thin wear layer. *Materials Science and Engineering*, 612(2), 1-8. doi:10.1088/1757-899X/612/2/022067
- Liang, Y., Harvey, J., Wu, R., Jiao, L., y Jones, D. (2020). Fatigue and Fracture Properties of Asphalt Mixes Containing Low Content of Crumb-Rubber Modifier. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(10), 1-9. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003371
- Lo Presti, D. (2013). Recycled Tyre Rubber Modified Bitumens for road asphalt mixtures: A literature review. *Construction and Building Materials*, 49, 863–881. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.09.007
- Lopes, L., Muniz, M., y Rodrigues, L. (2020). Fatigue tests and damage analyses in modified binders and gap-graded asphalt mixtures with Reacted and Activated Rubber – RAR. *Road Materials and Pavement Design*, 21(1), 1-22. doi:10.1080/14680629.2019.1710553
- Ma, T., Wang, H., Zhao, Y., Huang, X., y Wang, S. (2016). Laboratory Investigation of Crumb Rubber Modified Asphalt Binder and Mixtures with Warm-Mix Additives. *International Journal of Civil Engineering*, 15(2), 1-10. doi:10.1007 / s40999-016-0040-3
- Mohamed, S., Hassan, M., y Hamdy, I. (2019). The Potential use of Crumb Rubber in Hot Asphalt Mixes in Egypt using Dry Process. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 9(1), 4356-4360. doi:10.35940 / ijeat.A1952 .109119
- Munir, M., Elnour, A., Huda, S., y Zeiada, W. (2020). Activated Crumb Rubber Modified Binder as a Sustainable Paving Material: Pavement Performance Consideration. *Advances in Science and Engineering Technology International Conferences*, 1-7. doi:10.1109/ASET48392.2020.9118219
- Negoro, M., Setyawan, A., y Pramesti, F. (2020). The Aging Properties Of Thin Surfacing Hot Mix Asphalt Containing Crumb Rubber As Aggregate Replacement. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 9(4), 880-884.
- Pirmohammad, S., y Khanpour, M. (2020). Fracture strength of warm mix asphalt concretes modified with crumb rubber subjected to variable temperatures. *Road Materials and Pavement Design*, 21(1), 1-20. doi:10.1080/14680629.2020.1724819
- Pouranian, M., Notani, M., Tabesh, M., Nazeri, B., y Shishehbor, M. (2019). Rheological and environmental characteristics of crumb rubber asphalt binders containing non-foaming warm mix asphalt additives. *Construction and Building Materials*, 238, 1-17. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117707
- Rodríguez, A., Gallego, J., Pérez, I., Bonati, A., y Giuliani, F. (2014). High and low temperature properties of crumb rubber modified binders containing warm mix asphalt additives. *Construction and Building Materials*, 53, 460–466. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.12.026

- Rodríguez, I., Tarpoudi, F., Cavalli, M., Poulidakos, L., y Bueno, M. (2020). Microstructure analysis and mechanical performance of crumb rubber. *Construction and Building Materials*, 259, 119662-119671. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.119662
- Saeed, M., Aman, M., Ahmad, K., Yero, T., y Chinade, A. (2018). Effect of Crumb Rubber Modifier on the Fatigue Performance of Warm Mix Asphalt. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 9, 1367-1376. doi:10.1007/978-981-10-8016-6\_98
- Sharma, V., y Goyal, S. (2006). Comparative study of performance of natural fibres and crumb rubber modified stone matrix asphalt mixtures. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33(2), 134-139. doi:10.1139/L05-096
- Shen, J., Amirkhanian, S., Lee, S., y Putman, B. (2006). Recycling of Laboratory-Prepared Reclaimed Asphalt Pavement Mixtures Containing Crumb Rubber-Modified Binders in Hot-Mix Asphalt. *Journal of the Transportation Research Board*, 1962, 71-78. doi:10.3141/1962-09
- Tahami, S., Mirhosseini, A., Dessouky, S., Mork, H., y Kavussi, A. (2019). The use of high content of fine crumb rubber in asphalt mixes using dry process. *Construction and Building Materials*, 222, 643-653. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.06.180
- Wang, J., y Zeng, X. (2006). Influence of Temperature and Pressure on the Dynamic Properties of Rubber-Modified Asphalt Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(1), 125-131. doi:10.1061/ASCE 0899-1561 2006 18: 1 125
- Wang, H., Liu, X., Zhang, H., Apostolidis, P., Scarpas, T., y Erkens, S. (2018). Asphalt-rubber interaction and performance evaluation of rubberised asphalt binders containing non-foaming warm-mix additives. *Road Materials and Pavement Design*, 21(6), 1-23. doi:10.1080/14680629.2018.1561380
- Wang, H., Liu, X., Erkens, S., y Scarpas, A. (2020). Experimental characterization of storage stability of crumb rubber modified bitumen with warm-mix additives. *Construction and Building Materials*, 249, 1-10. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.118840
- Wen, Y., y Wang, Y. (2019). High-Temperature Rheological Properties of Asphalt Binders with Polymeric, Warm-Mix, and Rubber Particulate Additives. *American Society of Civil Engineers*, 31(3), 1-16. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002589
- Yang, Y. (2014). Research on Ice-Broken Effect of Granulated Rubber Asphalt Mixture High-elastic Deck Pavement on Bridge. *Applied Mechanics and Materials*, 587, 971-975. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.587-589.971
- Yang, X., You, Z., Rosli, M., Diab, A., Shao, H., Chen, S., y Ge, D. (2017). Environmental and Mechanical Performance of Crumb Rubber Modified Warm Mix Asphalt using Evotherm. *Journal of Cleaner Production*, 159, 1-34. doi:10.1016/j.jclepro.2017.04.168
- Yildirim, Z., y Karacasu, M. (2019). Modelling of waste rubber and glass fiber with response surface method in hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 227, 117070-117083. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117070
- Yu, X., Leng, Z., y Wei, T. (2014). Investigation of the Rheological Modification Mechanism of Warm-mix Additives on Crumb Rubber Modified Asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(2), 1-40. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000808
- Yu, H., Zhu, Z., Leng, Z., Wu, C., Zhang, Z., y Wang, D. (2019). Effect of Mixing Sequence on Asphalt Mixtures Containing Waste Tire Rubber and Warm Mix Surfactants. *Journal of Cleaner Production*, 246, 1-39. doi:10.1016/j.jclepro.2019.119008
- Zborowski, A., y Kaloush, K. (2007). Predictive Equations to Evaluate Thermal Fracture of Asphalt Rubber Mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 8(4), 819-833. doi: 10.1080/14680629.2007.9690101

# Análisis de la variabilidad asociada a ensayos de fatiga en mezclas asfálticas

*Analysis of the variability associated with fatigue tests in asphalt mixes*

**Melissa Karina Mora Valverde**

Universidad de Costa Rica  
Costa Rica  
[melikmora@gmail.com](mailto:melikmora@gmail.com)

**Mónica Jiménez Acuña**

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales  
Universidad de Costa Rica  
Costa Rica  
[monica.jimenez@ucr.ac.cr](mailto:monica.jimenez@ucr.ac.cr)

**José Pablo Aguiar Moya**

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales  
Universidad de Costa Rica  
Costa Rica  
[jose.aguiar@ucr.ac.cr](mailto:jose.aguiar@ucr.ac.cr)

**Wendy Sequeira Rojas**

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales  
Universidad de Costa Rica  
Costa Rica  
[wendy.sequeira@ucr.ac.cr](mailto:wendy.sequeira@ucr.ac.cr)

**Fecha de recepción:** 30 de octubre de 2020 / **Fecha de aprobación:** 16 de febrero de 2021

## RESUMEN

El presente artículo sintetiza el análisis de la variabilidad asociada a ensayos de fatiga, realizado en tres tipos de mezclas asfálticas en caliente y producidas en plantas asfálticas de Costa Rica. Los ensayos estudiados fueron: overlay (Tex-248-F), prueba de curva semi-circular (SCB, ASTM D8044-16) y la prueba de viga sometida a flexión en 4 puntos (AASHTO T321-17).

El problema radica en que existe mucha variabilidad en los resultados de los ensayos mencionados, generando que el análisis de dichos resultados sea cuestionado. Se debe tener en cuenta que el análisis de fatiga en mezclas asfálticas para carreteras en Costa Rica está regulado por el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes de Costa Rica (CR-2010), del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), y este se basa en la metodología Superpave y el ensayo AASHTO T 321. Por lo tanto, el trabajo se desarrolló, con el fin de generar insumos, para evaluar distintos ensayos y su aplicabilidad en los procesos de diseño y construcción de carreteras de Costa Rica. Esto podría permitir en un futuro redefinir la legislación y regulaciones en este tema en Costa Rica. El estudio requirió, una recolección de información bibliográfica, una fase experimental, que incluía la caracterización de los materiales y especímenes, y las pruebas de fatiga. Con esto, se realizó el análisis de la variabilidad de los resultados; buscando encontrar factores de sensibilidad, tendencias en el comportamiento de las mezclas, así como ventajas y desventajas de los métodos.

Se verificó que la variabilidad depende de diferentes factores, en mayor medida de las propiedades de la mezcla. También, se identificó que el ensayo más variable fue el de la viga a flexo-tracción en cuatro puntos y que la prueba semi-circular requirió el menor tiempo y esfuerzo comparado con las demás pruebas.

**Palabras clave:** Análisis de variabilidad, ensayos, fatiga, MAC, pavimento flexible, overlay (OT), ensayo semi-circular (SCB), flexo-tracción en cuatro puntos (4PBB).

## ABSTRACT

*This research paper synthesizes the analysis of the variability associated with fatigue tests on three types of hot asphalt mixtures and produced in plants in Costa Rica. The tests studied were: overlay (Tex-248-F), semi-circular curve test (SCB, ASTM D8044-16) and the beam test subjected to 4 point bending (AASHTO T321-17).*

*These tests present a lot of variability in the results, which causes the analysis of the results could be questioned. It should be considered that the fatigue analysis in asphalt mixtures for highways in Costa Rica is regulated by the General Specifications Manual for the Construction of Highways, Roads and Bridges of Costa Rica (CR-2010) of the Ministry of Public Works and Transport (MOPT, by its acronym in Spanish), and that it is based on the Superpave methodology and the AASHTO T 321 test. Therefore, the work was developed to generate inputs to evaluate different tests and their applicability in the design and construction processes of Costa Rica highways. This could allow redefining national specifications on this topic, in the future.*

*The study required a collection of bibliographic information, an experimental phase, which included the characterization of the materials and specimens, and fatigue tests. Then, the analysis of the variability of the results was carried out, looking forward to sensitivity factors, trends in the behavior of mixtures, as well as advantages and disadvantages of the methods.*

*It was verified that the variability depends on different factors to a greater extent on the properties of the mixture. Finally, it was identified that the most variable test was the four-point bending-traction beam test and the semi-circular test required the least time and effort compared to the other tests.*

**Keywords:** *Variability analysis, fatigue tests, hot asphalt mixtures, overlay, semi-circular test (SCB), four-point flexural-traction beam.*

---

## INTRODUCCIÓN

El deterioro por fatiga en mezclas asfálticas es un tema importante de analizar ya que, debido al daño acumulado, después de años de funcionamiento, este es uno de los principales mecanismos de falla de estructuras de pavimento flexible. La fatiga se asocia a la respuesta resiliente de la estructura, dando lugar a fallas estructurales y funcionales en el pavimento, que se producen principalmente en la capa asfáltica y se generan por las cargas cíclicas impuestas por el parque automotor (Rondón *et al.*, 2012).

Los ensayos de fatiga son parte fundamental para la caracterización de las mezclas asfálticas, ya que estos se relacionan directamente con la capacidad de soportar carga a largo plazo de una mezcla asfáltica, siendo esta una característica fundamental para el diseño estructural de los pavimentos y el adecuado análisis financiero del mismo (Loría y Arce, 2003).

Costa Rica cuenta con varios laboratorios con equipo apropiado para el estudio de algunos ensayos de fatiga, lo que permite generar, ampliar y adaptar investigaciones o normas en el tema y generar un avance en la materia y un mejoramiento del desempeño y calidad de las vías.

Se puede afirmar que las mezclas asfálticas están formadas por una variedad de materiales, lo que las hace sumamente heterogéneas. Por esta razón y junto con otros factores asociados al proceso de ensayo, la variabilidad en los resultados de ensayos de fatiga es un hecho esperado.

Según Domínguez (2018), la fatiga en los materiales se da progresivamente, pues aumenta a mayor cantidad de ciclos de carga. Además, es localizado y puede terminar originando la aparición de grietas o hasta la fractura completa de la estructura después de un número suficiente de repeticiones de carga. Por lo tanto, si se desea diseñar y construir una estructura de pavimento duradera, resistente al deterioro, la fatiga se vuelve un fenómeno importante de controlar y minimizar.

Este estudio de fatiga de los materiales aportó un avance para alcanzar diseños adecuados de pavimentos. Además, una razón que demostró la necesidad de este estudio fue la falta de estándares que definieran el correcto diseño de los mismos, basándose en insuficientes regulaciones al respecto en Costa Rica. Por lo tanto, el estudio pretendió encontrar y estudiar, las causas de tan alta variabilidad en los resultados de los ensayos de fatiga, utilizados en Costa Rica, o bien, de fácil implementación. Lo anterior para eventualmente poder considerar estos factores en la actualización de especificaciones en Costa Rica.

Este proyecto, permitió profundizar en el tema de fatiga de los materiales en Costa Rica, para que de esta manera se puedan alcanzar diseños más adecuados de los pavimentos. Se evaluaron tres tipos de ensayos de laboratorio sobre fatiga en mezclas asfálticas, overlay (Tex-248-F), el método estándar de prueba para determinar la vida útil de fatiga de mezclas de asfalto compactado sometidas a flexión repetida (AASHTO T321-17) y el método de prueba estándar para la evaluación de la resistencia al agrietamiento de la mezcla de asfalto utilizando la prueba de curva semi-circular (SCB)

a temperaturas intermedias (ASTM D8044-16), con el fin de analizar su variabilidad, identificando posibles fuentes de error y relaciones que permitan redefinir la legislación y regulaciones en Costa Rica en este tema, debido a que los resultados de estos ensayos actualmente presentan variaciones muy grandes.

## OBJETIVO

El objetivo principal del estudio consistió en analizar la variabilidad asociada a tres ensayos de fatiga en tres tipos de mezclas asfálticas en caliente (cuyas características se presentan en la metodología, en la sección de materiales), producidas en planta de Costa Rica.

Por lo tanto, para alcanzar el objetivo se procedió a realizar la caracterización de las mezclas asfálticas, analizar la

variabilidad del ensayo de fatiga overlay (Tex-248-F). También, se examinó la variabilidad del método estándar de prueba para determinar la vida útil de fatiga de mezclas de asfalto compactado sometidas a flexión repetida (AASHTO T321-17). Luego, se identificó la variabilidad del método de prueba estándar para la evaluación de la resistencia al agrietamiento de la mezcla de asfalto utilizando la prueba de curva semi-circular (SCB) a temperaturas intermedias (ASTM D8044-16). Finalmente, se comparó los resultados experimentales de los ensayos de fatiga en estudio para identificar la variabilidad asociada a estos.

## METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos planteados en el estudio, se siguió la metodología de investigación mostrada en la Figura 1.

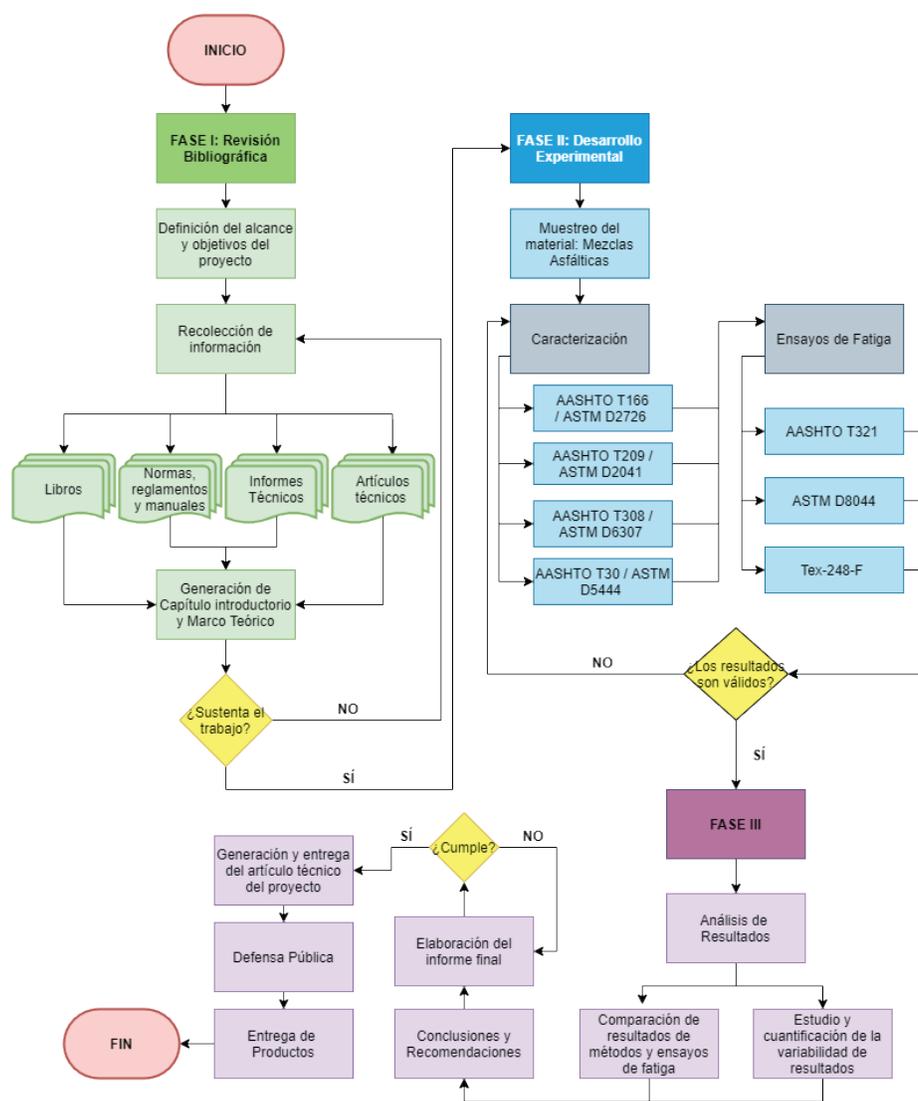


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología

## MATERIALES

Cómo se observa en la Figura 1, se inició con una fase de revisión bibliográfica, adquiriendo fundamentos teóricos y conociendo la reglamentación y normativa costarricense. Luego, se procedió con la caracterización de los materiales, la cual comprendió el desarrollo de los ensayos: granulometría del agregado extraído (AASHTO T30 / ASTM D5444), gravedad específica bruta para especímenes compactados (AASHTO T166 / ASTM D2726), gravedad específica máxima teórica (AASHTO T209 / ASTM D2041) y contenido de asfalto por ignición (AASHTO T308 / ASTM D6307), cuyos resultados se muestran en la Figura 2, y los Cuadros 1 y 2.

Cabe destacar que las mezclas asfálticas en caliente escogidas, fueron diseñadas y producidas en plantas asfálticas de Costa Rica, con el fin de estudiar diseños de uso común dentro del territorio costarricense y estas fueron: 1) Mezcla convencional, de tamaño máximo nominal (TMN) de 12,5 mm, con fuente de agregado de San Carlos, Alajuela, Costa Rica. 2) Mezcla convencional, con un TMN de 12,5 mm igualmente, pero con fuente de agregado de Guápiles, Limón, Costa Rica. 3) Mezcla modificada con Elvaloy y ácido polifosfórico (PPA), de TMN de 19,00 mm, con fuente de agregado de Guápiles, Limón, Costa Rica.

Cuadro 1. Resumen de los resultados del contenido de asfalto con correcciones y GMM gravedad máxima teórica, por mezcla

Mezcla	Contenido de agua (%)	Contenido de asfalto PTM (%)	Gmm
Convencional (12,5) / San Carlos	0,4963	6,2	2,471
Convencional (12,5) / Guápiles	0,2181	5,97	2,481
Modificada (19,0) / Guápiles	0,4172	5,98	2,478

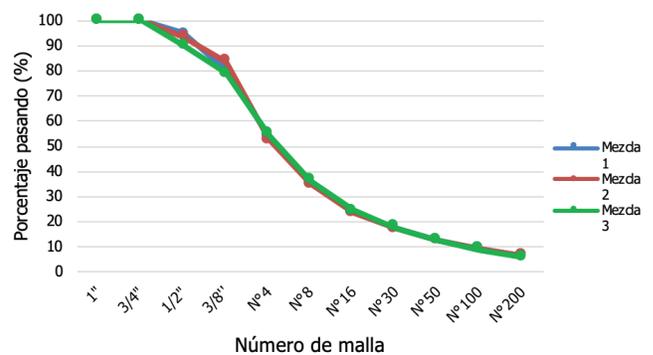


Figura 2. Granulometría del agregado, por mezcla

Cuadro 2. Resumen de gravedad específica bruta, porcentaje de vacíos y absorción de agua, en especímenes cortados, para las mezclas 1, 2 y 3

Ensayo	Mezcla Convencional (12,5) / San Carlos			Mezcla Convencional (12,5) / Guápiles			Mezcla Modificada (19) / Guápiles		
	Gbs promedio	Absorción de agua (%)	Vacíos (%)	Gbs promedio	Absorción de agua (%)	Vacíos (%)	Gbs promedio	Absorción de agua (%)	Vacíos (%)
Vigas B1	2,296	1,1	7,1	2,318	0,6	6,6	2,293	1,3	7,5
Vigas B2	2,313	1,5	6,4	2,296	1,1	7,4	2,291	1,3	7,5
Vigas B3	2,299	2,4	6,9	2,296	1	7,5	2,297	1,3	7,3
Overlay	2,304	1,5	6,8	2,309	1,2	6,9	2,307	1,3	6,9
SCB	2,31	1,5	6,5	2,308	1,1	7,0	2,313	1,0	6,6

B1: Bloque 1, B2: Bloque 2 y B3: Bloque 3, cada bloque está compuesto por 4 vigas. SCB: Ensayo semi-circular

## Ensayos de fatiga

Una vez preparadas las mezclas a evaluar, se procedió con la realización de los ensayos de fatiga: viga a flexo-tracción en cuatro puntos (AASHTO T321), viga semi-circular (ASTM D8044) y overlay test (Tex-248-F).

Estos ensayos de fatiga fueron escogidos debido a que el ensayo de la viga a flexo-tracción es el único que se utiliza en Costa Rica a nivel de especificación y de proyectos; los ensayos de overlay y semi-circular (SCB) son de importancia a nivel internacional. Además, cuentan con duraciones de ensayo más bajas con respecto al ensayo de la viga, no requieren de equipo muy especializado para su desarrollo y son los que se podrían implementar fácilmente en Costa Rica.

El Cuadro 3 muestra el tamaño de la muestra utilizada, se escogió una cantidad adicional de especímenes con el fin de captar mejor el efecto de la variabilidad y poder cuantificar si esta se mantiene o si existe la presencia de valores extremos. Se descartaron datos atípicos mediante un análisis estadístico de diagrama de cajas.

La variabilidad en los resultados de fatiga se entiende, para este caso, como la oscilación de los resultados en rangos muy amplios, afectando la precisión de estos. Como se mencionó anteriormente, esto produce que los resultados sean cuestionados por los profesionales o personas interesadas en el área. En el proyecto, la variabilidad fue estudiada utilizando el coeficiente de variación (CV), una medida de dispersión estadística. Esta, es una medida relativa del grado de variabilidad, hace referencia a la relación entre, la media de una variable y su variabilidad, y no depende de la escala de la variable. El análisis de variabilidad se realizó en la variable del número de ciclos a la falla para el ensayo overlay; en la energía de deformación, para el ensayo semi-circular y en el número

de ciclos de fatiga y rigidez por número de ciclos de fatiga (S<sub>xn</sub>), para el ensayo de la viga a flexo-tracción. Los resultados podrían estar afectados por factores como: materiales, equipo o preparación de la muestra.

Por otra parte, existen factores que pueden afectar la variabilidad de los resultados como la preparación de especímenes, el cual es un proceso delicado, por lo cual se recomienda seguir las instrucciones dadas por cada norma. También, se realizó el método de secado de muestras, utilizando un horno de secado al vacío, disminuyendo la influencia negativa de la humedad en los resultados. Estos factores podrían influir en el aumento de la variabilidad de los resultados, sin embargo, en el presente estudio no se cuantificó su efecto.

### Ensayo overlay (Tex-248-F)

Los parámetros utilizados para este ensayo fueron: frecuencia de 0,1 Hz, longitud de ciclo de 10 s y temperatura de 25±0,5°C, tensión aplicada, a un desplazamiento máximo constante de 0,025 pulgadas. (0,635 mm), porcentaje de vacíos del 7±1%, para especímenes recortados. Además, se agregó un tiempo de 10 minutos, como período de relajación y estabilización de temperatura, antes de la prueba, con carga cero. La prueba se ejecutó hasta una reducción del 93% de la carga máxima, midiendo desde el primer ciclo de apertura. O bien, si no se alcanzó esta reducción dentro de 1200 ciclos, el equipo detuvo la prueba automáticamente. El epóxico utilizado para adherir la muestra al equipo, tiene una resistencia a la tracción de 4,1 MPa (600 psi) y un tiempo de secado de 24 h. En cuanto al corte de las muestras, la cara superior del espécimen no fue cortada, por lo que la superficie queda rugosa. Lo anterior, con el fin de lograr un comportamiento homogéneo del porcentaje de vacíos de las muestras, tanto en muestras inferiores como superiores del bloque compactado, la parte rugosa quedó libre de pegamento, y la parte cortada, quedó en contacto con las placas mediante el epóxico.

Cuadro 3. Tamaño de la muestra

Ensayo	Especímenes por norma por mezcla	Especímenes adicionales, por mezcla	Total de especímenes, por mezcla	Valores atípicos para el conjunto de mezclas	Envejecimiento (85°C)
AASHTO T321	400 µε: 4	400 µε: 2	400 µε: 6	3	5 días
	600 µε: 4	600 µε: 2	600 µε: 6	1	5 días
ASTM D8044	Ranura 25 mm: 4	Ranura 25 mm: 2	Ranura 25 mm: 6	3	5 días
	Ranura 32 mm: 4	Ranura 32 mm: 2	Ranura 32 mm: 6	3	5 días
	Ranura 38 mm: 4	Ranura 38 mm: 2	Ranura 38 mm: 6	2	5 días
Tex-248-F	3	2	5	5	5 días

µε: microstrain (deformación)

### Ensayo viga semi-circular

Las tres profundidades de ranura nominales utilizadas fueron 25 mm, 32 mm y 38 mm, con un ancho de ranura de <3,5 mm. Ambas caras semicirculares del espécimen debían ser cortadas, pero para este caso, solo las caras internas fueron cortadas, las externas se dejaron con superficie rugosa, como lo muestra la Figura 3. Lo anterior con el mismo fin que para las muestras overlay.



Figura 3. Especímenes ensayo viga semi-circular

Se tomaron en cuenta los parámetros de prueba siguientes: una temperatura de  $25 \pm 1^\circ\text{C}$ , una velocidad de deformación constante de 0,5 mm/min, con una frecuencia de muestreo de 10 Hz, el porcentaje de vacíos de aire objetivo fue de  $7,0 \pm 0,5\%$ ; además, se aplicó una precarga de 45 N durante 30 s para asegurar que la muestra se asiente correctamente. La prueba finalizó automáticamente cuando la carga aplicada disminuyó al 25% de la carga máxima.

### Ensayo de viga a flexo-tracción en cuatro puntos

El equipo utilizado fue capaz de proporcionar una carga sinusoidal repetida en una frecuencia de 10 Hz. Además, de someter las muestras a flexión de cuatro puntos, con rotación libre y traslación horizontal en todos los puntos de carga y reacción. La temperatura de prueba utilizada fue de  $20^\circ\text{C}$ . Las deformaciones aplicadas fueron de: 4 muestras (vigas) a 400 microstrain y 4 muestras a 600 microstrain, por mezcla. La rigidez inicial fue calculada en el ciclo número 50, la relación de Poisson predeterminada fue de 0,4. La condición de parada fue: la rigidez de terminación, la cual se dio al 50% de la rigidez inicial y el número máximo de ciclos permitidos fue de diez millones de ciclos.

## RESULTADOS Y ANÁLISIS

### Variabilidad de Ensayos de Fatiga

El Cuadro 4, muestra un resumen de la variabilidad de los resultados de laboratorio, obtenidos al realizar los tres ensayos de fatiga seleccionados, en las tres mezclas asfálticas mencionadas. Esto permite observar de manera general, si existe o no alguna tendencia en el comportamiento de las mezclas.

En el Cuadro 4, se observa que la mezcla 1 presentó la mayor variabilidad en los ensayos de viga semi-circular y de la viga a flexo-tracción. Además, la mezcla 2 presenta una tendencia a la menor variabilidad, en los 3 ensayos estudiados. Este comportamiento podría estar asociado a la rigidez de la

Cuadro 4. Resumen de la variabilidad para cada tipo de mezcla, según cada ensayo

Ensayo / Condición	CV (%)							
	Overlay	SCB (Energía de deformación)			Viga flexo-tracción (Número de ciclos)		Viga flexo-tracción (Sxn)	
	Número de ciclos a la falla	Ranura 25 mm	Ranura 32 mm	Ranura 38 mm	400 $\mu\epsilon$	600 $\mu\epsilon$	400 $\mu\epsilon$	600 $\mu\epsilon$
Mezcla 1	6	10,79	13,85	23,83	49,8	31,7	50,0	36,5
Mezcla 2	5	10,30	1,92	16,13	14,8	22,9	19,3	28,6
Mezcla 3	28	7,50	12,76	11,68	25,6	26,0	20,0	35,6
Rangos	5% - 28%	1,9% - 24%			14% - 50%		19% - 50%	

Notas: CV: Coeficiente de variación, SCB: ensayo ASTM D8044-16  
Sxn: rigidez por número de ciclos de fatiga

mezcla, pues la mezcla 1, se consideró como la mezcla más rígida, según ensayos de caracterización y resultados de resistencia. Sin embargo, la mezcla 3 es la menos rígida, por lo tanto, en este caso podrían estar afectando otros factores como el contenido de asfalto, naturaleza del agregado, presencia y tipo de polímeros y tamaño máximo nominal de la muestra.

El ensayo que se consideró más variable es el ensayo de la viga a flexo-tracción. En este caso, es deseable tener un coeficiente de variación constante para los distintos niveles de la prueba, sin embargo, esto tampoco se cumple, pues se tiene un rango de variabilidad bastante amplio, entre 14,8% y 50,0%, considerándose una desventaja para el ensayo pues afecta su repetividad y la representatividad de la media disminuye.

La Figura 4 muestra los gráficos que representan cómo se distribuye en cada mezcla, los coeficientes de variación según el ensayo. Por ejemplo, para la mezcla 1, el %CV del ensayo de la viga a flexo-tracción, para la variable Sxn a 400 microstrain,

representó un 23% con respecto a las demás variables, casi 8 veces más variable que el %CV del ensayo overlay.

Cabe destacar que las mezclas asfálticas son mezclas sumamente heterogéneas, por lo tanto, sus comportamientos y respuestas son influenciados por muchos factores y componentes. Las propiedades de los materiales que la conforman juegan un papel muy importante en su desempeño y variabilidad de los resultados.

Además de los datos encontrados, comparando con los resultados de la caracterización de los materiales, se observó que para el ensayo overlay, el CV en el número de ciclos a la falla fue mayor para la mezcla modificada con polímeros, con mayor TMN y para las muestras con el menor CV del porcentaje de vacíos. Por otra parte, no se observó alguna tendencia en el comportamiento de la variabilidad con distintos contenidos de asfalto.

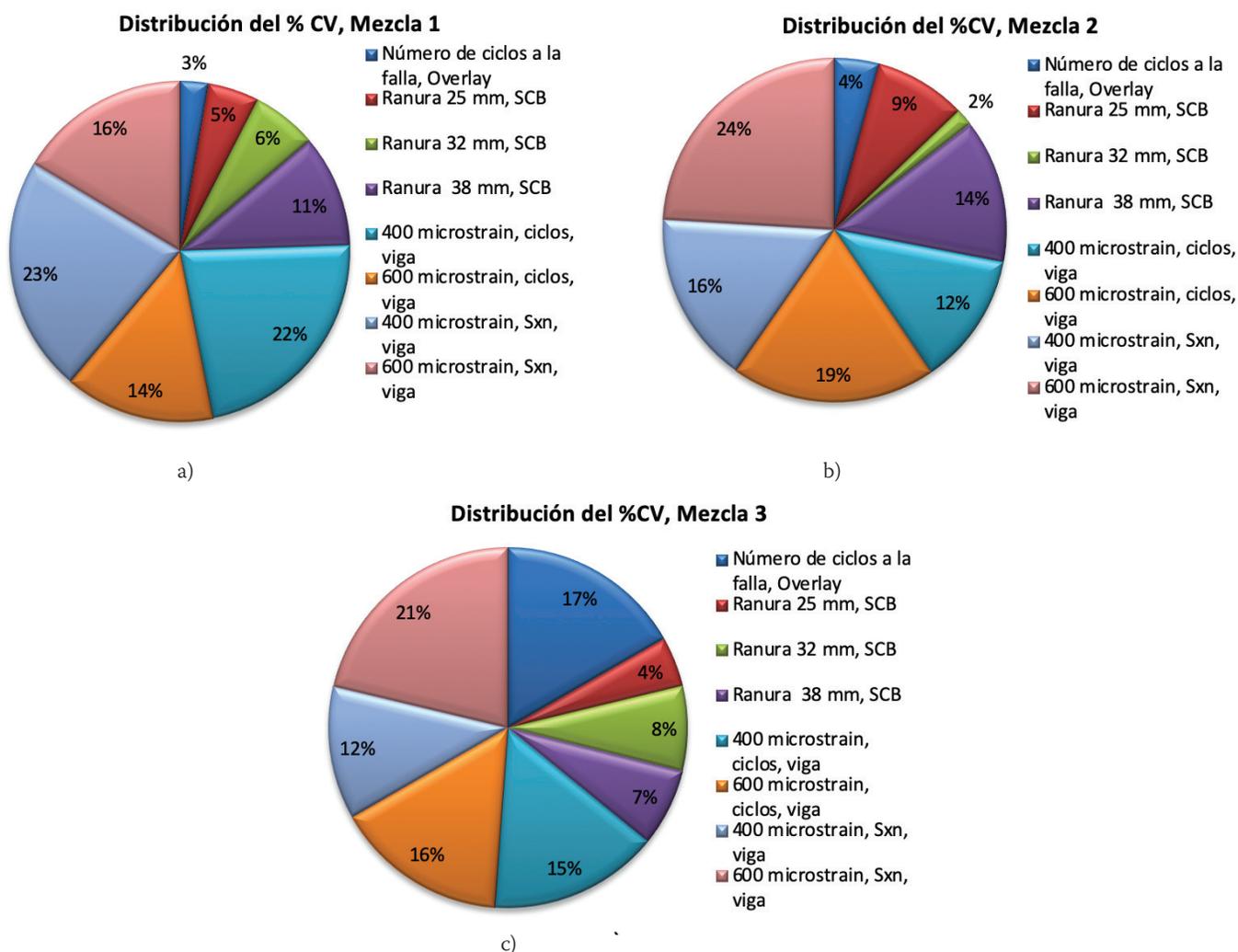


Figura 4. Gráficos de distribución del %CV para a) mezcla 1, b) mezcla 2, c) mezcla 3

Analizando el ensayo SCB, el CV de la energía de deformación, aumentó en las muestras con mayor contenido de asfalto y con mayor tamaño de ranura, sin embargo, no mostró tendencia a aumentar o disminuir la variabilidad de la energía de deformación con propiedades como presencia de polímeros, TMN del agregado o el CV del porcentaje de vacíos.

La variabilidad de la energía de deformación a la falla en el ensayo SCB se relacionó con los siguientes factores: el contenido de asfalto, tamaño de la ranura y su tiempo de ensayo, es decir, con un fallo más rápido, mayor variabilidad en los resultados. Además, se determinó que es el ensayo que muestra la menor variabilidad en sus resultados, tanto en variabilidad como en duración y requiere del menor esfuerzo comparado con las demás pruebas, desde un punto de vista de cantidad de tiempo. Por otro lado, excluye el tiempo de uso y curado del epóxico (el cual es necesario para el ensayo overlay), tampoco requiere de un transductor de desplazamiento lineal variable (LVDT por sus siglas en inglés).

Con respecto al ensayo de la viga a flexo-tracción, el CV para las variables  $S_{xn}$  y número de ciclos a la falla aumentó cuando había un menor CV en el porcentaje de vacíos y en las muestras con mayor contenido de asfalto, pero no presentó tendencias a aumentar o disminuir, para muestras con polímeros o en las variaciones del TMN del agregado.

Se observó, además, que la mezcla 1 presentó la mayor variabilidad en todos los casos y la mezcla 2 mostró los resultados más homogéneos. Por otro lado, el parámetro  $S_{xn}$  fue el más variable para todas las mezclas, por lo que se recomienda trabajar con el número de ciclos de fatiga. Se determinaron factores que afectaron la variabilidad de los parámetros en estudio, estos fueron el contenido de asfalto y el CV del porcentaje de vacíos. Por último, el ensayo de la viga a flexo-tracción (AASHTO T321-17) fue el que mostró la mayor variabilidad de sus resultados y duración de desarrollo, lo cual dificultó la interpretación de los resultados y la repetibilidad del ensayo.

La norma overlay recomienda probar las muestras dentro de los 5 días posteriores al moldeo, sin embargo, la condición anterior no se logró cumplir en el desarrollo de este proyecto por razones de disponibilidad de personal, equipos y por el tiempo de envejecimiento determinado. Según Walubita *et al.* (2012), un tiempo de espera más prolongado, propicia que los aglomerantes de asfalto comiencen a oxidarse y a endurecerse. Es decir, que la mezcla sea más rígida y quebradiza con una

menor resistencia al agrietamiento, de ahí una disminución del número de ciclos con el aumento del tiempo de sesión. Razón por la cual, esta condición es una posible fuente de variabilidad en los resultados.

Para el ensayo overlay, los factores que afectaron la variabilidad de los resultados fueron: uso de epóxico para la fijación de la muestra al equipo, un tiempo de espera más prolongado entre el moldeo y la falla de los especímenes, propiciando que los aglomerantes de asfalto comenzaran a oxidarse y a endurecerse, el CV del porcentaje de vacíos, porcentaje promedio de vacíos, la presencia de polímeros y el tamaño máximo nominal de la mezcla.

Además, el ensayo no fue sensible a diferencias entre mezclas, es decir, la mezcla que se consideraba más rígida era la mezcla 1 y fue la que resistió mayor cantidad de ciclos, la mezcla 3, modificada con polímero y, por lo tanto, con mejor desempeño, fue la que resistió menor cantidad de ciclos. Como menciona Walubita y otros (2012), la aplicación de este ensayo como una prueba confiable de susceptibilidad al agrietamiento en el laboratorio, es un desafío por sus problemas de repetibilidad y variabilidad, aunque Parker (2010), considera la prueba como candidato justo para la aplicación en procesos de diseño de mezcla de rutina. Una de las mayores desventajas encontradas durante el proceso, fue en el ensayo overlay con el uso de epóxico para fijar la muestra al equipo e iniciar el ensayo, pues esto influyó en la variabilidad de los resultados, aumentó costos y tiempos de trabajo.

Como se observa, no necesariamente el contenido de asfalto es el único parámetro de influencia en la resistencia a la fatiga (esto es aplicable a los tres ensayos en estudio), debido a que también hay presencia de aditivos y modificaciones de mezclas, los cuales se utilizan para mejorar el comportamiento de la carpeta asfáltica, ante una determinada característica. En conclusión, no se puede estudiar un factor aislándolo del resto de posibles variables, pues las mezclas al ser elementos tan heterogéneos, varios factores podrían estar influyendo simultáneamente en la variabilidad de los resultados.

La simplicidad en un método de prueba, así como la facilidad de preparación de las muestras, son factores que se determinaron importantes a considerar en los procesos de diseño de mezclas. Y los ensayos SCB y overlay, se encontraron sencillos de preparar y fáciles de manejar, además adecuados para extracción de núcleos de campo.

## Clasificaciones

Se generaron dos clasificaciones, una basada en la variabilidad de los resultados y otra basada en la duración del ensayo. El Cuadro 5, muestra la primera clasificación, basada en los resultados de variabilidad del Cuadro 4. Se puede observar que fueron 8 las condiciones que se analizaron, clasificadas por mezcla. Se le asignó el número 1 a la condición que mostraba la menor variabilidad y el número 8 a la condición con mayor variabilidad.

Por ejemplo, para la mezcla 1, el ensayo overlay tenía un CV de 6% y el ensayo de la viga a flexo-tracción, para la variable Sxn en su condición de 400 microstrain, tenía un CV de 50%, por lo tanto, al ensayo overlay se le dio una clasificación de 1 y al ensayo de la viga, una clasificación de 8, y así sucesivamente para las demás condiciones y para la Mezcla 2 y 3. Para obtener la clasificación parcial, se realizó una suma horizontal de los valores dados a las mezclas 1, 2 y 3 (Cuadro 5), entonces, para la suma menor, se le asignó el número 1, y para la suma mayor se le asignó el número 8. La clasificación general, se generó con el fin de, unificar la variabilidad presente en cada ensayo y poder realizar una comparación, este se determinó únicamente observando los resultados la clasificación parcial, donde hay una notable diferencia entre los valores, por ejemplo, se observa que, para el ensayo de la viga a tracción, predomina la presencia de clasificaciones por encima de 5.

El Cuadro 6 muestra la segunda clasificación generada, basada en la duración de los ensayos, se muestran las respectivas duraciones en minutos de cada ensayo y para cada mezcla. Se le asignó el número 1 al ensayo que tiene la menor duración y el número 3, al ensayo con mayor duración. Por ejemplo, el ensayo SCB tuvo duraciones en un rango de 3,98 min a 5,01 min, lo cual representa el menor rango, dándosele una clasificación de 1. Para el caso del ensayo de la viga a flexo-tracción, este presentó rangos de duración de 395,43 min a 2123,63 min, superando notablemente los otros dos ensayos, y por eso se le da la clasificación de 3.

En ambas clasificaciones (Cuadros 5 y 6), se observa que los ensayos poseen la misma clasificación. Es decir, el ensayo que mostró la menor variabilidad en sus resultados y la menor duración de ejecución fue el ensayo semi-circular (ASTM D8044). Y el ensayo con la mayor variabilidad en sus resultados y mayor duración de ejecución, con diferencias significativas, fue el ensayo de la viga a flexo-tracción (AASHTO T321-17).

Cuadro 5. Clasificación basada en la variabilidad de los resultados

Ensayo	Condición		Variabilidad				Clasificación General
			Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Clasificación Parcial	
Overlay	Número de ciclos a la Falla (OT)		1	2	7	3	2
SCB	Energía de Deformación a la Falla (U)	R 25 mm	2	3	1	1	1
		R 32 mm	3	1	3	2	
		R 38 mm	4	5	2	4	
Viga a flexo-tracción	Número de ciclos de fatiga	400 $\mu\epsilon$	7	4	5	5	3
		600 $\mu\epsilon$	5	7	6	6	
	Sxn	400 $\mu\epsilon$	8	6	4	6	
		600 $\mu\epsilon$	6	8	8	8	

R: Ranura,  $\mu\epsilon$ : microstrain (deformación)

Cuadro 6. Clasificación basada en la duración de los ensayos

Ensayo	Condición	Duración promedio (min)			Ranking
		Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	
Overlay	-	29,20	26,33	23,00	2
SCB	R 25 mm	5,01	4,18	3,98	1
	R 32 mm	4,91	4,34	4,12	
	R 38 mm	4,23	4,70	4,10	
Viga	400 $\mu\epsilon$	395,43	757,46	2123,63	3
	600 $\mu\epsilon$	103,54	111,26	137,43	

R: Ranura,  $\mu\epsilon$ : microstrain (deformación)

## CONCLUSIONES

Se logró analizar la variabilidad de los ensayos de fatiga, mediante el análisis del coeficiente de variación y realizar la caracterización de los materiales en estudio, con resultados satisfactorios.

Se compararon los resultados experimentales de los ensayos de fatiga en estudio mediante gráficos y cuadros, esto permitió definir que la mezcla 1, presentó la mayor variabilidad en los ensayos de viga semi-circular y de la viga a flexo-tracción. También, la mezcla 2 tuvo una tendencia a la menor variabilidad, en los 3 ensayos estudiados. Además, el ensayo que se consideró más variable fue el de la viga a flexo-tracción, con rangos entre 14,8% y 50,0% considerándose una desventaja para el ensayo, pues afecta su repetitividad y la representatividad de la media disminuye.

Se determinó que el ensayo que mostró la menor variabilidad en sus resultados y la menor duración de ejecución fue el ensayo semi-circular (ASTM D8044). Y el ensayo con la mayor variabilidad en sus resultados y mayor duración de ejecución, con diferencias significativas, fue el ensayo de la viga a flexo-tracción (AASHTO T321-17). La variabilidad encontrada fue importante, llegando a valores hasta del 50%, lo que afectaría la repetitividad de los ensayos y la precisión en los resultados, limitando su confiabilidad.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda que el ensayo de la viga a flexo-tracción (AASHTO T321-17) sea de uso únicamente de investigación ya que no se considera sencillo y se vuelve poco práctico, debido a la complejidad del equipo, dimensiones de la muestra y largos tiempos de prueba. Además, si se desea considerar este ensayo para procesos de diseño de mezclas Superpave o pruebas de garantía de calidad, la duración del ensayo podría atrasar dichos procesos, o generar incertidumbre debido a la variabilidad de los resultados.

Se considera necesario el control, monitoreo, evaluación y realización de ensayos acelerados de secciones a escala natural para estudiar el comportamiento de la estructura total del pavimento, calibraciones e inclusión de modelos de predicción en el diseño estructural de pavimentos flexibles.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, por el préstamo de equipo y tutela de los ensayos para cumplir con el desarrollo del proyecto. Asimismo, se agradece al equipo asesor, conformado por: José Aguiar, Mónica Jiménez y Wendy Sequeira, por su orientación durante el proceso práctico y redacción. Por último, se reconoce el apoyo de las empresas: Constructora Meco y Constructora Herrera, por la donación del material necesario para el desarrollo del proyecto.

## REFERENCIAS

- Domínguez, J. (22 de enero 2018). La fatiga de los materiales y su tolerancia al daño. *El Mundo*. Recuperado de <https://www.elmundo.es/economia/2018/01/16/5a5de0e4e5fdeaad3c8b45e5.html>
- Loría, G., y Arce, M. (2003). *Análisis de fatiga en mezclas asfálticas* (LM-PI-PV-IN-XX-02). Recuperado de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/1200>
- Parker, B. (2010). *Laboratory evaluation of hot-mix asphalt concrete fatigue cracking resistance*. Tesis de maestría, Texas A&M University.
- Rondón, H., Reyes, F., Gonzáles, L., y Vásquez, S. (2012). *Ahuellamiento y fatiga en mezclas asfálticas*. Bogotá, Colombia: Ecoediciones
- Walubita, L., Faruk, A., Das, G., Tanvi, H., Zhang, J., y Scullion, T. (2012). *The Overlay Tester: A Sensitivity Study To Improve Repeatability And Minimize Variability In The Test Results* (FHWA/TX-12/0-6607-1). Recuperado de <https://static.tti.tamu.edu/tti.tamu.edu/documents/0-6607-1.pdf>

## Fe de erratas

Aplica para los documentos descargados u obtenidos digitalmente antes del 17 de julio de 2020

El equipo editorial de la revista Infraestructura Vial ha detectado un error involuntario en la información brindada en su página web relacionada con los derechos de autor en los artículos publicados según la siguiente lista al pie. En razón de lo cual hacemos constar que los autores son quienes retienen los derechos de todas sus publicaciones en nuestra revista y que ya ha sido rectificado el error para cada artículo en la página web de Infraestructura Vial.

### Erratum

*Valid for documents downloaded or accessed before July 17th, 2020*

*The editorial team of Infraestructura Vial has detected an involuntary error in the information found in its website related to the copyright in published articles, regarding which we clarify that the authors are the copyright holders of all their publications in our journal. The information has already been corrected on the website of Infraestructura Vial. The articles for which this erratum is valid are listed below.*

#### **Vol. 21 Núm. 38 (2019): Revista 38**

- Cruces ferroviarios con promesa de mejora en seguridad vial en Costa Rica (*Railway crossings with promise of safety improvement in Costa Rica*) [p 01-08]
- Estadísticas de siniestros viales con víctimas en Costa Rica para el período 2012-2016 (*Statistics in road crashes with victims in Costa Rica for the period 2012-2016*) [p 09-19]

#### **Vol. 21 Núm. 37 (2019): Revista 37**

- Accesibilidad: Elemento Fundamental para la Ejecución de Infraestructura de Transporte (*Accessibility: fundamental for implementation of transportation infrastructure element*) [p 01-11]
- Estimación del módulo resiliente para materiales granulares de Costa Rica (*Estimation of the resilient modulus for granular materials of Costa Rica*) [p 12-20]
- Evaluación de la zona de influencia de la troncal de transporte público San José-Sabanilla-La Campiña (*Assessment of the area of influence of San José-Sabanilla-La Campiña public transportation trunk corridor*) [p 21-31]

#### **Vol. 20 Núm. 36 (2018): Revista 36**

- Generalidades y aplicaciones de la instrumentación de pavimentos en condiciones de campo en Costa Rica (*Generalities and applications of pavement instrumentation with field conditions in Costa Rica*) [p 05-14]
- Evaluación de las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas con la incorporación de fibras sintéticas de aramida y polipropileno (*Evaluation of mechanical properties of asphalt mixtures with incorporation of aramid and polypropylene synthetic fibers*) [p 15-24]

#### **Vol. 20 Núm. 35 (2018): Revista 35**

- Influencia de variables de diseño en las propiedades mecánicas de una base estabilizada con asfalto espumado (*Influence of design variables on the mechanical properties of a stabilized base with foamed asphalt*) [p 05-11]
- Criterios ambientales y socioeconómicos para priorizar inversiones en la red vial de Costa Rica (*Environmental and socioeconomic criteria to prioritize investments in the road network of Costa Rica*) [p 12-19]

- Conceptualización del procesamiento digital de imágenes para la evaluación de superficies de pavimento en Costa Rica (*Conceptualization of the digital image processing for the assessment of pavement surfaces in Costa Rica*) [p 20-26]
- Contexto de las especificaciones de regularidad superficial en proyectos de rehabilitación costarricense (*Surface roughness specifications context in costa rican rehabilitation projects*) [p 27-36]
- Clasificación y distribución de riesgos en proyectos de infraestructura desarrollados por medio de Alianzas Público- Privadas (APP) en Costa Rica (*Risk classification and allocation in infrastructure projects developed through Public Private Partnerships (PPP) in Costa Rica*) [p 37-45]

#### **Vol. 20 (2018): Edición Especial**

- Evolución histórica de la modelación de demanda de transporte urbano en Costa Rica (*Historical Evolution of the Urban Transportation Demand Modelling in Costa Rica*)

#### **Vol. 19 Núm. 34 (2017): Revista 34**

- Aproximación fisicoquímica de la susceptibilidad al daño por humedad de interfaces asfalto-agregado (*Physicochemical approach of moisture damage susceptibility of binder-aggregate interfaces*) [p 05-09]
- Los conceptos de fondeo y financiamiento en el desarrollo de proyectos por medio de Participación Público-Privada (PPP) (*The concepts of funding and financing when developing projects through public private partnerships (PPP)*) [p 10-17]
- Configuración espacial de la ciudad de Cartago y su relación con volúmenes vehiculares (*Spatial configuration of Cartago city and its relationship with traffic volumes*) [p 18-27]

#### **Vol. 19 Núm. 33 (2017): Revista 33**

- Análisis comparativo de mezclas suelo cemento modificadas con materiales no biodegradables. Metodología de la portland cement association (*Comparative analysis of cement modified soil mixes with non-biodegradable materials. Portland cement association methodology*) [p 05-14]

- Señalización y seguridad vial en buses de tránsito rápido: el transmilenio en Bogotá (*Road signage and road safety in bus rapid transit corridors: transmilenio in Bogotá*) [p 15-25]
- Mejores prácticas para diseñar mezclas asfálticas con pavimento asfáltico recuperado (RAP) (*Recommended best practices for using RAP in asphalt pavements for Costa Rica*) [p 35-44]
- Modelación de demanda de transporte urbano en Costa Rica, de Emme a TransCAD (*Urban transportation demand modelling in Costa Rica, from Emme to TransCAD*) [p 45-53]
- Uso de la bicicleta en Costa Rica: repaso histórico y caracterización del tipo de ciclistas y su movilidad en el entorno vial nacional (*Use of bicycle in Costa Rica: historical review and characterization of the type of cyclists and their mobility on the national road system*) [p 26-34]

#### **Vol. 18 Núm. 32 (2016): Revista 32**

- Determinación del desplazamiento lateral de vehículos en carreteras urbanas de Costa Rica (*Determination of vehicle wheel wander for urban roadways in Costa Rica*) [p 05-11]
- Modelo interaccional comportamental de tránsito: algoritmo de diagnóstico (*Interactional behaviourist transit model: diagnostic algorithm*) [p 12-19]
- Simulación de variables climáticas en ensayos de daño acelerado de pavimentos a escala natural (*Simulation of weather conditions on full scale accelerated pavement testing*) [p 20-29]
- Implementation of a laboratory batching procedure with a correction for fines and moisture (*Implementación de un procedimiento de bacheo en laboratorio con corrección por finos y humedad*) [p 30-38]
- Determinación de rutas con potencial de mejora utilizando funciones de desempeño de seguridad vial: caso de Costa Rica (*Identifying dangerous routes through safety performance functions: case of Costa Rica*) [p 39-52]

#### **Vol. 18 Núm. 31 (2016): Revista 31**

- Efecto de la Temperatura en la Evaluación de la Fatiga en Ligantes Asfálticos (*Effect of temperature on fatigue evaluation of asphalt binders*) [p 05-13]

- Afectación de la Resistencia a la Flexión en Concretos Modificados con Reciclado de Concreto (*Involvement of the bending strength in concrete modified with recycled concrete*) [p 14-19]
- Compaction and mechanical properties of soils compacted in the gyratory compactor (*Propiedades de compactación y mecánicas de suelos compactados en el compactador giratorio*) [p 20-29]
- Desarrollo de curvas de deterioro para pavimento flexible y factor de incertidumbre (Development of deterioration curves for flexible pavement and uncertainty factor) [p 30-38]
- Análisis del comportamiento micromecánico del asfalto (*Micromechanical analysis of asphalt behaviour*) [p 39-45]

#### **Vol. 17 Núm. 30 (2015): Revista 30**

- Identificación de sitios de cruce de fauna en la ruta 415, en el “Paso del Jaguar”, Costa Rica (*Identification of fauna crossing sites on the 415 route, in the “Paso del Jaguar”, Costa Rica*) [p 05-12]
- Desempeño y calidad de servicio del sistema de autobuses externos de la Universidad de Costa Rica (*Transit performance and quality of service indicators for transit services for students to the Universidad de Costa Rica*) [p 13-22]
- Modelo para predecir los cambios en el módulo de resiliencia debidos a humedecimiento y secado (*A model to predict changes in resilient modulus resulting from wetting and drying*) [p 23-30]
- Análisis de la susceptibilidad al daño por humedad de una mezcla asfáltica a partir del ensayo MIST y del programa iPAS 2D® (*Moisture damage analysis for an asphalt mixture through the MIST test and the iPAS 2D® software*) [p 31-39]
- Capas de refuerzo con hormigón adheridas como alternativa para la rehabilitación de pavimentos asfálticos (*Bonded concrete overlays as a rehabilitation alternative for asphalt pavements*) [p 40-49]

#### **Vol. 17 Núm. 29 (2015): Revista 29**

- Aplicación de la metodología iRAP y el software ViDA-iRAP en un tramo de autopista en México (*Application of iRAP methodology and ViDA-iRAP software on a section of highway in México*) [p 05-12]
- Seguridad vial en planes de inversión. Caso de estudio Ruta Nacional 27, Costa Rica (*Considering road safety*

*on long-term investment strategic plans. Case study: National Route 27, Costa Rica*) [p 13-23]

- Metodología de análisis de la condición del pavimento a partir del cuenco de deflexión (*Methodology of analysis of the condition of the pavement starting from the deflection bowl*) [p 24-32]
- Las alianzas público privadas y su rol en la modernización de la infraestructura costarricense (*Public private partnerships for the modernization of Costa Rican infrastructure*) [p 33-38]

#### **Vol. 16 Núm. 28 (2014): Revista 28**

- Caracterización comparativa de agregados obtenidos de rocas ígneas usados en construcción vial (*Comparative characterization of aggregates obtained from igneous rocks used in road construction*) [p 05-12]
- Propuesta de sistema de gestión de pavimentos para municipalidades y gobiernos locales (*Proposal for municipalities and local governments pavement management system*) [p 13-24]
- Análisis estocástico de pavimentos de concreto con refuerzo continuo (*Stochastic analysis of continuously reinforced concrete pavements*) [p 25-32]
- Emulsiones de imprimación, su aporte en la adherencia (*Emulsion primers, their contribution to bonding*) [p 33-43]
- Accidentología Vial (*Road accident analysis*) [p 44-50]

#### **Vol. 16 Núm. 27 (2014): Revista 27**

- Diseño de pavimentos urbanos por retrocálculo según guía AASHTO 93 mediante la utilización del deflectómetro liviano de impacto (*Structural urban road design by AASHTO 93 backcalculation based in the use of a light weight deflectometer*) [p 04-14]
- Análisis locacional de los yacimiento pétreos para la planeación territorial de infraestructura: El caso de la red pavimentada de Veracruz, México (*Locational analysis of quarries for the spatial planning of infrastructure: the case of the paved highway network of Veracruz state, Mexico*) [p 15-24]
- Impacto vial del túnel Santa Rosa en la Av. Próceres de la Independencia, SJL, Lima (*Traffic impact analysis of the Santa Rosa tunnel on proceres de la Independencia Av., SJL, Lima*) [p 25-35]
- Variación de la resistencia de una subbase granular debido a la variación del contenido de finos plásticos en

granulometrías controladas (*Granular subbase resistance variation with the variation of plastic fines content in controlled gradations*) [p 36-43]

- Sistemas Inteligentes de Transporte: ¿Por qué no? (*Intelligent transportation systems: why not?*) [p 44-46]

#### **Vol. 15 Núm. 26 (2013): Revista 26**

- Propuesta de norma para elaboración de mezcla asfáltica almacenable, para bacheos y reparaciones de emergencia (*no se indica título en inglés*) [p 05-13]
- Comportamiento dinámico de los vehículos de carga pesada en el cantón de San José (2011-2012) (*no se indica título en inglés*) [p 14-31]
- Ensayos acelerados de pavimento en Costa Rica (*no se indica título en inglés*) [p 32-41]
- Experiencia nicaragüense en la implementación de ensayos para la determinación del tipo de cemento asfáltico por grado de desempeño Superpave (*no se indica título en inglés*) [p 42-46]

#### **Vol. 14 Núm. 25 (2012): Revista 25**

- Evaluación de la accidentalidad en los pasos a nivel en La Habana, Cuba (*no se indica título en inglés*) [p 02-08]
- Medición de la resistencia a la compresión del concreto mediante cilindros de 100 por 200 mm y de 150 por 300 mm para el control de calidad de obras (*no se indica título en inglés*) [p 09-13]
- Sistemas de alerta temprana para monitoreo de deslizamientos (*no se indica título en inglés*) [p 14-19]
- Relación entre las características petrográficas y geotécnicas de agregados de la provincia de Buenos Aires (*no se indica título en inglés*) [p 20-27]
- Bayesian Regression in Pavement Deterioration Modeling: Revisiting the AASHTO Road Test Rut Depth Model (*no se indica título en inglés*) [p 28-35]

#### **Vol. 13 Núm. 24 (2011): Revista 24**

- Propuesta de metodología para diseño de pavimentos flexibles empleando geosintéticos como refuerzo (*no se indica título en inglés*) [p 04-09]
- Uso del ultrasonido para la evaluación de la homogeneidad en la densidad de especímenes de prueba trapezoidales de concreto asfáltico (*no se indica título en inglés*) [p 10-16]

- Comportamiento hidráulico, beneficios y limitaciones de la aplicación de un SDGA a una estructura de pavimento flexible (*no se indica título en inglés*) [p 17-21]
- Modelos de optimización lineal para realizar planes de inversiones de largo plazo en una red de pavimentos (*no se indica título en inglés*) [p 22-30]
- Equipos de evaluación de alto desempeño de redes viales (*no se indica título en inglés*) [p 31-39]
- Diseño de mezclas para evaluar su resistencia a la compresión uniaxial y su permeabilidad (*no se indica título en inglés*) [p 40-49]

#### **Vol. 12 Núm. 23 (2010): Revista 23**

- Planes de Conservación Vial Cantonal para fortalecer la acción municipal en Costa Rica (*no se indica título en inglés*) [p 05-10]
- Diagnóstico técnico del estado de las redes viales cantonales pavimentadas (*no se indica título en inglés*) [p 11-17]
- Componentes Esenciales de una Unidad Técnica de Gestión Vial en el Ámbito Municipal en Costa Rica (*no se indica título en inglés*) [p 18-23]
- Gestión Eficaz de la Maquinaria Vial en Gobiernos Locales (*no se indica título en inglés*) [p 24-31]
- Mezclas con asfaltos modificados en la República de Panamá (*no se indica título en inglés*) [p 32-40]

#### **Vol. 11 Núm. 22 (2009): Revista 22**

- Análisis de ocurrencias de diferentes tipos de accidentes de tránsito en el cantón de Pérez Zeledón, Costa Rica (*no se indica título en inglés*) [p 04-11]
- Estimación experimental de los coeficientes de fricción por desviación ( $k$ ) y curvatura ( $\mu$ ) en cables postensados, mediante instrumentación electrónica (*no se indica título en inglés*) [p 12-19]
- Análisis cualitativo del flujo de agua de infiltración para el control del drenaje de una estructura de pavimento flexible en la ciudad de Bogotá D.C. (*no se indica título en inglés*) [p 20-25]
- Análisis de la seguridad vial en la región central de Cuba (*no se indica título en inglés*) [p 26-33]
- Evaluación de características físicas y químicas de los rellenos minerales de piedra caliza y polvo de piedra en la formulación de los morteros asfálticos (*no se indica título en inglés*) [p 34-45]

### **Vol. 11 Núm. 21 (2009): Revista 21**

- Sellos de lechada asfáltica “Slurry Seals” en Costa Rica, conceptos, ensayos y especificaciones (*no se indica título en inglés*) [p 06-17]
- Mezclas asfálticas en frío en Costa Rica, conceptos, ensayos y especificaciones (*no se indica título en inglés*) [p 18-29]
- Determinación de la regularidad superficial del pavimento, mediante el cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI) (*no se indica título en inglés*) [p 30-37]
- Desarrollo de herramientas de gestión, con base en la determinación de índices (*no se indica título en inglés*) [p 38-48]
- Estabilización y mejoramiento de rutas no pavimentadas (*no se indica título en inglés*) [p 49-55]

### **Vol. 10 Núm. 20 (2008): Revista 20**

- Utilización de caucho de neumáticos en mezcla asfáltica densa en obras de infraestructura (*no se indica título en inglés*) [p 04-12]
- Caracterización y compactación de cenizas de Central Térmica empleadas en terraplenes de carreteras (*no se indica título en inglés*) [p 13-20]
- Mezclas asfálticas en caliente: un medio para la valorización de residuos de arenas de fundición (*no se indica título en inglés*) [p 21-29]
- La accidentalidad en los pasos a nivel de Cuba durante el período 1991-2007 (*no se indica título en inglés*) [p 30-37]
- El arbitraje y las controversias en obras viales-MARC Peruano (*no se indica título en inglés*) [p 38-41]

### **Vol. 10 Núm. 19 (2008): Revista 19**

- Análisis de la seguridad en el cálculo de espesores de refuerzo para pavimentos flexibles (*no se indica título en inglés*) [p 04-09]
- Estado del conocimiento del estudio sobre mezclas asfálticas modificadas en Colombia (*no se indica título en inglés*) [p 10-20]
- Análisis de la vulnerabilidad física y amenazas en la carretera longitudinal del norte en las microregiones de Metapán y Alto Lempa Norte. Región Norte, El Salvador (*no se indica título en inglés*) [p 21-27]
- Determinación de factores camión en pavimentos de Costa Rica (*no se indica título en inglés*) [p 28-37]

- Predicción de módulos resilientes en mezclas asfálticas mediante el modelo de Witczak (*no se indica título en inglés*) [p 38-48]

### **Vol. 9 Núm. 18 (2007): Revista 18**

- Metodología simplificada para evaluación de vulnerabilidad geotécnica de terraplenes en carreteras de montaña de Costa Rica (*no se indica título en inglés*) [p 04-14]
- Evaluación de los métodos de reciclado y rehabilitación de firmes a partir del análisis de los tramos experimentales del proyecto europeo PARAMIX (*no se indica título en inglés*) [p 15-23]
- Evaluación empírico-mecánica de las estructuras de pavimentos flexibles comparando herramientas computacionales y datos de pruebas de fatiga en laboratorio (*no se indica título en inglés*) [p 24-29]
- Comparación de diseños de pavimentos flexibles nuevos según el método de diseño AASHTO 93, la Normativa Chilena vigente y la guía de diseño de pavimentos empírico-mecánica NCHRP 1-37<sup>a</sup> (*no se indica título en inglés*) [p 30-38]
- Estudio de la afinidad de un agregado basáltico triturado utilizando asfaltos convencionales y aditivos promotores de adherencia (*no se indica título en inglés*) [p 39-43]

### **Vol. 9 Núm. 17 (2007): Revista 17**

- Diseño e implementación de un sistema de gestión vial y de espacio público para Bogotá, Colombia (*no se indica título en inglés*) [p 04-12]
- Resistencia al envejecimiento de las mezclas bituminosas en caliente: beneficios y limitaciones de la incorporación de filleres comerciales. Primera parte: estudios en base al método UCL (*no se indica título en inglés*) [p 13-24]
- Mezclas asfálticas modificadas con un elastómero (caucho) y un plastómero (tiras de bolsas de leche con asfalto 80-100) (*no se indica título en inglés*) [p 25-34]
- Método de optimización del número de giros de diseño mediante desempeño relativo (*no se indica título en inglés*) [p 35-45]
- Evaluación de asfaltos modificados en laboratorio con distintos polímeros (*no se indica título en inglés*) [p 46-53]

UCR