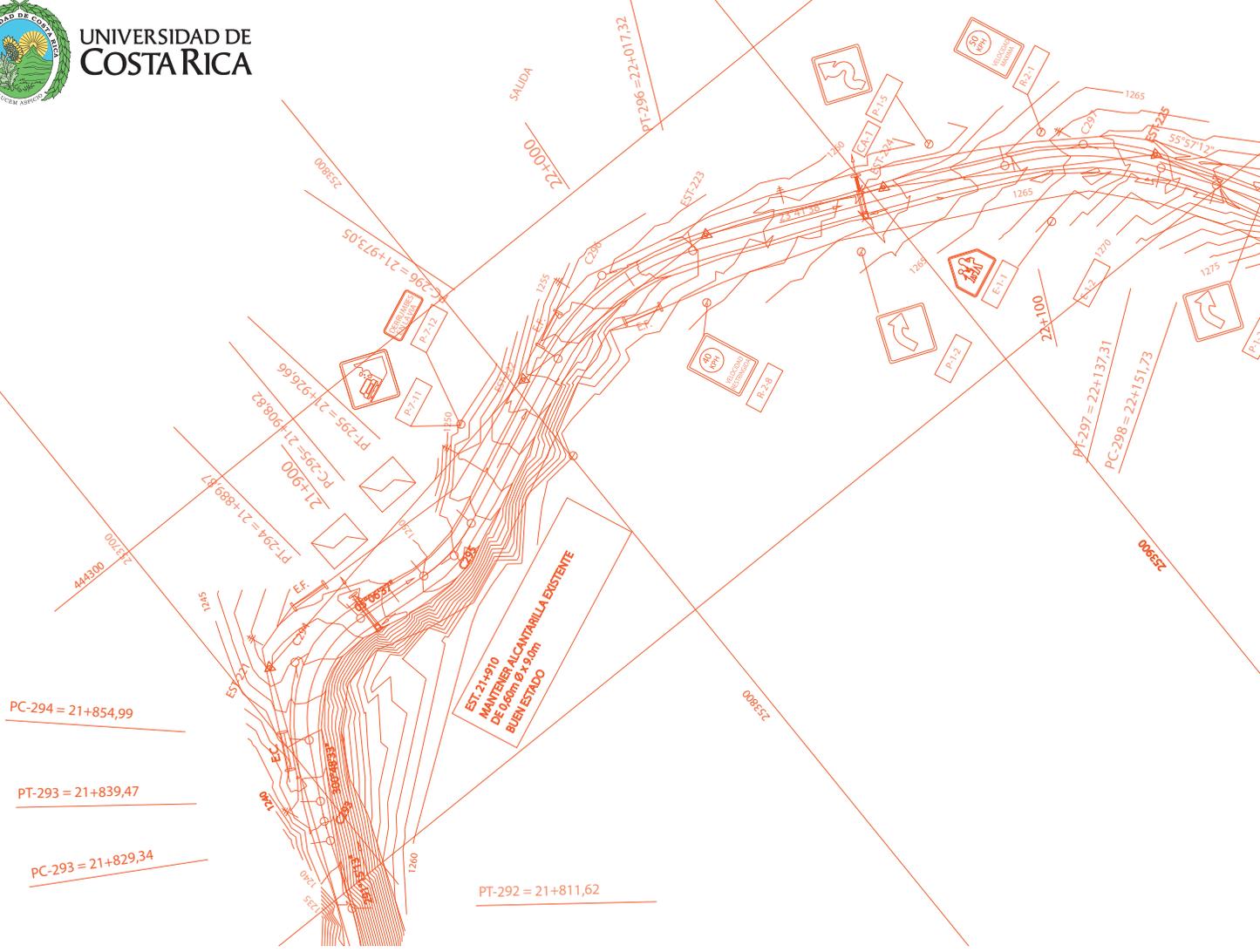




UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



Infraestructura Vial



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Publicación semestral / ISSN electrónico: 2215-3705

Volumen 20 / Número 36 / Diciembre, 2018/ San José, Costa Rica

COSTA RICA

Generalidades y aplicaciones de la instrumentación de pavimentos en condiciones de campo en Costa Rica

CHILE

Evaluación de las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas con la incorporación de fibras sintéticas de aramida y polipropileno.

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.

Esta revista cuenta con 30 publicaciones y un tiraje semestral de 2000 ejemplares, que son distribuidos a nivel nacional y en más de 35 países en todo el mundo.

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.

Políticas de Uso:



Revista Infraestructura Vial por LanammeUCR se distribuye bajo: Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-SinDerivar 4.0 Internacional



SUSCRIPCIÓN

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

EN ESTA EDICIÓN

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

Sheng Qi Wang Qiu

05

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.

Ing. Luis Mardones Parra

Dra. Alejandra Calabi Floody

Dra. Elsa Sánchez Alonso

Dr. Gonzalo Valdés Vidal

15

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:



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.

El presente número de la revista comprende dos artículos que se enfocan en el estudio y aplicación de tecnologías en pavimentos que buscan mejorar el diseño y desempeño de estos ante los agentes externos que los deterioran. En el primer artículo denominado **Generalidades y aplicaciones de la instrumentación de pavimentos en condiciones de campo en Costa Rica** se presenta cómo se está haciendo uso de la instrumentación de pavimentos para entender el comportamiento que presentan ante factores externos como cargas inducidas o fenómenos naturales. Con el uso de la instrumentación de pavimentos en condiciones de campo, se busca eventualmente mejorar y actualizar las metodologías de diseño de pavimentos utilizadas. Asimismo, el artículo detalla algunas aplicaciones adicionales que se le brinda al uso de esta tecnología.

En el artículo **Evaluación de las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas con la incorporación de fibras sintéticas de aramida y polipropileno**, se explora la posibilidad de utilizar fibras sintéticas para mejorar el desempeño de los pavimentos ante condiciones externas. Por lo que en el artículo se presentan los resultados obtenidos al evaluar una mezcla asfáltica modificada con fibras de aramida y polipropileno ante la fisuración térmica, daño por humedad y su comportamiento frente a las deformaciones permanentes.

Dr. Luis Guillermo Loría Salazar
LanammeUCR

DIRECTOR GENERAL

Dr. Luis Guillermo Loría Salazar,
LanammeUCR
luis.loriasalazar@ucr.ac.cr

DIRECTORA EJECUTIVA

M.Sc. Fabiola Miranda Argüello,
LanammeUCR
fabiola.miranda@ucr.ac.cr

MAQUETACIÓN Y DIAGRAMACIÓN

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

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

CONSEJO EDITORIAL

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

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

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

Sheng Qi Wang Qiu

Unidad de Materiales y Pavimentos, LanammeUCR
Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica
sheng.wang@ucr.ac.cr

Fecha de recepción: 10 de junio de 2018 / **Fecha de aprobación:** 21 de septiembre de 2018

RESUMEN

La instrumentación de pavimentos en condiciones de campo es una de las metodologías que se encuentra aplicando el LanammeUCR para cumplir con el objetivo de estudiar y analizar los pavimentos de Costa Rica, con el propósito de mejorar su desempeño a mediano y largo plazo. La instrumentación se utiliza principalmente para determinar el comportamiento que presenta un pavimento a partir del efecto de cargas externas inducidas o fenómenos naturales y esto permite extender su aplicación a diferentes usos: monitoreo estructural, generación de modelos matemáticos, desarrollo de pruebas para validación de diseños, validación de otros métodos de estudio, entre otros. Por lo general dentro del área de ingeniería de pavimentos, el comportamiento que se adquiere corresponde a la respuesta (esfuerzos y deformaciones) del pavimento, que es registrada por la instrumentación utilizada en estos, en donde esta información podrá ser utilizada para las aplicaciones mencionadas anteriormente. En este estudio se presentan los procedimientos y los resultados preliminares que ha realizado y obtenido el LanammeUCR con respecto a la instrumentación de pavimentos en campo para Costa Rica.

PALABRAS CLAVE: pavimentos, instrumentación, esfuerzos, deformaciones, condiciones de campo

ABSTRACT

Pavement instrumentation under field conditions is one of the methodologies that LanammeUCR is currently applying to meet its objectives of studying and analyzing Costa Rica's pavements with the purpose of improving their performance in the medium and long term. Pavement instrumentation is mainly used to determine the behavior a pavement shows under the effects of externally induced loads or natural phenomena, which allows a diverse range of uses: pavement structural monitoring, generation of mathematical models, development of tests for the validation of pavement designs, validation of other study methods, among others. Generally, in the field of pavement engineering, the acquired behavior corresponds to the response (stresses and strains) of the pavement, which is registered through the instrumentation used in these structures and the acquired information can be used in the applications mentioned before. This study shows the procedures and preliminary results that LanammeUCR has applied and acquired regarding the instrumentation of pavements under field conditions in Costa Rica.

KEYWORD: pavements, instrumentation, stresses, strains, field conditions

INTRODUCCIÓN

Uno de los mayores problemas de infraestructura vial que presenta Costa Rica es el deteriorado estado en el que se encuentran los pavimentos en las vías del país. Una de las causas de esta problemática (además de prácticas indebidas durante el proceso constructivo, poco control durante las inspecciones y análisis deficientes de desempeño), es debido al uso de guías de diseño no apropiadas para las condiciones que se presentan en Costa Rica, en donde se tienen limitaciones en cuanto a las características de desempeño y deterioro de los materiales que se utilizan, diferentes condiciones climáticas y de tránsito.

Uno de los esfuerzos para solucionar esta problemática, proviene de parte del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR), el cual tiene como objetivo a largo plazo el desarrollo de una Guía de Diseño Estructural Mecánica – Empírica de Pavimentos aplicable y actualizada para Costa Rica, en donde proyectos y estudios como el presentado en este artículo, forman parte de los esfuerzos de la institución para el desarrollo de esta. Cabe destacar que los resultados obtenidos hasta el momento para proyectos como el presentado en este artículo, son actualmente de carácter preliminar, por lo que el aporte de estos para el desarrollo de la guía se dará en el futuro.

El uso de una guía de diseño de este tipo no se centra sólo en calcular los espesores requeridos para una propuesta de un pavimento, si no que utiliza información del sitio y materiales donde se construirá y conformará este: condiciones de tránsito, de clima, características de los materiales que se utilizarán para el pavimento y sus posibles espesores. Esta información es utilizada para estudiar el comportamiento de su respuesta (esfuerzos, deformaciones y deflexiones) y el desempeño que tendrá el pavimento bajo esas condiciones. (Loría, 2013)

Seguidamente, se determina si el pavimento propuesto cumple con los criterios de desempeño (como fatiga, deformación permanente y daño por humedad) deseados para la vida útil esperada y las condiciones del sitio en donde se desea colocar. En caso de que no se acepte el diseño, se reinicia el proceso de diseño, cambiando los espesores propuestos o las propiedades de los materiales utilizados, realizando el proceso hasta que se acepte el desempeño obtenido. (Loría, 2013)

Como puede notarse, el uso de una guía de diseño de este tipo brindará pavimentos que se ajusten a las características y propiedades de los materiales de cada proyecto en específico. Para el caso de un país como Costa Rica, en donde se tiene gran variabilidad climática y distintos tipos de materiales, es necesario realizar diseños de este tipo para minimizar los factores que afectan el desempeño de los pavimentos y reducir la problemática actual en esta área. La Figura 1 muestra de forma resumida el proceso de diseño con una guía Mecánica – Empírica.

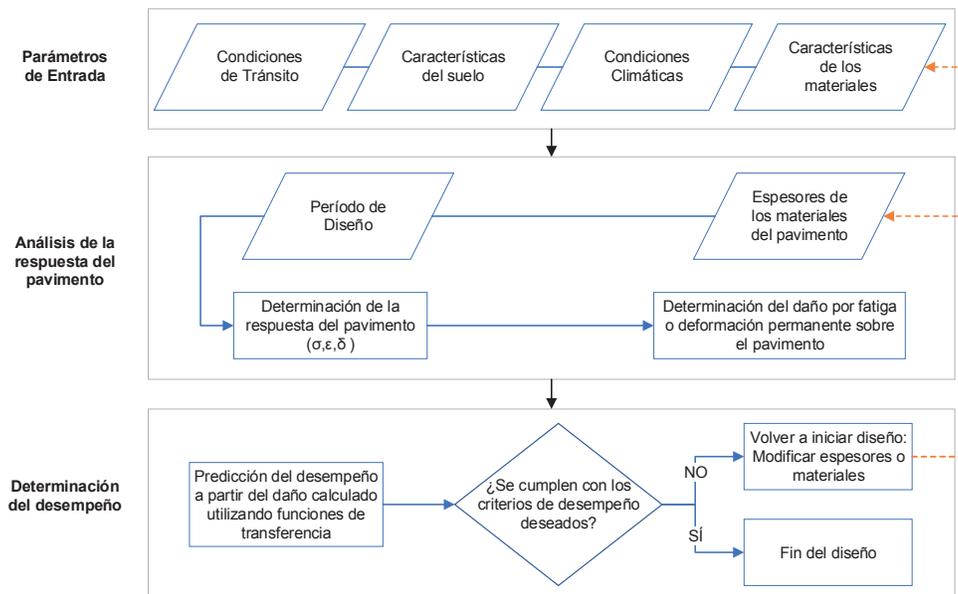


Figura 1. Procedimiento de diseño Mecánico – Empírico (Loría, 2013)

Para que la Guía de Diseño Estructural Mecánica – Empírica de Pavimentos se adapte a las condiciones del país, es necesario generar indicadores, modelos matemáticos y ecuaciones propios que determinen de forma precisa los daños al pavimento y funciones de transferencia adecuadas para medir y predecir el desempeño del pavimento a largo plazo. Esto se logra de forma empírica, monitoreando los cambios que sufre un pavimento a lo largo de su vida útil. En la actualidad, para realizar este tipo de monitoreos, puede darse la instrumentación de tramos de campo que entrarán en servicio y estudiarlos a lo largo de su vida útil o mediante el uso de Ensayos Acelerados en Pavimentos (APT por sus siglas en inglés), los cuales permiten simular las fallas de toda la vida útil de un pavimento en tan solo unos meses (Aguar, et al., 2012)

El LanammeUCR eligió inicialmente la línea de ensayos APT (después de un largo proceso de análisis y comparación de opciones), y adquirió un Simulador de Vehículos Pesados (HVS por sus siglas en inglés) para realizar los estudios correspondientes al daño que sufren los pavimentos y las funciones de transferencia en estos. Aun así, aunque los ensayos APT sean a escala natural y busquen simular la realidad, siempre existirán condiciones controladas de laboratorio, además, son ensayos muy agresivos sobre el pavimento debido a su naturaleza de ser un ensayo acelerado. Por lo que para los modelos o ecuaciones que se logren determinar, podría darse una calibración u optimización adicional al compararse con información similar obtenida de campo.

Debido a lo anterior, el LanammeUCR decidió complementar los estudios actuales con el monitoreo e instrumentación de pavimentos en tramos que se encuentran actualmente en servicio, con el objetivo de realizar un seguimiento en el tiempo de estos y complementar la información nueva con de los ensayos APT. Debido a esto, el presente trabajo muestra las generalidades, procedimientos y aplicaciones que el LanammeUCR ha desarrollado y continuará desarrollando mediante la instrumentación de pavimentos en campo.

INSTRUMENTACIÓN DE PAVIMENTOS EN CAMPO

Antecedentes

La instrumentación de pavimentos en servicio en condiciones de campo es una de las formas que pueden ser utilizadas para el estudio de pavimentos por medio del análisis mecánico – empírico, por lo que su aplicación no es nueva. A nivel

internacional existen proyectos como el Long Term Pavement Performance (LTPP) en el cual instrumentaron proyectos con pavimentos rígidos y pavimentos flexibles que entrarían en servicio. Los monitoreos de estos tramos lo realizaron entre los años 1996 y 1999 y la información adquirida fue utilizada para profundizar los conocimientos en el campo del comportamiento de pavimentos ante las cargas externas que transitan sobre estos. (FHWA, 1999)

Otro proyecto a nivel internacional destacable es el proyecto MnROAD, que se encuentra actualmente activo y es desarrollado por el Departamento de Transporte de Minnesota, en donde realizaron la instrumentación de carreteras interestatales mientras se encontraban en su proceso de construcción. El monitoreo de estos tramos se realizó para observar el comportamiento de los pavimentos debido a condiciones ambientales en las que se encuentra y por diferentes volúmenes de tránsito. (MnROAD, 2015)

Una de las razones por las que existen proyectos de este tipo a nivel internacional y forman parte del interés del LanammeUCR es el potencial que presentan para mejorar el estudio y entendimiento del comportamiento de los pavimentos según las condiciones en las que se encuentren. En donde con la instrumentación de estos, puede estudiarse los efectos de cada variable (carga, temperatura, propiedades de los materiales u otros) que afectan las respuestas del pavimento en condiciones de campo.

Instrumentación de proyectos nacionales

Para avanzar en esta línea de investigación, el LanammeUCR ha buscado proyectos que se encuentren en la etapa constructiva y que permitan colocar la instrumentación de interés en las diferentes capas de los pavimentos. Al mes de Julio en el año 2018, se ha logrado realizar la instrumentación de un tramo de pavimento rígido en el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría, un tramo en la ruta Cañas – Liberia (Ruta Nacional 1) y otro tramo en la ruta La Abundancia – Florencia (Ruta Nacional 35), correspondiente a un pavimento flexible.

Por el momento, el tramo con la mayor cantidad de información registrada y adquirida corresponde al del Aeropuerto Internacional Juan Santamaría (AIJS), por lo cual los detalles mostrados en el presente trabajo se enfocarán en este proyecto de instrumentación en particular. En este proyecto se instrumentó una losa de concreto, correspondiente a un pavimento rígido, en donde se utilizaron celdas de presión, galgas extensiométricas y termocuplas para su instrumentación. El uso que se le brinda a cada sensor se detalla a continuación:

- **Celdas de Presión**

Las celdas de presión son utilizadas para medir los esfuerzos verticales que llegan hasta el nivel en donde se encuentra instalada la celda. Este tipo de mediciones se realiza para determinar en qué medida un pavimento distribuye y reduce los esfuerzos respecto a la profundidad de interés, por lo que su uso se da cuando existe una carga externa que transita sobre el pavimento.

En el caso de pavimentos rígidos, el uso de celdas de presión puede extenderse para analizar los efectos de alabeo de temperatura que se dan en estos pavimentos, ya que la misma losa de concreto causará un aumento o disminución del esfuerzo vertical en un punto en particular debajo de ella, que puede ser registrado si se poseen sensores a ese nivel.

Para casos con monitoreos y seguimientos en el tiempo del mismo pavimento, puede ser eventualmente posible, observar un incremento en los registros del esfuerzo vertical, lo cual indica cierto nivel de deterioro sobre la estructura y no logre reducir el esfuerzo vertical ante una carga como lo realizaba en su inicio (Leiva & Camacho, 2015). Lo anterior corresponde a una de las aplicaciones que se realizan en la actualidad con la instrumentación de tramos de campo y ensayos APT. En la Figura 2 puede observarse una celda de presión modelo Geokon 3500-2, el cual tiene un rango de medición de 0 a 400 kPa.



Figura 2. Celda de presión utilizada para la instrumentación de pavimentos (LanammeUCR, 2015)

- **Galgas Extensiométricas**

Las galgas extensiométricas son utilizadas para medir la deformación unitaria que experimenta un elemento estructural como un pavimento. Estos se pueden colocar con una orientación transversal o longitudinal, con el fin de conocer la deformación que se puede dar en esos sentidos. La deformación

unitaria se desea obtener debido a que es utilizada para verificar los daños por fatiga que pueden darse en el pavimento. Por lo general tiene forma de “I” o “H” para lograr un anclaje adecuado con la estructura a medir. En la siguiente figura es posible observar este tipo de sensor para mediciones en concreto, ya que posee un soporte de acero en lugar de nylon (utilizado para mezclas asfálticas). Generalmente estos sensores permiten medir hasta los 1500 μs (microstrain).



Figura 3. Galga extensiométrica

Otro de los usos en los cuales se utiliza la información de la deformación unitaria, es en la generación y validación de los modelos de daño y criterios de falla que son utilizados en una guía de diseño Mecánico – Empírico (Leiva & Camacho, 2014). Por ende, al igual que con las celdas de presión, en monitoreos periódicos de la vida útil de la estructura, puede esperarse un incremento en los registros de deformación debido al deterioro de la estructura. Debido a lo anterior, el uso de este tipo de sensores resulta primordial en una instrumentación de pavimentos, debido a los objetivos que tiene el LanammeUCR.

- **Termopares**

Los termopares son sensores utilizados para registrar la temperatura en donde se encuentran, lo cual puede ser aplicado para obtener la temperatura del ambiente, en la superficie del pavimento o a un nivel debajo de este. En pavimentos rígidos, conocer la temperatura a un nivel cercano en la superficie y a un nivel cercano al inferior es importante para realizar un estudio enfocado a los efectos de alabeo por temperatura que estos sufren. De esta manera, puede relacionarse la temperatura con la respuesta que obtienen los otros sensores utilizados (esfuerzo vertical y deformación).

Para el caso de pavimentos flexibles, la temperatura es una de las variables que afecta el módulo de dinámico en la carpeta asfáltica, lo cual es uno de los indicadores del comportamiento que estos pueden tener (mayor o menor rigidez), lo cual afectará los esfuerzos y deformaciones registrados por los otros sensores. En la Figura 4 puede observarse un ejemplo de un termopar tipo K (compuesta por dos filamentos: uno de Nickel – Cromo y otra de Nickel – Aluminio) utilizada para la instrumentación.

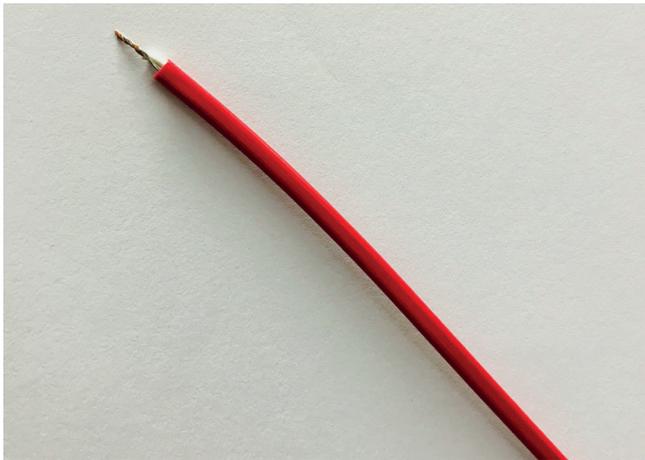


Figura 4. Termopar tipo K

Configuración de la instrumentación en el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría

Para el pavimento rígido del AIJS, una losa de concreto con dimensiones de 4.0 x 5.0 m fue instrumentada con la siguiente cantidad de sensores: 3 celdas de presión (esquina, centro y borde), 4 galgas extensiométricas y 3 termopares. El posicionamiento de estos sensores dentro de la losa de concreto puede observarse en las siguientes figuras:



Figura 5. Instrumentación del pavimento rígido del AIJS (LanammeUCR, 2015)

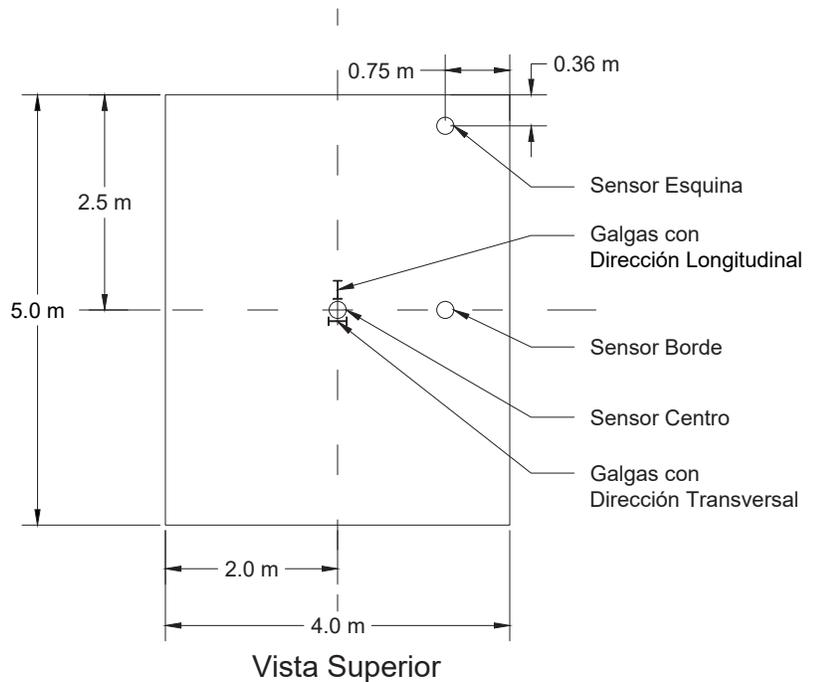
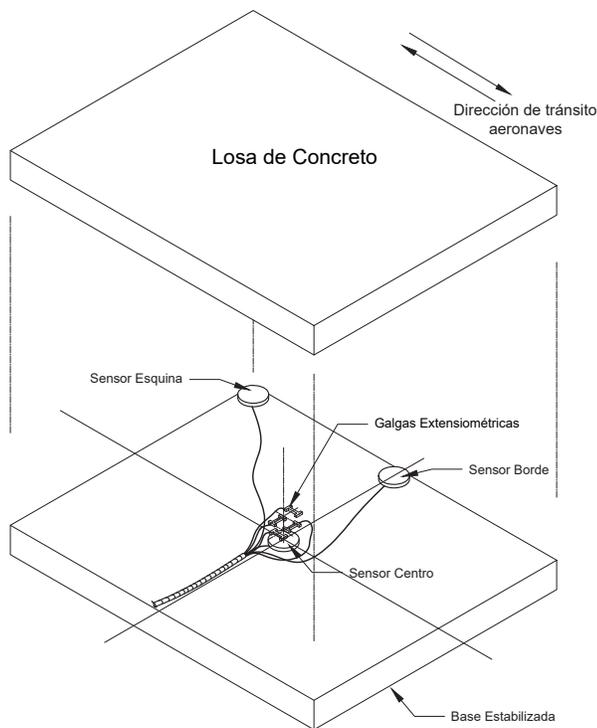


Figura 6. Vista Isométrica y Superior de la losa de concreto instrumentada y los sensores utilizados (LanammeUCR, 2015)

Con la colocación de los sensores de la forma observada, es posible obtener el registro de los esfuerzos verticales para las posiciones de Esquina, Centro y Borde de la losa cuando se dé el tránsito de un vehículo (respuesta debido a una carga externa). Asimismo, también se posibilita la adquisición de la respuesta del pavimento en estas posiciones debido a los efectos de alabeo por temperatura.

Las galgas extensiométricas fueron instaladas en ambas direcciones axiales (longitudinal y transversal) en la zona central de la losa. De esta forma es posible obtener la deformación unitaria que se da en ambas direcciones debido a cargas externas o a los efectos de alabeo por temperatura. Además, estas galgas extensiométricas se colocaron en la posición cercana al borde superior y al borde inferior de la losa de concreto (como se observa en la Figura 7), para obtener las deformaciones que suceden a estos niveles por los esfuerzos de compresión y tensión que se dan.

Los termopares se encuentran al mismo nivel de las galgas, lo cual permite obtener la temperatura de estas zonas de la losa y determinar el diferencial térmico que existe, causante de los efectos de alabeo comunes en los pavimentos rígidos. El tercer termopar no se encuentra dentro de la losa, ya que está siendo utilizada para obtener la temperatura del ambiente, sin embargo, se encontraba inhabilitada en el momento de las mediciones debido a problemas de conexión en el sensor.

RESPUESTA DE LOS PAVIMENTOS INSTRUMENTADOS

Con la instrumentación realizada, la respuesta de los pavimentos que puede ser adquirida corresponde a la del esfuerzo vertical y la deformación unitaria. En el caso del AIJS, se busca la respuesta generada por la aeronave A340-600, al ser una de las naves con una configuración de llantas más crítica (mayor carga sobre cada llanta en comparación a otras aeronaves) que arriban al aeropuerto con una carga máxima para su despegue de 365 ton (Airbus, 2017).

Para este proyecto, la adquisición de la respuesta de este pavimento se ha enfocado solo en el esfuerzo vertical, debido a las maniobras y forma de transitar realizado por la aeronave en estudio. La respuesta que se espera obtener corresponde al crecimiento y decrecimiento de una curva conocida como el pulso de carga que se genera a partir de una carga dinámica externa. Esto se ejemplifica en la Figura 8, asumiendo el paso de una llanta por el centro de la losa, en donde la respuesta es adquirida por una celda de presión.

La forma de la curva el pulso de carga será similar para las galgas extensiométricas, ya que su forma de detección es asemeja a las de las celdas de presión, pero la información que adquieren es completamente distinta (deformaciones en lugar de esfuerzos). En el caso de los efectos de alabeo por temperatura, se espera que para un período de 24 horas se observen incrementos y decrementos de esfuerzos verticales registrados debido al tipo de alabeo que se genere por las temperaturas durante el día y la posición del sensor. Con un alabeo hacia abajo, las posiciones de Borde y Esquina tendrán un incremento en los esfuerzos, mientras que la posición de Centro tendrá un decremento. Con un alabeo hacia arriba, se obtiene el efecto inverso. Lo anterior puede visualizarse en la Figura 9.

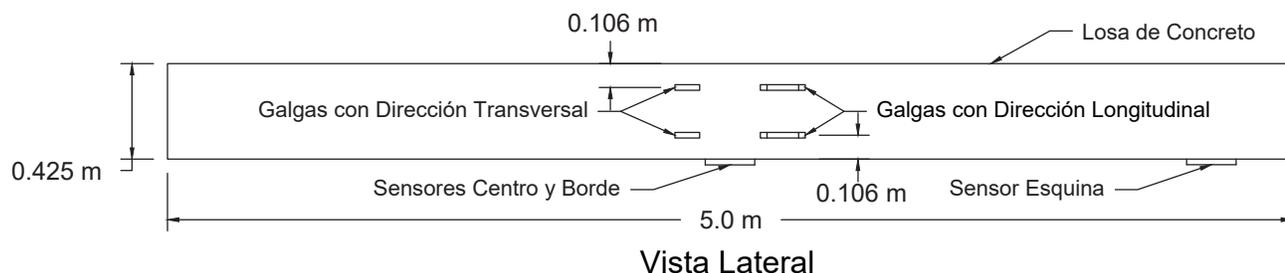
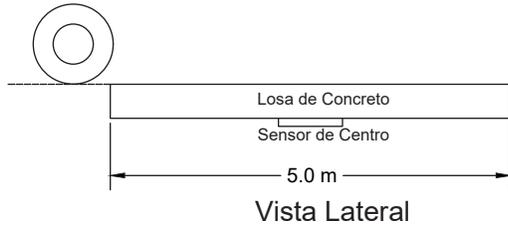
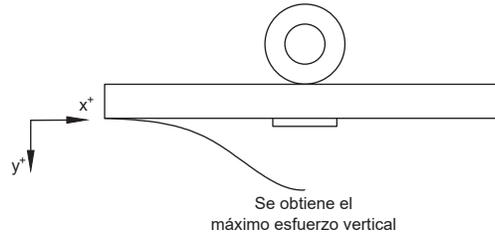


Figura 7. Vista Lateral de la losa de concreto instrumentada y los sensores utilizados (LanammeUCR, 2015)

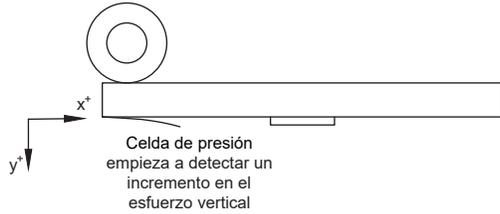
1. Carga se aproxima a la losa de concreto



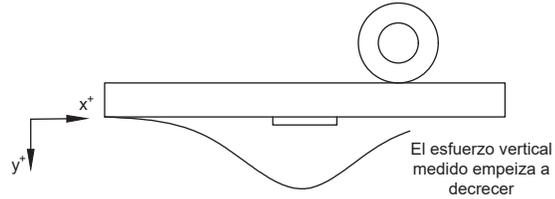
4. Carga llega a la celda de presión



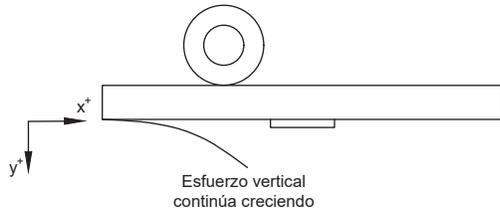
2. Carga entra a la losa de concreto



5. Carga se empieza a alejar de la celda de presión



3. Carga se aproxima a la celda de presión



6. Carga sale de la losa de concreto

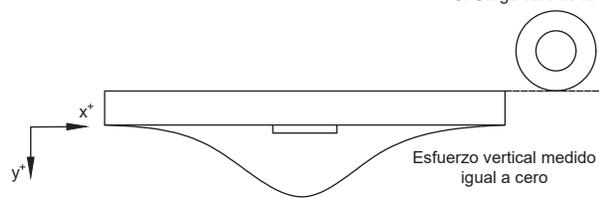


Figura 8. Forma de la respuesta generada por una carga externa

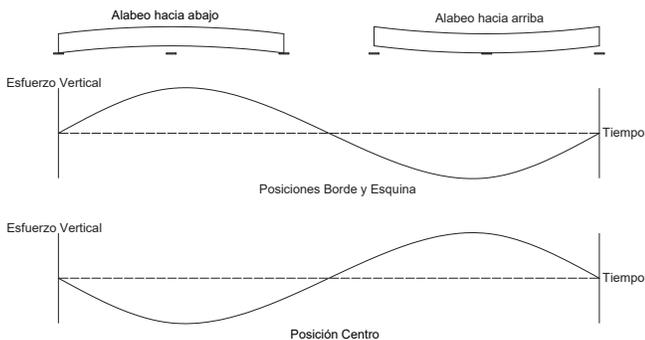


Figura 9. Forma de la respuesta generada por efectos de alabeo

Conociendo las formas de las respuestas esperadas, se facilita la interpretación e identificación de la información generada en campo, ya que puede determinarse si los datos adquiridos son los correctos o no. Por ejemplo, para la respuesta generada por una carga externa, se ha obtenido información como la mostrada en la Figura 10.

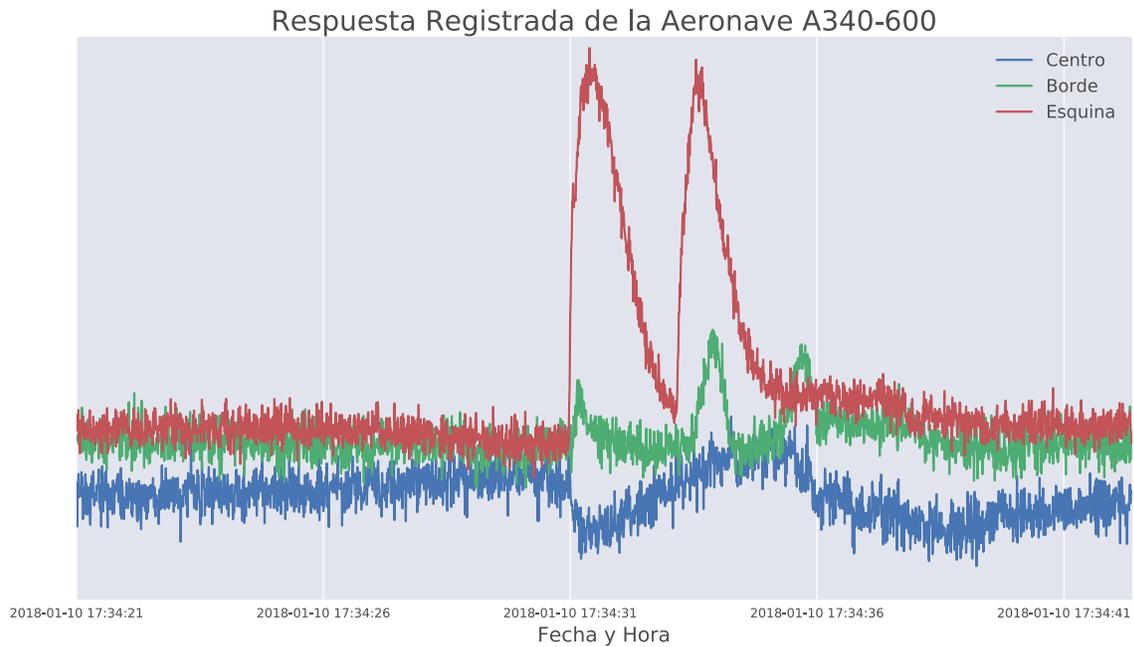


Figura 10. Respuesta del esfuerzo vertical obtenido para el tránsito de la aeronave A340-600

La celda de presión en la posición de Esquina es la que mostró un esfuerzo vertical mayor, esto debido a que las llantas de la aeronave A340-600 transitan principalmente sobre la zona en la que se encuentra este sensor. Otro aspecto por observar es que existen dos curvas consecutivas con la forma esperada de la respuesta, lo cual es debido a la configuración de las llantas (eje tándem) del vehículo en estudio que transita por la losa instrumentada esto se muestra en la Figura 11.

Con respecto a los efectos de temperatura, la respuesta generada (esfuerzos verticales) por los efectos de alabeo puede ser observada en la Figura 12, en donde puede notarse que se logra observar los incrementos y decrementos de esfuerzo vertical debido a los tipos de alabeo que la losa de concreto sufrió durante un período de 24 horas. Las temperaturas que provocan estos alabeos y cambios en el esfuerzo vertical se observan en la Figura 13, donde se tiene el registro de las 24 horas para las temperaturas de la zona superior e inferior de la losa.



Figura 11. Configuración de las llantas de la aeronave en estudio A340-600

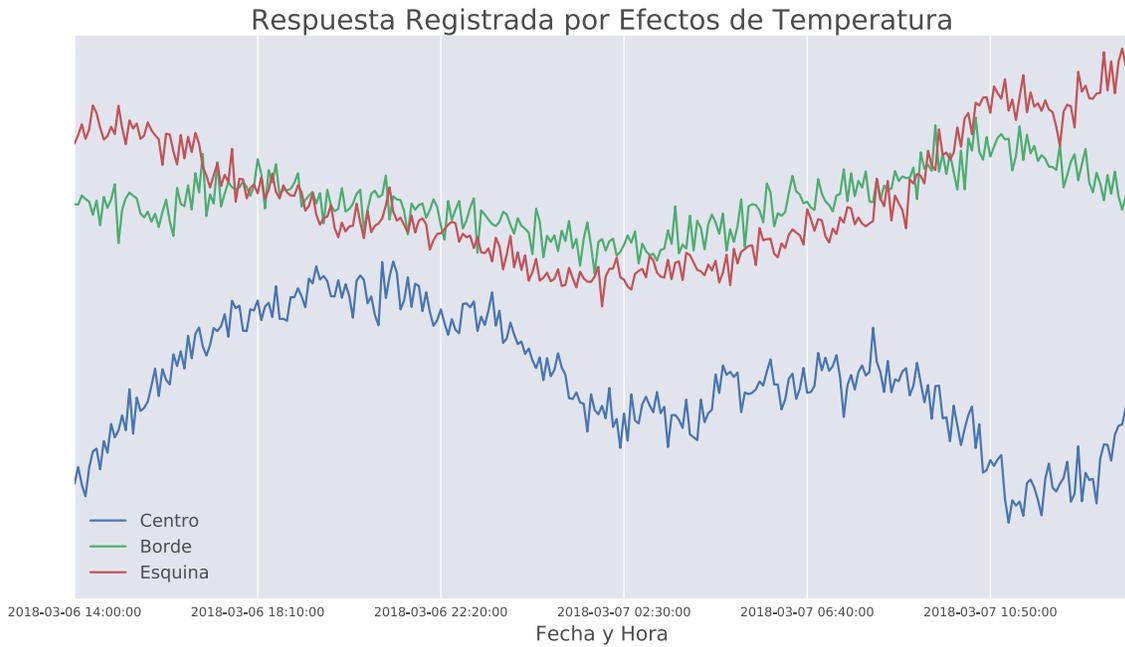


Figura 12. Respuesta del esfuerzo vertical generado por los efectos de alabeo en un período de 24 horas

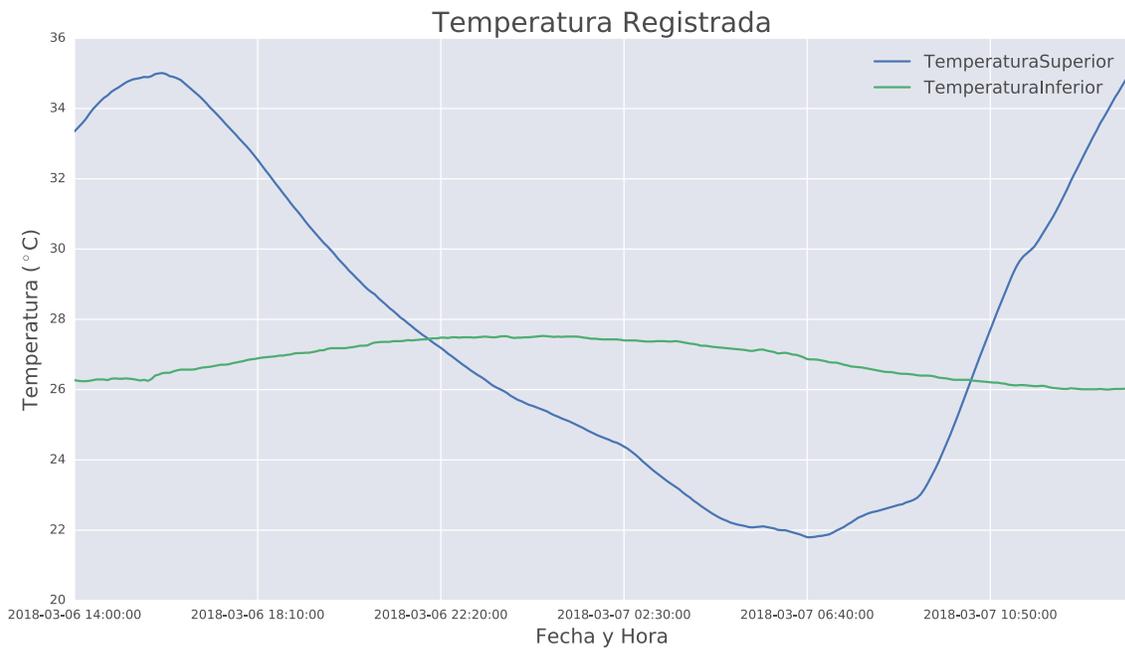


Figura 13. Temperaturas registradas en la parte superior e inferior de la losa de concreto a una profundidad de 10,6 cm de los extremos

APLICACIONES DE LA INSTRUMENTACIÓN DE PAVIMENTOS EN CAMPO

Dentro de las aplicaciones para las cuales se desea utilizar la instrumentación realizada se destacan los monitoreos y seguimientos periódicos en el tiempo de las estructuras de pavimento. En donde pueden registrarse los cambios en la respuesta a través del tiempo y relacionarlo con los deterioros que se den en el pavimento. Esto brinda la posibilidad de generar los modelos matemáticos utilizados para predecir los daños y desempeños de los pavimentos que son utilizados en guías de diseño Mecánico – Empíricos.

El uso de la instrumentación de tramos en servicio en conjunto con los ensayos de tipo APT posibilitan la optimización de los modelos matemáticos de predicción de daño y desempeño generados por estos últimos. Combinando estas dos metodologías, se logra el desarrollo de estos modelos matemáticos en el corto plazo y la optimización de estas a largo plazo, mediante lo observado en condiciones de campo. La profundización de los conocimientos en el campo de los pavimentos también se da de forma conjunta al observar los resultados que brindan la aplicación de estos métodos, al darse la posibilidad de experimentar con diferentes variables que tengan efectos sobre este tipo de estructuras.

Otro uso que puede brindársele a los resultados obtenidos es para la verificación y comparación de los métodos de cálculo que se utilizan actualmente para determinar las respuestas estructurales que se dan en los pavimentos (esfuerzos y deformaciones). Entre algunos de estos métodos se destacan la modelación por el Método de Elemento Finito para pavimentos rígidos y la Teoría de Multicapa Elástica en pavimentos flexibles, en donde la comparación de los resultados brindados por estos métodos con mediciones de campo permite conocer la

magnitud de aproximación que dan con respecto a la realidad, con lo que se puede validar el uso de estos métodos de cálculo.

Adicionalmente, con la información generada a partir de la instrumentación de pavimentos, puede lograrse la calibración de valores como gradientes térmicos o coeficientes de expansión térmica (para el caso de pavimentos rígidos) que actualmente se asumen de lo indicado por la teoría. Con valores calibrados de este tipo, se logran optimizar estas variables de diseño, adecuándolas a las zonas o proyectos en las que se desempeñaría un pavimento.

CONCLUSIONES

Aunque la instrumentación de pavimentos en condiciones de campo no es un método de estudio de pavimentos nuevo, su uso en la actualidad posee gran validez y muchas aplicaciones que son del interés del LanammeUCR como parte de sus objetivos para el desarrollo de la Guía de Diseño Estructural Mecánica – Empírica de pavimentos para Costa Rica.

Se ha observado que dentro de los usos que posee la instrumentación de pavimentos en campo se destacan: monitoreos estructurales, generación de modelos matemáticos para la predicción del daño y desempeño que poseen, optimización de estos modelos, validación de otros métodos de estudio, desarrollo de experimentos para la validación de diseños de pavimentos y sus variables, entre otros.

Al presentarle la oportunidad de obtener resultados deseados a partir de las instrumentaciones que se realizan y generar una amplia cantidad de aplicaciones posibles, continúa siendo del interés del LanammeUCR seguir y expandir el uso de esta metodología para lograr sus objetivos con respecto al estudio y análisis de los comportamientos que presentan los pavimentos en Costa Rica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguiar, J. P., Corrales, J. P., Elizondo, F., & Loría, L. G. (2012). *PaveLab and heavy vehicle simulator implementation at the National Laboratory of Materials and Testing Models of the University of Costa Rica*. LanammeUCR, San José.
2. Airbus. (2017). *A340-600 Aircraft Characteristics/Airport and Maintenance Planning*. Francia.
3. FHWA. (1999). *Introduction to LTPP Data*. Virginia: U.S Department of Transportation.
4. LanammeUCR. (2015). *Base de Datos Sobre Instrumentación de Pavimentos*. San José.
5. Leiva, F., & Camacho, E. (2014). *LM-PI-UMP-028-R1: Instrumentación y resultados del primer ensayo acelerado a escala natural en Costa Rica*. LanammeUCR, San José.
6. Leiva, F., & Camacho, E. (2015). *LM-PI-UMP-042-R1: Evaluación PAVELAB Tramos 002AC4*. LanammeUCR, San José.
7. Loría, L. G. (2013). *Desarrollo de la Guía de Diseño de Pavimentos de Costa Rica*. LanammeUCR, San José.
8. MnROAD. (2015). *Instrumentation and Data Collection at MnROAD*. Obtenido de Minnesota Department of Transportation: [http://www.dot.state.mn.us/mnroad/calendar/STA2015Presentations/3%20-%20Instrumentation%20and%20Data%20Gathering%20\(Palek\).pdf](http://www.dot.state.mn.us/mnroad/calendar/STA2015Presentations/3%20-%20Instrumentation%20and%20Data%20Gathering%20(Palek).pdf)

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.

Ing. Luis Mardones Parra

Universidad de La Frontera.

Temuco. Chile. luis.mardones.p@ufrontera.cl

Dra. Alejandra Calabi Floody

Universidad de La Frontera.

Temuco. Chile. alejandra.calabi@ufrontera.cl

Dra. Elsa Sánchez Alonso

Universidad de La Frontera.

Temuco. Chile. elsa.sanchez@ufrontera.cl

Dr. Gonzalo Valdés Vidal.

Universidad de La Frontera.

Temuco. Chile. gonzalo.valdes@ufrontera.cl

Fecha de envío: 19 de junio de 2018 / **Fecha de aprobación:** 17 de agosto de 2018

RESUMEN

Las carreteras están expuestas a agentes externos, como la lluvia, radiación solar, el aumento del flujo vehicular, entre otras, que contribuyen a generar deterioros en los pavimentos asfálticos. Esto hace necesaria la búsqueda nuevas tecnologías capaces de dar solución a estas condiciones externas. En la actualidad, la utilización de asfaltos modificados con polímeros es una de las alternativas más utilizadas, puesto que le otorga una mayor durabilidad a la estructura de pavimento. Sin embargo, la literatura indica que existen otras técnicas lo suficientemente competitivas que permiten la obtención de buenos resultados, como el uso de fibras sintéticas. En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo principal evaluar la influencia de la incorporación de fibras sintéticas de aramida y polipropileno en las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas. Para ello, se realizó un diseño de una mezcla IV-A-12 (comúnmente utilizada en Chile) con un ligante tipo CA-2 (de acuerdo a las especificaciones chilenas) con incorporación de diferentes porcentajes de fibras. Las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas modificadas fueron comparadas con una mezcla de referencia. A través de una fase experimental realizada, se evaluaron las propiedades de fisuración térmica, daño por humedad y el comportamiento frente a las deformaciones permanentes. Los resultados muestran que la adición de las fibras sintéticas de aramida y polipropileno reducen el daño por humedad y el ahuellamiento, mejorando también la respuesta frente a la fisuración térmica.

PALABRAS CLAVES: Mezclas Asfálticas, Fibras sintéticas, fibras de aramida, fibras de polipropileno.

ABSTRACT

Roads are exposed to external conditions such as rain, solar radiation and the increase of vehicular flow, among others; which generates distresses on asphalt pavements. It is necessary to research new technologies being able to improve the behavior of pavements against external conditions. Currently, the use of polymer modified asphalts is one of the most used alternatives, because they provide a greater durability to the pavement structure. However, literature review has shown that there are other competitive techniques to obtain good results, such as the use of synthetic fibers. Therefore, the main objective of this research is to evaluate the influence of the addition of aramid and polypropylene synthetic fibers in the mechanical properties of asphalt mixtures. For this purpose, a IV-A-12 asphalt mixture (mainly used in Chile) with a CA-24 asphalt binder (according to Chilean specifications) were manufactured, incorporating different percentages of synthetic fibers. The mechanical properties of the modified asphalt mixtures were compared with a reference hot asphalt mixture. Through the experimental phase, thermal cracking, moisture damage and rutting properties were evaluated. The results have shown that the use of aramid and polypropylene fibers in asphalt mixtures reduced the moisture damage and rutting, nevertheless the thermal cracking was improved.

KEY WORDS: Asphalt mixture, Synthetic fiber, Aramid fiber, Polypropylene fiber.

INTRODUCCIÓN

Los pavimentos permanentemente son expuestos a las cargas del tránsito y a los agentes ambientales, lo que genera un progresivo deterioro, teniendo como resultado la disminución de los estándares de confort y calidad, y un aumento en los costos de mantenimiento y conservación. La solución a este problema, radica en la utilización de metodologías constructivas llamativas desde el punto de vista técnico, con el potencial de combatir los agentes que disminuyen la capacidad estructural de los pavimentos.

La mejora en las propiedades mecánicas en los pavimentos se consigue con la incorporación de agentes modificadores que al interactuar en la mezcla asfáltica, proporcionan un aumento en el desempeño mecánico de éstas (Abtahi, Sheikhzadeh, & Hejazi, 2010). Dentro de los distintos modificadores de mezclas se encuentran los aditivos, ceras, polímeros, aceites, entre otros, destacándose los polímeros sobre los demás por ser uno de los más comercializados y por proveer un considerable aumento del desempeño mecánico de las mezclas (Al-Hadidy & Yi-qiu, 2009; Haddadi, Ghorbel, & Laradi, 2008). Sin embargo, los avances tecnológicos y la disminución de recursos han obligado a optar por materiales más innovadores, con buenas prestaciones mecánicas y con buena afinidad con las mezclas asfálticas, como lo es el uso de fibras sintéticas y/o naturales las cuales han demostrado tener la capacidad de proveer de una mayor durabilidad a los pavimentos. (Abiola, Kupolati, Sadiku, & Ndambuki, 2014; Abtahi et al., 2010).

La literatura muestra que existen distintos tipos de fibras, las cuales proveen de características positivas a las mezclas asfálticas. Abtahi et al.(2010) al realizar una revisión sobre el uso de fibras de polipropileno, poliéster, amianto, celulosa, carbón, vidrio y nailon en mezclas asfálticas, mencionaron que cambia la viscoelasticidad de las mezclas (Huang & White, 1996), aumentan los módulos dinámicos (Wu, Ye, Li, & Yue, 2007), disminuye la susceptibilidad al agua, mejorando el comportamiento frente a las deformaciones permanentes y aumentando la resistencia a la fisuración térmica (ciclos de hielo-deshielo)(Abtahi et al., 2010). También se ha utilizado fibra de vidrio por vía seca, la cual provee de una mejor capacidad frente a los esfuerzos de tensión cortante (cizalle) gracias al efecto de puente generado por las fibras a lo largo del plano de falla y un aumento de hasta un 50% en su % ITR (Yoo & Kim, 2015). Ahmad & Kareem (2015) estudiaron la incorporación de fibras de polipropileno y concluyeron que estas son capaces de mejorar la vida a la fatiga de las mezclas (Ahmad & Kareem, 2015), pudiendo ser explicado por Kutay, M. E.,

Gibson, N., & Youtcheff, (2008); Yoo & Kim, (2015), quienes mencionan que las fibras actúan como un puente entre microgrietas generadas por las repeticiones de cargas, absorbiendo y transmitiendo las tensiones, limitando su propagación y crecimiento (Kutay, M. E., Gibson, N., & Youtcheff, 2008; Yoo & Kim, 2015), otorgándole una mayor flexibilidad a la mezcla (Wu et al., 2007). A su vez, se ha estudiado la incorporación de fibras sintéticas como la aramida, la que gracias a su alta rigidez es utilizada para mejorar la resistencia mecánica de mezclas asfálticas (Abiola et al., 2014). Este tipo de fibras también es utilizada en combinación con otras fibras cuyo punto de fusión es similar a las temperaturas de fabricación de las mezclas asfálticas, como lo son las fibras de poliolefina y polipropileno, donde es posible mejorar el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas (Aliha, Razmi, & Mansourian, 2017; Kalloush, Zeiada, Biligiri, Rodezno, & Reed, 2010).

Dentro de las ventajas que tiene la incorporación de fibras en el ligante asfáltico, Wu, Ye, & Li, (2008) en su investigación menciona que con el aumento del porcentaje de fibras de poliéster es posible aumentar la viscosidad del ligante asfáltico (Wu et al., 2008), mientras que Afonso, Dinis-Almeida, & Fael, (2017) concluye que el aumento de fibras de celulosa requiere aumentar el contenido de ligante asfáltico en la mezcla, el cual se retiene en las fibras y permite un mejor recubrimiento de los áridos, sin afectar el comportamiento frente a las deformaciones permanentes (Afonso et al., 2017)

En otros campos de investigación se ha logrado conseguir mejorar las propiedades de autoreparación en la matriz árido-ligante con la adición de fibras metálicas, capaces de reparar grietas de hasta 0.639 mm (Pamulapati, Elseifi, Cooper, Mohammad, & Elbagalati, 2017; Yang, Kim, & Yoo, 2016).

La respuesta mecánica de las mezclas con adición de fibras está directamente relacionada con la dosificación establecida en la fase de diseño ya que así es posible optimizar el refuerzo de las fibras y conseguir aumento en la rigidez de la mezcla (Chen, Xu, Chen, & Zhang, 2009; Reyes, O., Camacho, J. & Mejia, 2017). Generalmente la incorporación de fibras en la mezcla reduce las densidades y aumentan los huecos, debido a que las fibras absorben el ligante asfáltico (Chen et al., 2009), por lo mismo, es que una de las formas de evitar este fenómeno, es aumentar las temperaturas de fabricación y el grado de compactación (Xu, Chen, & Prozzi, 2010).

Los métodos de incorporación de las fibras son a través de la vía seca y húmeda. La literatura demuestra que la vía seca permite una mejor distribución de la fibra sobre la mezcla, ya que esta técnica de incorporación es más sencilla y se minimiza

considerablemente la aglutinación de la fibra en la mezcla con respecto a la incorporación en húmedo (Abtahi et al., 2010).

En numerosas investigaciones se han utilizado diferentes tipos, tamaños y proporciones de fibras para mejorar el rendimiento de los materiales asfálticos. Rápidamente las ventajas que generan la aportación de fibras sobre el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas está siendo reconocida y está siendo considerada como un buen agente modificador, siendo contemplada como una solución dentro procedimientos estandarizados como es el caso de EE.UU, donde la Asociación de Pavimentos Flexibles de Ohio desarrolló una especificación estándar para el uso fibra de polipropileno para la construcción de pavimentos de alto desempeño (ITEM 400 HS., 1998).

OBJETIVOS

En base a lo anteriormente mencionado, el objetivo de esta investigación es evaluar el desempeño mecánico de mezclas asfálticas con adición de fibras sintéticas de polipropileno y aramida por vía seca.

METODOLOGÍA

Se realizó el diseño de una mezcla con el uso de una granulometría semidensa IV-A-12 (comúnmente utilizada en Chile para capas de rodadura), cumpliendo con los estándares exigidos de acuerdo a la normativa chilena, Tabla 1. Se utilizó un ligante tipo CA-24 (especificación chilena) y áridos de origen fluvial. Por otra parte, se utilizó una combinación de las fibras sintéticas de aramida y polipropileno en una relación 1:7 en peso respectivamente (Figura 1), cuya caracterización fue desarrollada por Mello, Kaloush, & Biligiri, (2008), resumidas en la Tabla 2. Para la fabricación de las mezclas reforzadas con fibras, se consideró una incorporación de un 0.05% de fibra en relación al peso de la mezcla, además hubo un procedimiento de dispersión de las fibras de aramida la cual fue incorporada en tres proporciones iguales sobre los áridos, mientras que las fibras de polipropileno fueron incorporadas directamente sobre la mezcla una vez incorporado el ligante asfáltico. El contenido óptimo de ligante asfáltico fue de un 5.2% sobre el peso de los áridos, considerándose la misma dosificación para la mezcla patrón como para la mezcla con fibras. Adicionalmente, en la fase de fabricación se realizó un proceso de acondicionamiento de la mezcla (AASHTO R30), que simula el envejecimiento a corto plazo y la absorción del ligante que se produce durante la fase de precompactación del proceso de construcción.

Tabla 1. Diseño mezcla patrón. Cumplimiento de los criterios del diseño Marshall.

Parámetro	Unidad	Valor	Especificación
Compactación	Golpes	75 golpes por cara	75 golpes por cara
Estabilidad	N	14,040	Min. 9,000
Fluencia	0.25mm	9.3	Min. 8 y Max. 16
Huecos en la mezcla	%	4.8	Min. 4 y Max.
VAM	%	15.4	Min. 15
Densidad	Kg/m ³	2,360	-

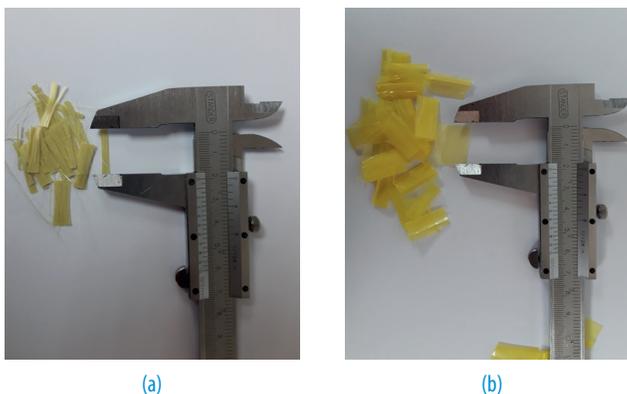


Figura 1 Fibras sintéticas. (a) Fibras de aramida. (b) Fibras de polipropileno.

TABLA 2. Caracterización fibras sintéticas. Fuente: Kaloush (2008)

Fibras	Aramida	Polipropileno
Forma	Monofilamentos	Fibrilida retorcida
Peso Específico	1.45	0.91
Resistencia a la Tracción (MPa)	3,000	483
Largo (mm)	Max. 38.1	19.05
Color	Amarillo	Canela
Resistencia Acido / Alcalino	Inerte	Inerte
Temperatura de Descomposición °C	>450	157

La mezcla patrón junto a la mezcla con fibras fueron sometidas a distintos ensayos que permiten evaluar sus propiedades mecánicas de desempeño frente a la resistencia a la fisuración, daño por humedad y deformaciones plásticas, también se obtuvieron propiedades volumétricas y de módulo de rigidez (UNE-12697-26).

Módulo de rigidez

La metodología utilizada para evaluar la rigidez de las mezclas, es la especificada en la norma española UNE-12697-26. Anexo C. Ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas (IT-CY). Esta consiste en la aplicación de impulsos de carga repetidos que se alternan con tiempos de reposo a lo largo del plano diametral de la probeta. Se realiza el registro de la deformación diametral horizontal de la probeta durante la aplicación de cada impulso de carga. Las temperaturas evaluadas fueron 15°C, 20°C y 25°C, con una precisión de $\pm 0.5^\circ\text{C}$.

Ensayo Fénix

El método FENIX permite evaluar la resistencia a la fisuración a través de la aplicación de un esfuerzo a tracción directa a la mitad de una probeta cilíndrica. El procedimiento de compactación de las probetas sigue la metodología establecida por la norma UNE-EN 12697-31. La probeta de 100 mm fabricada mediante compactador giratorio, se secciona por la mitad y se le realiza una entalla de 5 (mm) a lo largo de su plano diametral y así poder inducir el plano de fallo. Posteriormente, mediante un pegamento epóxico, se fijan unas placas de acero sobre las caras planas separadas por la entalladura. Una vez fijadas las placas, se procede a fijar a los soportes de la prensa, lo cual permite un movimiento de rotación respecto de las fijaciones. Finalmente, se somete probetas semicirculares a un esfuerzo de tracción directa a una velocidad de desplazamiento constante de 1 mm/min hasta llegar a la rotura de la probeta (Valdés et al., 2013). Las temperaturas evaluadas fueron -10°C , 0°C y 10°C , con una precisión de $\pm 1^\circ\text{C}$.

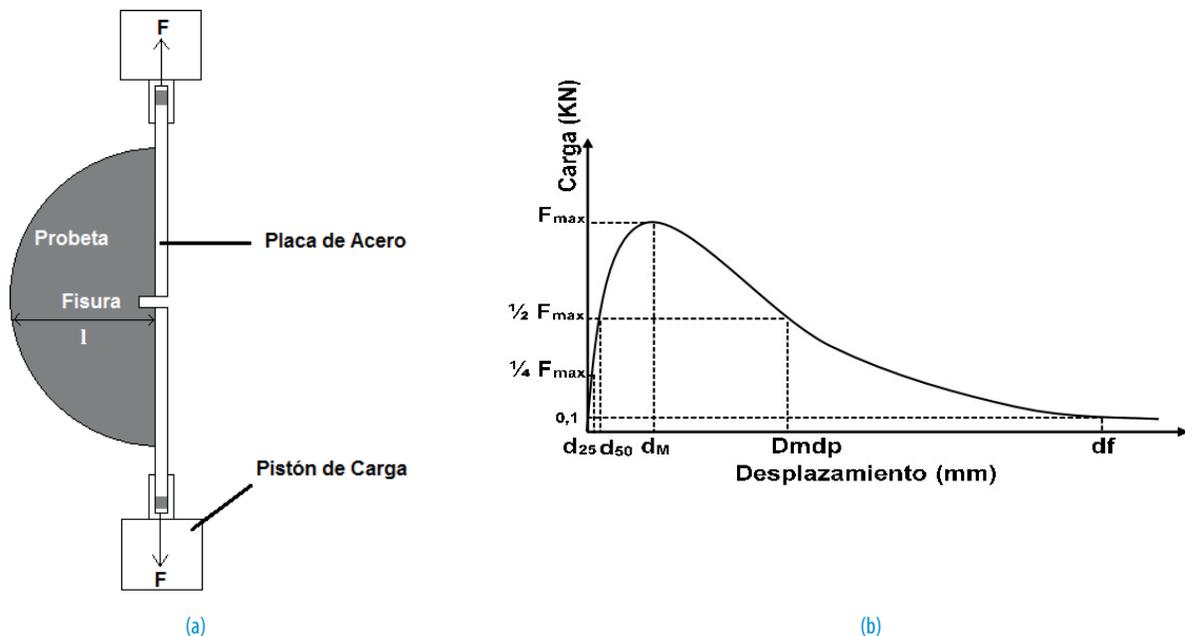


Figura 2. Ensayo FENIX. (a) Montaje ensayo Fénix, (b) Gráfica carga- desplazamiento. Fuente: (Valdés et al., 2009)

Del procedimiento de ensayo se puede obtener una curva en función de los datos adquiridos de carga aplicada y su desplazamiento, Figura 2. De esta curva se obtienen los parámetros involucrados en el proceso de fisuración: Carga máxima de tracción, índice de rigidez a la tracción, desplazamiento 50% Fmax postpico, energía disipada e índice de tenacidad

Carga máxima de tracción (F_{max}): Es el mayor valor alcanzado por la probeta ante los esfuerzos de tracción que es sometida.

Índice de Rigidez a Tracción (I_{RT}): Establece un indicador del grado de rigidez del material, mostrando que tan flexible o rígida es la mezcla asfáltica evaluada.

Desplazamiento 50% Fmax postpico (Δ_{mdp}): Es el desplazamiento registrado una vez que la carga ha caído a la mitad del valor de la carga. Este parámetro permite indicar la capacidad de la mezcla para admitir deformaciones.

Energía disipada en el proceso de Fisuración (G_p): Trabajo realizado en el proceso de fisuración dividido en el área de fractura. Es la representación de la fuerza de adhesión de los materiales de la mezcla asfáltica.

Índice de Tenacidad (I_T): Es la tenacidad de la mezcla asfáltica, que es la capacidad de mantener unidos los materiales que constituyen la mezcla una vez que se ha iniciado el fallo de fisuración.

Ensayo de Sensibilidad al Agua

Este ensayo busca determinar el efecto que produce el agua en la resistencia de la mezcla asfáltica, sometiendo las probetas a un efecto de saturación en agua a temperatura media de 40°C. Para este procedimiento se fabrican probetas mediante el compactador Marshall, las cuales se separan en dos grupos iguales, un grupo es acondicionado a temperatura ambiente (20°C) entre 68 y 72 horas, y el otro grupo se somete a un proceso de saturación y luego se acondiciona en un baño de agua a temperatura controlada de 40°C por el mismo periodo de tiempo que el grupo seco. Una vez terminado este periodo se dejan acondicionando juntas a 20°C, por mínimo de 2 horas antes de realizar el ensayo de tracción indirecta. La velocidad de desplazamiento del axial que ejerce la carga es de 50mm/min (UNE EN 12697:12).

Hamburg Wheel Tracking

Este ensayo busca medir el grado de deformación permanente, el daño por humedad y el deterioro al que se ve expuesta una mezcla al ser sometida a una serie de ciclos de pasadas de una rueda cargada dentro de un recipiente lleno de agua, que mantiene la temperatura del sistema que oscila entre los 25 °C y 70 °C, siendo 50 °C la temperatura mayormente utilizada.

Los resultados obtenidos expresan el grado de ahuellamiento que presentan los tipos de mezclas y la presencia de *stripping* en ellas (AASHTO T324-14). Debido a la falta de normativas en Chile, el cumplimiento de las deformaciones plásticas se verifica mediante las especificaciones de los Departamentos de Transporte de los Estados de Texas y Colorado de EEUU.

Las probetas usadas en este ensayo tienen 150 [mm] de diámetro y son compactadas mediante el compactador giratorio hasta alcanzar un porcentaje de huecos de un $7 \pm 1\%$. Para estas pruebas experimentales se estableció un periodo de acondicionamiento de 30 minutos a 50°C, posteriormente se aplica una carga en movimiento de 705 ± 4.5 [N] con una duración de 10000 ciclos.

Adicionalmente, se determinó la pendiente de ahuellamiento entre los ciclos 5.000 y 10.000 en función de la profundidad de la huella, ecuación 1.

$$WTS_{Agua} = \frac{H_{10.000} - H_{5.000}}{5} \quad (1)$$

donde

WTS_{Agua} = Pendiente de ahuellamiento (mm/10³ ciclos)

H = Profundidad de la huella.

RESULTADOS

Densidad y Módulo de Rigidez

Con respecto a la densidad, es posible observar que las probetas fabricadas con incorporación de fibras sintéticas no presentan grandes diferencias con respecto a la mezcla patrón, ya que no se ve reflejado una variación superior al 1%, Figura 3. Este comportamiento se manifiesta independientemente del tipo y nivel de compactación utilizado en el proceso de fabricación.

Al analizar los valores de módulo de rigidez entre 15 °C y 25 °C, es posible observar que las mezclas reforzadas con fibras presentan en promedio valores de módulo de rigidez un 13% inferior que las mezcla patrón, cumpliendo todas mezclas con el 97% de la densidad Marshall exigido en las especificaciones de construcción, Figura 4. Estos resultados no concuerdan con lo determinado en otra investigación en que se evaluó el módulo de rigidez en otro rango de temperaturas (4,4°C, 37,7°C y 54,4°C). Esta investigación indica que las fibras de aramida poseen un coeficiente de dilatación térmica negativo, lo que genera una mayor contracción con el aumento de la temperatura, mejorando el refuerzo en la mezcla, aumentando su módulo de rigidez (Kaloush, Biligiri, Zeiada, Rodezno, & Reed, 2010).

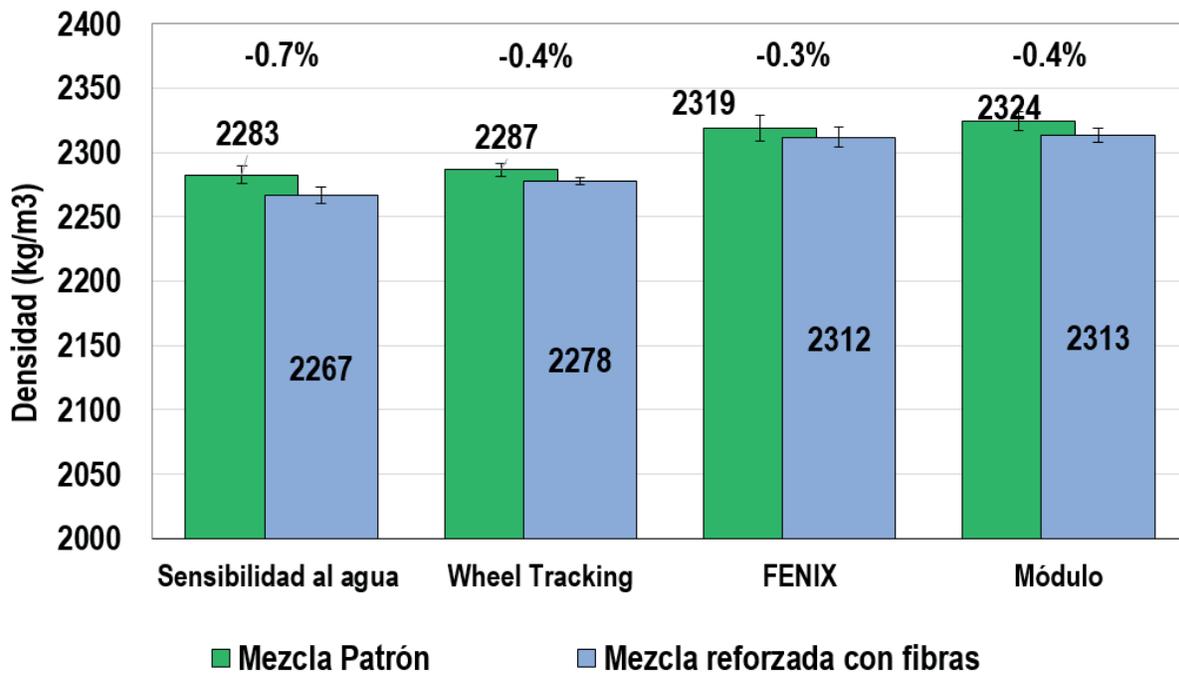


Figura 3 Comparación de las densidades de las mezclas evaluadas

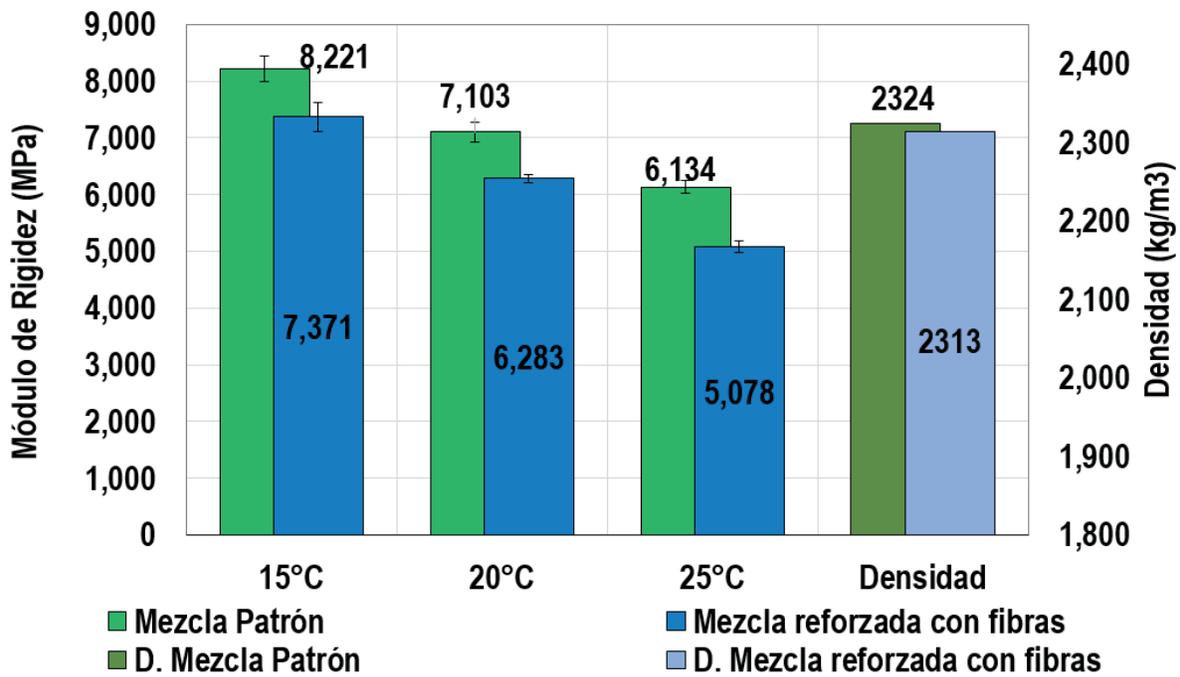


Figura 4 Módulos de Rigidez de las mezclas evaluadas a la temperatura de 15°C, 20°C y 25°C vs densidad según compactación Marshall.

Resistencia a la Fisuración.

La adición de fibras sintéticas de polipropileno y aramida tienen una gran incidencia en el comportamiento frente a la fisuración térmica (Figura 5). Se observó que estas mezclas modificadas presentaron una mayor resistencia a tracción (F_{max}) a la temperatura de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, mejorando entorno al 13% respecto a una mezcla patrón. A la temperatura de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ la mezcla modificada presentó un comportamiento similar respecto a la mezcla de referencia y a los $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ se registró una disminución entorno a un 14% en el F_{max} .

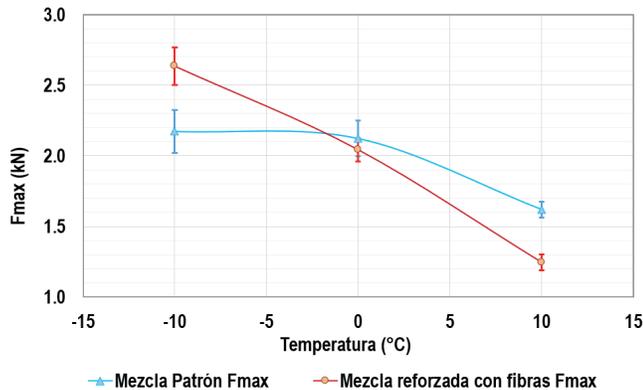


Figura 5 Resistencia a la fisuración vs temperatura

También se observó que la mezcla con fibras presentó un comportamiento más flexible a la mayor temperatura evaluada, registrando una mayor capacidad de deformación (Δ_{mdp}) respecto a la mezcla patrón. A las temperaturas de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ no se perciben diferencias significativas, Figura 6. A su vez, es posible percibir que a la temperatura de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ la mezcla con incorporación de fibras registra un valor promedio de IRT igual a $8,15\text{ kN/mm}$, muy similar al de la mezcla patrón con un valor promedio de $8,23\text{ kN/mm}$. A la temperatura de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ la mezcla reforzada con fibras presenta una mayor rigidez a tracción. Sin embargo, a esta temperatura se observa una mayor dispersión estadística. En cuanto a la rigidez a la temperatura de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ se puede observar un comportamiento similar al de la mezcla patrón, no obstante, existe un aumento de casi un 41% de su capacidad de flexión.

En la Figura 7 se puede observar que tanto el parámetro de energía disipada como el de índice de tenacidad aumentan con el incremento de la temperatura. Cabe señalar que la mezcla con la incorporación de fibras sintéticas en todo el rango de temperatura evaluado presenta una mayor tenacidad respecto a la mezcla patrón (dado por el mayor valor promedio de GD), no obstante, se destaca un incremento considerable entre los

$0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. También se observó que la mezcla con fibras permite disipar una mayor cantidad de energía en el proceso de fisuración, describiendo un aumento casi lineal en todo el rango evaluado, mientras que la mezcla de referencia no presenta un aumento de GD tan significativo comparado con la mezcla reforzada con fibras. Estos resultados son comparables con el trabajo de Kaloush, Zeiada, et al., (2010), quien observó un aumento entre el 50% y 75% de la energía de fractura al utilizar fibras sintéticas de iguales características, asegurando que con el aumento de la energía de fractura existe una menor fisuración térmica.

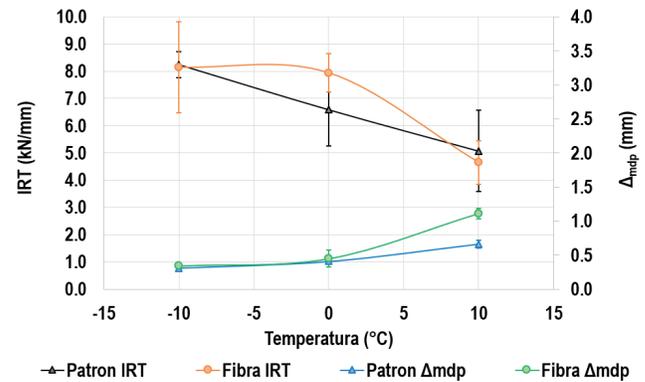


Figura 6 Relación entre IRT vs Δ_{mdp} a distintas Temperaturas.

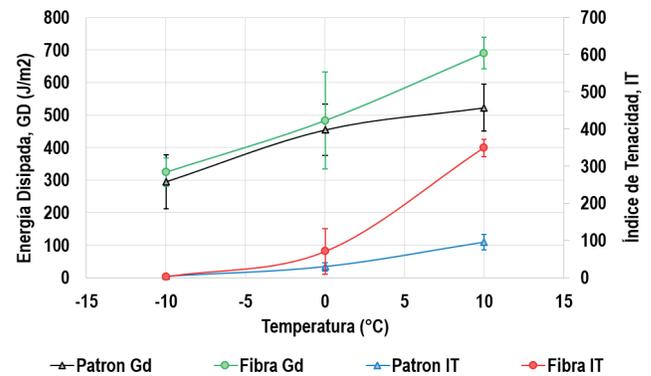


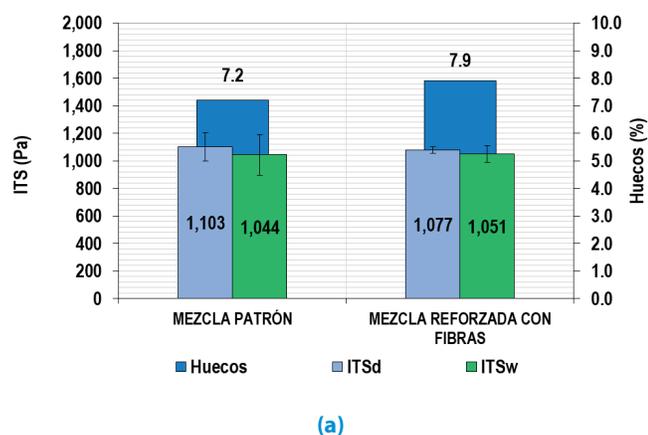
Figura 7 Relación entre la energía disipada vs Índice de tenacidad a distintas Temperaturas.

Sensibilidad al Agua

La normativa chilena no emplea el parámetro de sensibilidad al agua en el diseño de mezclas asfálticas, por lo que se utilizarán los límites de cumplimiento de la norma española para evaluar los resultados obtenidos. Según el pliego de prescripciones técnicas español (PG-3), se requiere un mínimo de 80% del valor de ITSR para emplear la mezcla en capa base o intermedia, y un 85% para capa de rodadura.

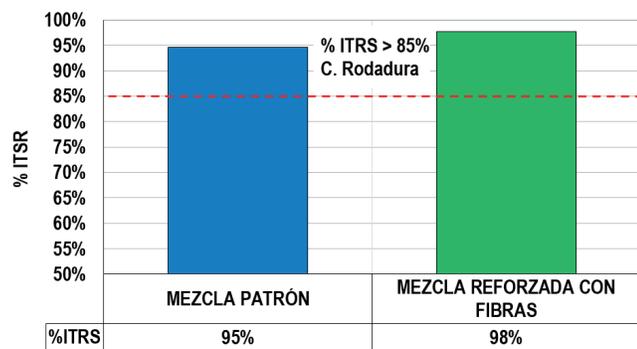
En la Figura 8(a) es posible observar que la mezcla reforzada con fibras posee una menor resistencia a la tracción en seco (ITSd) que la mezcla patrón, sin embargo, en húmedo (ITSw), la resistencia a la tracción es muy similar, destacándose una disminución mayor para la mezcla patrón entorno al 5%, mientras que para la mezcla modificada con fibras ocurre una disminución de un 2%. También es posible notar que las mezclas modificadas con fibras a pesar de tener un mayor porcentaje de vacíos (7,9%) que la mezcla patrón (7,2%), no es tan susceptible al daño generado por la acción del agua en la cohesión entre el árido y el ligante asfáltico.

En general, los resultados obtenidos muestran que ambas mezclas evaluadas cumplen con lo establecido en el pliego de prescripciones técnicas español, pudiéndose emplear ambos tipos de mezclas como capa de rodadura (ITSR > 85%). Los resultados muestran que las mezclas con fibras sintéticas poseen un valor de ITSr de un 98% siendo levemente mayor que la mezcla patrón con un 95%, acorde al cálculo realizado bajo la norma europea, Figura 8(b).



(a)

Figura 8. Susceptibilidad al agua mezcla patrón y mezcla reforzada con fibras sintéticas.



(b)

Figura 8. Susceptibilidad al agua mezcla patrón y mezcla reforzada con fibras sintéticas.

Deformaciones Plásticas.

Para analizar comportamiento de las mezclas frente a las deformaciones plásticas se utilizó los parámetros establecidos en la especificación estadounidense debido a que en Chile no existe normativa para realizar el ensayo. Se empleó el criterio establecido por el Departamento de Transporte de Colorado (CDOT) que indica una profundidad máxima de la huella de 10mm.

Se puede observar que la mezcla reforzada con fibras sintéticas tiene un mejor comportamiento frente a las deformaciones plásticas, pues tuvo un ahuellamiento promedio de 3,94 mm mientras que la mezcla patrón registró 6,29 mm. Las desviaciones respecto al promedio del ahuellamiento final registran 0.8 mm para mezcla patrón y 0.3 mm para mezcla con fibra. También se observa que la mezcla patrón posee una pendiente de ahuellamiento ($WTS_{Agua(5000-10000)}$) de 0.28 mm/10³ ciclos y la mezcla reforzada con fibras un $WTS_{Agua(5000-10000)}$ de 0.15 mm/10³ ciclos, lo que significa que la mezcla con fibras presenta un menor incremento en el tiempo en el ahuellamiento que la mezcla patrón. Es comportamiento es similar al descrito por Mello et al., (2008), quienes mencionan que al incorporar estas fibras en las mezclas asfálticas es posible conseguir un ahuellamiento gradual en la mezcla, mejorando la respuesta frente a las deformaciones permanentes, debido al refuerzo generado por las fibras de aramiditas.

Además, se evaluó el efecto de *stripping*, observándose que ninguna de las mezclas presentó este fenómeno debido a que no hubo un cambio en pendiente de la curva de ahuellamiento. A modo general, la mezcla patrón y la mezcla modificada con fibras sintéticas cumple con el valor de ahuellamiento máximo permisible por esta normativa del CDOT, Figura 9.

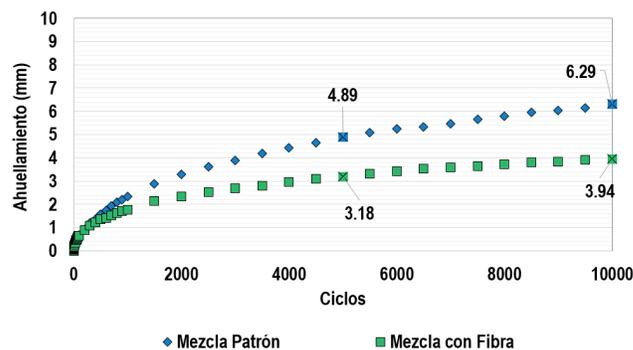


Figura 9. Curva de ahuellamiento de la mezcla patrón y mezcla reforzada con fibras sintéticas.

CONCLUSIONES

En este trabajo se evaluó el desempeño mecánico de mezclas asfálticas con la incorporación de fibras sintéticas a través de una metodología experimental. En base en los resultados de los ensayos realizados se puede concluir lo siguiente:

- Las metodologías empleadas en la fabricación de probetas fueron realizadas bajo una misma energía de compactación, cumpliendo con las especificaciones establecidas por las normas empleadas. Al utilizar la misma energía de compactación las densidades de las mezclas con incorporación de fibras no presentaron variaciones significativas respecto a las densidades de la mezcla patrón.
- La aportación de las fibras sintéticas muestra una disminución del módulo de rigidez entre un 10 y 17% en comparación a la mezcla de referencia para las temperaturas evaluadas, destacando que ambas mezclas cumplen con el 97% de la densidad Marshall.
- El aporte de las fibras a la mezcla resulta beneficioso en el rango de temperaturas que va desde los 0 °C a 10 °C mejorando su capacidad de flexión, tenacidad y permitiendo una disipación de energía mas eficiente en el proceso de fisuración. Sin embargo, con la adición a la temperatura de -10 °C, no se observa diferencias significativas con respecto a la mezcla patrón.
- La incorporación de fibras de aramida y polipropileno en la mezcla asfáltica, contribuye a una reducción en el daño por humedad, alcanzando un valor de ITSr de un 98%, lo que indica que la resistencia a la tracción indirecta en condición seca y húmeda presenta valores similares, cumpliendo con lo exigido por la normativa española para capa de rodadura (ITSr>85%).
- La adición de las fibras sintéticas reduce en un 37,4% el ahuellamiento en relación a la mezcla patrón, concluyendo que las fibras mejoran la respuesta a altas temperaturas, asegurando buen comportamiento frente a deterioros asociados a la deformación permanentes y *stripping*.

BIBLIOGRAFÍA

1. Abiola, O. S., Kupolati, W. K., Sadiku, E. R., & Ndambuki, J. M. (2014). Utilisation of natural fibre as modifier in bituminous mixes: A review. *Construction and Building Materials*, 54, 305–312. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.037>
2. Abtahi, S. M., Sheikhzadeh, M., & Hejazi, S. M. (2010). Fiber-reinforced asphalt-concrete - A review. *Construction and Building Materials*, 24(6), 871–877. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.11.009>
3. Afonso, M. L., Dinis-Almeida, M., & Fael, C. S. (2017). Study of the porous asphalt performance with cellulosic fibres. *Construction and Building Materials*, 135, 104–111. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.222>
4. Ahmad, A., & Kareem, Y. (2015). Fatigue Behavior of Polypropylene Fiber Reinforced Bituminous Concrete Mix, 4(02), 449–453.
5. Al-Hadidy, A. I., & Yi-qiu, T. (2009). Effect of polyethylene on life of flexible pavements. *Construction and Building Materials*, 23(3), 1456–1464. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.07.004>
6. Aliha, M. R. M., Razmi, A., & Mansourian, A. (2017). The influence of natural and synthetic fibers on low temperature mixed mode I + II fracture behavior of warm mix asphalt (WMA) materials. *Engineering Fracture Mechanics*, 182, 322–336. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.06.003>
7. Chen, H., Xu, Q., Chen, S., & Zhang, Z. (2009). Evaluation and design of fiber-reinforced asphalt mixtures. *Materials and Design*, 30(7), 2595–2603. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.09.030>
8. Haddadi, S., Ghorbel, E., & Laradi, N. (2008). Effects of the manufacturing process on the performances of the bituminous binders modified with EVA. *Construction and Building Materials*, 22(6), 1212–1219. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.028>
9. Huang, H., & White, T. D. (1996). Dynamic Properties of Fiber-Modified. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 98–104. Retrieved from <https://doi.org/10.3141/1545-13>
10. ITEM 400 HS. (1998). Standard specification for asphalt concrete - high stress using polypropylene fibers Using polypropylene Fibers. *Flexible Pavements Inc.*
11. Kaloush, K. E., Biligiri, K. P., Zeiada, W. A., Rodezno, M. C., & Reed, J. X. (2010). Evaluation of Fiber-Reinforced Asphalt Mixtures Using Advanced Material Characterization Tests. *Journal of Testing and Evaluation*, 38(4), 102442. <https://doi.org/10.1520/JTE102442>
12. Kaloush, K. E., Zeiada, W. A., Biligiri, K. P., Rodezno, M. C., & Reed, J. X. (2010). Evaluation of Fiber-Reinforced Asphalt Mixtures Using Advanced Material Characterization Tests. *Journal of Testing and Evaluation*, 38(4), 102442. <https://doi.org/10.1520/JTE102442>
13. Kutay, M. E., Gibson, N., & Youtcheff, J. (2008). Kutay, M. E., Gibson, N., & Youtcheff, J. In *Conventional and viscoelastic continuum damage (VECD) - Based fatigue analysis of polymer modified asphalt pavements*.

14. Mello, L. G., Kaloush, K. E., & Biligiri, K. P. (2008). Evaluation of Fiber Reinforcement in Hot Mix Asphalt Using Advanced Material Characterization Tests. In *The First Pan American Geosynthetics Conference & Exhibition 2-5 March 2008, Cancun, Mexico*(pp. 0–7).
15. Pamulapati, Y., Elseifi, M. A., Cooper, S. B., Mohammad, L. N., & Elbagalati, O. (2017). Evaluation of self-healing of asphalt concrete through induction heating and metallic fibers. *Construction and Building Materials*, *146*, 66–75. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.064>
16. Reyes, O., Camacho, J., & Mejia, M. (2017). Resistencia mecánica y dinámica de mezclas asfálticas adicionadas con fibras sintéticas. *Congreso Ibero-Latinoamericano Del Asfalto CILA XX*.
17. Valdés, G., Pérez-Jiménez, F., & Botella, R. (2009). Ensayo Fénix, una Nueva Metodología para Medir la Resistencia a la Fisuración en Mezclas Asfálticas. *Revista de La Construcción*, *8*(1), 114–125.
18. Valdés V, G. A., Pérez-Jiménez, F. E., & Botella N, R. (2013). Nuevo procedimiento para evaluar el comportamiento a fatiga en pavimentos asfálticos a través del ensayo Fénix New procedure to assess the fatigue behavior in asphalt pavements by Fénix test. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, *21*(3), 362–371. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052013000300006>
19. Wu, S., Ye, Q., & Li, N. (2008). Investigation of rheological and fatigue properties of asphalt mixtures containing polyester fibers. *Construction and Building Materials*, *22*(10), 2111–2115. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.018>
20. Wu, S., Ye, Q., Li, N., & Yue, H. (2007). Effects of fibers on the dynamic properties of asphalt mixtures. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, *22*(4), 733–736. <https://doi.org/10.1007/s11595-006-4733-3>
21. Xu, Q., Chen, H., & Prozzi, J. A. (2010). Performance of fiber reinforced asphalt concrete under environmental temperature and water effects. *Construction and Building Materials*, *24*(10), 2003–2010. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.012>
22. Yang, J. M., Kim, J. K., & Yoo, D. Y. (2016). Effects of amorphous metallic fibers on the properties of asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, *128*, 176–184. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.082>
23. Yoo, P. J., & Kim, T. W. (2015). Strengthening of hot-mix asphalt mixtures reinforced by polypropylene-impregnated multifilament glass fibres and scraps. *Construction and Building Materials*, *75*, 415–420. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.009>

UCR
