

## I. INTRODUCCIÓN

Como uno de los objetivos del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR), se encuentra el desarrollo de una guía de diseño de pavimentos actualizada, aplicable y apta para Costa Rica. Esta guía se denomina como Guía de Diseño Estructural Mecánica – Empírica de Pavimentos.

La necesidad de una guía actualizada de diseño de pavimentos nace debido a que uno de los factores que contribuyen al mal desempeño en las estructuras de pavimentos nacionales es el uso de metodologías de diseño que fueron desarrolladas con características de materiales, tránsito y condiciones climáticas a las que se presentan en Costa Rica.

El procedimiento de diseño mediante la guía mecánica–empírica difiere de las metodologías actuales de forma tal que los resultados de un diseño no son los espesores que conformarán el pavimento, sino la predicción del desempeño que tendrá esta bajo las condiciones en donde se colocará y funcionará. Para lograr esta predicción del desempeño, el procedimiento de diseño inicia con la recolección de la información correspondiente a las características de tránsito de la zona, propiedades de los materiales propuestos para el pavimento y las condiciones climáticas locales. Estos son los parámetros de entrada necesarios para realizar un diseño mecánico – empírico. (Loría, 2013)

A partir de esto, se definen posibles espesores para el pavimento y un período de vida útil, con lo cual se procede a determinar la respuesta (esfuerzos, deformaciones y deflexiones) que tendrá el pavimento según los parámetros de entrada utilizados. Las respuestas generalmente son calculadas mediante herramientas computacionales basadas en teorías como Multicapa Elástica o modelaciones del Método de Elemento Finito. (Loría, 2013)

Con la respuesta del pavimento calculada, se utilizan estos valores dentro de modelos y ecuaciones matemáticas de predicción de desempeño. Si los resultados obtenidos cumplen con los criterios de desempeño deseados, se da por finalizado el procedimiento de diseño. En el caso contrario, puede considerarse opciones como cambiar los espesores o materiales propuestos para el pavimento y recalcular las respuestas y las predicciones de desempeño (Loría, 2013). En la Figura 1 se muestra un resumen gráfico del procedimiento de diseño Mecánico – Empírico.

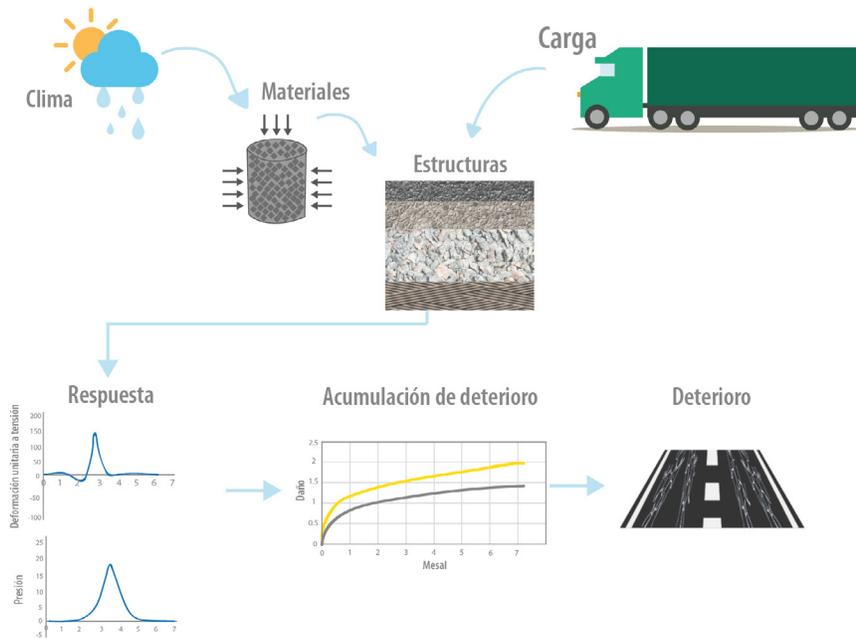


Figura 1. Componentes del diseño mecánico-empírico de pavimentos

Parte del proceso de elaboración de la Guía de Diseño Estructural Mecánica – Empírica de Pavimentos corresponde a la calibración de las ecuaciones y modelos matemáticos de predicción de desempeño adaptadas a las condiciones nacionales. Para lograr lo anterior, se monitorean los cambios que presenta el pavimento a lo largo de su vida útil, en donde este monitoreo es realizado mediante la instrumentación del pavimento con sensores que recopilan la información de interés para generar estas ecuaciones y modelos matemáticos.

Debido a lo anterior, el LanammeUCR ha buscado instrumentar tramos de pavimentos en funcionamiento bajo condiciones de campo para lograr la calibración adecuada. Hasta la fecha se ha logrado la instrumentación de tramos en la ruta Cañas–Liberia (Ruta Nacional 1), La Abundancia – Florencia (Ruta Nacional 35) y en el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría. Con los tramos instrumentados, se logra abarcar el estudio tanto de pavimentos flexibles como de pavimentos rígidos.

A continuación, se resumen varios aspectos relacionados a la instrumentación de pavimentos y ejemplifica los usos que le ha brindado el LanammeUCR a la información que se recolecta de estos tramos.

### Instrumentación

Para monitorear y estudiar la respuesta de los pavimentos bajo las condiciones de campo en las que se encuentra en funcionamiento, el LanammeUCR utiliza la siguiente serie de sensores que adquieren distintos tipos de información:

- Celdas de Presión

Son sensores que miden el esfuerzo vertical que llega hasta el nivel en donde se encuentran colocadas. A partir de esto, es posible observar la reducción de esfuerzos que aporta la estructura del pavimento ante las cargas de tránsito. Debido a que los pavimentos se deterioran progresivamente durante su vida útil, su capacidad de reducción de esfuerzos disminuye también. Con el uso de estos sensores, es posible cuantificar los aumentos del esfuerzo vertical a causa del deterioro progresivo en pavimentos (Leiva & Camacho, 2015).

Por lo general, las celdas de presión se han instalado debajo de las capas de subbase y base para pavimentos flexibles. En pavimentos rígidos, estos sensores se han colocado inmediatamente debajo de la losa de concreto.



Figura 2. Celda de presión para medición de esfuerzos verticales

– Galgas extensiométricas

Las galgas extensiométricas miden la deformación unitaria que experimenta un pavimento. Usualmente se colocan de forma embebida en la carpeta asfáltica o en la losa de concreto para estudiar el daño por fatiga que se dan tanto en pavimentos flexibles como pavimentos rígidos (Leiva & Camacho, 2014). Para lograr lo anterior, las galgas extensiométricas se colocan sobre un soporte de acero (en pavimentos rígidos) o nylon (para pavimentos flexibles) para lograr un anclaje entre la losa de concreto o la carpeta asfáltica. En la Figura 3 se muestra un ejemplo de una galga extensiométrica para una losa de concreto.



Figura 3. Galgas extensiométricas para pavimentos rígidos

Debido a la forma de "I" o "H" que poseen, las galgas pueden colocarse de forma longitudinal o transversal, dependiendo de la deformación unitaria que se desee adquirir. Al igual que en el caso de las celdas de presión, las lecturas registradas por este tipo de sensor también variarán conforme el estado que se encuentra el pavimento a través de su vida útil.

- Termopares

Los termopares son utilizados para medir la temperatura del punto en donde se encuentran instalado. Esta información se recolecta debido a que los cambios de temperatura afectan el comportamiento de los pavimentos. En pavimentos rígidos existe el alabeo de las losas de concreto, mientras que en pavimentos flexibles la temperatura afecta el módulo dinámico de la mezcla asfáltica. Por ende, estos sensores también son instalados de forma embebida en la carpeta asfáltica o en la losa de concreto.

- Sistema de adquisición de datos

Los sensores anteriormente mostrados necesitan ser conectados a una interfaz que permita el registro de las mediciones que realizan. Esta interfaz es conocida como el sistema de adquisición de datos (DAS por sus siglas en ingl, la cual se encarga de convertir las señales eléctricas que reportan los sensores a las unidades de medida correspondientes: kilopascasles (kPa) para esfuerzos verticales, microstrain ( $\mu\epsilon$ ) para deformación unitaria y grados Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) para la temperatura. En la Figura 4 se observa un ejemplo de un sistema de adquisición de datos, propiedad del LanammeUCR.

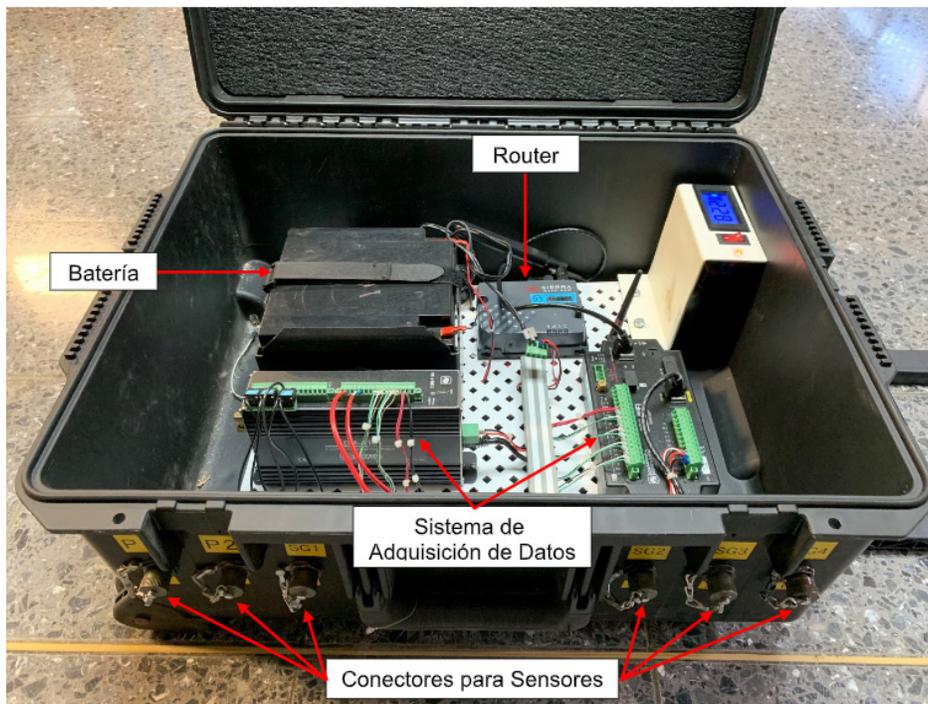


Figura 4. Sistema de adquisición de datos

Con los instrumentos y sensores mostrados es posible el monitorear periódicamente los pavimentos a lo largo de su vida útil para calibrar las ecuaciones y modelos matemáticos de desempeño que se requieren en un diseño mecánico – empírico. Sin embargo, otro de los usos que el LanammeUCR les brinda a los tramos instrumentados es la comparación de las respuestas de los pavimentos modeladas con herramientas computacionales con las adquiridas en la realidad, con el objetivo de validar los procedimientos de análisis realizados y propuestos en la guía de diseño.

Como se mencionaba al inicio, el diseño mecánico – empírico requiere del cálculo de la respuesta de los pavimentos

para predecir su desempeño, y su cálculo; en la actualidad se realiza por medio de teorías y métodos computacionales (modelación). Como la información adquirida en campo también corresponde a una respuesta del pavimento, es posible comparar las respuestas reales con las respuestas teóricas, cuantificando así la sobreestimación o subestimación que podrían brindar las teorías o modelos utilizados para calcular una respuesta del pavimento. A continuación, se mostrará un caso de estudio en el cual se comparan las respuestas teóricas y reales.

El caso de estudio utilizará la información adquirida en la instrumentación de la Ruta Nacional 35, La Abundancia – Florencia. La estructura instrumentada corresponde a un pavimento flexible en donde se colocaron 2 celdas de presión y 4 galgas extensiométricas.

## Modelación de pavimentos

La modelación de pavimentos consiste en la estimación de las respuestas mecánicas (esfuerzos, deformaciones y deflexiones) de un pavimento ante cargas externas, como por ejemplo las cargas de tránsito, utilizando algunos procedimientos matemáticos, como la teoría de Odemark-Boussinesq, multicapa elástica o elemento finito, por ejemplo.

En el caso de la estructura de pavimento analizada posee 5 capas y un espesor total de 67 cm, compuesta por: una capa de mezcla asfáltica en caliente (MAC) modificada con polímero, una MAC densa convencional, una capa de base estabilizada con cemento, una capa de subbase, y la subrasante (compuesta por un relleno de sustitución y suelo)

Para realizar una correcta comparación de los valores medidos vs los modelados es necesario efectuar una estimación adecuada de la capacidad mecánica de los materiales en sitio, con el objetivo de que la modelación sea representativa. Para esto es necesario disponer de ensayos de laboratorio adecuados y datos del día de la medición.

La mezcla asfáltica es considerada como un material visco-elástico para las temperaturas de trabajo más comunes de las carreteras en Costa Rica (15°-60°C). Esto indica que la capacidad mecánica del material, asociada a su módulo de elasticidad no es constante, sino que depende de la velocidad de aplicación de la carga y la temperatura de trabajo; es por este motivo que es muy importante medir o determinar estos parámetros previos a la modelación. En la Figura 5 es posible observar una imagen térmica de la superficie del pavimento; esta temperatura superficial es utilizada para estimar la temperatura interna del pavimento.



Figura 5. Imagen térmica pavimento analizado

En este caso de estudio se utilizó un vehículo C2, para aplicar carga a la estructura, este posee un eje direccional delantero de 10,8 ton y un eje tándem trasero compuesto por un eje simple dual de 12,9 ton y otro de 12,4 ton. Para conocer el peso de cada eje se realizó un pesaje del vehículo utilizando balanzas debidamente calibradas (ver Figura 6).

Para la modelación se utilizó una frecuencia de carga equivalente a una velocidad de 6 km/h, ya que la prueba de carga se realizó a esta velocidad. Para realizar la prueba, en la Figura 7 se puede observar una secuencia de fotografías, donde se muestra el paso del camión sobre la zona instrumentada. Con la velocidad y el espesor de carpeta asfáltica

se puede estimar la velocidad del pulso y la frecuencia de carga, utilizando el diagrama de Barksdale. Para este caso se obtuvo que, para una velocidad de 6 km/h y una profundidad media de 6,5 cm, el pulso de carga es de 0,26 segundos y la frecuencia de carga 3,7 Hz.



Figura 6. Pesaje y verificación de carga en el vehículo patrón



Figura 7. Paso de vehículo con carga patrón en zona instrumentada

Como se mencionó en párrafos anteriores, la rigidez de la mezcla asfáltica depende de la frecuencia y de la temperatura, es por este motivo que es necesario contar con un ensayo de laboratorio que brinde esta información. El ensayo de módulo dinámico (AASHTO-T342), permite realizar un barrido de frecuencias y temperaturas, lo cual permite estimar la curva maestra de la mezcla asfáltica mediante un proceso matemático y obtener el módulo de la mezcla a cualquier temperatura y frecuencia de interés. Para facilitar el cómputo de la curva maestra a partir del ensayo de laboratorio, el LanammeUCR, a través del PITRA, ha puesto al servicio de la comunidad ingenieril el software PITRA-ImoDin (interfaz

de módulo dinámico). Este software permite en unos simples pasos realizar el proceso matemático que permite calcular los coeficientes del modelo sigmoidal de la curva maestra, utilizando varios métodos de ajustes. La interfaz de este software puede observarse en la Figura 8.

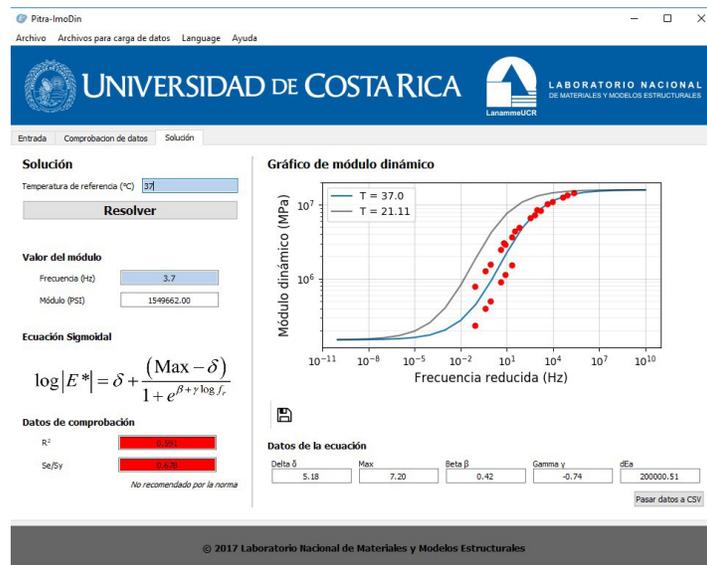


Figura 8. Salida software Imodin-PITRA para mezcla analizada

Para los materiales granulares y suelos se utilizaron los ensayos de caracterización típicos, como granulometría y límites para conocer el tipo de material, Proctor y CBR para densidad, y resistencia a la compresión en el caso de la BE. Con estos parámetros es posible estimar el módulo aproximado de estos materiales.

Conociendo el tipo de estructura, espesores de los materiales y módulos de estos es posible realizar una modelación utilizando algunos de los métodos mencionados previamente. De igual forma el LanammeUCR ha programado un software de multicapa elástica, que permite a los ingenieros de Costa Rica realizar modelaciones de estructuras de pavimento de una forma eficiente. Este software posee tres módulos: en el primero, se ingresa la estructura de pavimentos por examinar; en el segundo, la carga y los puntos de la estructura por analizar y el tercero, el software que realiza los cálculos y muestra las respuestas de la estructura en los puntos de interés del módulo dos. En la Figura 9 es posible observar parte de la interfaz del módulo 1 y los valores utilizados para realizar la presente modelación.

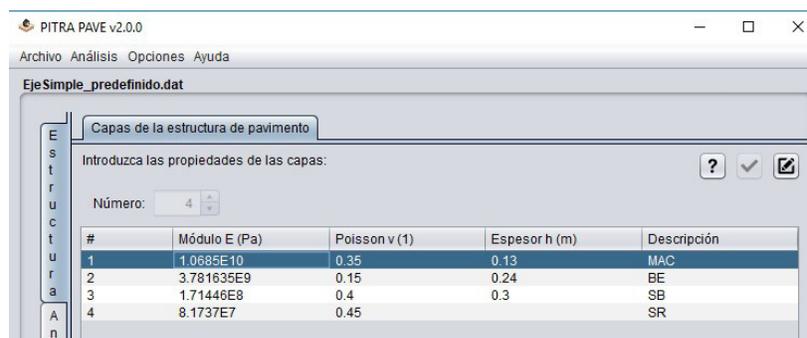


Figura 9. Interfaz de usuario software PITRA-Pave, módulo estructura

Para obtener las respuestas del pavimento es necesario utilizar una carga patrón; en ese caso, a manera de ejemplo, se muestra la opción para modelar un eje simple sencillo acorde con el eje direccional del vehículo C2 utilizado en la prueba de carga. En dicha interfaz se requiere el peso del eje, presión y los puntos de análisis.



Figura 10. Modelación de un simple, en software de multicapa elástica

En la Figura 11, se puede observar una salida del software con los resultados obtenidos de la modelación realizada con las respuestas críticas de la estructura, en dicha imagen se extrae el valor de la tercera línea, el cual corresponde a la respuesta crítica a tensión en la fibra inferior de la carpeta asfáltica. Este valor es uno de los requeridos para estimar el daño a fatiga en este material. En esta modelación se obtuvo un valor de  $23,8 \mu\epsilon$  a tensión, el cual es un valor bajo acorde al tipo de estructura analizada y que será utilizado como valor a comparar en la captura de datos.

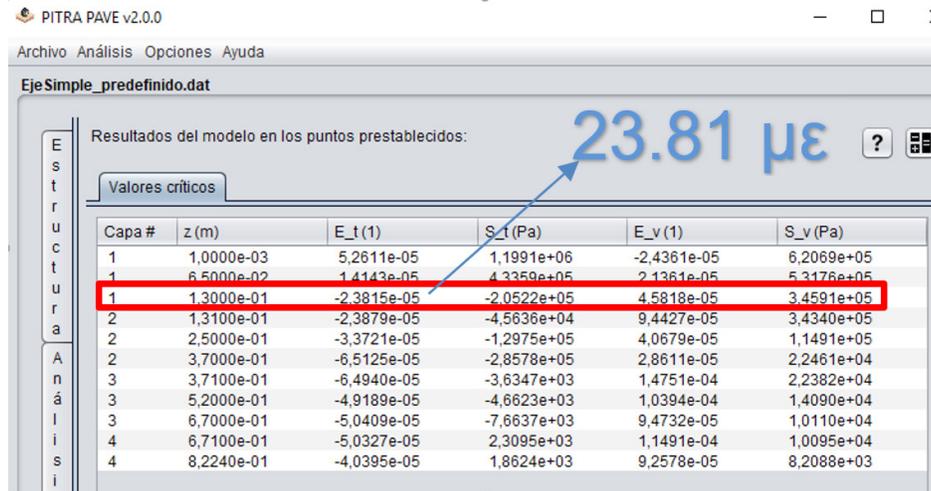


Figura 11. Salida del software PITRA-Pave

## Respuesta

En este caso de estudio, se realizó una modelación de pavimento acorde con las prácticas propuestas en la guía de diseño mecanístico-empírica de pavimentos y después se realizaron mediciones en campo de la instrumentación colocada en los sitios de interés.

En el monitoreo de pavimentos en campo pueden destacarse tres elementos fundamentales. El primero considera los sensores utilizados y la precisión de estos; como segundo componente, se puede mencionar el sistema de adquisición de datos, el cual debe cumplir con requisitos de cada proyecto para poder realizar la captura de información de los sensores instalados a la frecuencia de interés. En este apartado también se puede mencionar que el equipo debe

complementarse con un software (código) personalizado a cada proyecto que capture los datos de la forma deseada y por último y no menos importante, el análisis de la información, la cual incluye el filtrado de señales, separación de estas e interpretación.

En la Figura 12 se muestra la captura de una señal asociada al sensor de deformación unitaria (galgas extensiométricas) en la fibra inferior de la MAC, en la misma pueden identificarse tres pulsos, asociados a los tres ejes del vehículo C2, en el círculo se encuentra el eje delantero direccional. En dicho gráfico puede observarse un valor cercano a los  $24 \mu\epsilon$  a tensión, el cual puede asociarse de forma directa con el valor modelado que se observa en la Figura 11 con  $23,8 \mu\epsilon$ . En este caso en particular y bajo los parámetros ingresados en la modelación, se puede inferir que la modelación realizada es bastante cercana a los valores que se presentan en la estructura real.

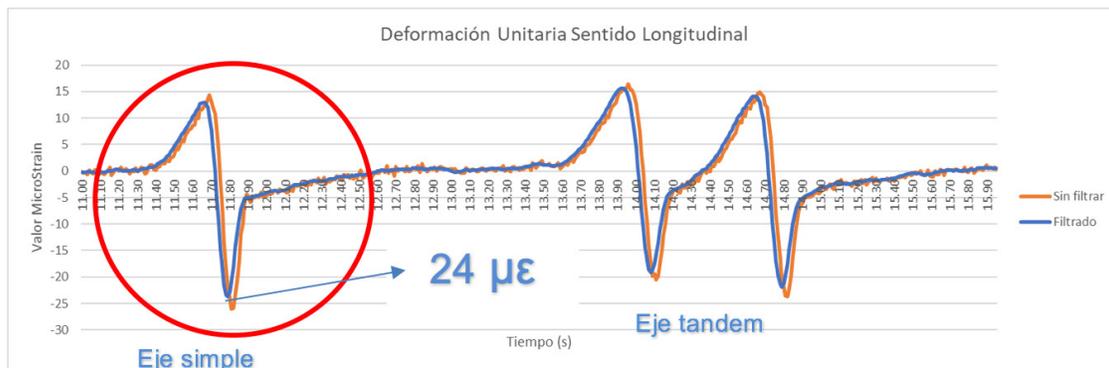


Figura 12. Captura de datos vehículo C3

## Conclusiones

- El LanammeUCR, mediante la instalación de sensores en pavimentos, ha podido monitorear estructuras de diferente naturaleza, por ejemplo, pavimentos de concreto, asfálticos o pavimentos aeroportuarios de forma exitosa.
- La captura de datos en campo de forma adecuada es producto de la correcta amalgama de varios factores como lo son: selección adecuada de sensores, correcta instalación en sitio, buena coordinación e interés por parte de la administración y empresa constructora; DAS adecuado, generación de un software personalizado para cada proyecto y una correcta interpretación y postproceso de los resultados obtenidos.
- La generación de software complementario por parte del LanammeUCR permite realizar análisis de forma rápida y precisa en estructuras de pavimentos, acordes a las tendencias a nivel mundial.
- A través de la experiencia y estudios realizados por el LanammeUCR es posible al día de hoy realizar modelaciones de pavimentos acordes a la realidad en campo, permitiendo validar los procesos de diseño que serán incorporados en la Guía de Diseño Estructural Mecánica-Empírica de Pavimentos para Costa Rica.
- Los estudios realizados sobre este tema permiten fortalecer y complementar los resultados obtenidos en laboratorio y continuar con la calibración de modelos de desempeño, software y algoritmos de análisis.

## Bibliografía

- 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.
- Leiva, F., & Camacho, E. (2015). LM-PI-UMP-042-R1: Evaluación PAVELAB Tramos 002AC4. LanammeUCR, San José.
- Loría, L. G. (2013). Desarrollo de la Guía de Diseño de Pavimentos de Costa Rica. LanammeUCR, San José.



LanammeUCR

## LABORATORIO NACIONAL DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

# PITRA

Programa de  
**Infraestructura del Transporte**

Ing. Luis Guillermo Loría-Salazar, Ph.D.

*Coordinador General*

Ing. Fabián Elizondo-Arrieta, MBA

*Subcoordinador*

### UNIDADES

#### Unidad de Auditoría Técnica (UAT)

Ing. Wendy Sequeira-Rojas, M.Sc

*Coordinadora*

#### Unidad de Seguridad Vial y Transporte (USVT)

Ing. Diana Jiménez-Romero, M.Sc, MBA

*Coordinadora*

#### Unidad de Normativa y Actualización Técnica (UNAT)

Ing. Raquel Arriola-Guzmán

*Coordinadora*

#### Unidad de Materiales y Pavimentos (UMP)

Ing. José Pablo Aguiar-Moya, Ph.D.

*Coordinador*

#### Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional (UGERVN)

Ing. Roy Barrantes-Jiménez M.Sc

*Coordinador*

#### Unidad de Gestión Municipal (UGM)

Ing. Jaime Allen-Monge, Ph.D

*Coordinador*

CENTRO DE TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA

Diagramación, diseño y control de calidad: Katherine Zúñiga Villaplana / Óscar Rodríguez Quintana

Boletín técnico: INSTRUMENTACIÓN DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO/ Abril 2019