

## Software de Diseño Mecánico Empírico de Pavimentos Flexibles para Costa Rica, CRME

Christopher Trejos Castillo<sup>1</sup>, Luis Guillermo Loria Salazar<sup>2</sup>,  
José Pablo Aguiar Moya<sup>3</sup>

<sup>1</sup>LANAMME, Universidad de Costa Rica, Ciudad de Investigación, christopher.trejoscastillo@ucr.ac.cr

<sup>2</sup>LANAMME, Universidad de Costa Rica, Ciudad de Investigación, luis.loriasalazar@ucr.ac.cr

<sup>3</sup>LANAMME, Universidad de Costa Rica, Ciudad de Investigación, jose.aguiar@ucr.ac.cr

### Resumen

Tradicionalmente, el diseño de pavimentos flexibles en la región se ha realizado con la metodología empírica definida por AASHTO en 1993. Esta metodología fue desarrollada para las condiciones climáticas y los materiales presentes en Illinois, los cuales son distintos a los que se encuentran en zonas tropicales. La nueva metodología de diseño mecánico empírica para pavimentos flexibles, está basada en el uso de la mecánica de sólidos para calcular las respuestas del pavimento (esfuerzos, deformaciones unitarias y deflexiones) producidas por el paso de los vehículos y con estos valores estimar el desempeño del pavimento a lo largo de la vida útil. Costa Rica ha desarrollado una amplia línea de investigación para calibrar los modelos empíricos que relacionen las respuestas con el deterioro específico del pavimento, gracias a esto se ha desarrollado el software para diseño CRME. La investigación desarrollada incluye el desarrollo de modelos de predicción del módulo dinámico en la carpeta asfáltica, del módulo resiliente en las capas no ligadas, el uso de espectros de cargas, modelos de determinación del efecto del zigzagueo lateral y el efecto de la humedad, y la temperatura en la resistencia de los materiales que conforman la estructura de pavimento.

**Palabras Clave:** mecánico, empírico, diseño, pavimentos, software

### 1 Introducción

La metodología empírica de diseño de pavimentos fue complementada con los modelos mecánicos para calcular las respuestas producidas por el paso de las cargas vehiculares, utilizando la teoría de multicapa elástica (MLET) o la metodología de elemento finito (FEM).

Para predecir el desempeño de la estructura de pavimento a lo largo del tiempo, la guía mecánico empírica de pavimentos flexibles de Estados Unidos (MEPDG, por sus siglas en inglés) provee funciones de transferencia para relacionar las respuestas del pavimento con algún tipo de deterioro. Los coeficientes de correlación de las ecuaciones propuestas por la guía son muy bajos, razón por la cual estas deben ser calibradas para cada país [1].

Es por lo anterior que para calibrar los modelos, el LanammeUCR desarrolló el programa de investigación PaveLab. Este laboratorio cuenta con equipo con tecnología para ensayar a los materiales que componen la estructura de pavimento, además de tener un simulador acelerado de vehículos pesados (HVS por sus siglas en inglés) [2]. Basado en los resultados de los ensayos realizados en las pistas, se obtienen modelos de predicción del agrietamiento y deformación permanente a lo largo de la vida útil del pavimento [3].

A partir del desarrollo de modelos Costa Rica generó una herramienta computacional llamada CRME para diseñar pavimentos flexibles usando la metodología mecánica-empírica, la cual pretende ser una herramienta fácil de utilizar, que permita predecir el desempeño de la estructura, considerando todas las variables que afectarán el funcionamiento de la carretera. Además dicha herramienta busca eliminar la necesidad de adquirir licencias de alto costo (Ejemplo, AASHTOWare Pavement ME Design) y debido a que los modelos utilizados en la

herramienta diseñada por AASHTO, fueron calibrados para las condiciones presentes en Estados Unidos [4, 5] como se mencionó anteriormente.

Para producir diseños confiables, se consideran modelos que estiman la afectación climática a los materiales. Predice, como función del índice de humedad de Thornwaite (TMI) y la curva característica suelo agua (SWCC) del material, cómo el módulo resiliente de las capas no ligadas crecerá o decrecerá.

El software CRME considera la propiedad esfuerzo - dependiente de los materiales granulares, utilizando el Modelo Universal de Witczak, el cual correlaciona el módulo resiliente con la primera invariante de esfuerzos y el esfuerzo octaédrico. Para caracterizar la mezcla asfáltica, la aplicación considera las propiedades viscoelásticas del material, variando el módulo dinámico en función de la temperatura y la frecuencia [6, 7].

Para contabilizar el tránsito del proyecto, el usuario puede utilizar el enfoque de ejes equivalentes de carga (ESAL por sus siglas en inglés) o utilizar espectros de carga [8]. Con el segundo, la herramienta desarrollada suma el daño producido por cada carga de cada tipo de eje de manera mensual, usando la ley de Miner. Para el ahuellamiento, acumula la deformación permanente producida por cada capa del pavimento, utilizando un modelo de predicción distinto para los materiales no ligados que para la carpeta asfáltica.

La investigación producida se basa en obtener modelos calibrados que permitan predecir el agrietamiento por fatiga o piel de cocodrilo y el ahuellamiento. La cantidad de repeticiones permitidas antes de la falla por fatiga, es estimada basada en la reducción del módulo resiliente después de una cantidad de repeticiones de carga. La calibración del modelo está hecha con un programa de ensayo acelerado de pavimentos (PaveLab) [9] y algunas pistas de desempeño del pavimento a largo plazo (LTPP-CR).

La aplicación incluye un modelo para medir el efecto del zigzagueo lateral, considerando estadísticamente la variación de la huella de los vehículos en función del ancho del carril. También, considera el enfoque de endurecimiento por deformación unitaria de los materiales para el modelo de ahuellamiento. La herramienta estima el daño considerando la diferencia entre el efecto producido por un eje tándem o trídem con respecto a un eje simple.

## 2 Descripción general del software

CRME emula el enfoque de diseño desarrollado por la guía de diseño de pavimentos flexibles MEPDG desarrollada por AASHTO, considerando las condiciones climáticas, el tránsito y las propiedades de los materiales, para calcular las respuestas (esfuerzos, deformaciones unitarias y deflexiones) producidas por la carga utilizando la teoría de multicapa elástica. Con las respuestas, la aplicación predice el daño del pavimento con modelos de desempeño basados en enfoques mecanicistas.

El diseñador debe seleccionar espesores iniciales para cada una de las capas y posteriormente calcular el módulo resiliente de cada una de las capas al ser afectados por los modelos climáticos para calcular las respuestas debidas a la carga de la llanta. Luego, utilizando el tránsito y las respuestas junto con los modelos de desempeño, el diseñador debe decidir en función del daño estimado, si el diseño es aprobado o no [10].

El software es una herramienta que predice el ahuellamiento final y el agrietamiento después de que el usuario haya incluido todos los datos en función del nivel elegido para cada variable. Para el nivel 1 se utilizan modelos más refinados y para el nivel 3 se utilizan modelos simplificados. El usuario debe incluir los datos del proyecto, las características del proyecto y los datos de entrada se irán habilitando mientras el usuario llene los datos de cada módulo. Primero debe ingresar los datos de tránsito, luego los datos climáticos, los materiales y, por último, los modelos de desempeño. Finalmente, el usuario debe dar clic en el botón diseñar para obtener la deformación permanente, el daño por fatiga de arriba hacia abajo y de abajo hacia arriba, además del porcentaje de área agrietada y el agrietamiento longitudinal. El usuario deberá decidir si el diseño propuesto es adecuado en función de los resultados obtenidos y en

caso de no cumplir alguna especificación planteada para el proyecto a diseñar, podrá modificar los datos de entrada hasta obtener un diseño que cumpla.

### 3 Modelo mecánico

Para calcular las respuestas del pavimento ante el paso de una llanta, se utiliza la teoría de multicapa elástica, ya que no toma un tiempo excesivo realizando el cálculo de los esfuerzos, deformaciones unitarias y deflexiones en las posiciones necesarias para el diseño.

La teoría de multicapa elástica fue programada en la herramienta de cálculo, con la ayuda del método especificado por Huang [11]. Para determinar las respuestas debido a la carga  $q$  distribuida sobre una área circular de radio  $a$ , se emplea la transformación de Hankel, mostrado en la ecuación (1); donde  $R^*$  es la respuesta debido a la carga  $-mJ_0(m)$ , donde  $m$  es un parámetro,  $J_0(x)$  es la función de Bessel de primer tipo y orden 0,  $\rho = r/H$ , con  $r$  la coordenada cilíndrica para la dirección radial,  $H$  es la profundidad a la capa de subrasante,  $J_1(x)$  es la función de Bessel de primer tipo y orden uno,  $\alpha = a/H$  y  $R$  es la respuesta debida a la carga  $q$ . Para resolver la integral, se utiliza el método numérico llamado regla de la cuadratura Gaussiana, usando la serie de Taylor de la función de Bessel.

$$R = q \int_0^{\infty} \frac{R^*}{m} J_1(m \alpha) d m \quad (1)$$

### 4 Tránsito

Una mala estimación del tráfico de la carretera puede producir una falla prematura. El software considera dos formas de tomar en cuenta esta variable. La primera es el enfoque típico con ejes equivalentes de carga (ESAL), el cual es propuesto para el nivel 3.

La segunda forma de realizar el cálculo es utilizando espectros de carga. Los espectros de carga pueden obtenerse de una medición realizada en campo o basándose en un espectro de carga de la zona a diseñar. El usuario deberá conocer la carga representativa de cada uno de los rangos de carga y conocer el total de repeticiones de este rango. En Costa Rica se realizan pesajes en diferentes carreteras del país, con los cuales se obtienen los espectros de carga.

En la Figura 1 se muestra la ventana de ingreso de datos para la variable tránsito utilizando espectros de carga sin series históricas.

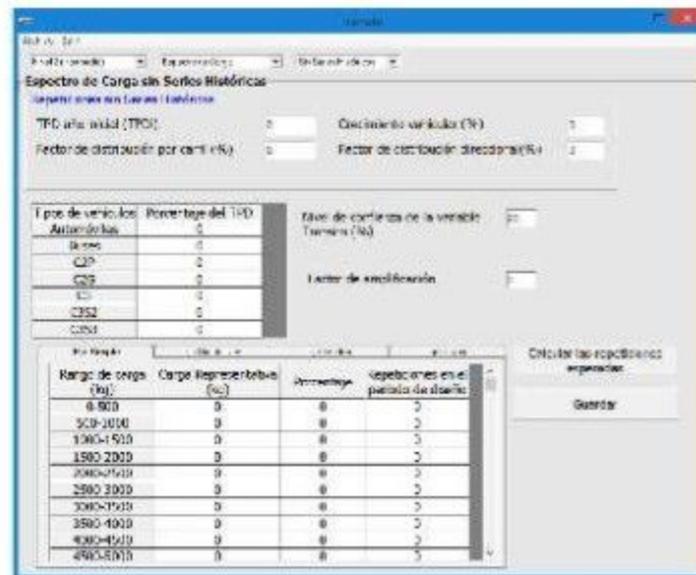


Figura 1. Ventana de ingreso de datos de la variable Tránsito

## 5 Clima

Los factores climáticos son considerados por medio de la temperatura del aire mensual promedio, máxima y mínima; y el índice de humedad de Thornwaite. Los modelos de variación del módulo resiliente por medio de las condiciones climáticas se encuentran incluidos en el CRME.

Es posible incluir el grado de saturación como una función del TMI o de la curva característica de retención de agua en el suelo (SWCC, por sus siglas en inglés). También, el software puede estimar el módulo dinámico promedio mensual de la mezcla asfáltica como función de la temperatura promedio mensual.

## 6 Carpeta asfáltica

En la aplicación se tienen tres niveles de caracterización de la carpeta asfáltica. Para el nivel básico se tiene tres modelos para estimar el módulo dinámico. En la Figura 2 se muestra la ventana de ingreso de datos para el nivel básico.

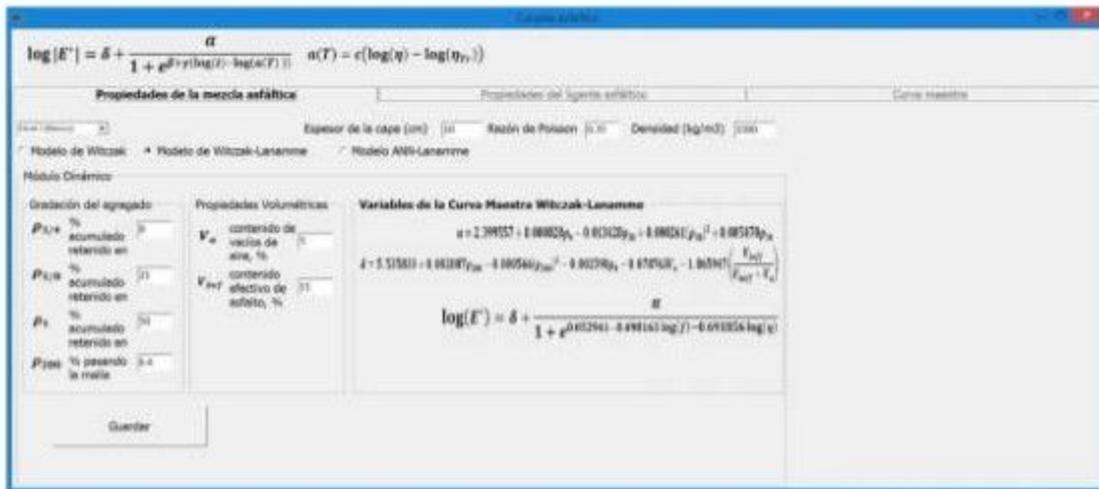


Figura 2. Ventana de ingreso de datos de la mezcla asfáltica para el nivel básico

### 6.1 Nivel Básico de caracterización de la carpeta asfáltica

#### 6.1.1 Modelo de predicción del módulo dinámico de Witzak

El primero es el modelo de predicción de  $E^*$  de Witzak para mezclas asfálticas propuesto en la guía MEPDG [1]. Este modelo predice módulos dinámicos mayores a los que se encuentran en mezclas asfálticas en Costa Rica, pues fue calibrada con mezclas modificadas.

#### 6.1.2 Modelo de predicción del módulo dinámico Witzak-Lanamme

El segundo modelo incluido en el nivel básico es el modelo modificado de estimación del módulo dinámico Witzak-Lanamme.

Este modelo sigmooidal, se muestra en la ecuación (2), donde  $E^*$  es el módulo dinámico (psi),  $\eta$  la viscosidad del ligante asfáltico con el envejecimiento y temperatura de interés ( $10^6$  Poise),  $f$  la frecuencia de carga (Hz), la cual es recíproca al tiempo de carga en segundos,  $V_v$  el porcentaje de vacíos,  $V_{eff}$  el contenido efectivo de asfalto (%),  $p_{3/4}$  el porcentaje acumulado retenido en la malla 3/4,  $p_{3/8}$  el porcentaje acumulado retenido en la malla 3/8,  $p_4$  el porcentaje acumulado retenido en la malla No. 4 y  $p_{200}$  el porcentaje pasando la malla No. 200 [13]. Este modelo toma en consideración el tipo de ligante y los materiales presentes en Costa Rica, prediciendo de manera más precisa los módulos dinámicos.

$$\begin{aligned} \log E^* &= 5.535833 + 0.002087\rho_2 - 0.000566(\rho_2)^2 - 0.002590\rho_4 - 0.078763V_u \\ &- 1.865947 \left( \frac{V_b}{V_b + V_u} \right) \\ &+ \frac{2.399557 + 0.000820\rho_4 - 0.013420\rho_{3/4} + 0.000261(\rho_{2/B})^2 + 0.005470\rho_{3/4}}{1 + e^{0.0 - 0.4 \rho_2 - 0.6 \rho_4 - 0.6 \rho_{3/4} - 0.6 \rho_{2/B}}} \end{aligned} \quad (2)$$

### 6.1.3 Modelo de predicción del módulo dinámico ANN-Lanamme

El tercer modelo incluido en el nivel básico se basa en una investigación reciente, es un modelo de red neural artificial (ANN por sus siglas en inglés). El modelo se basa en una ANN de propagación posterior con una función sigmoideal tal como se muestra en las ecuaciones de la (3 a la (5, donde  $H_k^1$  es el vector de valores is el vector de valores transferidos de nodos en la capa oculta,  $P_i$  es el vector de variables de entrada ( $\rho_2, \rho_4, \rho_{3/4}, V_u, V_b, \log \log \eta$ , temperatura y frecuencia) tal como se definió en la ecuación(2),  $W_{ki}$  es la matriz de pesos para la capa oculta,  $W_k$  es el vector de pesos para la capa de salida,  $B_k^1$  es el vector de sesgo para la primera capa y  $B_u$  es el factor de sesgo para capa externa y  $m$  es la cantidad de nodos en la capa oculta [14].

$$f(T) = \frac{2}{1 + e^{-2T}} - 1 \quad (3)$$

$$H_k^1 = B_k^1 + \sum_{i=1}^m W_{ki} P_i \quad (4)$$

$$\text{Salida} = \ln E^* = f \left( B_u + \sum_{k=1}^m H_k^1 W_k \right) \quad (5)$$

### 6.2 Nivel Intermedio: Modelo de curva maestra con la ecuación de Arrhenius

En este nivel se utiliza la ecuación de Arrhenius para obtener el factor de ajuste de la curva maestra, tal como se muestra en la ecuación (6), donde  $\Delta E_a$  es la energía aparente de activación, típicamente 250 KJ/mol, R es la constante universal de los gases = 8.314 J/K-mol,  $T$  es la temperatura en Kelvin y  $T_r$  es la temperatura de referencia en Kelvin.

La ventaja del uso de este modelo está en que permite calcular el módulo dinámico  $E^*$  sin la necesidad de realizar ensayos al ligante asfáltico.

La función sigmoideal simétrica utilizada para obtener el módulo dinámico a temperaturas y frecuencias específicas se muestra en la ecuación (7), donde  $\delta, \beta, \gamma, M$  y  $\Delta E_a$  son coeficientes de regresión y  $f$  es la frecuencia de carga del pavimento (Hz) [15].

$$\log a_T = \frac{\Delta E_a}{2.303R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \quad (6)$$

$$\log E^* = \delta + \frac{M - \delta}{1 + e^{\beta + \gamma(\log f + \log a_T)}} \quad (7)$$

### 6.3 Nivel Alto: Modelo de curva maestra de la guía MEPDG

El método más preciso es el que se describe en el primer nivel, esta metodología considera la viscosidad del ligando para estimar el efecto de la temperatura en el módulo dinámico, tal como se muestra en la ecuación (8), donde  $\eta$  es la viscosidad en cPoise,  $A, \gamma, T_s$  son parámetros de regresión y  $T$  es la temperatura de la mezcla asfáltica en Rankine.

Debe considerarse que si la viscosidad obtenida es mayor a  $2.7 \times 10^4$  Poise, debe utilizarse este valor. Esto sucede cuando se evalúan temperaturas bajas en la fórmula.

### 6.3.1 Ligante asfáltico

Para obtener valores de  $A$  y  $VTS$ , los cuales son la intersección y la pendiente de la curva  $\log \log \eta$  (cPoise) –  $\log T$  (Rankine), el usuario puede utilizar tres métodos. Para el nivel básico, puede utilizar valores recomendados de la literatura en función del grado Superpave del ligante, el grado convencional AC o el grado de penetración convencional. Para el nivel intermedio, estos valores pueden ser determinados con al menos cuatro puntos obtenidos de ensayos convencionales al ligante y para el nivel avanzado, el ingeniero puede utilizar al menos tres puntos obtenidos del ensayo Superpave utilizando un reómetro.

El factor de ajuste en la ecuación (9), depende de la viscosidad calculada como función de la temperatura, donde  $\eta_T$  es la viscosidad a la temperatura de referencia en cPoise. El modelo simétrico sigmoideal se muestra en la ecuación (10), donde  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  y  $c$  son parámetros de regresión y  $t$  es el tiempo de carga en segundos.

$$\log \log \eta = A + V \log T \quad (8)$$

$$\log a_T = c(\log \eta - \log \eta_T) \quad (9)$$

$$\log E^* = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\log t - \log t_T)}} \quad (10)$$

Para estimar el tiempo de carga  $t$  en segundos como función de la velocidad  $v$  en km/h y la profundidad  $d$  en metros, la herramienta utiliza la fórmula mostrada en la ecuación (11) [16].

$$\log(t) = 0.5d - 0.2 - 0.94 \log(v) \quad (11)$$

## 7 Capas no ligadas

La herramienta permite utilizar dos métodos para estimar el módulo resiliente de las capas no ligadas (base, subbase y subrasante); el nivel básico determina el módulo resiliente basado en el CBR o como un dato de entrada directamente. Para el nivel avanzado, el usuario puede utilizar el modelo universal, el cual considera la propiedad esfuerzo-dependiente de los materiales granulares.

El modelo descrito en la ecuación (12) [17], donde  $\theta$  es el primer invariante de esfuerzos,  $\tau_o$  es el esfuerzo octaédrico y  $M_R$  es el módulo resiliente.

$$M_R = k_1 \gamma_a \left( \frac{\theta}{\gamma_a} \right)^{k_2} \left( \frac{\tau_o}{\gamma_a} + 1 \right)^{k_3} \quad (12)$$

Como se mencionó previamente, el programa toma en cuenta el factor ambiental, el cual puede variar el valor del módulo resiliente de estas capas.

## 8 Modelos de desempeño calibrados con datos de ensayos acelerados de pavimento (APT, por sus siglas en inglés)

En el LanammeUCR se evalúan diferentes maneras de obtener los modelos necesarios para determinar el daño por fatiga en la estructura de pavimento, por lo cual se determinaron modelos con un enfoque incremental-recursivo, considerando la disminución del módulo dinámico de la carpeta asfáltica, tal como se muestra en la ecuación (13) y con un enfoque similar al de la guía MEPDG, tal como se muestra en la ecuación (14) [18], en donde  $\epsilon$  es la

deformación unitaria tangencial en la fibra inferior de la carpeta asfáltica,  $T$  es la temperatura de la mezcla ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $N_f$  es la cantidad de repeticiones de carga permitidas,  $M$  es la cantidad de repeticiones de carga permitidas en millones,  $E$  es el módulo dinámico de la mezcla asfáltica en MPa y  $\omega$  el daño.

$$N_f = e^{3.3} (\varepsilon)^{-15} e^{T/100} \quad (13)$$

$$\omega = 0.0925 \times MN^{0.3} \times \left(\frac{\varepsilon}{200}\right)^{1.5} \times \left(\frac{E}{3000}\right)^{0.7} \times e^{0.0} \times T \quad (14)$$

Estos modelos fueron determinados para mezclas hechas en planta y pueden ser incluidos manualmente en la aplicación CRME.

La elaboración de modelos de fatiga para utilizar dentro de la guía ha pasado por varias etapas, iniciando con la formulación de modelos basados en datos de laboratorio en el LanammeUCR, tal como el que se muestra en la ecuación (15) [19].

$$N_f = 4,345 \times 10^1 \cdot \varepsilon^{-4.0} \quad (15)$$

## 9 Comparación entre programas

Para evaluar los resultados obtenidos con el CRME, una comparación fue realizada con otras herramientas computacionales de diseño de pavimentos: MEPDG y AASHTOWare Pavement Design ME.

Debido a la forma en que cada software solicita la información, fue necesario procesar los datos con el fin de permitir una comparación directa entre los métodos. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra las condiciones climáticas incorporadas en los programas para cada una de las comparaciones. La Tabla 2 muestra los datos de entrada del tráfico y las características de los materiales de cada capa de la estructura de pavimento flexible. Para la estimación del módulo dinámico se utilizó el modelo de Witzack en el caso del programa AASHTOWare y la curva maestra para el caso del MEPDG, las tablas 3 y 4 muestran los datos de entrada utilizados.

Tabla 1. Condiciones climáticas promedio mensuales del ejemplo

Lluvia, mm		Temperatura, $^{\circ}\text{C}$		TMI	
MEPDG	AASHTOWare	MEPDG	AASHTOWare	MEPDG	AASHTOWare
34	30	12	21.1	41.5	0
35	49	13.9	23.9	0	-28
56	88	17	25.3	0	-16.1
61	64	21.4	23.9	-14.9	-20.8
58	113	24.9	25.3	-31.1	-3.6
93	222	27.5	28.1	-22.2	12.2
85	141	28.1	28.1	-28.3	0
94	193	28.5	29.4	-26.1	0
88	180	26	25.3	-19.1	49.6
118	125	21.6	23.3	0	33.7
87	67	16.2	22.5	45.3	0
29	59	11.6	20	0	0

Tabla 2. Datos de entrada de la comparación entre los softwares

Modulo	AASHTOWare Pavement	MEPDG
<b>Clima</b>	Condiciones climáticas mostradas en la <b>¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.</b>	Condiciones climáticas mostradas en la <b>¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.</b>
<b>Tráfico</b>	17 500 000 ESAL	103 326 000 ESAL
<b>Carpeta asfáltica</b>	Temperatura de referencia 21°C, asfalto efectivo 11.6%, vacíos de aire 7%, Densidad 2403 kg/m <sup>3</sup> , Poisson 0.35, espesor 15.24 cm	Temperatura de referencia 21°C, asfalto efectivo 11%, vacíos de aire 8.5%, densidad 2370 kg/m <sup>3</sup> , Poisson 0.35, espesor 25.4 cm
<b>Ligante asfáltico</b>	A=10.651 y VTS=-3.554, obtenido por reología	A=10.874 y VTS=-3.665, obtenido por reología
<b>Base Granular</b>	Módulo resiliente 275.8 MPa, Poisson 0.35, índice de plasticidad 6, pasando la malla #200 8.7%, gravedad específica 2.70, densidad máxima seca 2037.6 kg/m <sup>3</sup> , contenido óptimo de agua 7.4%, espesor 25.4 cm. Para la SWCC, a <sub>r</sub> =7.2555, b <sub>r</sub> =1.3328, c <sub>r</sub> =0.8242 y h <sub>r</sub> =117.4	Módulo resiliente 265 MPa, Poisson 0.35, índice de plasticidad 1, límite líquido 6, pasando la malla #200 8.7%, gravedad específica 2.70, densidad seca máxima 2037.5 kg/m <sup>3</sup> , contenido óptimo de agua 7.4%, espesor 38 cm. Para la SWCC, a <sub>r</sub> =7.2555, b <sub>r</sub> =1.3328, c <sub>r</sub> =0.8242 y h <sub>r</sub> =117.4
<b>Subbase Granular</b>	Módulo resiliente 193.05 MPa, Poisson 0.35, índice de plasticidad 6, pasando la malla #200 30%, Gravedad específica 2.70, densidad seca máxima 1952.65 kg/m <sup>3</sup> , contenido óptimo de agua 10.1%, espesor 25.4 cm. Para la SWCC, a <sub>r</sub> =48.1615, b <sub>r</sub> =1.0906, c <sub>r</sub> =0.8869 y h <sub>r</sub> =460	Módulo resiliente 119 MPa, Poisson 0.35, índice de plasticidad 0, límite líquido 11, pasando la malla #200 5.2%, gravedad específica 2.70, densidad seca máxima 1922 kg/m <sup>3</sup> , contenido óptimo de agua 7.3%, espesor 50 cm. Para la SWCC, a <sub>r</sub> =4.7572, b <sub>r</sub> =2.8814, c <sub>r</sub> =0.8694 y h <sub>r</sub> =100
<b>Subrasante</b>	Módulo resiliente 89.63 MPa, Poisson 0.35, índice de plasticidad 30, pasando la malla #200 79.1%, gravedad específica 2.70, densidad seca máxima 1565 kg/m <sup>3</sup> , contenido óptimo de agua 22.2%. Para la SWCC, a <sub>r</sub> =136.42, b <sub>r</sub> =0.5183, c <sub>r</sub> =0.0324 y h <sub>r</sub> =500	Módulo resiliente 83 MPa, Poisson 0.35, índice de plasticidad 30, límite líquido 51, pasando la malla #200 79.1%, gravedad específica 2.70, densidad seca máxima 1565 kg/m <sup>3</sup> , contenido óptimo de agua 22.2%. Para la SWCC, a <sub>r</sub> =136.42, b <sub>r</sub> =0.5183, c <sub>r</sub> =0.0324 y h <sub>r</sub> =500

Tabla 3. Datos para el modelo de Witczak de Módulo dinámico

Malla	Porcentaje pasando
3/4 in	100
3/8 in	77
No. 4	60
No. 200	6

Tabla 4. Datos de ensayo del módulo dinámico de la mezcla asfáltica

Temperatura °C	Módulo dinámico mezcla E* (MPa)					
	25 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz	0,5 Hz	0,1 Hz
-12,2	18834	17941	17626	16241	15626	14171
4,4	14102	13161	12471	10582	9817	8105
21,1	7905	7254	6370	4585	3946	2752
37,8	3718	2957	2417	1436	1158	730
54,4	1188	890	677	392	304	198

Para hacer la comparación más exacta, se utilizaron las funciones de transferencia propuestas en la guía MEPDG [1].

La Tabla 5 muestra los resultados obtenidos con el CRME y con software anterior de la guía MEPDG y el software AASHTOWare Pavement ME.

Se utilizaron las dos versiones de programas relacionados a la guía MEPDG, ya que esta metodología es la base del CRME y para evaluar las diferencias entre estas herramientas computacionales.

Las diferencias entre los valores obtenidos pueden provenir de consideraciones distintas en el diseño, sin embargo, los resultados obtenidos con el software de diseño mecánico empírico de pavimentos de Costa Rica, se encuentran entre los valores esperados.

Tabla 5. Salidas de las herramientas

	Parámetro	CRME	AASHTO Ware	Diferencia (%)
AASHTOWare	Área agrietada (%)	14.27	5	185
	Agrietamiento longitudinal (pies/milla)	2534	2000	27
	Ahuellamiento MAC (mm)	15.75	22.35	30
	Ahuellamiento Total (mm)	20.53	31.49	35
	Parámetro	CRME	MEPDG	Diferencia (%)
MEPDG	Área agrietada (%)	14.69	16.49	11
	Agrietamiento longitudinal (pies/milla)	1415.9	1095.8	29
	Ahuellamiento MAC (mm)	5.49	16.26	66
	Ahuellamiento Total (mm)	7.73	24.89	69

Como se observa en la Tabla 5, la mayor diferencia encontrada es de un 185%, en la comparación del porcentaje agrietado calculado con el AASHTOWare. Otra gran diferencia (69%) está en el ahuellamiento en la carpeta asfáltica según el software previo de la guía MEPDG. Los valores menores de ahuellamiento observados en el CRME pueden asociarse a la consideración del zigzagueo lateral.

El enfoque de endurecimiento por deformación fue considerado lo que permite tomar en cuenta la variación climática y su efecto en el diseño de pavimentos. Las variaciones estacionales en el diseño pueden ser visualizadas debido a la variación del módulo resiliente de las capas no ligadas y el efecto de la temperatura en el módulo dinámico de la carpeta asfáltica.

En la Figura 3 se muestran los módulos promedio mensuales utilizados en el programa CRME y los valores utilizados en un año en la herramienta MEPDG. Debe mencionarse que la guía MEPDG predice un módulo para diferentes profundidades y realiza varias estimaciones en cada profundidad, además de realizar estimaciones de módulo dinámico para cada mes del periodo de diseño.

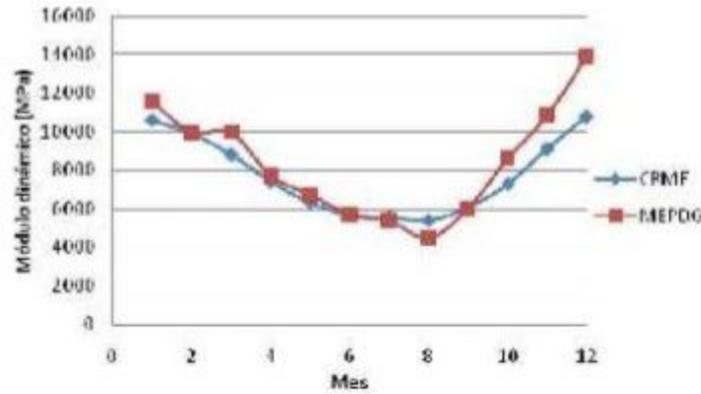


Figura 3. Módulos dinámicos promedio mensuales

Los deterioros principales predichos por CRME son: Ahuellamiento total y en la MAC, el área agrietada y el agrietamiento longitudinal. La diferencia entre los modelos puede ser vista en los gráficos comparativos mostrados en la Figura 4.

Los gráficos comparativos entre el CRME y el AASHTOWare no se muestran debido a que este último no permite realizarlos. Similitudes entre ambas metodologías pueden observarse en los gráficos al observar la forma de la curva.

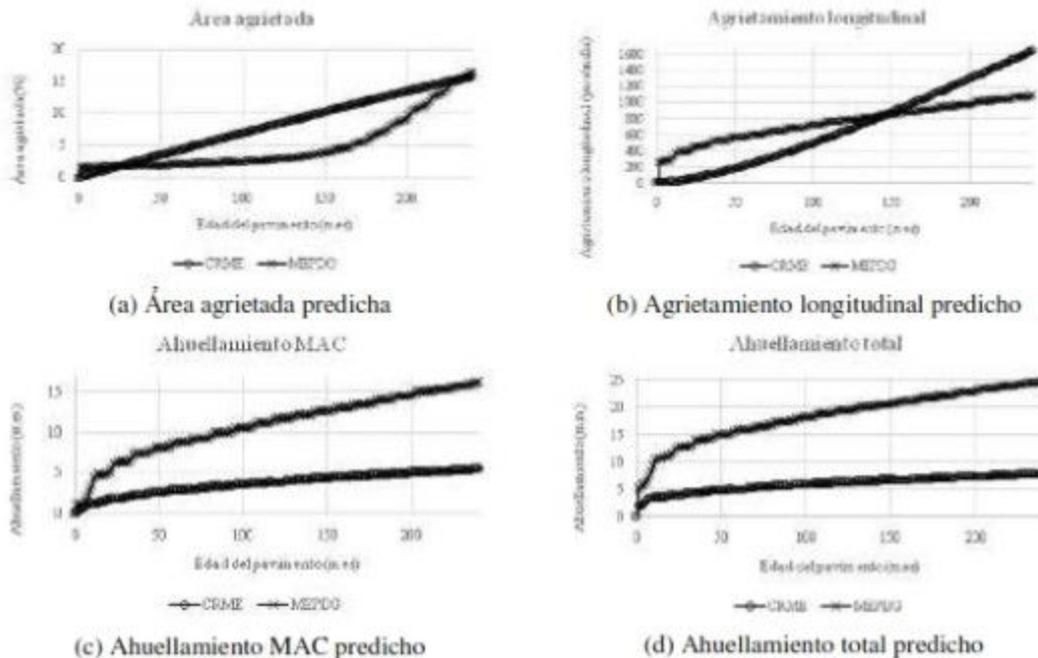


Figura 4. Comparación de ahuellamientos obtenidos entre CRME y MEPDG

## 10 Conclusiones

Con la implementación de la guía de diseño mecanístico empírica de pavimentos CRME, Costa Rica supera las falencias de la metodología tradicional de diseño empírico. La posibilidad de desarrollar análisis detallados considerando modelos mecanísticos mejorará el uso de recursos, logrando diseños de pavimentos flexibles más eficientes y económicos.

El desarrollo de la guía CRME implica un mejoramiento continuo de la herramienta de cálculo, incluyendo investigación en diferentes áreas como propiedades de materiales, desarrollo del daño y efecto de la humedad y el envejecimiento.

El software CRME incluye la mayoría de metodologías usadas en la guía de diseño Mecanístico Empírico de Pavimentos (MEPDG) de AASHTO, sin embargo, la herramienta costarricense basa sus cálculos en los promedios mensuales, a diferencia del MEPDG, el cual predice los valores para cada mes durante la vida de diseño.

Las diferencias encontradas entre el CRME y las otras metodologías son esperadas ya que los modelos fueron calibrados para condiciones estadounidenses con climas y tránsitos distintos, y que la forma en que se recolectan los datos en los programas es distinta para cada caso. Sin embargo, se puede notar que los resultados obtenidos con la guía CRME son realistas y más representativos de las condiciones de la región.

## 11 Referencias

- [1]NCHRP 1-37A. "Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures". Final Report. Research Board of the National Academies, National Research Council, Washington, DC, 2004.
- [2]Leiva-Villacorta, F., Aguiar-Moya, J. P., Loría-Salazar, L. G."Accelerated pavement testing first results at the LanammeUCR APT facility". Transportation Research Board 94th Annual Meeting Proceedings, 2015.
- [3]Leiva-Villacorta, F., Vargas-Nordbeck, A., Aguiar-Moya, J. P., Loría-Salazar, L. G. "Development and Calibration of Permanent Deformation Models."The Roles of Accelerated Pavement Testing in Pavement Sustainability. Engineering, Environment, and Economics, pp. 573-587.2016.
- [4]Zapata, C. E., Perera, Y. Y., Houton, W. N. "Matric Suction Prediction Model used in the New AASTHO ME-PDG". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Washington, DC, 2009.
- [5]Cary, C. E., Zapata, C. E. "Enhancement of the model for resilient response of soils due to seasonal environmental changes implemented in the m-epdg". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Washington, DC, 2010.
- [6]Leiva-Villacorta, F., Loría-Salazar, L. G., Camacho-Garita, E. "Evaluating Nonlinearity on Granular Materials and Soils Through the Use of Deflection Techniques". The Roles of Accelerated Pavement Testing in Pavement Sustainability. Engineering, Environment, and Economics, pp. 111-129, 2016.
- [7]Loría, L. G., Badilla, G., Jimenez Acuna, M., Elizondo, F., & Aguiar-Moya, J. P. "Experiences in the Characterization of Materials Used in the Calibration of the AASHTO Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG) for Flexible Pavement for Costa Rica". Transportation Research Board 90th Annual Meeting, 2011.
- [8]Ulloa, Á., Badilla, G., Allen-Monge, J., Sibaja-Obando, D." Encuesta de Carga". LanammeUCR, 2007.
- [9]Aguiar-Moya, J. P., Corrales, J. P., Elizondo, F., Loría-Salazar, L. G. "PaveLab and heavy vehicle simulator implementation at the National Laboratory of Materials and Testing Models of the University of Costa Rica." Advances in pavement design through full-scale accelerated pavement testing, pp. 25-32, 2012.
- [10]Trejos-Castillo, C., Aguiar-Moya, J. P., Loría-Salazar, L. G. "Desarrollo de software de análisis y diseño de pavimentos para Costa Rica". Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR, 2016.
- [11]Huang, Y. H. "Pavement design and analysis" Pearson/Prentice Hall, 2004.
- [12]Beven, K." A sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration estimates". Journal of Hydrology, pp. 169-190, 1979.

- [13]Elizondo, F.; Ulloa, Á.; Badilla, G." Predicción de módulos resilientes en mezclas asfálticas mediante el modelo de Witczak". *Infraestructura Vial*, Vol. 10, no 3, 2007.
- [14]Leiva-Villacorta, F.; Loria-Salazar, L. G.; Aguiar-Moya, J. P. "Development of an Improved and More Effective Dynamic Modulus  $E^*$  Model for Mixtures in Costa Rica by Means of Artificial Neural Networks". *Transportation Research Board 92nd Annual Meeting*, 2013.
- [15]Zhao, Y.; Kim, Y. "Time-temperature superposition for asphalt mixtures with growing damage and permanent deformation in compression". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, no 1832, pp. 161-172, 2003.
- [16]Hu, X., Zhou, F., Hu, S., & Walubita, L. F."Proposed loading waveforms and loading time equations for mechanistic-empirical pavement design and analysis". *Journal of Transportation Engineering*, vol. 136, no 6, pp. 518-527, 2009.
- [17]Andrei, D., Witczak, M., Schwartz, C., Uzan, J. "Harmonized resilient modulus test method for unbound pavement materials". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 29-37, 2004.
- [18]Leiva-Villacorta, F., Vargas-Nordbeck, A., Aguiar-Moya, J. P., Loria-Salazar, L. G. "Calibration of a Mechanistic-Empirical Fatigue Model Using the PaveLab Heavy Vehicle Simulator". *Transportation Research Board 95th Annual Meeting (No. 16-3509)*, 2016.
- [19]Aguiar-Moya, J. P.; Loria-Salazar, L. G. "Desarrollo de modelos de fatiga para capas asfálticas", 2006.