

AVANCE DE LAS INVESTIGACIONES EN LA GENERACIÓN DE LA INTERFAZ DE CÁLCULO QUE ACOMPAÑARÁ A LA NUEVA GUÍA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS COSTARRICENSE

Luis Guillermo Loría Salazar¹, Christopher Trejos Castillo², Paulina Leiva Padilla³

¹Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, luis.loriasalazar@ucr.ac.cr

²Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, christopher.trejoscastillo@ucr.ac.cr

³Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, paulina.leivapadilla@ucr.ac.cr

Resumen

Tradicionalmente, el diseño de pavimentos en Costa Rica y los países de la región utiliza las metodologías definidas por la AASHTO en 1993. Estas metodologías fueron desarrolladas para condiciones específicas de clima, materiales y carga de ciertas regiones de Estados Unidos, lo que las hace poco aplicables a realidades ajenas.

Recientemente, con la finalidad de retornar a las bases que fundamentan a la ingeniería, la AASHTO 93 ha sido complementada con modelos mecaniscistas, para la verificación del desempeño de la estructura durante la vida de diseño, a través de la Metodología de Diseño Mecánico-Empírico (MEPDG, por sus siglas en inglés), propuesta en el 2002 y que constituye el estado del arte del diseño de pavimentos en Estados Unidos.

Con la finalidad de garantizar la elaboración de diseños óptimos, que permitan tanto un desempeño adecuado del pavimento a lo largo de la vida de diseño, como la utilización eficiente de los recursos del estado, desde el año 2010, el Programa de Infraestructura del Transporte, del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, de la Universidad de Costa Rica (PITRA-LanammeUCR), a través de su Unidad de Materiales y Pavimentos (UMP), ha venido gestando toda una línea de investigaciones, en la generación de una guía de diseño para Costa Rica, que pueda ser extrapolable a los países de la región.

Para la definición completa de esta metodología es necesario el desarrollo de una herramienta de cálculo, suficientemente amigable, eficiente y accesible, que le permita al ingeniero, comprobar y facilitar su proceso de diseño. El presente documento expone dos de las primeras versiones del CR-ME, nombre con que se ha nombrado al software que se espera acompañe a la Guía de Diseño Mecánico-Empírico Costarricense. Con estas dos primeras versiones, se han definido los lineamientos básicos para el lanzamiento de la versión oficial definitiva, que se pondrá a disposición del público a finales del presente año.

Palabras clave: mecanístico-empírico, diseño de pavimentos, programación, pavimentos flexibles

1 Introducción

El diseño de pavimentos en países latinoamericanos ha tenido una gran influencia de las metodologías propuestas por Estados Unidos, que fueron obtenidas de los ensayos realizados a la pista de ensayo a escala real del estado de Illinois en los años 60.

Esta metodología considera por tanto condiciones climáticas, propiedades de materiales y tráfico diferentes a las presentes en países tropicales, por lo cual su uso admite solamente una opción de diseño que debe ser adaptada y mejorada.

En este sentido, es posible mencionar la evolución natural de las metodologías de diseño de pavimentos que se muestra en la Figura 1, donde se observa que el estado de la práctica actual, debe incluir una componente de verificación mecánica del desempeño del pavimento en el tiempo; migrando ya en el estado del arte, a la definición de metodologías mecánicas en el futuro.

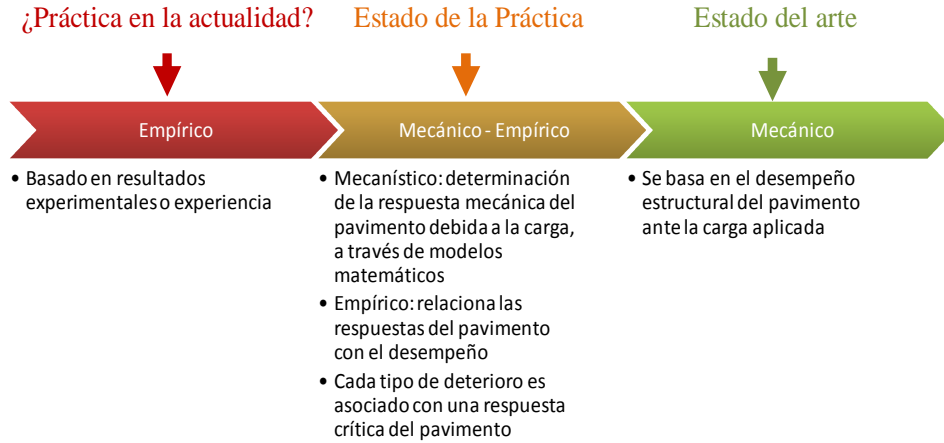


Figura 1 Proceso de evolución de las metodologías de diseño

Es por esta razón importante generar una guía de diseño mecanístico-empírica que permita la verificación del desempeño del diseño empírico AASTHO 93, tomando en cuenta las características de la región centroamericana. En este sentido, tal como se muestra en la Figura 2, en el PITRA-LanammeUCR, a través de su Unidad de Materiales y Pavimentos (UMP), se ha venido gestando toda una línea de investigaciones, en la generación de una guía de diseño para Costa Rica, que pueda ser extrapolable a los países de la región.



Figura 2 Proceso de definición de la Guía de Diseño Mecanístico-empírica de Costa Rica

El presente documento muestra parte de los detalles de los avances logrados hasta la fecha, en las labores ejecutadas en el desarrollo de la guía de diseño costarricense, que se espera sea útil también para el diseño de pavimentos de los países vecinos.

2 Diseño de pavimentos flexibles

El diseño tradicional de pavimentos flexibles de la metodología AASHTO 93 está básicamente definido, en encontrar valores de espesor de cada una sus capas, de forma tal que la estructura sea capaz de soportar estructural y funcionalmente, las cargas a las que será sometida durante la vida útil esperada.

Con el fin de complementar a las metodologías de diseño empíricas, alrededor del mundo se han elaborado metodologías que incluyen conceptos mecanicistas en un intento por verificar el desempeño de la estructura, retornando a las bases de la ingeniería de este modo.

Las metodologías de diseño mecanístico-empíricas se basan en el cálculo de las respuestas del pavimento ante condiciones de tráfico, propiedades de los materiales constitutivos y el clima en cada subestación, que posteriormente se utilizan como insumo en las ecuaciones de transferencia, para determinar el desempeño del pavimento, ante criterios de aceptación establecidos.

2.1 Metodología de diseño mecanístico empírica de pavimentos flexibles MEPDG

Esta metodología se basa en la determinación del desempeño mecánico del pavimento a dos tipos de deterioros principales: agrietamiento por fatiga -tanto de arriba hacia abajo como de abajo hacia arriba en la capa asfáltica-, y deformación permanente estructural -para cada capa-, con el fin de garantizar que la estructura cumpla con el comportamiento esperado, durante la vida útil esperada.

2.1.1 Agrietamiento por fatiga

El agrietamiento por fatiga de la primera capa de pavimento, se obtiene calculando el número de repeticiones que el material de esta capa soportaría en las mismas condiciones. Para este objetivo, se calibran modelos estadísticos que permiten correlacionar, el módulo elástico y la deformación a tensión del material mediante ensayos de fatiga, con el número de repeticiones de carga necesarias para que falle en tales condiciones. En Estados Unidos, la MEPDG ha calibrado, para una gama de materiales representativa, el modelo de la Ecuación 1 y Ecuación 2 [1].

$$N_f = 0.00432 \cdot 10^M \cdot k'_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{3.9492} \left(\frac{1}{E^*} \right)^{1.281} \quad (1)$$

$$M = 4.84 \left[\frac{V_b}{V_a + V_b} - 0.69 \right] \quad (2)$$

donde N_f es el número de repeticiones de carga a fatiga, V_a es el porcentaje de vacíos, V_b es el porcentaje de asfalto efectivo, k'_1 es un parámetro de corrección según el tipo de grieta, E^* es el módulo dinámico de la carpeta asfáltica y ε_t es la deformación unitaria a tensión en la parte inferior de la carpeta asfáltica para agrietamiento de abajo hacia arriba y en la superficie para agrietamiento de arriba hacia abajo, en la condición crítica que genera el daño máximo.

Posteriormente, el valor de N_f calculado se transforma discretamente el daño producido en el tiempo, de acuerdo con la ley de Miner de la Ecuación 3.

$$D = N/N_f \quad (3)$$

donde D es el daño producido, N es la cantidad de ejes de carga acumulados en el período de estudio y N_f ya ha sido definido anteriormente.

Una vez determinado el daño, es necesario calcular el porcentaje de área agrietada y el agrietamiento longitudinal de acuerdo a las fórmulas de la Ecuación 4 y Ecuación 5 [1].

$$AA = \left(\frac{6000}{1 + e^{(-2C'_2 + C'_2 * \log(D))}} \right) * \left(\frac{1}{60} \right) \quad (4)$$

$$AL = \left(\frac{1000}{1 + e^{7.0 - 3.5 * \log(D * 100)}} \right) * 10.56 \quad (5)$$

donde AA: porcentaje de área agrietada, $C'_2 = -2.40874 - 39.748(1 + h_{AC})^{-2.856}$, h_{AC} : espesor de la carpeta asfáltica, AL: agrietamiento longitudinal en pies/milla y D : definido previamente.

Dichas funciones, representan el paso final antes de decidir si el pavimento será apropiado para mantener un desempeño adecuado durante la vida útil esperada; es por tanto importante, que para el desarrollo de una guía de diseño mecanístico-empírico de pavimentos, cada región realice una calibración propia, que le permita obtener sus propias ecuaciones de transferencia, disminuyendo de este modo la confiabilidad por el uso de ecuaciones que no representan las condiciones propias del sitio donde se realizará el proyecto diseñado.

2.1.2 Deformación permanente

La deformación permanente estructural del pavimento, se da por la densificación de cada una de las capas que lo conforman, es por esto que la MEPDG establece modelos distintos para el cálculo de la deformación permanente de cada una de estas.

Para el caso de la carpeta asfáltica, la Ecuación 1 y la Ecuación 7, definidas a partir de ε_p : deformación plástica acumulada a N repeticiones de carga, ε_r : deformación unitaria resiliente a la mitad de la carpeta asfáltica, k_1 : parámetro de profundidad, T : temperatura de la mezcla en grados Fahrenheit, DP : deformación permanente en pulgadas y h_i : espesor de la capa asfáltica en milímetros [1].

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = k_1 \cdot 10^{-3.4488T^{1.5606}N^{0.479244}} \quad (6)$$

$$DP = \sum_{i=1}^{n \text{ capas}} \varepsilon_p^i \cdot h_i \quad (7)$$

En el caso de la base y la subbase granular, la guía recomienda utilizar la Ecuación 8, junto con la Ecuación 9, Ecuación 10, Ecuación 11 y Ecuación 12, a continuación [1].

$$\delta_a = \beta_1 * \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right) e^{-\left[\frac{\rho}{N} \right]^\beta} \varepsilon_v h \quad (8)$$

$$\left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right) = \frac{\left(e^{(\rho)^\beta} * 0.15 \right) + \left(e^{(\rho/10^9)^\beta} * 20 \right)}{2} \quad (9)$$

$$\rho = 10^9 \left[\frac{\ln 0.0075}{1 - (10^9)^\beta} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (10)$$

$$W_c = 51.712 \left[\left(\frac{E_r}{2555} \right)^{\frac{1}{0.64}} \right]^{-0.3586 * GWT^{0.1192}} \quad (11)$$

$$\log \beta = -0.61119 - 0.017638 * W_c \quad (12)$$

donde δ_a : deformación permanente en milímetros, β_1 : factor de calibración, que un valor de 1.673 para bases y subbases granulares y 1.35 para la subrasante, N : definido anteriormente, ε_v :

deformación unitaria vertical a la mitad de la base granular o la subbase, h : espesor de la base granular o la subbase en milímetros, $\varepsilon_0, \beta, \rho$: son propiedades del material, ε_r : deformación unitaria elástica utilizada en la prueba de laboratorio para obtener las propiedades $\varepsilon_0, \beta, \rho$, GTW : profundidad del nivel freático en pies, E_r : módulo de la capa y W_c : porcentaje de contenido de agua.

Para la subrasante, bajo el supuesto de espesor infinito, se propone la Ecuación 13 [1].

$$\delta = \left(\frac{1 - e^{-k \cdot h_{roca}}}{k} \right) * \varepsilon_{p,z=0} \quad (13)$$

$$\varepsilon_p = \varepsilon_v \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right) e^{-\left(\frac{\rho}{N}\right)^\beta} \quad (14)$$

$$k = \frac{1}{6} \ln \left(\frac{\varepsilon_{p,z=0 \text{ in}}}{\varepsilon_{p,z=6 \text{ in}}} \right) \quad (15)$$

donde δ : deformación permanente de la subrasante, h_{roca} : profundidad a la roca firme, $\varepsilon_{p,z}$: deformación plástica acumulada a N repeticiones de carga a la profundidad z en pulgadas de la subrasante y $\varepsilon_v, \varepsilon_0, \varepsilon_r, \rho, \beta$ y N : definidos previamente.

Debe mencionarse que debido a que se tienen cambios en las condiciones climáticas a lo largo de la vida útil del pavimento, que influyen en los valores de las propiedades de los materiales, y por tanto el cálculo de la deformación permanente en cada subestación, es necesario utilizar el enfoque de endurecimiento por deformación unitaria, que propicia que al inicio de cada subestación se conserve la misma deformación unitaria plástica de la subestación anterior.

El enfoque se basa en igualar la deformación unitaria de la subestación anterior, utilizando los datos de la siguiente subestación, para así obtener un valor de ejes de carga equivalentes con el cual se calcula la deformación permanente de dicha subestación, para que la deformación permanente a lo largo de la vida útil sea mayor o igual al avanzar en las subestaciones. Estas ecuaciones para el cálculo de los ejes de carga equivalentes se muestran a continuación: Ecuación 16 para la carpeta asfáltica, Ecuación 17 para la base y Ecuación 18 para la subbase y la subrasante.

$$Nt_{equiv,i} = \left(\frac{T_i}{T_{i+1}} \right)^{\frac{1.5606}{0.479244}} \cdot N_i \quad (16)$$

$$Nt_{equiv,i} = \frac{\rho_{i+1}}{\left\{ -\ln \left[e^{\left(\frac{\rho_i}{N_i}\right)^\beta} \left(\frac{(\varepsilon_0/\varepsilon_r)_i}{(\varepsilon_0/\varepsilon_r)_{i+1}} \right) \left(\frac{\varepsilon_{v,i}}{\varepsilon_{v,i+1}} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{\beta_{i+1}}}} \quad (17)$$

$$Nt_{equiv,i} = \frac{\rho_{i+1}}{\left\{ -\ln \left[\frac{\delta_i}{\left(\frac{1 - e^{-k_{i+1} \cdot h}}{k_{i+1}} \right) \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right)_{i+1} \cdot \varepsilon_{v,i+1}} \right] \right\}^{\frac{1}{\beta_{i+1}}}} \quad (18)$$

Estas fórmulas pueden indefinirse según la transición de estación, por lo cual en la guía desarrollada para Costa Rica, se asume que se conservará la deformación unitaria de la subestación anterior.

3 Metodología costarricense de diseño mecánico - empírico de pavimentos flexibles

Para la Guía de Diseño de Pavimentos de Costa Rica se realizó una división por niveles de acuerdo a las características propias del país y la importancia del proyecto en diseño, tal como se describen a continuación.

3.1 Nivel 1 de conocimiento

Este es el nivel de mayor importancia, utilizado para proyectos carreteros de gran tránsito vehicular. Se caracteriza porque requiere del conocimiento del espectro de carga de la carretera a diseñar, además de los resultados del ensayo AASHTO T315 para la determinación de la curva maestra de módulo dinámico a cada una de las temperaturas de cada subestación [1].

También es necesario que el usuario realice el ensayo NCHRP 1-28A o AASHTO T307, para la determinación del módulo resiliente de las capas inferiores utilizando el modelo universal constitutivo de los materiales a utilizar en el proyecto que se muestra en la Ecuación 22 [1]

$$M_r = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3} \quad (19)$$

donde M_r : módulo resiliente en Pascales, p_a : presión atmosférica en Pascales, $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$: primer invariante de esfuerzos, $\tau_{oct} = \frac{\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}}{3}$: esfuerzo cortante octaédrico, σ_1, σ_2 y σ_3 : esfuerzos principales y k_1, k_2 y k_3 : constantes obtenidas de la regresión lineal múltiple.

La importancia del uso de este enfoque radica en que las propiedades de estos materiales son esfuerzo dependientes; tal como se muestra en la Figura 3, el módulo resiliente cambia en función de la carga aplicada en el pavimento, afectando significativamente sus respuestas. Para cada una de las cargas del espectro de carga, es necesario iterar hasta que el módulo resiliente obtenido en dos pasos consecutivos, sea menor a un porcentaje de error aceptado.

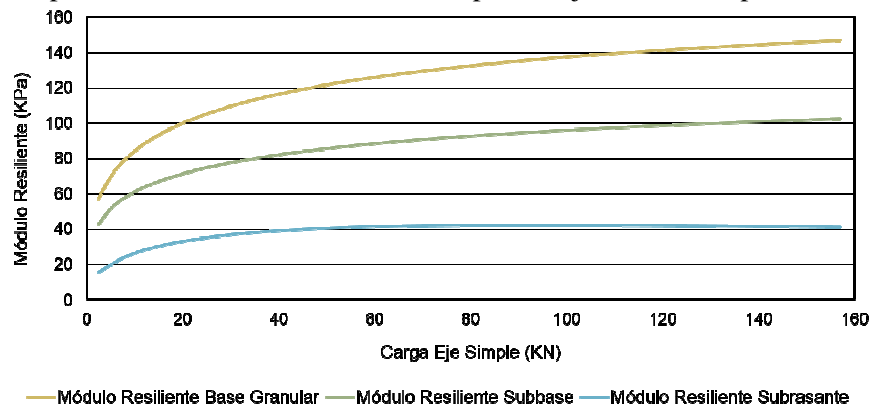


Figura 3 Módulo resiliente en función de la carga aplicada

3.2 Nivel 2 de conocimiento

El Nivel 2 es el que continúa en el grado de importancia, dentro de este nivel, se permite al usuario que elija entre dos opciones de espectros de carga predeterminados.

Actualmente el software implementado toma en cuenta los espectros de carga de las carreteras San José-Cartago y San José-Limón del año 2009 (Figura 4) [5], por ser las únicas con más de tres años de encuestas de carga, como es solicitado en la guía MEPDG.

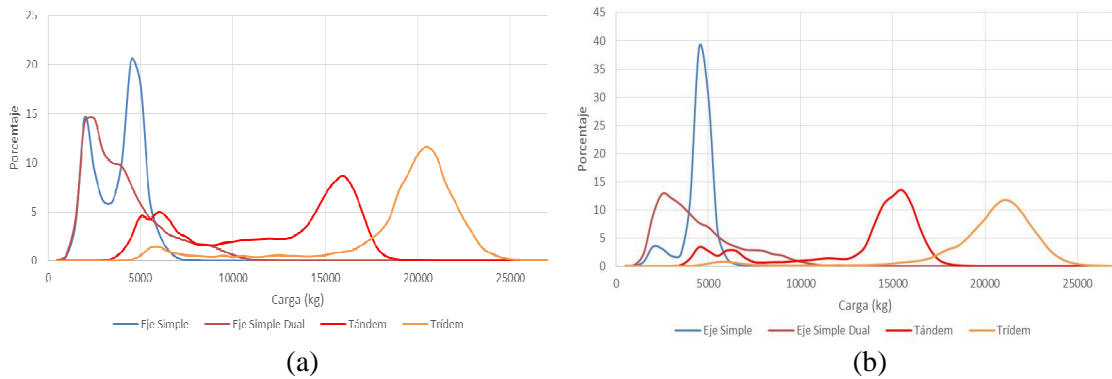


Figura 4 (a) Espectro de carga de la carretera San José-Cartago, (b) espectro de carga de la carretera San José-Limón

Con respecto a los materiales, se propone el uso de la ecuación de Witczak-Lanamme [6] para la caracterización del módulo dinámico de la carpeta asfáltica, y los modelos propuestos por Juan Diego Porras en su tesis de grado, el módulo resiliente de los materiales de la base, subbase y subrasante [7].

Tanto en el Nivel 1 como en el Nivel 2, utiliza el software de multicapa elástica OpenPave, desarrollado por Jeremy Lea de la Universidad de California en Davis [8], para el cálculo de las respuestas de desempeño del pavimento.

La metodología desarrollada consiste en el cálculo de las respuestas del pavimento, ante cada una de las cargas del espectro, para el uso posterior de las ecuaciones de transferencia, del daño a la fatiga y deformación permanente. En la Figura 5 se muestra en detalle el proceso de diseño.

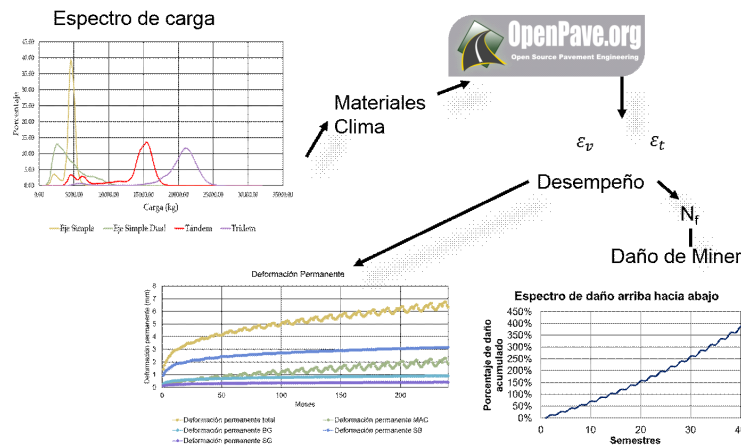


Figura 5 Proceso de diseño mecánico empírico de pavimentos de Costa Rica

Este enfoque demanda un mayor tiempo de cálculo, sin embargo constituye una de las metodologías más precisas para el diseño de pavimentos flexibles, puesto que considera el deterioro causado por cada una de las cargas del espectro, en lugar de convertir la cantidad de ejes de cada carga a una cantidad equivalente de ejes de carga debidos a una carga determinada, asumiendo que se tendrá el mismo daño, tal como lo hace la metodología de ejes equivalentes, que podría sobrestimar o subestimar el tráfico que transitará por la carretera.

3.3 Nivel 3 de conocimiento

Este nivel es el recomendado para proyectos de menor importancia, el cual admite que el diseñador utilice valores característicos de módulo para la carpeta asfáltica y los materiales que componen la base, subbase y subrasante.

Adicionalmente, este nivel recomienda el uso de los factores camión determinados por el LanammeUCR o el MOPT, o los propios a ingresar por el usuario, calcular la cantidad de ejes equivalentes de carga.

En cuanto al cálculo de las respuestas del pavimento, se utiliza la metodología de espesor equivalente y las ecuaciones de transferencia, realizando discretización semestral del tiempo para determinar el desempeño del pavimento.

Para este nivel el diseñador calcula una idea del desempeño que presentará el pavimento con los espesores iniciales ingresados al programa, en una capacidad máxima de una estructura de seis capas.

4 Interfaz de cálculo

Para la implementación necesaria de la Guía de Diseño de Costa Rica, es necesario el desarrollo de una herramienta de cálculo que le facilite al usuario la realización de los diseños de una manera eficiente.

En este sentido, se han desarrollado dos versiones de prueba, aún no oficiales, que reúnen los esfuerzos que hasta el momento se han formulado.

La primera de las versiones fue desarrollada mediante el uso de las interfaces gráficas de usuario del lenguaje de programación Matlab. La pantalla de bienvenida de esta versión es la que se muestra en Figura 6, y puede ser obtenida de manera gratuita en el centro de descarga del LanammeUCR:

<http://163.178.106.6/sitio-nuevo/index.php/centro-de-descarga/cr-me/descripci%C3%B3n-cr-me.html>.

Para esta versión, aún no se contemplaba la división por niveles anteriormente expuesta, que fue definida como la principal mejora requerida en el siguiente paso.



Figura 6 Interfaz gráfica CR-ME v1.0 [9, 10]

La segunda versión (Figura 7), en un intento por mejorar las posibilidades de uso desde cualquier computador, fue desarrollada mediante el uso del lenguaje de programación e interfaces gráficas de usuario de Visual Basic de Excel. Esta versión, además de la división por niveles de importancia, incluye un módulo para la determinación de una aproximación inicial de los espesores a utilizar con ayuda de la metodología de diseño de pavimentos empírica AASHTO 93.

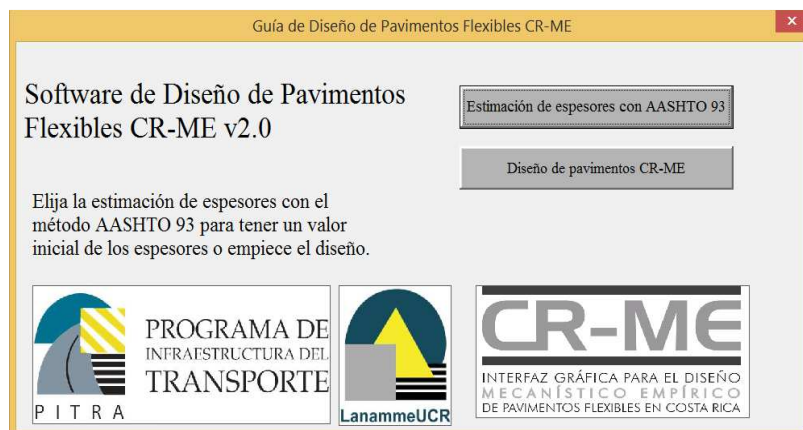


Figura 7 Interfaz gráfica CR-ME v2.0 [11]

En esta versión, se introduce también una mejora al módulo clima, puesto que se le permite al usuario ingresar la zona climática donde se ubica el proyecto, de manera que se cargan automáticamente los datos necesarios, para la modificación del módulo de la subrasante bajo los cambios de humedad típicos del país, de acuerdo con la Ecuación 20 [12], y las variaciones de temperatura, que son influyentes en el valor del módulo dinámico de la carpeta del Nivel 1. Las zonas climáticas disponibles en este caso (Figura 8), fueron obtenidas mediante los climatogramas del Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica.

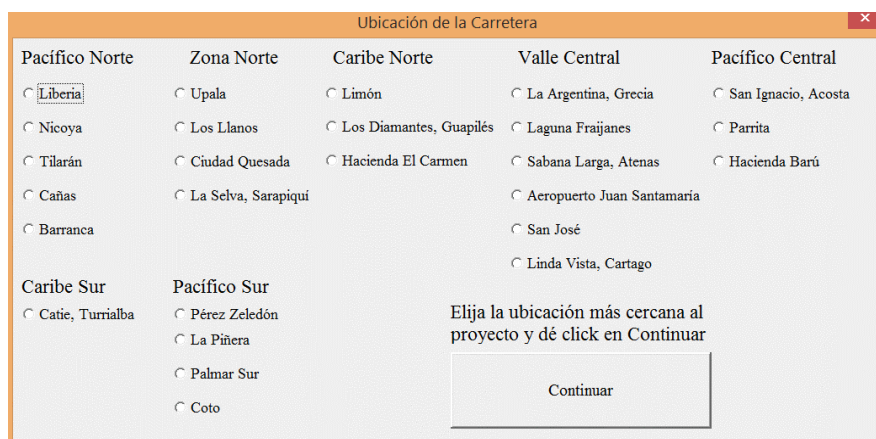


Figura 8 Elección de la zona climática del proyecto [11]

$$F_{env} = \frac{M_r}{M_{r, \text{ópt}}} = 10^{\frac{a + \frac{b-a}{1 + e^{\beta + k_s(S - S_{\text{ópt}})}}}{}} \quad (20)$$

donde F_{env} : factor ambiental, M_r : módulo resiliente buscado, $M_{r, \text{ópt}}$: módulo resiliente a la humedad y densidad óptima de laboratorio, S : grado de saturación a evaluar, $S_{\text{ópt}}$: grado de saturación con la humedad y densidad óptimas de laboratorio, $a = \min(\log(M_r/M_{r, \text{ópt}}))$, $b = \max(\log(M_r/M_{r, \text{ópt}}))$, k_s : parámetro de regresión y $\beta = \ln(-b/a)$ -esta fórmula puede llegar a disminuir el módulo resiliente de la subrasante hasta en un 50% en la época lluviosa y aumentarlo hasta el doble en la época seca-. A pesar del avance, este módulo aún deberá ser mejorado en próximas versiones, para una división por niveles de importancia.

Esta nueva interfaz, en cuanto a caracterización de materiales, permite al usuario incluir de una manera sencilla y rápida los datos necesarios para realizar un diseño en cualquiera de los tres niveles de conocimiento, tal como se muestra en la Figura 9, enviando finalmente al

usuario, a una ventana de resumen del cumplimiento o no con las especificaciones establecidas (Figura 10).

CURVA MAESTRA

Frecuencia, Hz

25 Hz 10 Hz 5 Hz 1 Hz 0.5 Hz 0.1 Hz

Módulo [E*], psi

14°C						
40°C						
70°C						
100°C						
130°C						

Utilizar los datos predeterminados para una mezcla AC-30

INGRESAR

(a)

Estructura y materiales

Datos llanta | Carpeta asfáltica | **Base 1** | Base 2 | Subbase 1 | Subbase 2 | Subrasante

Datos Base 1

Espesor (mm) **Valores típicos**

Módulo resiliente (MPa) Para conocer valores típicos de módulo resiliente según el material, dé click en el botón valores típicos.

Razón de Poisson

-Si tiene tres capas, coloque 0 en los valores de Base 2, Subbase 1 y Subbase 2.
 -Si tiene cuatro capas, coloque 0 en los valores de Base 2 y Subbase 2.
 -Si tiene cinco capas, coloque 0 en los valores de Subbase 2.

Anterior Siguiente Guardar Debe dar click en Siguiente para guardar los datos

(b)

Espectro de carga predeterminado

Basarse en el espectro de carga Ruta Florencio del Castillo (San José Cartago)

Basarse en el espectro de carga Ruta Braulio Carrillo (San José Limón)

Vida útil (años)

Creimiento vehicular (%)

TPDA

Cantidad de carriles

2 carriles

4 carriles

6 o más carriles

Continuar

Porcentaje de cada tipo de vehículo

Vehículos livianos

Pick up

C2

C2+

C3

Bus C2

C4

T2-S1

T3-S1

T3-S2

T3-S3

Espectro de Carga Anual San José Limón

Espectro de Carga Anual San José Cartago

(c)

Figura 9 (a) Ingreso de datos para la determinación de la curva maestra en el nivel 1, (b) ingreso de datos de módulo resiliente y espesor en el nivel 3, (c) ingreso del tráfico de la carretera en el nivel 2 [11]

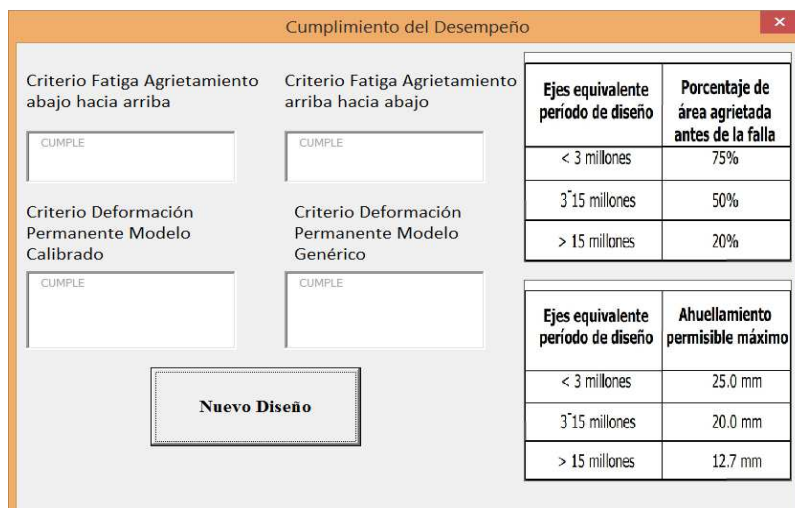


Figura 10 Ventana de salida del CR-ME v2.0 [11]

5 Conclusiones y recomendaciones

La utilización de un diseño de pavimentos, que incorpore la verificación del desempeño mecánico de la estructura durante su vida de diseño, permite el retorno de esta rama a las bases de que fundamentan la ingeniería de pavimentos, con retraso por algunos años a causa del uso generalizado de las metodologías empíricas.

La Guía de Diseño Mecánico-Empírico de Costa Rica intenta reunir los esfuerzos realizados desde el 2010 en la definición de la primera en la rama para latinoamérica, y en especial con posibilidad de ser extrapolable a países de la región centroamericana principalmente.

Las dos primeras versiones de software aún no oficiales permiten establecer los lineamientos básicos para la definición del software oficial, que se espera esté disponible al público en el siguiente año.

Con respecto a la metodología propuesta por la guía costarricense, el enfoque de endurecimiento por deformación unitaria permite que la curva de deformación permanente en función del tiempo o de los ejes de carga acumulados, tenga un comportamiento en que se muestre un crecimiento rápido al inicio y una tendencia lineal de aumento de la deformación en la segunda etapa de acumulación del ahuellamiento, tal como lo predice la curva teórica de acumulación de la deformación permanente.

Por otra parte, dejar de lado la utilización de los factores camión o los factores de equivalencia de carga para poder caracterizar el tráfico al que será sometida la carretera a diseñar, permite eliminar el sesgo producido cuando se utilizan los ESAL en la definición del tránsito de diseño.

Por tanto, utilizar el enfoque que determina el daño producido por cada una de las cargas del espectro, permite conocer de manera más puntual el desempeño del pavimento ante cada una de las cargas, a lo largo de todo el tiempo en que se espera que el pavimento tenga una serviciabilidad adecuada. Esto puede ayudar a dar recomendaciones a las autoridades respecto al daño producido por vehículos transportando cargas pesadas, además de permitir conocer el desempeño esperado del pavimento a lo largo de su vida útil.

Adicionalmente, en países tropicales como Costa Rica, es importante iniciar con las consideraciones de la variable climática en el diseño de pavimentos, a razón de las altas temperaturas que se dan en regiones como en Guanacaste, dándose por tanto lapsos grandes de tiempo en que el módulo dinámico de diseño será más bajo de lo que podría obtenerse con modelos como el de Witczak-Lanamme o los resultados de ensayo a una temperatura específica.

Así como, los efectos que las precipitaciones abundantes pueden tener sobre la disminución en los valores de módulo resiliente de la capa de suelos principalmente.

Como tareas para mejorar las versiones actuales de software, queda la incorporación del diseño de pavimentos de bases estabilizadas con cemento, reconstrucciones, y el diseño de pavimentos de concreto; así como, la actualización que constantemente se le deben dar a este tipo de software, en especial cuando se mejoran los modelos constitutivos mejoran su alcance de calibración.

6 Referencias

- [1] National Cooperative Highway Research Program. (2004). *Guide for Mechanistic - Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*. Illinois: Transportation Research Board.
- [2] Aguiar, J., & Loría, L. (2006). *Desarrollo de modelos de fatiga para capas asfálticas*. San José: LanammeUCR.
- [3] Hu, X., Zhou, F., Hu, S., & Walubita, L. F. (210). *Proposed Loading Waveforms and Loading Time Equations for Mechanistic-Empirical Pavement Design and Analysis*. Journal of Transportation Engineering ASCE.
- [4] Leiva, P. (2013). *Herramienta de cálculo de la curva maestra de módulo dinámico*. San José: Manual de usuario. Informe LM-PI-UMP-017, Unidad de Materiales y Pavimentos, Programa de Infraestructura del Transporte, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica.
- [5] Ulloa, Á., Badilla, G., Allen, J., & Sibaja Obando, D. (2007). *Encuesta de carga*. San José: LanammeUCR.
- [6] Elizondo, F., Badilla, G., & Ulloa, Á. (2008). *Predicción de módulos resilientes en mezclas asfálticas mediante el modelo de Witczak*. San José: LanammeUCR.
- [7] Porras, J. (2009). *Determinación de rangos de módulos resilientes para materiales constituyentes de la estructura de pavimentos existentes en Costa Rica, mediante el procedimiento de retrocálculo de módulos y ensayos dinámicos*. San José: Tesis UCR.
- [8] Lea, J. (2009). *Open Source Pavement Engineering*. OpenPave. Davis, California, Estados Unidos.
- [9] Vargas, J. (2013). *Elementos fundamentales para el desarrollo de una Guía de Diseño de Pavimentos Empírico-Mecánica para Costa Rica*. San José: Trabajo Final de graduación para optar por el grado de licenciatura en ingeniería civil de la Universidad de Costa Rica.
- [10] Trejos, C. (2014). *Interfaz gráfica para diseño mecánico-empírico de pavimentos en Costa Rica*. San José: Manual de usuario. Informe LM-PI-UMP-030-R, Unidad de Materiales y Pavimentos, Programa de Infraestructura del Transporte, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica.
- [11] Trejos, C. (2015). *Herramienta de cálculo complementaria a la Nueva Metodología de Diseño Mecánico-Empírico de Pavimentos Flexibles de Costa Rica*. San José: Trabajo Final de graduación para optar por el grado de licenciatura en ingeniería civil de la Universidad de Costa Rica.
- [12] Cary, C. E., & Zapata, C. E. (2010). *Enhancement of the Model for Resilient Response of Soils due to Seasonal Environmental Changes Implemented in the M-EPDG*. Arizona: TRR: Journal of the Transportation Research Board.