

NUEVA GUÍA DE DISEÑO MECANÍSTICA-EMPÍRICA PARA ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO (VISTAZO A LA GUÍA 2002, PROYECTO NCHRP I 37A)

Autor: Ing. Fabricio Leiva Villacorta

Universidad de Costa Rica. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
(LANAMME)

Tel: (506) 207-5423 correo electrónico: fleiva@lanamme.ucr.ac.cr

Resumen

En la actualidad se está comentando mucho la publicación de la Guía de diseño 2002 desarrollada en Estados Unidos, dentro de lo cual es importante destacar que esta guía al igual que la guía AASHTO 93 no se pueden simplemente copiar y utilizar como ya se ha hecho (parte de la culpa del mal estado de las carreteras), pero si cabe destacar que esta nueva guía presenta una metodología que puede ser calibrada y adaptada después de un proceso de investigación y recopilación de información.

En este artículo se presentan aspectos generales de la Guía de Diseño 2002, los beneficios que presenta la metodología mecanística-empírica, un vistazo a la Metodología de Diseño de pavimentos flexibles (nuevos y reconstruidos), donde se presentan en forma general los parámetros de entrada y los modelos para evaluar el desempeño de pavimentos flexibles además de las limitantes que presenta la guía para la aplicación fuera de los Estados Unidos.

1. INTRODUCCIÓN

En la mayoría de los países de Latinoamérica existe la clara necesidad por la implementación de una guía de diseño de pavimentos que vaya de acuerdo a las características de los materiales constituyentes de una estructura de pavimento, a las condiciones climáticas que ofrece una zona tropical, de acuerdo a las cargas de tránsito y al sistema de administración de pavimentos donde se incluye el presupuesto y las políticas de mantenimiento, rehabilitación, reconstrucción y priorización de inversiones, por lo que aunque en Estados Unidos se ha desarrollado una guía bastante completa, no se puede aplicar así como se encuentra, dado que ésta cumple con las condiciones descritas anteriormente para ese país, pero lo que si es rescatable y aplicable es la metodología de diseño (mecanística-empírica), la cual puede ser calibrada y posiblemente utilizada en cualquier parte del mundo.

Actualmente se tiene conocimiento de las limitantes de los procedimientos contenidos en la Guía de diseño AASHTO edición 1993, los cuales son completamente empíricos y muy limitados, especialmente a la hora de considerar el tránsito de vehículos pesados. Los diseños de pavimentos, materiales y métodos de construcción utilizados en la prueba de rodado AASHO eran representativos de la época en la cual se efectuó, por lo que han perdido toda validez. Además es difícil visualizar los efectos de las condiciones climáticas en otras latitudes en el desempeño de los pavimentos, por el hecho de que la prueba de rodado AASHO se efectuó en una localidad geográfica específica (Illinois, USA).

El desarrollo de la Guía para el Diseño Estructural de Pavimentos Nuevos y Rehabilitados, bajo el proyecto 1-37 A de la NCHRP, por parte de la consultora estadounidense ERES implica:

- La edición de una guía de diseño, basada en procedimientos que utilizan las actuales tecnologías empírico-mecanicistas, incluyendo una metodología para la calibración, validación y adaptación a las condiciones locales;
- La elaboración de un programa computacional y de documentación basada en la guía de diseño, enfocada al usuario.

2. ASPECTOS GENERALES DE LA GUÍA

La guía consta de 5 capítulos para el análisis y diseño de estructuras de pavimento flexible y rígido. También incluye apartados para rehabilitación, verificación de la metodología de diseño, calibración y finalmente la validación de los modelos.

La guía representa el principal cambio en la forma en que se ha efectuado el análisis de pavimentos. El diseñador considera, en primer término, los factores necesarios para desarrollar el proyecto (tránsito, clima, subrasante, condiciones del pavimento existente para rehabilitación) y las condiciones de construcción, a fin de proponer un diseño de prueba. El diseño inicial será adecuadamente evaluado por medio de los modelos de deterioro, si el diseño no cumple con los criterios de desempeño, se revisa, para luego repetir el proceso de evaluación cuantas veces sea necesario.

Esta guía entrega una serie de recomendaciones para el análisis de pavimentos tanto nuevos como rehabilitados (por ejemplo, espesor y materiales a utilizar en cada capa de pavimento), incluyendo procedimientos para elegir espesores, tratamientos de rehabilitación, drenajes sub-superficiales, estrategias para el mejoramiento de fundaciones y otros aspectos relacionados con el diseño.

3. METODOLOGÍA DE DISEÑO MECANÍSTICA-EMPÍRICA

Este procedimiento de diseño estructural de capas de pavimento se basa en el análisis mecanístico para escoger una combinación de espesores y materiales con el fin de suministrar el nivel de servicio deseado de acuerdo con el tránsito esperado. Los elementos del procedimiento de diseño mecanístico abarcan además los efectos climáticos, el modelo estructural y la respuesta del pavimento, la caracterización de los materiales, las funciones de transferencia y el análisis del comportamiento para concluir con el proceso de selección del sistema de pavimento a construir. La Figura 1 muestra el procedimiento de este método de diseño estructural.

El modelo mecánico se basa en la teoría de multicapa elástica o elemento finito y determina las reacciones del pavimento a la carga de las ruedas en términos de esfuerzos, deformaciones unitarias y deflexiones (σ , ϵ , Δ). La parte empírica del diseño utiliza las reacciones del pavimento para predecir la vida del mismo basada en observaciones hechas

en campo. Así, el término “empírico” se debe a la definición de las funciones de transferencia a partir de datos reales.

3.1 Beneficios de un procedimiento empírico-mecanicista

El procedimiento de diseño basado en principios empírico-mecanicistas, incluido en la guía 2002, permite evaluar los efectos de la variación de los materiales en el desempeño de los pavimentos, entregando una relación racional entre las especificaciones de materiales y los procesos constructivos, y el diseño estructural del pavimento. Esta nueva guía incluye, además, métodos que consideran directamente el envejecimiento de los materiales, mes a mes, a lo largo del período de diseño.

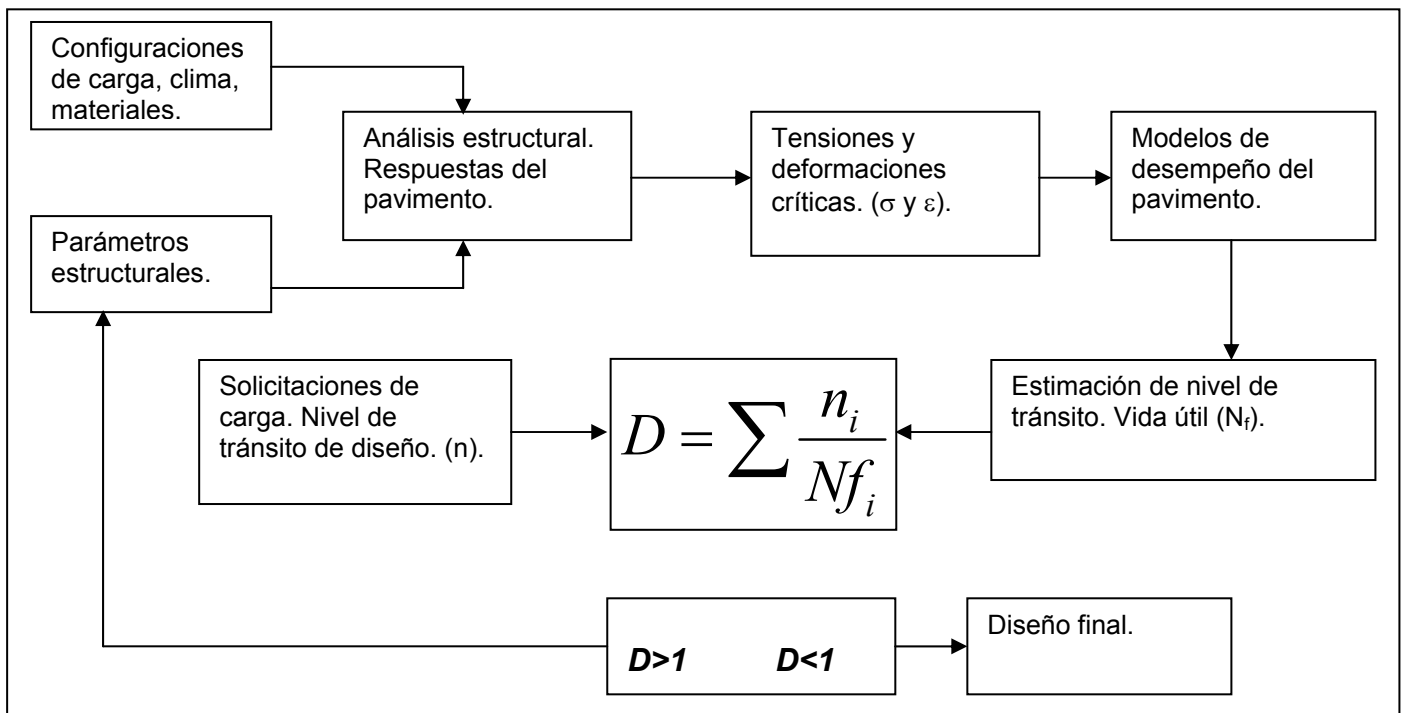


Figura 1. Procedimiento de diseño Mecanicista – Empírico.

En la siguiente figura, se observa que la línea continua representa el desempeño observado en los pavimentos actuales. Una de las principales razones para las fallas prematuras en los pavimentos es la imposibilidad de incorporar adecuadamente en los procedimientos de diseño las variaciones en la calidad de los materiales y en los procesos constructivos. Tales variaciones no fueron consideradas como variables experimentales primarias en la prueba de rodado AASHO.

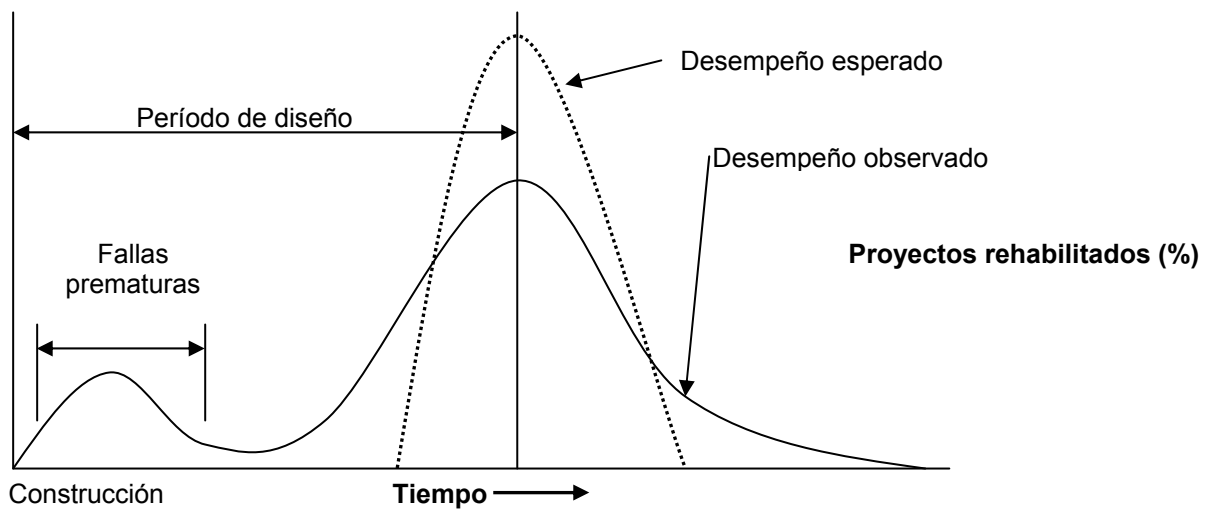


Figura 2: Desempeño de los diseños en los pavimentos existentes

Además, un procedimiento basado en un enfoque empírico-mecanicista permite, a diferencia de los procedimientos empíricos, incluir futuros avances y conocimientos que puedan ser implementados y desarrollados.

Otros beneficios que presentan los procedimientos de diseño empírico-mecanicistas son:

- Permite una adecuada evaluación de las consecuencias en el desempeño del pavimento, producto de nuevas condiciones de carga (por ejemplo, modelación del daño por aplicación de cargas crecientes, por elevadas presiones de inflado en los neumáticos, por múltiples ejes y por otros factores que pueden ser modelados utilizando un procedimiento mecanicista).
- Se puede hacer un mejor uso de los materiales disponibles (por ejemplo, se puede simular el comportamiento de materiales estabilizados, tanto en pavimentos rígidos como en flexibles, a fin de predecir el desempeño a futuro).
- Facilita el desarrollo de procedimientos mejorados para evaluar los deterioros prematuros, a fin de analizar por qué algunos pavimentos exceden sus expectativas de diseño.
- Los efectos por envejecimiento pueden incluirse en las estimaciones del desempeño (por ejemplo, el endurecimiento del asfalto debido al paso del tiempo, el cual puede influir en el ahuellamiento y en la generación de grietas por fatiga).
- Los efectos estacionales, tales como el debilitamiento del pavimento producido por los deshielos, pueden ser incluidos en la estimación del desempeño.

- Las consecuencias de la erosión de la subbase bajo pavimento rígido pueden ser evaluadas.
- Permite el desarrollo de mejores metodologías para la evaluación de los beneficios a largo plazo que conlleva la dotación de drenajes mejorados a la vía.
- Desde el punto de vista del diseño, aumenta la confiabilidad, permite predecir modos de falla específicos (los cuales pueden ser minimizados), evaluar de mejor manera el impacto de nuevos niveles y condiciones de carga, minimizar fallas prematuras, mejorar los diseños para rehabilitación de pavimentos e introducir adecuadamente variaciones diarias, estacionales y anuales en los materiales, el clima y el tránsito en el proceso de diseño.

4. ASPECTOS GENERALES DEL SOFTWARE DE LA GUÍA.

El enfoque empírico-mecanicista de una guía de diseño implica la inclusión de una variedad de factores y criterios, siendo necesaria una compleja serie de cálculos e iteraciones para efectuar el análisis de las estructuras tentativas de pavimentos, de acuerdo con los niveles de desempeño y de deterioro requeridos para un diseño óptimo, y para un cierto nivel de confiabilidad. De esta forma, se hace imprescindible el uso de un software adecuado para efectuar dichos procesos.

Información general

En este aspecto se incluye el nombre del proyecto, el período de vida útil proyectado, las fechas de construcción y de puesta en uso, el tipo de pavimento nuevo a diseñar (flexible, rígido de junta simple o rígido continuo con refuerzo), las opciones de restauración para los pavimentos de hormigón, las opciones de sobrecapas, etc. Además se incluyen el tipo de análisis (determinístico o probabilístico), el nivel de confiabilidad para cada tipo de deterioro y la regularidad superficial o rugosidad (IRI). En la Figura 3 se muestra el esquema secuencial del proceso de diseño usando el software de la guía.

Datos de Entrada

Los datos de entrada se clasifican en tres grupos principales:

Tránsito: se ingresan los factores de ajuste del volumen de tránsito (factor de distribución mensual –por tipo de vehículo- y horario, distribución por clase de vehículo y tendencia de

proyección para el crecimiento del tránsito -por tipo de vehículo o para todos los tipos de vehículo-); espectros normalizados de carga por eje (por tipo de eje y vehículo); datos generales de tránsito (número de ejes por vehículo, configuración de ejes, espaciamiento entre ejes). Además se ingresan, el Tránsito Medio Diario Anual de Camiones (TMDAC), factor direccional, velocidad de operación, entre otros.

Clima: El Modelo Climático Integrado permite predecir y determinar:

- Gradientes de temperatura en las losas de hormigón;
- Apertura y cerrado de grietas;
- Módulo dinámico (E^*) base para mezclas asfálticas y módulo resiliente (MR) para subrasantes y bases no ligadas;
- Conversión de perfiles no lineales de temperatura en diferencias de temperatura lineales;
- Distribuciones de frecuencias de los gradientes térmicos para cada mes del año;
- Distribuciones de probabilidad para gradientes térmicos durante el día (positivo) y la noche (negativo);
- Otros parámetros (nivel de penetración de heladas, días húmedos, humedad relativa, etc.)

Estructura: inicialmente, se ingresan los rasgos generales de la estructura del pavimento y las características del drenaje. Posteriormente se ingresan los aspectos principales de cada una de las capas constituyentes del pavimento (tipo de material y espesor). En seguida, se introducen las principales características de cada uno de los materiales que conforman las capas del pavimento: para losas de concreto, se ingresan características de expansión térmica, mezcla y resistencia; para mezclas asfálticas, se ingresan características asociadas al ligante, a la mezcla, y a otras más generales asociadas con el agrietamiento térmico; para los materiales no ligados (base, subbase y subrasante), se ingresan datos asociados con la resistencia y otras características mecánicas que se utilizan en unión con el Modelo Climático Integrado Mejorado; y para las rocas, se ingresa el tipo de material rocoso que se encuentra en las capas subyacentes del pavimento (continua o fracturada) y otras características generales (razón de Poisson, Módulo Resiliente, peso unitario, entre otros).

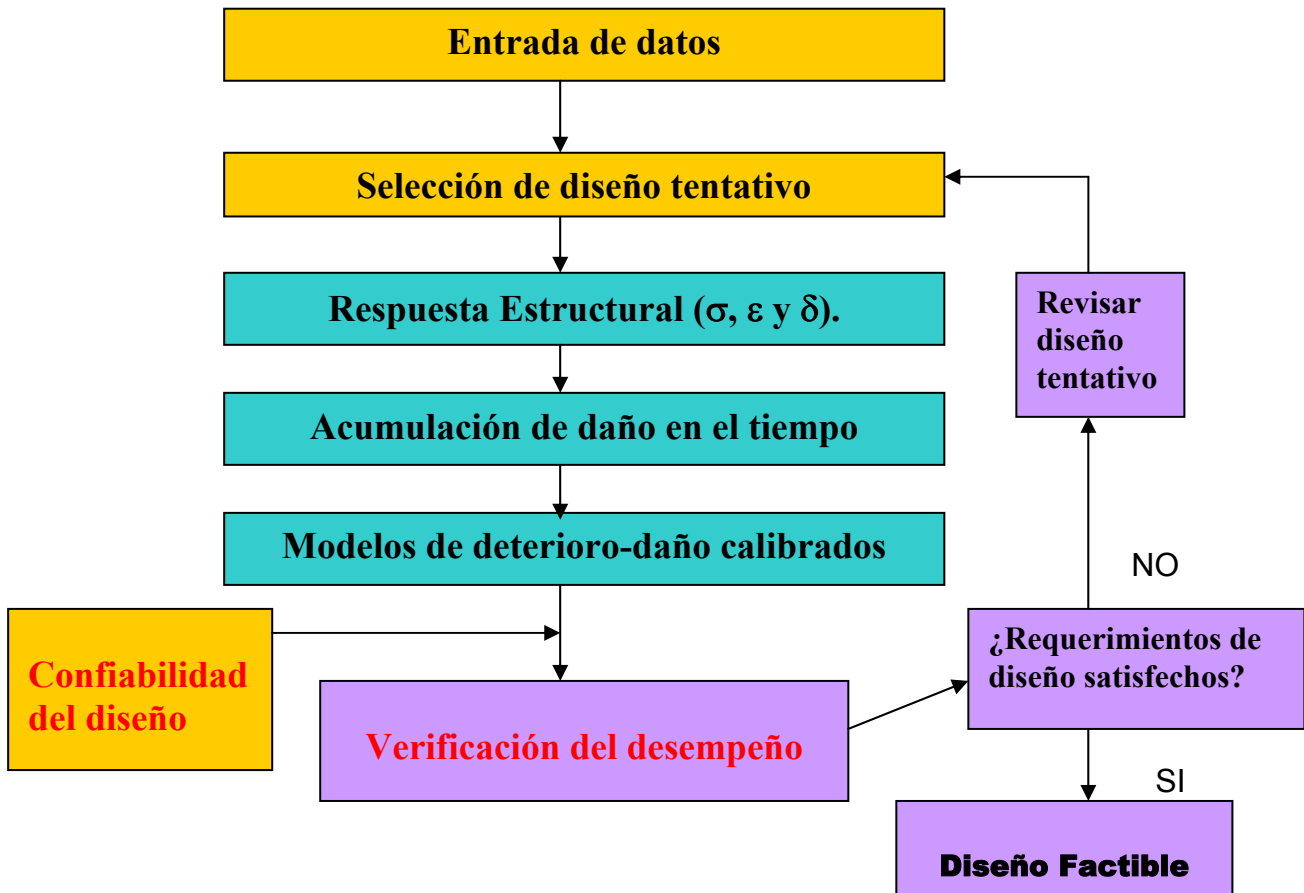


Figura 3. Esquema secuencial del proceso de diseño aplicando el software.

Vista de resultados y salidas

La sección de resultados entrega archivos con formato EXCEL, a fin de apreciar los datos de entrada, cálculos y gráficos asociados al análisis efectuado para cada uno de los tipos de deterioro y para el nivel de regularidad superficial.

5. VISTAZO A LA METODOLOGÍA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES (NUEVOS Y RECONSTRUIDOS)

En este apartado se describe el diseño mecánico-empírico de pavimentos flexibles, dentro de los cuales se incluyen:

- Pavimentos flexibles convencionales: carpeta asfáltica sobre materiales de base/sub-base granulares.
- Pavimentos flexibles de capa asfáltica de gran espesor.

- Pavimentos flexibles del tipo “Full Depth”
- Pavimentos semi-rígidos.

6.1 Descripción del proceso de diseño

Los principales pasos en el proceso de diseño se describen a continuación:

1. Establecer un diseño inicial de prueba para las condiciones específicas del proyecto: capacidad de soporte de la subrasante, propiedades del concreto asfáltico y propiedades de otros materiales, cargas de tránsito, clima, tipo de pavimento.
2. Establecer un criterio aceptable para evaluar el desempeño de la estructura al final del período de diseño (niveles de deformación, agrietamiento, IRI, entre otros).
3. Seleccionar el nivel de confianza para cada uno de los indicadores de desempeño.
4. Procesar los valores de entrada para obtener valores mensuales de tránsito, variación estacional de las propiedades de los materiales y factores climáticos necesarios para la evaluación del desempeño durante el período de diseño.
5. Calcular respuestas estructurales (esfuerzos y deformaciones) aplicando la teoría de multi-capa elástica o elemento finito para cada tipo de eje y carga, con el fin de obtener el cálculo del incremento del daño a través del período de diseño.
6. Calcular el deterioro o el daño al final de cada período de diseño.
7. Predecir los tipos de deterioro clave aplicando los modelos de desempeño calibrados.
8. Predecir el IRI a partir del IRI inicial, el deterioro acumulado y los factores de sitio al final de cada análisis de incremento.
9. Evaluar el desempeño esperable del diseño de prueba a un nivel de confianza dado.
10. Si el diseño de prueba no cumple con el criterio de desempeño se repiten los pasos del 4 al 9 hasta que se cumpla o cumplan los criterios.

6.2 Valores de entrada para el diseño de pavimentos flexibles

Información general:

- Periodo de vida de del pavimento.
- Fecha de construcción de las capas inferiores: granulares base/subbase, o capas estabilizadas, para el modelo climático.
- Fecha construcción de la capa asfáltica, para el modelo de diseño.
- Fecha de apertura al tránsito, para el modelo de daño y deterioro.

Identificación del proyecto:

- Localización e identificación del proyecto
- Clasificación funcional del proyecto (Arterias principales hasta rutas locales y calles).

Crterios de desempeño:

- Agrietamiento por fatiga de la superficie hacia abajo (190 m/km).
- Agrietamiento por fatiga del fondo de la capa asfáltica hacia arriba (25 a 50% del área del carril).
- Agrietamiento por fatiga de capas estabilizadas (25% del área del carril).
- Deformación permanente total (7.6 a 12.7 mm).
- Regularidad superficial (IRI terminal 2.4 a 4 m/km).

Tránsito:

Información Básica:

- Tránsito promedio diario anual para el año base, incluyendo el número de vehículos pesados de las clases 4 a 13.
- Porcentaje de camiones en la dirección de diseño (factor de distribución vehicular).
- Porcentaje de camiones en el carril de diseño (factor de distribución por carril).
- Velocidad de operación, necesario para el cálculo de módulo de rigidez de capas asfálticas. (ver Tabla 1).

Tabla 1. Recomendaciones para la selección de velocidad de operación.

Tipo de camino	Velocidad de operación (kph)	Frecuencia estimada a la mitad de la capa asfáltica (Hz)		
		Capa asfáltica representativa (10 a 30 cm)	Capa asfáltica delgada (2.5 a 7.5 cm)	Capa asfáltica sobre bases asfálticas (7.5 a 30 cm)
Interestatal	96	15-40	45-95	10-25
Arterias principales	72	10-30	35-70	15-20
Calles urbanas	24	5-10	10-25	5-10
Intersecciones	0 - 8	0.1-0.5	0.5-1.0	0.1-0.25

Ajuste de volumen vehicular:

- Factores de ajuste mensual.
- Distribución vehicular.
- Distribución vehicular horaria.
- Factores de crecimiento vehicular.

Configuración del eje del vehículo:

- Largo promedio del eje, para camiones típicamente se usa 2.59 m.
- Espacio de neumáticos de eje dual, 30.5 cm.

- Presión de inflado, 120 psi (827 kPa).
- Separación entre ejes, para ejes tandem 131 cm en promedio, para ejes tridem 125 cm en promedio.

Clima:

La siguiente información es necesaria para la modelación climatológica en el diseño de pavimentos flexibles:

- Temperatura del aire horaria para el período de diseño.
- Precipitación horaria para el período de diseño.
- Velocidad del viento horaria para el período de diseño.
- Porcentaje de luz solar horaria para el período de diseño.
- Valores de humedad relativa del ambiente horaria.
- Variación estacional o constante del Nivel freático del sitio del proyecto.
- Localización del proyecto: latitud y longitud.
- Elevación.

Estructura de pavimento:

Características del drenaje:

- Absorción de la capa superficial.
- Potencial de infiltración.
- Sección transversal del pavimento.
- Longitud del drenaje.

Propiedades de las capas:

- Espesor de capa.
- Módulo de Poisson.
- Conductividad térmica.
- Capacidad calorífica.
- Peso unitario.

6.3 Modelos para evaluar el desempeño de pavimentos flexibles

El propósito del modelo de deterioro es determinar la respuesta estructural para pavimentos flexibles debido a la aplicación de carga y efectos ambientales, ya sea efectos directos (deformaciones por expansión térmica o contracción) o indirectos (variación de rigidez debido a cambios en temperatura y humedad).

Los parámetros de respuesta de estos modelos son esfuerzos, deformaciones unitarias y desplazamientos dentro de las capas. Estos parámetros de respuesta crítica son de interés particular requeridos como datos de entrada para los modelos de deterioro en el procedimiento de diseño Empírico-Mecanístico. Ejemplos de variables respuesta crítica son:

- Deformación unitaria tensional en el fondo de la carpeta asfáltica (para evaluar el agrietamiento por fatiga).
- Esfuerzo / deformación vertical en compresión dentro de la carpeta asfáltica (para evaluar deformación permanente).
- Esfuerzo / deformación vertical en compresión dentro de la base/sub-base (para evaluar deformación permanente en capas granulares).
- Esfuerzo / deformación vertical en compresión sobre la superficie de la subrasante (para evaluar deformación permanente).

Deformación Permanente:

La mezcla asfáltica como repuesta ante la carga muestra tres etapas de comportamiento por deformación:

- La etapa 1 presenta un elevado nivel de deformación inicial, con un decremento en la razón de deformación plástica, predominantemente asociado con cambios volumétricos.
- La etapa 2 presenta una razón de formación baja asociado con cambios volumétricos y toma fuerza la deformación por esfuerzos de cortante.
- La etapa 3 presenta altos niveles de deformación asociados con deformación plástica por cortante sin cambios volumétricos.

La deformación permanente para determinado momento es la suma de las deformaciones de cada capa, expresado de la siguiente forma:

$$RD = \sum_{i=1}^{n_{\text{sublayers}}} \varepsilon_p^i h^i$$

Donde:

RD = Deformación permanente total

$n_{sublayers}$ = Número de subcapas
 ϵ_p^i = Deformación total en la subcapa_i
 h_i = Espesor de la subcapa_i

Deformación permanente de mezclas asfálticas

La ecuación utilizada en esta guía para predecir la deformación permanente en capas asfálticas se muestra a continuación:

$$\frac{\epsilon_p}{\epsilon_r} = \beta_{r1} \alpha_1 T^{\alpha_2 \beta_{r2}} N^{\alpha_3 \beta_{r3}}$$

Donde:

ϵ_p = Deformación unitaria acumulada a N repeticiones de carga.(in/in)
 ϵ_r = Deformación unitaria Resiliente como una función de las propiedades de la mezcla, temperatura tiempo de carga (in/in)
 N = Número de repeticiones de carga
 T = Temperatura (° F)
 α_i = Coeficientes de regresión.
 β_i = Factores de calibración.

Deformación permanente de capas granulares y suelos

$$\delta_a(N) = \beta_1 \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_r} \right) e^{-\left(\frac{\rho}{N}\right)^\beta} \epsilon_v h$$

Donde:

δ_a = Deformación Permanente (in).
 N = Número de repeticiones de carga
 ϵ_0 , β , y ρ = Propiedades de los Materiales.
 ϵ_r = Deformación unitaria Resiliente obtenida en laboratorio para obtener las propiedades de los materiales listados arriba. (in/in).
 ϵ_v = Deformación unitaria Resiliente vertical (in /in)
 h = Espesor de la capa (in).
 β_1 = factor de calibración.

Dentro de los factores que afectan la deformación permanente en pavimentos flexibles se pueden mencionar:

- Espesor de la capa asfáltica
- Módulo dinámico de la capa asfáltica

- Grado de desempeño del ligante.
- Vacíos de aire en la capa asfáltica.
- Contenido de asfalto efectivo.
- Tipo de base.
- Espesor de la base.
- La rigidez de la base.
- Carga de tránsito, área de contacto y presión de inflado.
- Velocidad de operación del tránsito.
- Variabilidad de la carga vehicular
- Temperatura y condiciones ambientales.

Agrietamiento por Fatiga

La estimación del daño por fatiga se basa en la Ley de Miner, la cual se establece por la siguiente relación:

$$D = \sum_{i=1}^T \frac{n_i}{N_i}$$

Donde:

D = daño.

T = Número total de períodos.

n_i = Tránsito actual para el período i .

N_i = Tránsito permitido para el período i .

Agrietamiento por fatiga en mezcla asfáltica

$$N_f = Ck_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{k_2} \left(\frac{1}{E} \right)^{k_3}$$

$$= \beta_{f1} k_1 (\varepsilon_t)^{-\beta_{f2} k_2} (E)^{-\beta_{f3} k_3}$$

Donde:

N_f = número de repeticiones para la falla por fatiga.

ε_t = deformación unitaria por tensión en la posición crítica.

E = rigidez del material.

k_1, k_2, k_3 = coeficientes de regresión de laboratorio.

$\beta_{f1}, \beta_{f2}, \beta_{f3}$ = parámetros de calibración.

C = factor de ajuste de laboratorio a campo.

$$C = 10^M$$

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

V_b = contenido de ligante efectivo (%).

V_a = contenido de vacíos de aire (%).

Como ecuación final para el cálculo del agrietamiento por fatiga a partir del daño por fatiga está expresada como:

- a. Para agrietamiento del fondo de la capa hacia arriba (% del área total del carril):

$$FC_{bottom} = \left(\frac{6000}{1 + e^{(C_1 * C'_1 + C_2 * C'_2 * \log_{10}(D * 100))}} \right) * \left(\frac{1}{60} \right)$$

Donde:

FC_{bottom} = agrietamiento por fatiga (%)

D = daño por fatiga

$C_1 = 1.0$

$C'_1 = -2 * C'_2$

$C_2 = 1.0$

$C'_2 = -2.40874 - 39.748 * (1 + h_{ac})^{-2.856}$

- b. Para agrietamiento de la superficie de la capa hacia abajo (pies/millas):

$$FC_{top} = \left(\frac{1000}{1 + e^{(7.0 - 3.5 * \log_{10}(D * 100))}} \right) * (10.56)$$

Donde:

FC_{Top} = fatiga

D = daño por fatiga

Los principales factores afectan el agrietamiento por fatiga se muestran a continuación:

- Espesor de la capa asfáltica
- Módulo dinámico de la capa asfáltica
- Grado de desempeño del ligante.
- Vacíos de aire en la capa asfáltica.
- Contenido de asfalto efectivo.
- Espesor de la base.
- Módulo de la subrasante.
- Configuración de carga de tránsito.
- Carga de tránsito, área de contacto y presión de inflado.
- Número de repeticiones de carga

- Temperatura y condiciones ambientales.

Agrietamiento por Fatiga de mezclas químicamente estabilizadas

En esencia, el agrietamiento por fatiga de mezclas químicamente estabilizadas (CSM), puede dar como resultado una serie de posibles consideraciones:

- Si la capa se encuentra directamente por debajo de la capa asfáltica, cualquier fatiga en la capa de CSM producirá el reflejo de una fracción de las grietas hacia la superficie.
- Si se coloca una capa suave o de amortiguamiento en medio de las capas CSM y HMA, es posible que el reflejo de grietas se minimice considerablemente o se elimine.
- Como estas capas están sujetas a altos niveles de daño por fatiga, el módulo equivalente de elasticidad debe ser reducido con el incremento en el daño.

La guía presenta la siguiente ecuación para caracterizar este tipo de capas:

$$\log N_f = \frac{[(0.972\beta c1 - \sigma_t / Mr)]}{0.0825\beta c2}$$

Donde:

N_f : número de repeticiones para la falla.

σ_t : esfuerzo de tensión en la fibra inferior de la capa (psi).

Mr : módulo de ruptura (esfuerzo a flexotracción) del material, a los 28 días.

$\beta c1$ y $\beta c2$: factores de calibración.

De igual forma presenta la relación de decremento de módulo de la capa estabilizada, con el incremento del daño por fatiga:

$$E_{CSM}(t) = E_{CSM}(\min) + \frac{(E_{CSM}(\max) - E_{CSM}(\min))}{(1 + e^{(-4+14D)})}$$

Donde:

$E_{CSM}(t)$ = módulo de la nueva capa de CSM (psi).

$E_{CSM}(\max)$ = máximo módulo de la capa (psi).

$E_{CSM}(\min)$ = mínimo módulo de la capa, después de la destrucción total (psi).

D = Nivel de daño de la capa en expresión decimal (i.e. $D = 0.60$).

Regularidad superficial (IRI):

Capa asfáltica sobre materiales (Base/Sub-Base) granulares:

$$IRI = IRI_0 + 0.0463 \left(SF \left[e^{\frac{age}{20}} - 1 \right] \right) + 0.00119(TC_L)_T + 0.1834(COV_{RD}) \\ + 0.00384(FC)_T + 0.00736(BC)_T + 0.00155(LC_{SNWP})_{MH}$$

IRI_0 = IRI inicial, m/km.

SF = Factor de sitio (ver siguiente ecuación).

$e^{age/20} - 1$ = Tiempo transcurrido en años.

COV_{RD} = Coeficiente de variación de la profundidad de roderas, (se asume 20%).

$(TC_L)_T$ = Longitud total de grietas transversales (niveles de severidad bajo, medio y alto), m/km).

$(FC)_T$ = Agrietamiento por fatiga en la huella, porcentaje del área del carril.

$(BC)_T$ = Área de grietas en bloque, porcentaje del área del carril.

$(LC_{SNWP})_{MH}$ = Longitud de las grietas selladas de severidad moderada a alta, fuera de la huella, m/km.

$$SF = \left[\frac{(R_{SD})(P_{0.075} + 1)(PI)}{2 \times 10^4} \right] + \left[\frac{\ln(FI + 1)(P_{0.02} + 1)(\ln(R_m + 1))}{10} \right]$$

R_{SD} = Desviación estándar de la precipitación mensual, mm

$P_{0.075}$ = Porcentaje de material pasando la malla de 0.075 mm.

PI = Índice plástico del suelo.

$P_{0.02}$ = Porcentaje pasando la malla 0.02 mm.

R_m = Promedio de precipitación anual, mm.

FI = Índice de congelamiento anual. °C-días.

Capa asfáltica sobre bases tratadas con asfalto:

$$IRI = IRI_0 + 0.0099947(Age) + 0.0005183(FI) + 0.00235(FC)_T \\ + 18.36 \left(\frac{1}{(TC_S)_H} \right) + 0.9694(P)_H$$

Donde:

$(TC_S)_H$ = Espaciamiento promedio de las grietas transversales de alta severidad.

$(P)_H$ = Área de baches de alta severidad, porcentaje del área del carril.

Capa asfáltica sobre capas químicamente estabilizadas:

$$IRI = IRI_0 + 0.00732(FC)_T + 0.07647(SD_{RD}) + 0.0001449(TC_L)_T \\ + 0.00842(BC)_T + 0.0002115(LC_{NWP})_{MH}$$

Con todas las variables previamente definidas.

7. ES NECESARIO QUE CADA PAÍS CUENTE CON UNA GUÍA DE DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO

En la actualidad se discute el problema del mal estado de nuestras carreteras, tanto desde el punto de vista funcional como estructural. Parte de este problema puede explicarse viendo desde la raíz del asunto: el diseño. Al igual que un edificio que ha sido diseñado de mala forma, como por ejemplo incumpliendo especificaciones mínimas de construcción, es de esperar que una estructura de pavimento falle por una mala práctica ingenieril, que aunque se haya llevado a cabo por muchos años, esto no implica que esté correcto.

En nuestro país se utilizan guías de diseño copiadas, en la mayoría de los casos sin vigencia y aplicabilidad, dado que éstas han sido desarrolladas para unas condiciones de clima, tránsito y materiales propios del lugar donde se llevó a cabo la investigación y elaboración de la guía.

La aparición de la Guía de Diseño 2002 (o guía NCHRP 1-37A), desarrollada y publicada en Estados Unidos, puede parecer la solución a la interrogante planteada, pero con eso estaríamos volviendo a lo mismo, a copiar un procedimiento que, de la forma como se presenta, es solamente aplicable dentro de los Estados Unidos. El software está diseñado para cargar información que sólo puede ser obtenida y utilizada dentro de los límites geográficos de ese país. Lo que si es rescatable de esta guía 2002 es la metodología de diseño Mecánica-Empírica (M-E), la cual considera estados tensionales (esfuerzo y deformación unitaria) obtenidos a partir de una modelación multicapa elástica o elemento finito de las diferentes capas que componen la estructura, además de la modelación de la configuración de carga (peso y configuración del eje, presión de inflado). Estos estados tensionales son los parámetros de entrada para los modelos de desempeño que evalúan la vida útil de la estructura.

Dentro de las principales limitantes que se pueden observar a la hora de aplicar la guía 2002 en Costa Rica se encuentran:

- La guía incorpora un Modelo Climático Integrado, el cual carga información obtenida de estaciones meteorológicas geo-referenciadas, localizables solamente dentro de los Estados Unidos. O se deben generar nuevos archivos con la misma información de los actuales, para que sean reconocidos por el programa.

- La guía requiere del conocimiento de los espectros de carga vehicular del proyecto; esto es, la distribución vehicular y el conocimiento de los pesos por eje, información que requiere un registro histórico y de su seguimiento.
- La guía permite diseñar con tres niveles estadísticos de confianza, uno de los cuales incorpora ensayos de laboratorio complejos para determinar las propiedades de los materiales, que son los insumos del software de la guía, para el diseño de carreteras de gran importancia y de alto volumen vehicular. Estos ensayos y los equipos necesarios para realizarlos tienen un alto costo y requieren conocimiento especializado.

Estas son algunas de las limitantes que se pueden observar a primera vista. Después de una lectura rápida del contenido de la guía, se pueden profundizar en las limitantes que tienen las mismas agencias y departamentos de transporte en Estados Unidos para calibrar e implementar el uso de la guía en sus respectivas localidades, por lo que así nos podemos imaginar cuan lejos estamos de aplicar esta compleja guía en nuestro país.

Se puede decir que en Costa Rica existe la clara necesidad por la implementación de una guía de diseño de pavimentos que vaya de acuerdo a las características de los materiales constituyentes de este tipo de estructura, a las condiciones climáticas que ofrece una región tropical, de acuerdo a las cargas de tránsito y al sistema de administración de pavimentos donde el presupuesto y las políticas de mantenimiento, rehabilitación, reconstrucción y priorización de inversiones no tienen la importancia que merecen. Aunque en Estados Unidos se ha desarrollado una guía bastante completa, no se puede aplicar así como se encuentra, pero lo que si es rescatable y aplicable es la metodología de diseño (mecánica-empírica), la cual puede ser calibrada y posiblemente utilizada en cualquier parte del mundo.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Guía de diseño Mecánica – Empírica. ERES Consultora. NCHRP Proyecto 1-37 A. 2004.

<http://www.trb.org/mepdg/guide.htm>

www.2002designguide.com