



Laboratorio Nacional de
Materiales y Modelos Estructurales

Proyecto: LM-PI-GM-INF-22-14

RECOMENDACIONES TÉCNICAS PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS FLEXIBLES CON LA INCORPORACIÓN DE CRITERIOS MECÁNICO-EMPÍRICOS

Preparado por:
Programa de Infraestructura del Transporte

San José, Costa Rica
Octubre, 2014



Documento generado con base en el Art. 6, inciso j) de la ley 8114 según la reforma aprobada en la ley 8603. Reglamento al Art. 6 de la precitada ley, publicado mediante decreto DE-37016-MOPT.

Información técnica del documento

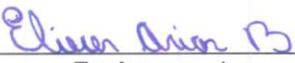
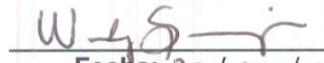
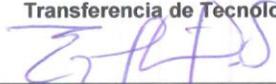
1. Informe LM-PI-GM-INF-22-14		2. Copia No. 1
3. Título y subtítulo: RECOMENDACIONES TÉCNICAS PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS FLEXIBLES CON LA INCORPORACIÓN DE CRITERIOS MECÁNICO-EMPÍRICOS		4. Fecha del Informe: Octubre, 2014
7. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
8. Notas complementarias		
9. Resumen El diseño de pavimentos al día de hoy es una mezcla de conocimiento adquirido, de forma empírica y por medio del análisis mecánico de los materiales. Esto ha llevado a que se desarrollen metodologías de diseño que consideran lo mejor de ambas ramas y ha permitido optimizar el desempeño de los materiales y predecir de una mejor manera su comportamiento durante el período de diseño. El presente documento pretende ser una guía básica sobre los lineamientos que deben seguirse para considerar las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en la construcción de carreteras, con el propósito de dar a conocer las principales tendencias internacionales en cuanto a diseño de pavimentos y aplicar el conocimiento ingenieril acorde con los últimos avances en la caracterización de materiales, comportamiento mecánico y predicción de deterioro. La metodología que se presentan en este documento recopila los principales avances internacionales en cuanto al diseño de pavimentos, que pueden ser aplicados en el país con la capacidad instalada en diferentes laboratorios nacionales y en cuanto al conocimiento e investigación que el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, LanammeUCR ha realizado o ha colaborado con personal técnico y equipo de avanzada. Esto permitirá extender los procedimientos requeridos al día de hoy y conocer las necesidades actuales en cuanto a transferencia tecnológica e investigación a corto, mediano y largo plazo.		
10. Palabras clave Diseño, pavimentos, fatiga, deformación,	11. Nivel de seguridad: Ninguno	12. Núm. de páginas 26
13. Preparado por: Ing. Eliécer Arias Barrantes Unidad de Gestión Municipal  Fecha: 17 / 10 / 2014	14. Revisado por: Ing. Wendy Sequeira Rojas, MSc Coordinadora Unidad de Auditoría Técnica  Fecha: 20 / 10 / 14	15. Revisado por: Ing. Jose Pablo Aguiar Moya, PhD Coordinador Unidad de Pavimentos y Materiales  Fecha: 17 / 10 / 14
16. Revisado por: Ing. Raquel Arriola, Coordinadora Unidad de Transferencia de Tecnología  Fecha: 17 / 10 / 14	17. Revisado por: Ing. Fabián Elizondo Arrieta, MB.a Coordinador de Laboratorios de Infraestructura Vial  Fecha: 17 / 10 / 14	18. Aprobado por: Ing. Guillermo Loria Salazar, PhD Coordinador General PITRA  Fecha: 17 / 10 / 14



TABLA DE CONTENIDO

1 ANTECEDENTES	5
2 ALCANCE	6
3 DESCRIPCIÓN.....	7
4 RECOMENDACIONES TÉCNICAS.....	10
4.1 Recomendaciones generales	10
4.1.1 Período de diseño	10
4.1.2 Ensayos de laboratorio.....	11
4.2 Fatiga en mezclas asfálticas.....	11
4.2.1 Guía mecanístico-emprírica de diseño de pavimentos (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, MEPDG).....	12
4.3 Fatiga en bases estabilizadas con cemento.....	14
4.3.1 Portland Cement Association (PCA).....	14
4.4 Deformación permanente	15
4.4.1 Guía mecanístico-emprírica de diseño de pavimentos (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide MEPDG).....	15
5 FACTOR CAMIÓN.....	19
6 TEMPERATURA EN LA MEZCLA ASFÁLTICA	21
6.1 Método del Instituto del Asfalto.....	21
6.2 Strategic Highway Research Program (SHRP).....	23
7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	23
8 REFERENCIAS.....	24

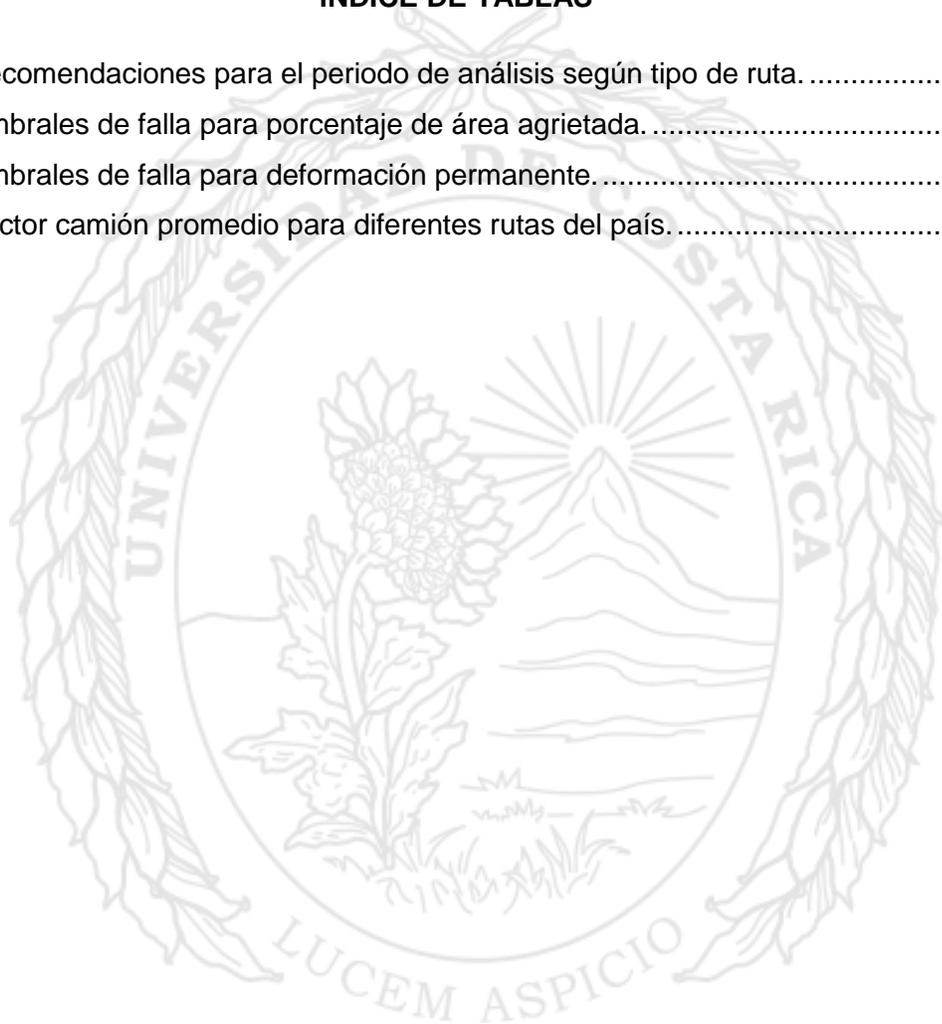


INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema para desarrollo de la Guía CR-ME.	9
Figura 2. Relación entre la temperatura del pavimento, la temperatura del aire y la temperatura del pavimento a cualquier profundidad.	22

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Recomendaciones para el periodo de análisis según tipo de ruta.	10
Tabla 2. Umbrales de falla para porcentaje de área agrietada.	12
Tabla 3. Umbrales de falla para deformación permanente.	15
Tabla 4. Factor camión promedio para diferentes rutas del país.	21





1 ANTECEDENTES

En el 2007 el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) estableció los lineamientos para el diseño estructural de pavimentos, mediante el oficio DVOP-5170-07 (Castro Fernández, DVOP-5170-07, 2007) y el oficio DVOP-6152-07 (Castro Fernández, DVOP-6152-07, 2007). Estos documentos incluyen los parámetros de entrada para diseño de espesores mediante la metodología de diseño de la AASHTO de 1993 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993), las ecuaciones para evaluar el daño por fatiga y la deformación permanente de la subrasante, aunque, en la práctica estos modelos brindan resultados de altísimas repeticiones admisibles para la falla, lo cual provoca, que prácticamente toda estructura analizada cumpla con dichos parámetros, que no se discrimine al realizar un diseño en función de las características propias de cada proyecto y que no haya un adecuado razonamiento ingenieril en el momento de diseñar una estructura de pavimento.

Posteriormente, el PITRA-LanammeUCR, con la colaboración de estudiantes de la Universidad de Costa Rica, ha desarrollado una serie de proyectos de investigación con el objetivo de analizar el comportamiento estructural de pavimentos y sus materiales componentes. Estos proyectos abordan temas variados como: caracterización y análisis de materiales, análisis de cargas vehiculares, los efectos climáticos, análisis estructural de pavimentos por diversos modelos de análisis (multicapa elástica, elemento finito, viscoelasticidad), variabilidad en el diseño, entre otros temas.

Por ejemplo, la investigación realizada por (Orozco, 2007) contempla la influencia de los factores climáticos en el desempeño de los pavimentos. Mediante revisión bibliográfica define los factores climáticos de mayor interés y realiza una zonificación climática para la gestión de la infraestructura vial.

Otros proyectos de investigación se han realizado con el objetivo de caracterizar los materiales granulares y suelos típicos de las estructuras de pavimento en Costa Rica. (Porrás, 2009) realiza una caracterización de los materiales constituyentes del pavimento. Como resultado desarrolla modelos que permiten al diseñador obtener el módulo resiliente de los materiales de la base, subbase y subrasante, a partir de propiedades básicas.



Asimismo, otra investigación se enfoca en la obtención de los factores camión de los autobuses urbanos e interurbanos para Costa Rica. (Espinoza González, 2013) Con ello se caracteriza las cargas a las que están expuestos actualmente los pavimentos del país.

En el 2013, (Vargas Hernández, 2013) desarrolló una interfaz para el diseño de pavimentos, la cual considera la variación estacional de los módulos resilientes de los suelos, la variación del módulo de la mezcla asfáltica por la temperatura y el desempeño de los pavimentos por fatiga y por deformación permanente. Esta interfaz representa un preámbulo para el desarrollo de una herramienta de análisis y diseño calibrada de forma precisa para las condiciones tropicales predominantes en Costa Rica.

En total, y a manera de resumen, en el PITRA-LanammeUCR se han realizado un total del 90 tesis y 41 investigaciones que aportan en el diseño estructural de pavimentos. Todos estos estudios se resumen en la "Guía Interina de Diseño de Pavimentos Flexibles" (Arias, Loría, Aguiar, y otros) que próximamente se presentará a la comunidad ingenieril de Costa Rica. Cabe destacar que la guía también contará con un software o herramienta informática que facilitará la metodología de diseño, sin que con ello se deba omitir la importancia y responsabilidad profesional, por parte de los ingenieros viales, de conocer a fondo los algoritmos de diseño o las propiedades de entrada de los materiales.

Finalmente, se debe resaltar que a través del LanammeUCR se han realizado y están disponibles, numerosas investigaciones con el objetivo de que sirvan de referencia para la aplicación práctica y cotidiana para los diseñadores de pavimentos, esto, sin obviar, que guías de diseño empíricas como el AASHTO 93, deben irse dejando atrás, para cambiarlas por criterios mecánico-empíricos, de los cuales Costa Rica posee una gran gama. Además, el establecimiento del PaveLab[®] permitirá en el corto y mediano plazo elaborar modelos de desempeño calibrados para varias estructuras de pavimento, típicas de Costa Rica.

2 ALCANCE

- El presente documento pretende ser una guía básica en cuanto a la incorporación de parámetros de diseño de pavimentos flexibles y semi-rígidos, considerando los estudios realizados en el país y literatura internacional sobre el tema.
- Los modelos y procedimientos expuestos son tomados de referencias internacionales que poseen una gran aceptación a nivel mundial y constituyen los fundamentos



básicos de una guía de diseño de pavimentos empírica- mecánica moderna. Esto, con el objetivo de introducir en Costa Rica estos criterios técnicos basados en conocimiento fundamental de ingeniería (módulos elásticos o dinámicos, esfuerzos, deformaciones y deflexiones, por ejemplo) y dejar de lado metodologías empíricas que fueron calibradas para condiciones distintas a las del país y con las cuales no se logra una efectiva optimización de los recursos disponibles

- Como base para los diseños iniciales (diseño semilla) se considera aplicable la metodología de diseño de la AASHTO de 1993, por el conocimiento que tienen ya los diseñadores del país, pero se insiste en que es estrictamente necesario realizar una verificación por desempeño, utilizando ecuaciones de transferencia adecuadas, con el fin de que la estructura cumpla con los requisitos de deformación permanente y fatiga, para la cual deben realizarse varias iteraciones.
- En el presente documento no se detallan recomendaciones sobre pavimentos rígidos, las mismas serán presentadas directamente en la guía interina de diseño de pavimentos para Costa Rica.

3 DESCRIPCIÓN

El presente documento brinda a los diseñadores de pavimentos de Costa Rica recomendaciones básicas sobre el diseño de pavimentos flexibles y semi-rígidos, con el fin de uniformar criterios a nivel nacional y difundir al grupo profesional los procedimientos actuales en diseño de pavimentos, con el fin de incorporar en el mismo propiedades mecánicas de los materiales locales. Debe resaltarse que lo aquí expuesto no corresponde a conocimiento avanzado o estado del arte, sino a conocimiento aplicado, de uso regular en otros países como Estados Unidos, Inglaterra, Francia, Alemania, Sudáfrica, Australia o Colombia .

Así las cosas, debe indicarse que la respuesta de los pavimentos no puede analizarse como un fenómeno estático sino dinámico, y por lo tanto, se debe evaluar el comportamiento y propiedades de los materiales ante cargas cíclicas. En ese sentido, debe entenderse que las respuestas del pavimento pueden ser muy variadas y dependientes de muchos factores como lo son: el clima, la magnitud de la carga, la velocidad de los vehículos y de las propiedades de cada material colocado. Además, debe considerarse el hecho de que estas



propiedades no son constantes para cada material y más bien dependen de las condiciones propias de cada material y diseño específico.

Por lo anterior, es de vital importancia realizar modelaciones para cada proyecto y considerar las propiedades reales de cada material tales como: módulo dinámico de las mezclas asfálticas, módulo resiliente de mezclas asfálticas, de materiales granulares y subrasante, así como temperatura y otros factores climáticos. De esta manera, se introduce el comportamiento viscoelástico de las mezclas asfálticas y los no lineales-esfuerzo dependientes de los materiales granulares y suelos, que de otra manera, serían subcaracterizados y analizados de manera errónea. Esto a su vez, implica la realización de ensayos de carga dinámica con y sin confinamiento (triaxiales) y no depender de simples relaciones de módulos versus CBR, que tantos errores han generado a la ingeniería al ser extrapoladas para condiciones completamente diferentes de las condiciones de diseño.

Los modelos expuestos en este documento constituyen la base de cálculo para la MEPDG (*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*), que es la guía de diseño mecanística-empírica desarrollada por Programa Nacional Cooperativo de Investigación de Carreteras NCHRP (*National Cooperative Highway Research Program*) de los Estados Unidos en el 2004; cuyo fin es abordar temas relacionados con los departamentos de transporte de los Estados Unidos y está compuesto por profesionales en transporte del sector privado y del Gobierno. Además, cuenta con la colaboración de la Junta de Investigación del TRB (Transportation Research Board), de la Asociación Americana de Carreteras Estatales y Oficiales del Transporte AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*), de la Administración Federal FHWA (*Federal Highway Administration*).

En la presente guía, también se brinda información que ha sido desarrollada en Costa Rica, por medio de proyectos de investigación y que cuentan con el respaldo de profesionales en las áreas de: transportes, pavimentos y materiales. Además, se ha revisado que todos los procedimientos puedan ser ejecutados utilizando propiedades de los materiales locales cuyos resultados sean obtenidos a través de ensayos de laboratorio existentes en el país.

Para introducir la metodología de análisis mecanicista, se adjunta una figura de la publicación "Desarrollo de la Guía de Diseño de Pavimentos de Costa Rica: CR-ME (Loría

Salazar, 2013) ", presentada en el XV Congreso Ibero-latinoamericano del Asfalto. La publicación refiere, entre otros aspectos lo siguiente: 1) Uso de las funciones de transferencia del MEPDG basadas en modelos de regresión que correlacionan las respuestas del pavimento con algún deterioro, 2) Calibración de funciones de transferencia propias, basadas en los resultados de los ensayos acelerados usando el HVS del PaveLab (Aguiar Moya, Corrales, Elizondo Arrieta, & Loría Salazar, 2012) y 3) Monitoreo de 30 secciones de pavimentos nuevos y reconstruidos, para verificar los modelos indicados en el punto 2) e incluir factores asociados al sitio particular. Además, se están estudiando umbrales máximos permisibles o aceptables de los diversos deterioros para verificar los diseños.

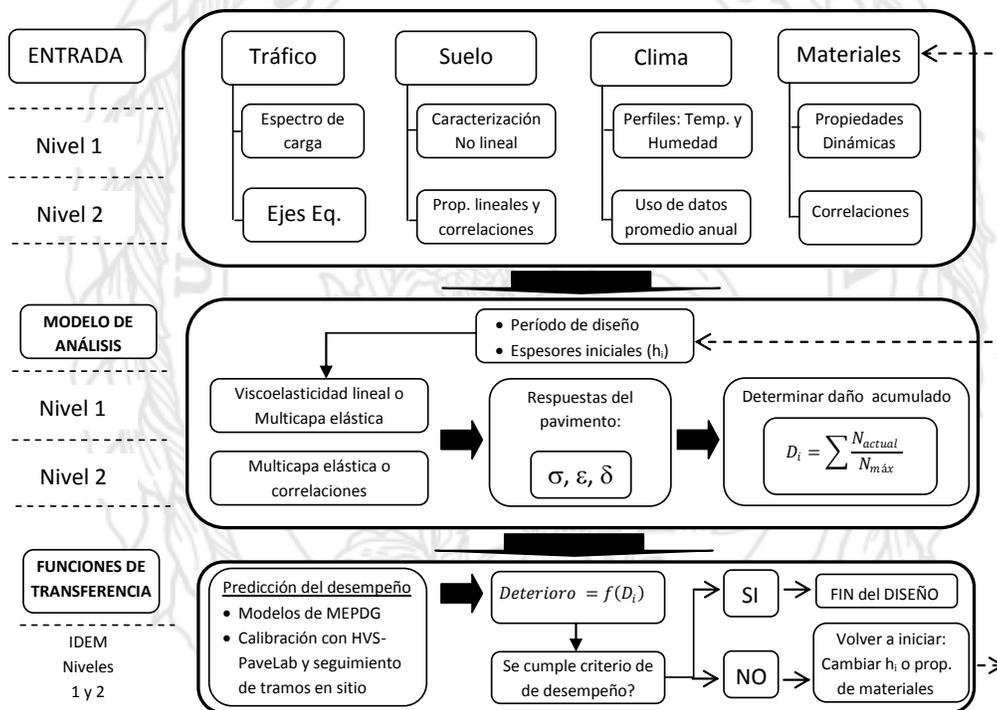


Figura 1. Esquema para desarrollo de la Guía CR-ME.

Fuente. (Loría Salazar, 2013)



4 RECOMENDACIONES TÉCNICAS

4.1 Recomendaciones generales

En esta sección se brindan recomendaciones generales para el diseño de pavimentos que deben considerarse para mantener una rigurosidad técnica acorde a las tecnologías actuales en el país y con el fin de predecir de manera más precisa el comportamiento mecánico de los materiales utilizados en la construcción de carreteras y su relación con el desempeño de los pavimentos.

4.1.1 Período de diseño

Se recomiendan los períodos que se muestran en la Tabla 1 para el diseño de pavimentos nuevos, considerando la clasificación de las vías a intervenir.

Tabla 1. Recomendaciones para el periodo de análisis según tipo de ruta.

Condiciones de la ruta	Periodo de análisis (años)
Urbana de alto volumen	15 -20
Rural de alto volumen	10 –15
Pavimentada de bajo volumen	8 – 12
Superficie de agregados de bajo volumen	5 - 8

- Para el diseño de sobrecapas se recomienda realizar un proceso formal de diseño, que considere la capacidad actual del pavimento al momento de las intervenciones, considerando metodologías como: vida remanente y retrocálculo de módulos.
- En el caso de la metodología de retrocálculo de módulos no es recomendable utilizar las mediciones de deflectometría del informe bianual de Evaluación de la Red Vial Nacional, dado que el intervalo entre mediciones está enfocado a un análisis a nivel de red y en este caso se requiere un análisis a nivel de proyecto, además, se recomienda considerar un período de diseño para sobrecapas no menor a 6 años.

4.1.2 Ensayos de laboratorio

- Para determinar el módulo resiliente de la mezcla asfáltica, materiales granulares y suelos a utilizar en el diseño de estructural de pavimento, se recomienda el uso de los siguientes ensayos de laboratorio.
 1. Módulo resiliente de mezclas asfálticas a la tensión indirecta (AASHTO TP-31-96 ASTM D 4123 IT-ED-04).
 2. Módulo dinámico de mezcla asfálticas en caliente (AASHTO TP 62 ASTM D 3497/D 3496).
 3. Módulo resiliente de materiales granulares y suelos (AASHTO T 307).
- En el caso del módulo resiliente de la mezcla asfáltica debe considerarse la temperatura del pavimento para el análisis de desempeño y la frecuencia de carga asociada a la velocidad de los vehículos. El módulo de resiliencia de la mezcla asfáltica, se hace en modo de tracción indirecta, y podría ser un buen paso intermedio entre el coeficiente estructural (que actualmente no correlaciona realmente con la capacidad mecánica de la mezcla asfáltica) y el módulo dinámico de la mezcla asfáltica.

4.2 Fatiga en mezclas asfálticas

- Se recomienda realizar una revisión del desempeño a fatiga en mezclas asfálticas en caliente, para esto se puede utilizar como referencia el modelo matemático de la *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG) del 2004 (National Cooperative Highway Research Program, 2004).
- Como recomendación se brindan los siguientes umbrales de falla (ver Tabla 2) para diferentes niveles de tránsito, con el fin de verificar el desempeño a fatiga de las mezclas asfálticas, utilizando la función de transferencia de la ecuación 6.

Tabla 2. Umbrales de falla para porcentaje de área agrietada.

Ejes equivalente período de diseño	Porcentaje de área agrietada antes de la falla
< 3 millones	75%
3-15 millones	50%
> 15 millones	20%

4.2.1 *Guía mecanístico-emprírica de diseño de pavimentos (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, MEPDG)*

El procedimiento que se plantea a continuación es el recomendado por la MEPDG del 2004 (National Cooperative Highway Research Program, 2004), y matemáticamente se resume desde la ecuación 1 hasta la ecuación 6, el mismo permite estimar la cantidad de repeticiones de carga (80 KN) necesarias para la falla a fatiga de una mezcla asfáltica.

La ecuación 1 permite estimar la cantidad de repeticiones necesarias para alcanzar un 100% de daño en un pavimento asfáltico, considerando el factor de ajuste de laboratorio a campo (ecuaciones 2 y 3) y el tipo de grieta (ecuación 4).

Es importante aclarar que el resultado de la ecuación 1 sólo indica la cantidad de repeticiones totales que podría soportar dicha estructura para un 100% de daño, por lo tanto brinda poca información para analizar cómo evoluciona el daño a través del tiempo, de ahí lo importante de utilizar la Ley de Miner, representada por la ecuación 5, esta relación permite estimar el daño en función de las cargas estimadas en cada año del período de diseño.

Conociendo el nivel de deterioro para cada año dentro del período de análisis y utilizando la relación que se presenta en la ecuación 6 es posible estimar el porcentaje de área agrietada (en la huella de los vehículos) para cada año y con el umbral definido en la Tabla 2 es posible determinar si el pavimento cumple o no por fatiga.

$$N_f = 0,00432x Cx k'_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3,9492} \left(\frac{1}{E^*}\right)^{1,281} \quad (1)$$

$$C = 10^M \quad (2)$$

$$M = 4,84 \left[\frac{V_b}{V_a + V_b} - 0,69 \right] \quad (3)$$

Donde,

- E^* : Módulo dinámico de la mezcla asfáltica (psi).
- ε_t : Deformación por tensión en la fibra inferior de la capa asfáltica (in/in)
- V_b : Contenido de asfalto efectivo (%).
- V_a : Porcentaje de vacíos (%).
- k'_1 : Parámetro de corrección según tipo de grieta.

Para agrietamiento de abajo-arriba:

$$k'_1 = \frac{1}{0,000398 + \frac{0,003602}{1 + e^{(11,02 - 3,49 * h_{ac})}}} \quad (4)$$

Donde,

- h_{ac} : espesor de carpeta asfáltica (in).

Par estimar el daño por fatiga se utiliza la siguiente ecuación:

$$D = \sum_{i=1}^T \frac{n_i}{N_i} \quad (5)$$

Donde,

- D : Daño.
- T : Número total de periodos (puede considerarse un año).
- n_i : Tráfico actual del periodo i .
- N_i : Tráfico permitido bajo las condiciones que prevalecen del periodo i .

$$FC = \left(\frac{6000}{1 + e^{(C_1 * C'_1 + C'_2 * C''_2 * \log(D))}} \right) * \left(\frac{1}{60} \right) \quad (6)$$

Donde,

- FC : Agrietamiento de abajo hacia arriba por fatiga, porcentaje por área de la huella.
- D : Daño por fatiga de abajo hacia arriba, en decimal.
- C_1 : 1,0
- C'_1 : $-2 * C'_2$
- C'_2 : 1,0
- C''_2 : $-2,40874 - 39,748 * (1 + h_{AC})^{-2,856}$
- h_{AC} = espesor en pulgadas

4.3 Fatiga en bases estabilizadas con cemento

En el caso de los pavimentos semirrígidos, el desempeño se rige por el agrietamiento por fatiga en la capa de base estabilizada y no por el agrietamiento en la capa de mezcla asfáltica.

En la ecuación 7 se presenta un modelo que permite estimar la vida a fatiga de una base estabilizada con cemento (Scullion, Jacob, Stacy, & Chen, 2008), en este caso el modelo brinda la cantidad de repeticiones necesarias para alcanzar el daño por fatiga, por lo tanto este valor debe compararse con la cantidad final de ejes equivalentes en el periodo de diseño.

4.3.1 Portland Cement Association (PCA)

$$N_f = \left(\frac{\beta_c^4}{\sigma_t / M_{rup}} \right)^{\beta_c^3 * 20} \quad (7)$$

Donde,

- N_f = Número de repeticiones de carga para el agrietamiento por fatiga de la base estabilizada.
- σ_t = Máximo esfuerzo a tensión inducido por el tráfico en la parte inferior de la capa de base estabilizada (psi).

- MR: Módulo de ruptura a los 28 días (resistencia a flexión) $\beta_{c3,c4}$: Factores de calibración en campo (psi).
- $\beta_{c3}=1.0259$, y $\beta_{c4}=1.1368$, para granular.
- $\beta_{c3}=0.6052$, y $\beta_{c4}=2.1154$, para material fino.

4.4 Deformación permanente

Se recomienda realizar una revisión de la deformación permanente en mezclas asfálticas en caliente, materiales granulares y subrasante con el objetivo de minimizar el potencial de ahuellamiento en los pavimentos.

Para esto se puede utilizar como referencia el modelo calibrado para la *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG) del 2004 (National Cooperative Highway Research Program, 2004), el cual permite obtener la deformación permanente en cada capa de la estructura del pavimento.

Como guía pueden seguirse las recomendaciones de la Tabla 3 para verificar el potencial de ahuellamiento en las estructuras de pavimento.

Tabla 3. Umbrales de falla para deformación permanente.

Ejes equivalente período de diseño	Ahuellamiento permisible máximo
< 3 millones	25 mm
3-15 millones	20 mm
> 15 millones	12,7 mm

4.4.1 Guía mecanístico-empririca de diseño de pavimentos (*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* MEPDG)

4.4.1.1 Deformación permanente de la mezcla asfáltica

En la ecuación 8 puede observarse el modelo matemático que permite determinar la deformación permanente en un pavimento con más de una carpeta asfáltica, el cual consiste en una sumatoria de la deformación plástica acumulada y un parámetro en función del espesor de cada capa, los demás parámetros pueden calcularse por medio de las ecuaciones 9,10,11 y 12.

$$PD = \sum_{i=1}^{n \text{ capas}} \varepsilon_p^i * K_i \quad (8)$$

Donde,

- PD : Deformación permanente del pavimento.
- ε_p^i : Esfuerzo plástico total de la capa i .
- h^i : Espesor de la capa i .

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = 10^{-3,4488} T^{1,5606} N^{0,479244} \quad (9)$$

Donde:

- ε_p = Deformación plástica acumulada a N repeticiones de carga (in/in).
- ε_r = Deformación vertical resiliente (in/in).
- T = Temperatura de la mezcla (°F).
- N = Número de repeticiones de carga.
- k_1 : Parámetro de profundidad, calculado como:

$$k_1 = (C_1 + C_2 * d) * 0,328196^d \quad (10)$$

$$C_1 = -0,1039 * h_{ac}^2 + 2,4868 * h_{ac} - 17,342 \quad (11)$$

$$C_2 = 0,0172 * h_{ac}^2 - 1,7331 * h_{ac} + 27,428 \quad (12)$$

Donde,

- h_{ac} : espesor total de la capa asfáltica (in).
- d : profundidad media de la capa (in).

4.4.1.2 Deformación permanente de la base y subbase granular

La deformación de bases y subbases granulares depende de varios factores, los cuales pueden obtenerse de fuentes nacionales y de ensayos de laboratorio específicos.

$$\delta_a = \beta_1 * \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r}\right) e^{-\left[\frac{p}{N}\right]^\beta} \varepsilon_v h \quad (13)$$

Donde,

- $\bar{\delta}_a$: Deformación permanente para la capa/subcapa (in).
- N : Número de repeticiones de carga.
- ε_v : Deformación vertical elástica en la capa (in/in).
- h : espesor (in)

$$\log \beta = -0,61119 - 0,017638 * W_c \quad (14)$$

$$\left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r}\right) = \frac{\left(e^{(\rho)^\beta} * 0,15\right) + \left(e^{(\rho/10^9)^\beta} * 20\right)}{2} \quad (15)$$

$$\rho = 10^9 \left[\frac{\ln \left[\frac{(0,15)}{20} \right]}{1 - (10^9)^\beta} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (16)$$

$$W_c = 51,712 \left[\left(\frac{E_r}{2555} \right)^{\frac{1}{0,64}} \right]^{-0,3586 * GTW^{0,1192}} \quad (17)$$

- W_c : Contenido de agua (%).
- E_r : Módulo resiliente de la capa/subcapa, (psi).
- GTW : Profundidad del nivel freático, (pies).
- ε_0 , β , ρ : Propiedades del material.
- ε_r : Deformación elástica utilizada en la prueba de laboratorio para obtener las propiedades del material (ε_0 , β , ρ).
- ε_v : Deformación elástica promedio vertical en la capa/subcapa.
- h : Espesor de la capa/subcapa (in).
- β_1 : Factor de calibración, 1,673 para bases/ subbases granulares y 1,35 para la subrasante.

4.4.1.3 Deformación permanente de la subrasante

La relación matemática para calcular la deformación plástica de la subrasante es un proceso un poco más complejo, pero las ecuaciones ya se encuentran simplificadas y con calcular la deformación plástica en dos puntos específicos que son: fibra superior de la subrasante y a 6 pulgadas (aproximadamente 15 cm) de profundidad en la subrasante; pueden obtenerse los resultados requeridos. De igual forma tienen que utilizarse las ecuaciones 14,15,16 y 17 para estimar los parámetros necesarios.

$$\varepsilon_p(z) = (\varepsilon_{p,z=0}) e^{-kz} \quad (18)$$

Donde,

- $\varepsilon_p(z)$: Deformación vertical plástica a la profundidad z (medida desde la superficie de la subrasante).
- $\varepsilon_{p,z=0}$: Deformación vertical plástica en la superficie de la subrasante.
- z : Profundidad medida desde la superficie de la subrasante (in).
- k : Constante obtenida de la regresión.

Para calcular la deformación de la subrasante se realizan los siguientes pasos:

- Se calcula la respuesta del pavimento (deformación vertical elástica ε_v) en la superficie de la subrasante y a 6 pulgadas de profundidad en la subrasante.
- Utilizando las ecuaciones descritas para materiales granulares, se calcula $\left(\frac{\varepsilon_o}{\varepsilon_r}\right)$, β y ρ para $z=0$ y $z=6$ in.
- Utilizando los valores obtenidos en el paso anterior, se calcula la deformación plástica para cada profundidad:

$$\varepsilon_p(z) = \beta_1 * \left(\frac{\varepsilon_o}{\varepsilon_r}\right) e^{-\left[\frac{\rho}{N}\right]^\beta} \varepsilon_v \quad (19)$$

- Se calcula el parámetro k :

$$k = \frac{1}{6} \ln\left(\frac{\varepsilon_{p,z=0}}{\varepsilon_{p,z=6}}\right) \quad (20)$$

v) La deformación permanente total se calcula como:

$$d\delta = \varepsilon_p(z)dz \quad (21)$$

$$\delta = \int_0^{h_{roca}} \varepsilon_p(z)dz \quad (22)$$

$$\delta = \varepsilon_{p,z=0} \int_0^{h_{roca}} e^{-kz} dz = \left(\frac{1 - e^{-kh_{roca}}}{k} \right) * \varepsilon_{p,z=0} \quad (23)$$

Donde,

- δ : Deformación plástica total de la subrasante, in.
- h_{roca} : Profundidad de la capa rocosa, pies (z=0 representa la superficie de la subrasante).

5 FACTOR CAMIÓN

Los factores camión (FC) permiten conocer el daño que los ejes de cada vehículo le generan al pavimento, y corresponden a la suma de los factores de equivalencia de carga LEF (*load equivalency factors*) de cada vehículo.

$$FC \text{ promedio} = \frac{[\sum(\text{Número de ejes} * LEF)]}{\text{Número de vehículos encuestados}} \quad (24)$$

Donde,

- LEF: Factores equivalentes de carga (definidos en la guía de diseño AASHTO 93)

De tal manera, se puede determinar la cantidad de ejes equivalentes de carga de 80 kN que deberá soportar en total una determinada estructura de pavimento, para todos sus años de servicio; para conocer el valor de ejes equivalentes de diseño para cada tipo de vehículo, se aplica la siguiente ecuación.

$$ESAL_{(tipo-vehículo)} = \sum(TPDA * distribución - tipo de vehículo, \%) * FC_{(tipo-vehículo)} \quad (25)$$

Sin embargo, para el diseño se debe conocer la cantidad total de ESALs por día ($ESAL_{dia}$), es decir, considerando todas las clases de vehículos, por lo que se suman los ESALs de todas las categorías anteriores. Por último, para conocer la cantidad de ejes equivalentes

con los cuales una obra deberá ser debidamente diseñada, es necesario considerar aspectos de los carriles y vida útil de la carretera (para tal efecto pueden considerarse las recomendaciones de la AASHTO 1993), por lo que se aplica la siguiente ecuación:

$$ESAL_{diseño} = ESAL_{día} * DS * LDF * GF * Y * 365 \quad (26)$$

$$GF * Y = \frac{(1 + r)^n - 1}{r} \quad (27)$$

Donde,

- $ESAL_{diseño}$: Ejes equivalentes de diseño (por año).
- DS: Factor de distribución por sentido.
- LDF: Factor de distribución por carril
- $GF * Y$: Factor de crecimiento para el período de diseño esperado.
- r: Tasa de crecimiento anual.
- n: Vida útil

Actualmente se cuenta con información de diferentes períodos (2007, 2009, 2008-2011). En la Tabla 4 se pueden encontrar los factores camión que han sido calculados por medio de distintos proyectos de investigación, cada uno de ellos posee un esquema de análisis y el detalle puede ser consultado en cada proyecto.

En resumen, la Tabla 4 presenta los factores camión calculados en el 2007 por medio de una encuesta de carga realizada por el LanammeUCR (Allen, Ulloa, Sibaja, & Badilla, 2007). También se brinda una recopilación de factores camión de las bases de datos de la Dirección de Planificación Sectorial del MOPT (Vargas & Allen, 2014) y de un proyecto final de graduación realizado en conjunto con el LanammeUCR (Espinoza González, 2013) sobre los factores camión de los buses urbanos e interurbanos. Los factores que se presentan en la Tabla 4 se encuentran calculados con los LEF de pavimentos flexibles, por lo tanto ,el cálculo de ejes equivalentes de diseño con los mismos sólo aplica para proyectos con pavimentos flexibles o semirrígidos.

Tabla 4. Factor camión promedio para diferentes rutas del país.

Fuente	Tipo de vehículo		Factor Camion								
	Ruta		Pick Up	C2+	C2	Bus C2	C3	C4	T2-S1	T3-S1	T3-S2
Determinación de los factores camión promedio en las estaciones de pesaje en Costa Rica 2008-2011	Ruta 32 San José-Limón		-	-	0.242	-	0.82	1.375	0.961	1.565	1.685
	Ruta 32 Limón-San José		-	-	0.21	-	0.599	0.573	0.675	0.745	0.813
	Ruta 1 Cañas-San José		-	-	0.34	-	0.846	0.792	0.749	1.167	1.603
	Ruta 2 San José-Cartago		-	-	0.214	-	0.689	1.102	0.438	1.068	1.016
	Ruta 2 Cartago-San José		-	-	0.205	-	0.880	1.199	1.874	1.273	1.394
	Ruta 2 Paso Canoas-San José		-	-	0.268	-	0.604	0.956	0.668	0.936	1.072
Encuesta de Carga 2007	Ruta 1: General Cañas (Peaje)		0.011	0.019	0.734	2.022	2.721	-	-	-	2.102
	Ruta 1: Bernardo Soto Naranjo (Peaje)		0.011	0.016	0.902	3.68	1.971	-	-	-	3.701
	Ruta 1: Bernardo Soto Esparza (Peaje)		0.011	0.233	0.723	2.911	2.834	-	-	-	4.153
	Ruta 2 Florencia del Castillo (Peaje)		0.015	0.031	-	1.473	-	-	-	-	-
	Ruta 2 Perez Zeledón (Tránsito)		0.012	0.014	0.446	1.858	3.33	-	-	-	2.08
	Ruta 27 Prospero Fernandez (Peaje)		0.011	0.016	1.163	1.957	3.155	-	-	-	2.695
	Ruta 32 Braulio Carrillo (Peaje)		0.011	0.022	-	3.692	-	-	-	-	-
	Ruta 140 San Carlos (Ciudad Quesada)		0.012	0.014	0.521	2.107	3.773	-	-	-	3.861
Factores Camión TFG Juan Carlos Espinoza 2013	Bus Urbano		-	-	-	1.02	-	-	-	-	-
	Bus Interurbano		-	-	-	2.88	-	-	-	-	-
Promedio			0.01	0.05	0.50	2.36	1.85	1.00	0.89	1.13	2.18
Desviación estandar			0.00	0.08	0.32	0.90	1.24	0.29	0.51	0.28	1.17

Fuente: (Espinoza Gonzáles, 2013) (Allen, Ulloa, Sibaja, & Badilla, 2007) (Vargas & Allen, 2014). Modificado Arias, 2014.

6 TEMPERATURA EN LA MEZCLA ASFÁLTICA

La mezcla asfáltica es un material viscoelástico, por lo tanto, sus propiedades dependen del tránsito y de la temperatura. El módulo de la mezcla asfáltica debe considerar la temperatura a la que estará expuesto el pavimento, ya que en función de estas condiciones el mismo puede variar significativamente, por lo tanto, es indispensable conocer o estimar la temperatura a la que estará sometido el pavimento asfáltico en el sitio del proyecto y la temperatura de la mezcla asfáltica a la profundidad de interés.

A continuación se presentan dos metodologías para determinar la temperatura de la carpeta asfáltica a partir de condiciones externas.

6.1 Método del Instituto del Asfalto

La figura 2 muestra el gráfico del Instituto del Asfalto (obtenido de la versión en grados Fahrenheit) con la relación entre la temperatura en la superficie del pavimento, la temperatura promedio del aire (5 días) y la temperatura a una profundidad deseada. En este

tipo de análisis el interés radica en conocer la temperatura promedio que tendrá la mezcla asfáltica, calculándose como un promedio de la temperatura en la superficie, en el centro y en la fibra inferior de la carpeta asfáltica.

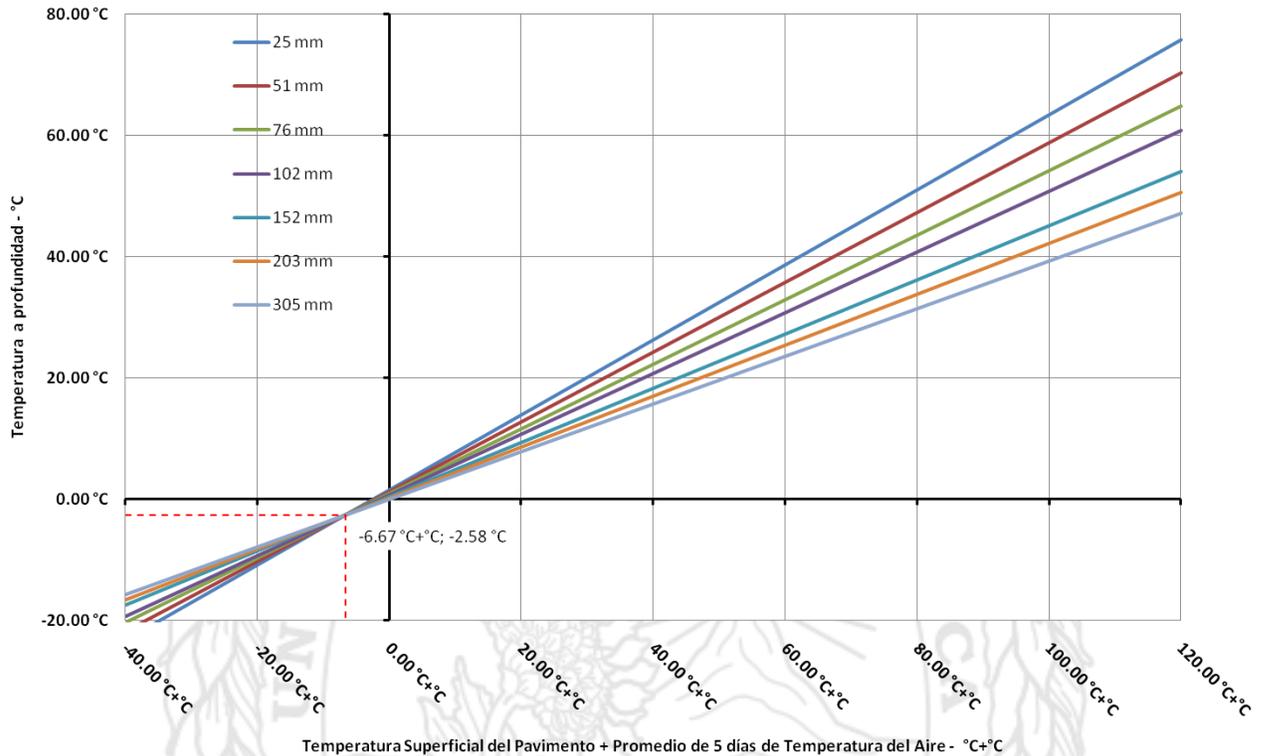


Figura 2. Relación entre la temperatura del pavimento, la temperatura del aire y la temperatura del pavimento a cualquier profundidad.

Fuentes: Southgate, Kenuky Department of Highways – Modificado por Sanabria, 2014.

Complementario al gráfico anterior, pueden utilizarse las siguientes ecuaciones para determinar la temperatura de la capa asfáltica a una determinada profundidad.

$$T_{prof} = A \cdot \ln(prof) + B \quad (28)$$

Donde,

- *prof*: la profundidad de interés (mm).
- *A, B*: calculados como:

$$A = \left(\frac{-65}{669} \cdot (T_{sup} + T_{5días}) + \frac{-616}{951} \right) \quad (29)$$

$$B = \left(\frac{325}{344} \cdot (T_{sup} + T_{5días}) + \frac{1891}{509} \right) \quad (30)$$

Si no se cuenta con la temperatura promedio de cinco días ($T_{5días}$) se puede estimar como un promedio entre la temperatura del aire máxima y la temperatura promedio anual según datos del Instituto Meteorológico Nacional.

6.2 Strategic Highway Research Program (SHRP)

El SHRP desarrolló algoritmos para transformar la temperatura del aire en temperatura del pavimento. El modelo utilizado por la SHRP para calcular la temperatura máxima del pavimento considera que esta se origina a 20 mm de profundidad. El modelo se describe con la siguiente ecuación (Harman, D'Angelo, & Bukowski, 1999):

$$Temp. \text{máxima: } T_{20 \text{ mm}} = (T_{aire} - 0,00618 \times lat^2 + 0,2289 \times lat + 42,4) \times 0,9545 - 17,78 \quad (31)$$

Donde,

- $T_{20 \text{ mm}}$: es la temperatura dentro del pavimento, a 20 mm de la superficie (°C).
- Lat : es la latitud del punto de donde se realiza el diseño, en grados.
- T_{aire} : es la temperatura del aire máxima que se desea evaluar (°C).

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Los modelos expuestos provienen de fuentes internacionales, sin embargo ya se han utilizado en proyectos de investigación nacionales con las propiedades de materiales locales, por lo tanto, se recomienda su utilización en medios locales dada la aceptabilidad internacional.



- Es indispensable realizar diseños de pavimentos que tomen en cuenta conceptos básicos de la mecánica de materiales, con el propósito de predecir de una mejor manera su comportamiento.
- Actualmente existe en el país la capacidad tecnológica y conocimiento para aplicar criterios de diseño empírico - mecánicos, por lo tanto la aplicación de esta metodología debe extenderse mucho más a los diferentes actores involucrados en el ámbito de diseño estructural de pavimentos a nivel nacional. En razón de lo anterior y como parte de las competencias del LanammeUCR, de forma complementaria a esta guía se brindará la transferencia de tecnología y capacitación necesaria al gremio ingenieril para la comprensión y aplicación de los criterios técnicos presentados en la presente guía.
- Se recomienda considerar la importancia de la vía, costo del proyecto y flujo vehicular para determinar el tipo de ensayos a realizar para obtener las propiedades mecánicas de los materiales, con el fin de disminuir el grado de incertidumbre en los proyectos más onerosos.
- Las recomendaciones presentadas están enfocadas en dar una guía a los diseñadores nacionales sobre los modelos matemáticos a utilizar para predecir el desempeño de mezclas asfálticas, con el fin de unificar criterios y llenar los vacíos que puedan encontrarse al momento de aplicar una metodología con componentes empíricos y mecánicos.

8 REFERENCIAS

Aguiar Moya, J. P., Corrales, J. P., Elizondo Arrieta, F., & Loría Salazar, L. G. (2012). *PaveLab and heavy vehicle simulator implementation at the National Laboratory of Materials and Testing Models of the University of Costa Rica*. San Pedro.

Allen, J., Ulloa, Á., Sibaja, D., & Badilla, G. (2007). *Determinación de factores de los factores camión en Costa Rica*. San José, Costa Rica.



American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). *Design of Pavement Structures*. Washington, DC.

Castro Fernández, P. (10 de Setiembre de 2007). DVOP-5170-07. San Jose, Costa Rica.

Castro Fernández, P. (29 de Octubre de 2007). DVOP-6152-07. San José, San José, Costa Rica.

Espinoza Gonzáles, J. C. (2013). *Trabajo Final de Graduación: Determinación de Factores Camión y Espectros de Carga Representativos de Autobuses Urbanos e Interurbanos para Diseño de Pavimentos Flexibles de Costa Rica*. (Tesis inédita de licenciatura). Universidad de Costa Rica. San Pedro.

Harman, T., D'Angelo, J., & Bukowski, J. (1999). *Superpave Asphalt Mixture Design Workshop Workbook*. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, DC.

Loría Salazar, L. G. (2013). *Desarrollo De La Guía De Diseño De Pavimentos De Costa Rica: CR_ME*. San Pedro.

National Cooperative Highway Research Program. (2004). *Guide for Mechanistic-Empirical Design Guide of New and Rehabilitated Pavement Structures*. National Research Council, Transportation Research Program, Illinois.

Orozco, E. O. (2007). *Trabajo Final de Graduación: Zonificación Climática de Costa Rica Para la Gestión de Infraestructura Vial*. (Tesis inédita de licenciatura). Universidad de Costa Rica. San Pedro.

Porras, J. D. (2009). *Trabajo Final de Graduación: Determinación de rangos de módulos resilientes para materiales constituyentes de la estructura de pavimentos existentes en Costa Rica, mediante el procedimiento de r*. (Tesis inédita de licenciatura). Universidad de Costa Rica. San Pedro.

Scullion, T., Jacob, U., Stacy, H., & Chen, P. (2008). *Thickness Design Systems for Pavements Containing Soil-Cement Bases*. Illinois: Portland Cement Association.



Vargas Hernández, J. P. (2013). *rabajo Final de Graduación: Elementos Fundamentales para el desarrollo de una guía de Diseño de Pavimentos Empírico-Mecanística para Costa Rica. (Tesis inédita de licenciatura). Universidad de Costa Rica. San Pedro.*

Vargas, C., & Allen, J. (2014). *Determinación de los factores camión promedio en estaciones de pesaje en Costa Rica: Periodo 2008 - 2011. San Pedro.*

