

Permanent deformation model for pavement condition assessment

Modelo de deformación permanente para la evaluación de la condición del pavimento

F. Leiva ^{1*}, E. Pérez *, J. Aguiar *, L. Loría *

* Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca. COSTA RICA

Fecha de Recepción: 02/08/2016

Fecha de Aceptación: 12/12/2016

PAG 37-46

Abstract

For many decades, studies have addressed the development of plastic strains in flexible pavements. Currently, there are models available that allow predicting this type of failure, and it is a common practice to include them in the structural design of pavements. However, variables required for this prediction are complex and difficult to obtain on site; therefore, they are not easy to apply in the diagnostic process. The measurement of deflections is a structural evaluation method for flexible pavements, whose value may include the competence of the pavement as a whole. This research seeks to correlate deflection data on the pavement's surface with probable plastic strains over time, and to use this prediction to calculate the pavement's remaining service life, with the criterion of maximum rutting allowed. Real-scale data from 4 different lanes were tested by the National Laboratory of Materials and Structural Models of the University of Costa Rica. The proposed model was able to predict future rutting using as input the thickness of the pavement structure, the surface deflection measured at loads of 40 kN, and the equivalent axle repetition; a high goodness of fit was achieved. The rut level estimate should help maintenance and rehabilitation policies of the road management system to be assessed and applied at the right time.

Keywords: Plastic strains, flexible pavement, rutting, deflection pavement, productive model

Resumen

El desarrollo de deformaciones plásticas en pavimentos flexibles ha sido un tópico de investigación desde hace varias décadas. Actualmente se cuenta con modelos que permiten predecir este tipo de falla, siendo una práctica común considerarlos en el diseño estructural de pavimentos. Sin embargo, las variables requeridas para dicha predicción son complejas o difíciles de obtener en campo, lo que hace que su aplicación en el proceso de auscultación no sea sencilla. La medición de deflexiones es una técnica de evaluación estructural de pavimentos flexibles cuyo valor puede considerar la competencia del conjunto pavimento. Esta investigación busca correlacionar los datos de deflexiones en la superficie del pavimento con las deformaciones plásticas probables en el tiempo y usar esta predicción para estimar la vida remanente del pavimento usando como criterio el ahuellamiento máximo permisible. Se utilizaron datos adquiridos en 4 pistas distintas ensayadas a escala real por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica. El modelo propuesto logra predecir el ahuellamiento futuro usando como insumo el espesor de la estructura de pavimento, la deflexión superficial medida a 40kN de carga, y la repetición de ejes equivalentes, logrando una bondad de ajuste alta. Con la estimación del nivel de ahuellamiento se espera que las políticas de mantenimiento y rehabilitación propias de un sistema de administración de pavimentos sean calibradas y aplicadas a su debido tiempo.

Palabras clave: Deformaciones plásticas, pavimento flexible, ahuellamiento, deflexión del pavimento, modelo productivo

1. Introducción

El ahuellamiento es una falla funcional asociada a las repeticiones de cargas. Es causado por deformaciones permanentes en cualquiera de las capas del pavimento, o en la subrasante, producidas principalmente por consolidación o desplazamiento lateral de los materiales debido al tráfico. Un ahuellamiento severo puede resultar en hidropilado, y potencialmente la falla estructural en el pavimento (Huang, 2004). El incremento en el tráfico vehicular, y del porcentaje de vehículos pesados, así como la incertidumbre asociada a la proyección de estos, hacen que el ahuellamiento sea una de las fallas más frecuentes y severas que afectan los pavimentos. La práctica actual tiende a hacer del ahuellamiento probable uno de los indicadores a controlar durante el diseño del pavimento, buscando principalmente la preservación de la velocidad y seguridad, al evitar el fenómeno de hidropilado. Para tal fin es común recurrir a

modelos calibrados para predecir la cantidad máxima de ciclos de carga que puede soportar la estructura antes de llegar a presentar un ahuellamiento máximo que pueda ocasionar efectos adversos al funcionamiento del pavimento. Este criterio es comúnmente usado en los métodos de diseño de pavimentos con enfoque mecanicistas-empíricos, sin embargo, pocas investigaciones se han realizado para ofrecer herramientas de seguimiento y predicción del avance de esta falla a lo largo del tiempo.

Es conocido que la tendencia en pavimentos flexibles que las deflexiones superficiales medidas en áreas afectadas por ahuellamiento son mayores a aquellas que se miden en áreas sin fallas (Huang, 2004). Este artículo presenta un modelo predictivo de correlación entre las deflexiones superficiales y el tránsito de cargas con las deformaciones plásticas probables a lo largo del tiempo. El modelo fue creado utilizando como recurso las mediciones de cuatro pistas ensayadas de manera acelerada en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la

¹ Autor de correspondencia:



Universidad de Costa Rica (LanammeUCR). El modelo propuesto puede ser usado como una herramienta de utilidad en la proyección de la vida remanente del pavimento, teniendo en esto una herramienta importante para la ayuda en la toma de decisiones y planificación de las administraciones encargadas.

2. Modelos para predecir ahuellamiento

Existen muchos factores que pueden influir en el desarrollo de deformaciones plásticas en la estructura de pavimentos asfálticos. En los métodos empíricos para predecir esta falla se consideran factores tales como las propiedades de los materiales (ej. módulo resiliente), temperatura ambiental, presión de inflado de la llanta, duración de la carga, número de ciclos, y velocidad de recorrido (Huang, 2004). El uso de estos parámetros ha dado resultados exitosos. Sin embargo, su aplicabilidad parece limitada al diseño del pavimento, ya que es poco común o necesita de una inversión de tiempo considerable, el poder contar con toda la información requerida por estos modelos a partir de una estructura de pavimento ya construida.

Un pavimento sujeto a cargas repetidas de tránsito desarrollara deformaciones verticales a compresión (ϵ_c) que resultarán posteriormente en deformaciones permanentes,

como se muestra en la Figura 1. Investigaciones previas correlacionaron la deformación vertical a compresión, calculada por la teoría de multicapas elásticas, en cada capa del pavimento con sus respectivas deformaciones plásticas probables. Estos modelos basados en comportamiento mecánico son representativos, y muy populares (Du et al., 2008).

Una forma general del modelo de falla de deformación permanente es representada por la Ecuación 1. En esta ecuación N_d es el número de repeticiones de cargas para la falla, ϵ_c es la deformación a compresión en la parte superior de la subrasante, y los coeficientes f_1 y f_2 son coeficientes obtenidos en laboratorio. La Tabla 1 resume algunos de los modelos desarrollados por varias organizaciones a partir de esta forma general (Du et al., 2008).

Los modelos presentados se basan en la deformación unitaria a compresión en la superficie de la subrasante, ignorando el efecto de la deformación permanente en las capas superiores. Para tratar de mitigar esta omisión la Administración Federal de Carreteras de Estados Unidos (FHWA) desarrolló un sistema de análisis de pavimentos, VESYS, el cual cuenta con un modelo simple para el cálculo de ahuellamiento. En este modelo se asumió que la deformación permanente está linealmente relacionada con las deformaciones resilientes, como se muestra en la Ecuación 2 (FHWA).

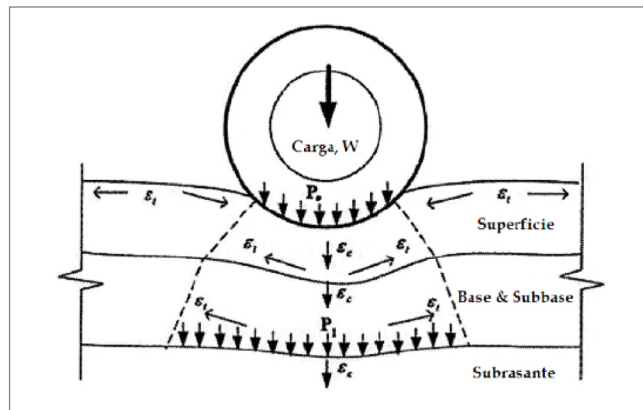


Figura 1. Deformaciones en pavimentos flexibles y distribución de cargas (Du et al., 2008)

$$N_d = f_1(\epsilon_c)^{-f_2} \quad (1)$$

Tabla 1. Modelos desarrollados por distintas organizaciones para deformaciones plásticas

Organización	Modelo
Instituto del asfalto	$N_d = 1.365 \times 10^{-9} (\epsilon_c)^{-4.477}$
Shell Petroleum	$N_d = 6.15 \times 10^{-7} (\epsilon_c)^{-4}$
Universidad de Nottingham	$N_d = 1.13 \times 10^{-6} (\epsilon_c)^{-3.571}$
Mn/ROAD	$N_d = 7.0 \times 10^{15} (\epsilon_c)^{-3.909}$

SPANISH VERSION.....

$$\varepsilon_p(N) = \mu \varepsilon N^{-\alpha} \quad (2)$$

Donde, $\varepsilon_p(N)$: es la deformación permanente luego de N repeticiones de cargas,

μ : Coeficiente lineal entre la deformación permanente y la deformación elástica o resiliente

ε : Deformación elástica o resiliente luego de 200 repeticiones de cargas

N: Numero de repeticiones de cargas

α : Parámetro de compresión de deformación permanente

Dado que el sistema VESYS no fue completamente exitoso, el sistema fue revisado basado en un análisis de carga biaxial y triaxial. Otro modelo de predicción de ahuellamiento (Ecuación 3) fue desarrollado por el Programa Estratégico de Investigación de Carreteras (SHRP), basados en la Ecuación 2 (Lytton, 1993):

$$\varepsilon_p(N) = aN^b \quad (3)$$

Donde, $\varepsilon_p(N)$: es la deformación permanente luego de N repeticiones de cargas,

a : Intercepto del análisis de regresión

N: Numero de repeticiones de cargas

b : Pendiente de la regresión

En el caso de la guía mecanística-empírica desarrollada en Estados Unidos al inicio del presente siglo (National Cooperative Highway Research Program, 2004), la deformación permanente para determinado momento es la suma de las deformaciones de cada capa, expresado en la Ecuación 4. Para cada subcapa existe una ecuación que depende del tipo y propiedades del material.

$$PD = \sum_{i=1}^{n\text{-capas}} \varepsilon_p^i \cdot h_i \quad (4)$$

Donde, PD: Deformación permanente total

n-capas: Número de subcapas

ε_p^i : Deformación total en la subcapa_i

h_i : Espesor de la subcapa_i

Por otro lado, una de las más recientes guías de pavimentos mecanística-empíricas llamada CalME, utiliza el concepto de daño incremental recursivo (Ullidtz et al., 2008). Para esto, las propiedades de los materiales son actualizadas con el paso del tiempo para reflejar el daño producido por la pasada de cargas en el pavimento. Para cualquier tipo de deterioro se utiliza el modelo de daño en función de respuesta mecanicistas, propiedades de los materiales y la cantidad de repeticiones de carga como se muestra en la Ecuación 5.

$$Daño = A \times MN^\alpha \times \left(\frac{resp}{resp_{ref}} \right)^\beta \times \left(\frac{E}{E_{ref}} \right)^\gamma \quad (5)$$

Donde, MN: Repeticiones de carga,

resp: Respuesta del pavimento relacionada con el deterioro buscado

resp_{ref}: Respuesta de referencia

E= Módulo del material actualizado para cada repetición de carga

E_{ref}= Módulo de referencia

A, α , β , y γ : Parámetros de regresión

Finalmente, en el Laboratorio de Materiales de la Universidad de Costa Rica se han desarrollado modelos de deformación permanente siguiendo modelos de la forma mostradas en las Ecuaciones 1 a 3 (Leiva-Villacorta et al., 2015; Avila-Esquivel et al., 2016). Estos modelos dependen de propiedades de los materiales y condiciones del entorno del pavimento como se muestra en la Ecuación 6. Tales modelos, para ser utilizados en auscultación de pavimentos requieren de variables de entrada con datos no fáciles de determinar durante la ejecución de un ensayo no-destructivo in-situ. Por ejemplo, respuestas del pavimento como esfuerzos y deformaciones unitarias requieren una estimación a partir del conocimiento de propiedades del pavimento o se requiere de sensores instalados dentro de la estructura de pavimento. El propósito de este estudio fue el desarrollo de modelos sencillos que relacionan una respuesta cuantificable como la deflexión mediante ensayos no-destructivos con el nivel de deterioro del pavimento, en este caso ahuellamiento. Adicionalmente, se pretende que este tipo de modelación sirva como alimentación de sistemas de administración de pavimentos.

$$DP = k_1 X^{k_2} N^{k_3} \quad (6)$$

Donde, DP: Deformación permanente

X: Grupo de propiedades que dependen del material (Temperatura, esfuerzo desviador, esfuerzo de confinamiento, contenido de humedad)

N: Repeticiones carga,

k_1 , k_2 , k_3 : coeficientes de regresión

3. Objetivo

Establecer un modelo de ahuellamiento con fines de auscultación basado en información obtenida de ensayos acelerados a escala natural.

Mediante la auscultación de pavimentos flexibles con ensayos no destructivos, como deflectometría de impacto y el conocimiento de la cantidad de repeticiones de carga equivalentes, se pretende estimar el nivel de ahuellamiento que presenta el pavimento evaluado. Con la estimación del nivel de ahuellamiento se espera que las políticas de mantenimiento y rehabilitación propias de un sistema de administración de pavimentos sean calibradas y aplicadas a su debido tiempo.

Los ensayos de deflectometría de impacto se utilizan actualmente en Costa Rica para evaluar la condición general de pavimentos flexibles. Este tipo de auscultación se realiza cada dos años sobre la red vial nacional que comprende cerca de 5 mil kilómetros. La carga aplicada corresponde a un eje equivalente de 40 kN, la cual se utiliza para diseño de pavimentos y gestión de mantenimiento y rehabilitación a través de la estimación de vida remanente. Con el fin de utilizar al máximo la información obtenida de esta evaluación bianual es que se enmarca el presente estudio.

4. Pista de ensayos acelerados del LanammeUCR

Los ensayos acelerados de pavimentos consisten en aplicar cargas sobre secciones de pavimentos emulando en un corto periodo de tiempo la vida útil del pavimento. El



LanammeUCR cuenta con un equipo HVS – Mark VI para ensayar pistas de prueba en condiciones aceleradas, este es un equipo completamente automático y móvil, con capacidad de aplicar cargas entre 30kN y 100kN, sobre secciones de un mínimo de 6 metros lineales, con un ancho de huella (desviación de llanta) de 1.0 metro (Leiva-Villacorta et al., 2013). La pista de prueba cuenta con cuatro pistas de prueba con estructuras de pavimentos distintas, las mismas son esquematizadas en la Tabla 2.

Para esta investigación se consideraron los registros de la siguiente instrumentación a lo largo del tiempo (Camacho-Garita y Leiva-Villacorta, 2014):

- Perfilómetro láser. Utilizado para medir el perfil longitudinal y transversal de la superficie en la sección de ensayo, logrando determinar a través de sus registros las variaciones de la deformación permanente de la sección de prueba. El sistema de toma de datos utiliza 2 dispositivos láser Selcom de 16 Hz y cada perfil consiste de 64 perfiles longitudinales tomados a intervalos transversales de 25 mm. El ahuellamiento se puede medir hasta profundidades de 100 mm con una precisión de ± 1 mm.
- Deflectómetro de superficie del pavimento (RSD). El RSD es esencialmente una versión electrónica de la

viga Benkelman con capacidad de transferencia de datos. Se utiliza para medir el cuenco de deflexión de la superficie bajo la carga del HVS con una exactitud en la medición de ± 10 micrones.

- Deflectómetro Multi-profundidad (MDD). El MDD se utiliza para medir la deflexión elástica instantánea y la deformación permanente en varias capas del pavimento de la sección de prueba. Las mediciones de desplazamiento se realizan con una precisión de ± 10 micrones.

La Figura 2 muestra el arreglo de todos los sensores que contiene una pista de ensayo. Se cuenta con sensores de presión, deformación unitaria, temperatura y directamente relacionados con este estudio sensores de deflexión instantánea (RSD y MDD). De estas pistas de prueba se tomaron mediciones en distintos puntos de la misma estructura, esto con el fin de considerar la variabilidad de respuesta estructural asociada al proceso constructivo. Todos los sensores y puntos de medición se ubican a lo largo del eje central longitudinal. Para este estudio, todas las mediciones se realizaron a nivel superficial (para los sensores de deflexión instantánea RSD y MDD).

Tabla 2. Propiedades de la pista de ensayos acelerados (in situ)

Propiedades \ Sección	AC1	AC2	AC3	AC4
Espesor de concreto asfáltico, cm	6.1	6.3	13.2	13.2
Espesor de base, cm	21.9	21.2	31.0	24.9
Espesor de subbase granular, cm	30.1	30.1	30.1	30.1
Módulo del concreto asfáltico @ 25°C, MPa	3800	3800	3800	3800
Módulo de la base, MPa	1200	170	170	1200
Módulo de la subbase, MPa	140	140	140	140
Módulo de la subrasante, MPa	70	70	70	70

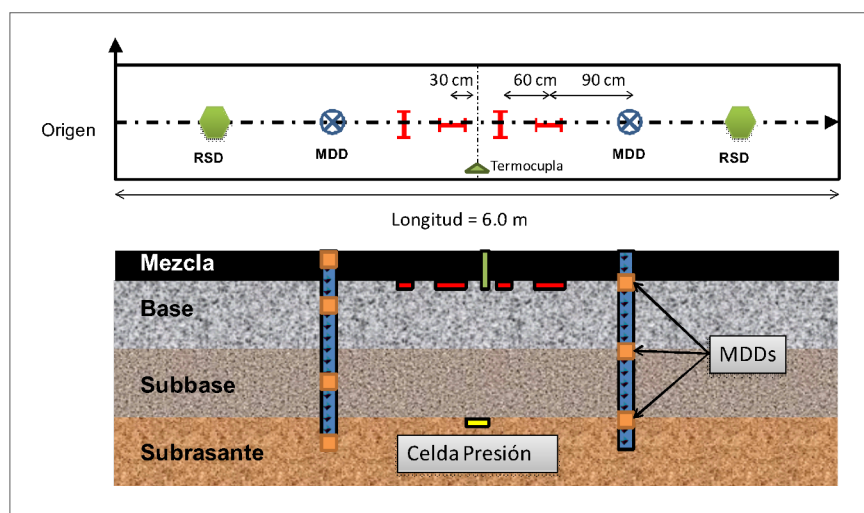


Figura 2. Estructuras en pistas de ensayos acelerados del LanammeUCR (Leiva-Villacorta et al., 2015)

5. Desarrollo de modelo

Para lograr definir la forma general del modelo se analizó individualmente el comportamiento de la deformación plástica medida en las pistas de prueba en relación al número de ciclos registrados. Para simplificar la aplicación en campo del modelo se utilizó en número de repeticiones de ejes simples equivalentes de 80kN (ESAL). La Tabla 3 describe la ubicación exacta de los puntos analizados en cada uno de los tramos evaluados. Todos los puntos de medición se ubican a lo largo del eje central longitudinal de cada pista de ensayo como se ha mostrado en la Figura 2.

En la Figura 3 se muestra las tendencias de comportamiento de la deformación plástica a lo largo del tiempo. Se observó la consistencia en la tendencia esperada de la deformación. Por ejemplo, la sección con mayor

capacidad estructural: AC1 que tiene base estabilizada con cemento, presentó las menores deformaciones. Caso contrario, la sección con menor capacidad estructural AC2 exhibió las mayores deformaciones. El comportamiento observado de las mediciones en la pista de prueba es comparable con lo descrito por las Ecuaciones 2 y 3, en donde se espera una tendencia potencial de la deformación plástica mientras aumentan los ESALs. Se observó una tendencia principalmente lineal, con algunos de los puntos evaluados con tendencias potenciales entre deformación y los ESALs. La Tabla 4 muestra el coeficiente de determinación para cada uno de los puntos evaluados, cuya relación generalmente sigue una tendencia lineal. En los puntos AC4-P4 y AC4-P6 se obtuvo una baja correlación entre deformación y los ESALs, pero esto se debe a la magnitud relativa de las deformaciones (menores a 5 mm).

Tabla 3. Puntos de registro en pistas de ensayos acelerados

Estructura	Ubicación en eje	Nomenclatura	Sensor
AC-1	2.0 m	AC1-P4	RSD
	3.0 m	AC1-P6	MDD
	5.5 m	AC1-P11	RSD
AC-2	1.5 m	AC2-P3	RSD
	2.5 m	AC2-P5	MDD
AC-3	1.5 m	AC3-P3	RSD
	2.5 m	AC3-P5	MDD
AC-4	2.0 m	AC4-P4	RSD
	3.0 m	AC4-P6	MDD
	5.5 m	AC4-P11	RSD

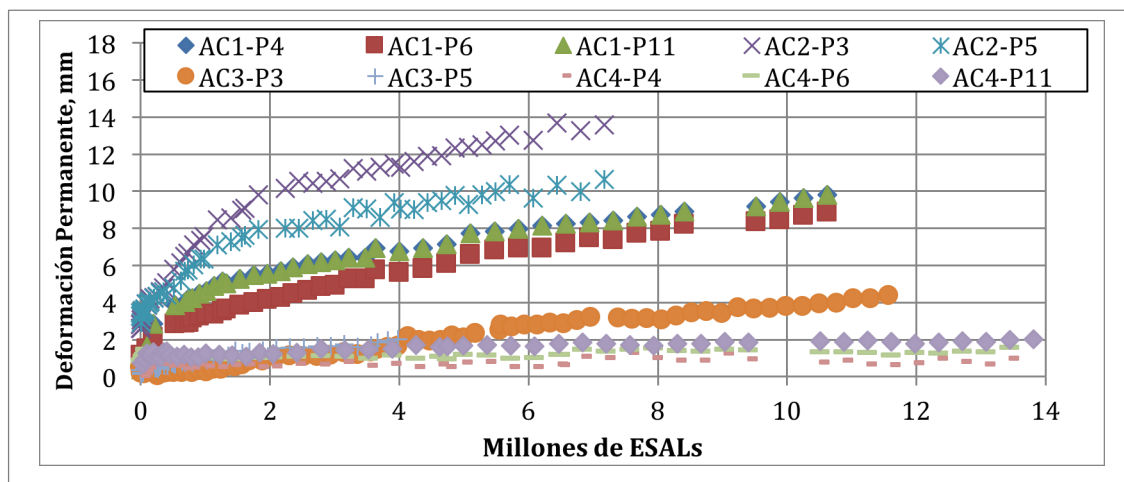


Figura 3. Deformaciones plásticas en todas las estructuras vs. ESALs



La Figura 4 muestra las tendencias de comportamiento de la deformación plástica en función de las deflexiones instantáneas superficiales. Se observó una tendencia principalmente exponencial con algunos de los puntos evaluados con tendencias lineales entre deformación y deflexión (como se muestra en la Tabla 4).

Finalmente, se tomó la decisión de integrar las deflexiones y los ESALs es una variable independiente con el

fin de uniformizar las tendencias en todos los puntos evaluados (Figura 5). Se observó una tendencia principalmente potencial con algunos de los puntos evaluados con tendencias lineales, como se muestra en la Tabla 4. En este caso, 7 de los 10 puntos evaluados presentaron una relación potencial entre la deformación y la variable independiente $\delta \times \text{ESALs}$.

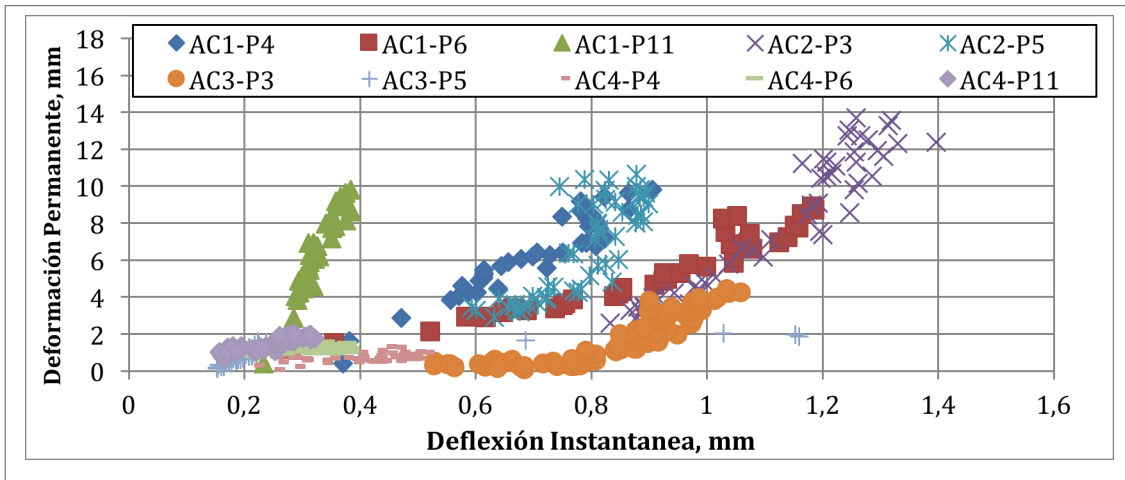


Figura 4. Deformaciones plásticas en todas las estructuras vs. deflexiones (δ)

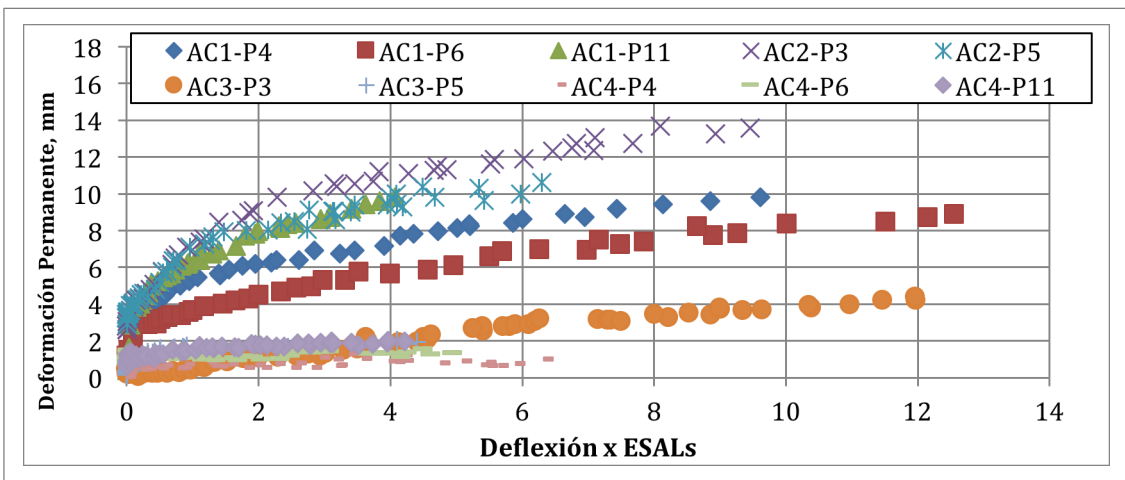


Figura 5. Tendencia de deformaciones plásticas en función de $\delta \times \text{ESALs}$

Tabla 4. Coeficiente de determinación para tendencias analizadas

Medición	VS. ESALs		VS. Deflexión		VS. Deflexión x ESALs	
	Lineal	Potencial	Lineal	Exponencial	Lineal	Potencial
AC1-P4	0.862	0.973	0.907	0.762	0.832	0.906
AC1-P6	0.947	0.935	0.893	0.966	0.921	0.942
AC1-P11	0.862	0.973	0.802	0.606	0.834	0.961
AC2-P3	0.882	0.855	0.91	0.942	0.865	0.871
AC2-P5	0.873	0.809	0.666	0.732	0.864	0.813
AC3-P3	0.980	0.640	0.758	0.785	0.972	0.652
AC3-P5	0.904	0.845	0.428	0.253	0.506	0.855
AC4-P4	0.218	0.300	0.111	0.126	0.214	0.280
AC4-P6	0.179	0.070	0.030	0.037	0.168	0.06
AC4-P11	0.821	0.830	0.755	0.735	0.803	0.829
Tendencia Dominante (cantidad)	X (6)	-	-	X (6)	-	X (7)

Basado en los resultados mostrados en las Figuras 3 a 5 y la Tabla 4, y como se cuenta con observaciones de deformación plástica en diferentes momentos a lo largo del tiempo (ESALs), se consideró un modelo de serie de tiempo que incorpore un parámetro Auto-regresivo de Orden 1 ó AR(1), según se muestra en la Ecuación 7.

$$RD_t = b_1 X_{t-1}^{(b_2 h + b_3)} + b_4 X_t + b_5 h + b_6 \quad (7)$$

En los procesos AR(1) la variable X_{t-1} está determinado únicamente por el valor del parámetro asociado al período anterior (Greene, 2012) siendo,

$$X_{t-1} = \delta \times ESAL_{t-1} \quad (8)$$

$$X_t = (b_7 h + b_8) ESAL_t + b_9 X_{t-1} \quad (9)$$

Donde,

RD_t = deformación permanente en el momento t (mm)

h = espesor de capa de mezcla asfáltica (mm)

δ = deflexión superficial a 40 kN, en el momento t-1 (mm)

$ESAL_{t-1}$ = millones de ejes equivalentes de 80 kN, en el momento t-1

$ESAL_t$ = millones de ejes equivalentes de 80 kN esperados en el momento t

En este modelo se recurre a una variable X_{t-1} que ayuda a definir de manera más clara la tendencia del ahuellamiento en relación a la cantidad de ejes equivalentes.

El primer término presenta la tendencia potencial del comportamiento esperado, y el resto del modelo considera las variaciones en el tiempo de las deflexiones superficiales. Los estadísticos descriptivos de los datos utilizados para el modelo se resumen en la Tabla 5, y en las Ecuaciones 10 a 12 se presentan los criterios de evaluación del desempeño del modelo.

La Tabla 6 presenta los resultados del ajuste de regresión, y los valores asociados a la inferencia calculados (Hamilton, 2012). La Figura 6 muestra el resultado del modelo, comparado con las mediciones reales de deformación permanente. Esto unido a los resultados mostrados en la Figura 7 se aprecia que el modelo predice eficientemente las deformaciones plásticas esperadas a lo largo del tiempo.

Finalmente, este modelo puede ser utilizado para estimar la vida remanente de la estructura del pavimento aplicando el algoritmo descrito en la Figura 8. Para esto se requiere conocer la cantidad de ESALs a la hora de realizar la medición (basados en datos de tránsito que recolecta la agencia de transportes periódicamente), el valor de deflexión medido y un valor límite de deflexión, por ejemplo 12.5 mm es un valor límite comúnmente utilizado (criterio de referencia). Por diferencia entre ESALs estimados a futuro y los ESALs al momento de la medición se obtiene la vida remanente del pavimento evaluado. Cabe destacar que el ahuellamiento máximo permisible no es el único criterio para determinar la vida remanente de un pavimento flexible y por lo tanto, la vida remanente estimada mediante la metodología mostrada sólo aplica para ahuellamiento.



Tabla 5. Coeficiente de determinación para tendencias analizadas

	RD (mm)	ESAL (10 ⁶)	δ (mm)	h (mm)
Promedio	3.522	3.449	0.590	101.820
Desviación	3.294	3.575	0.326	38.251
Máximo	13.68	13.82	1.40	142.40
Mínimo	0.06	0.00	0.15	47.30

Coeficiente de determinación (R^2) $R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i^t - y_i^p)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i^t - \bar{y}^t)^2}$ (10)

Coeficiente de determinación ajustado (R^2) $R^2_{ajust.} = 1 - \frac{n-1}{n-k-1} (1 - R^2)$ (11)

Promedio de los errores al cuadrado (MSE) $MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i^t - y_i^p)^2}{n}$ (12)

Nota: y_i^t y y_i^p = valor real y la predicción respectivamente, \bar{y}^t y \bar{y}^p = promedio de los valores reales y predicciones correspondientes a n mediciones. k representa el número de variables.

Tabla 6. Coeficientes determinados para el modelo

Parámetro	Coeficiente	Error estándar	t	$p > t $	Intervalo de confianza (95%)	
					Inferior	Superior
b_1	5.9200	2.096	2.820	0.01	1.801	10.039
b_2	-0.0016	0.001	-2.440	0.02	-0.003	0.000
b_3	0.2237	0.094	2.380	0.02	0.039	0.409
b_4	0.2932	0.043	6.880	0.00	0.209	0.377
b_5	-0.0648	0.002	-33.300	0.00	-0.069	-0.061
b_6	3.5920	2.010	1.790	0.07	-0.356	7.540
b_7	-0.0003	0.000	-5.110	0.00	0.000	0.000
b_8	0.0469	0.009	5.160	0.00	0.029	0.065
b_9	1.0318	0.007	145.820	0.00	1.018	1.046
Numero de observaciones		521				
Valor F		0.0012				
$R^2_{ajust.}$		0.8308				
MSE		1.810				

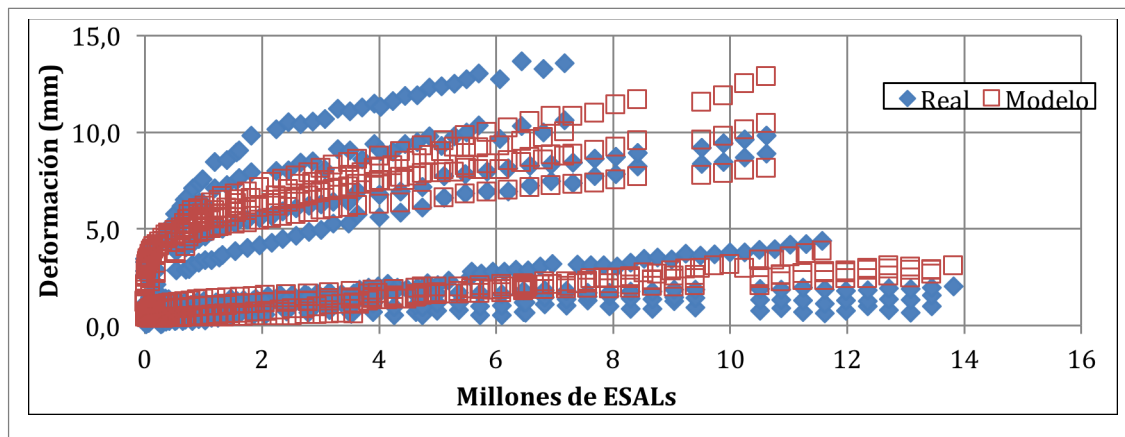


Figura 6. Predicción en función a la cantidad de ESALs

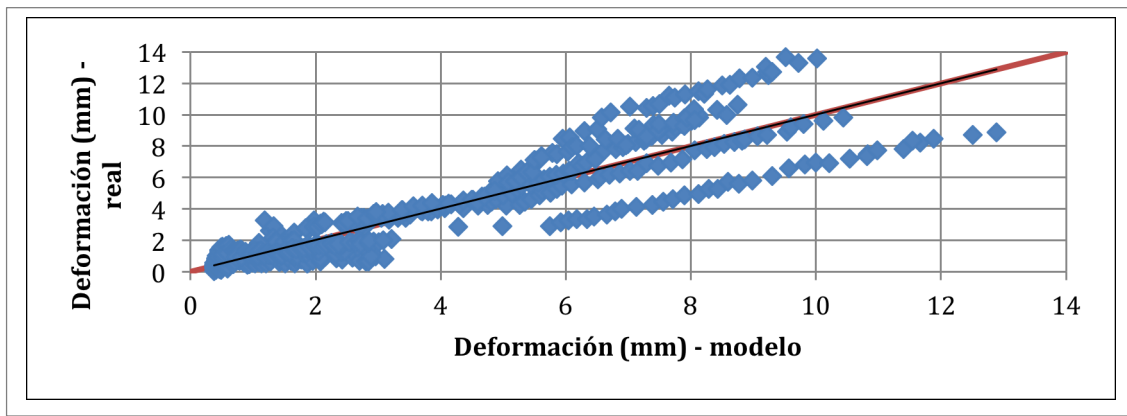


Figura 7. Predicción vs. Medición real

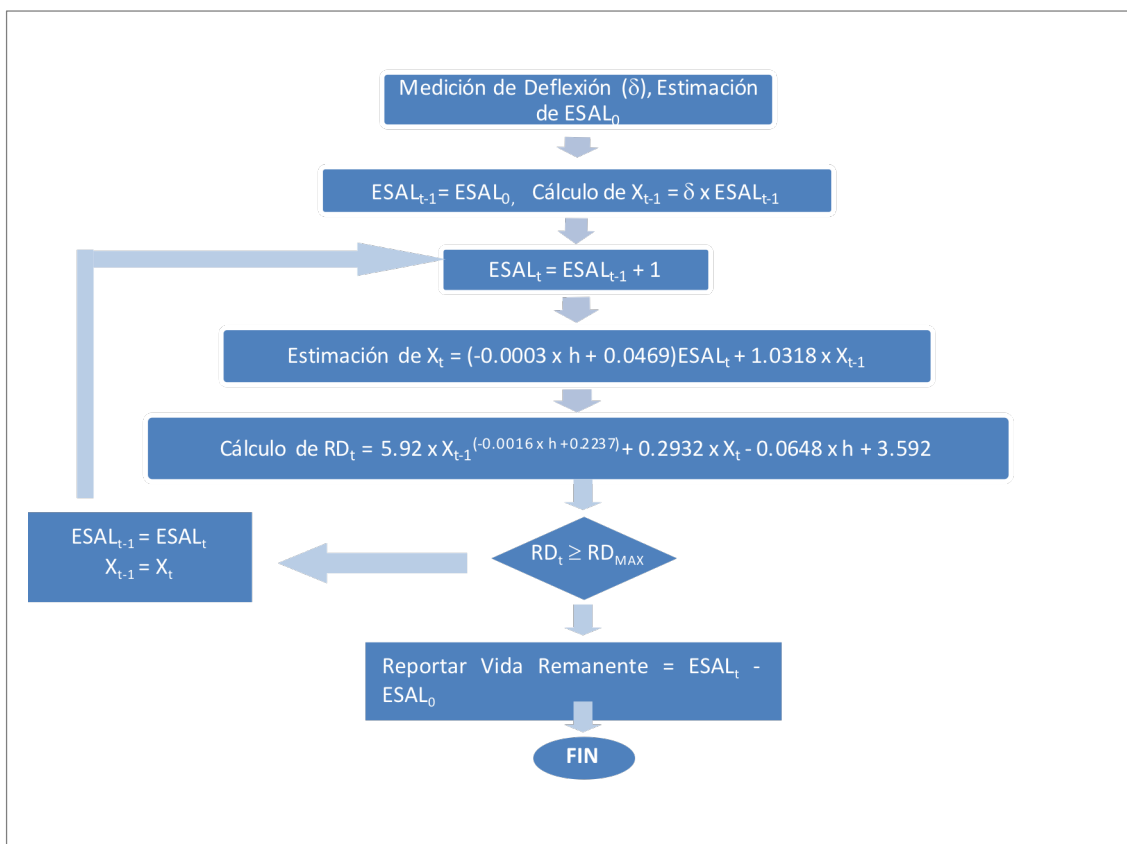


Figura 8. Algoritmo para estimar vida remanente usando el modelo propuesto

6. Conclusiones

De los resultados del seguimiento del desarrollo de deformaciones plásticas en la pista de pruebas del LanammeUCR se concluye que el espesor total de las diferentes capas de pavimento colocadas sobre la subrasante tiene un efecto significativo en la resistencia a las deformaciones plásticas en pavimentos flexibles. Las deformaciones tienen una tendencia potencial, logrando un comportamiento asintótico (menor tasa de deformaciones) y deformaciones muy inferiores en los pavimentos con bases tratadas.

El modelo planteado presenta como ventaja frente a los disponibles actualmente en que reduce los parámetros requeridos para predecir la deformación plástica probable en la estructura. Solo tres variables son requeridas, el espesor de la capa asfáltica, la deflexión superficial y la repetición de ejes equivalentes; otros parámetros como el módulo resiliente

o dinámico, deformaciones unitarias, propiedades de la mezcla asfáltica y condiciones ambientales no son consideradas directamente en el proceso de predicción: indirectamente se contemplan en la deflexión superficial de un momento dado. El modelo presentado cumple con predecir la profundidad de deformación plástica durante la vida útil del pavimento, desempeñándose con un R^2 (ajustado) igual a 0.831 y un MSE de 1.81.

Se recomienda utilizar los resultados de la evaluación de la red vial nacional (mediciones de deflexión instantánea y niveles de ahullamiento) y los datos de tránsito obtenidos de la agencia de transportes para calibrar el modelo. Adicionalmente se recomienda la implementación del modelo calibrado dentro del sistema de administración de pavimentos para rutas nacionales para que las políticas de mantenimiento y rehabilitación propias de un sistema de administración de pavimentos sean aplicadas a su debido tiempo.

7. Referencias

- Avila-Esquivel T., Araya-Porras Y., Aguiar-Moya J.P. y Loria-Salazar L.G. (2016)**, Development of Permanent Deformation Models for Granular Materials and Soils. Proceedings of the 95th Annual Transportation Research Board, Washington, D.C. 2016.
- Camacho-Garita E. y Leiva-Villacorta F. (2014)**, Proceso constructivo PAVELAB. Informe: LM-PI-UMP-027-R1. San José, Costa Rica: Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA). Universidad de Costa Rica.
- Du J.-C., Shen D.-H. y Cross S. (2008)**, Pavement Rutting Dynamic Prediction Model. International Journal of Pavement Research and Technology, 64-71
- FHWA (1978)**, Predictive Design Procedures, VESYS User manual. Report N FHWA-RD-77-154
- Greene W.A. (2011)**, Econometric Analysis, 7th Edition, Prentice Hall
- Hamilton L. C. (2012)**, Statistics with Stata (version 12), 8th Edition, Thomson Books/Cole.
- Huang Y. (2004)**, Pavement Analysis and Design. New Jersey, USA: Prentice Hall
- Leiva-Villacorta F., Aguiar-Moya J.P. y Loria-Salazar L.G. (2015)**, Ensayos De Desempeño De Laboratorio Del Primer Ensayo Acelerado A Escala Natural En Costa Rica LM-PI-UMP-053-R1. San José, Costa Rica: Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
- Leiva-Villacorta F., Aguiar-Moya J. P. y Loria-Salazar L. G. (2013)**, Ensayos acelerados de pavimento en Costa Rica. Revista Infraestructura Vial / LanammeUCR , 32-41.
- Leiva-Villacorta F., Aguiar-Moya J.P. y Loria-Salazar L.G. (2015)**, Accelerated Pavement Testing First Results At The LanammeUCR APT Facility. Proceedings of the 94th Annual Transportation Research Board, Washington, D.C. 2015.
- Lytton R., Uzan J., Fernando E., Roque R., Hiltunen D. y Stoffels S. (1993)**, Development and validation of performance prediction models and specifications for asphalt binders and paving mixtures. Report SHRP-A-357
- National Cooperative Highway Research Program (2004)**, Guide for Mechanistic - Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. Illinois: Transportation Research Board
- Ullidtz P., Harvey J., Kanekanti V., Tsai B.W. y Monismith C. (2008)**, Calibration of Mechanistic-Empirical Models Using the California Heavy Vehicle Simulators. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2087, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 20-28, 2008.