

ENSAYOS ACELERADOS DE PAVIMENTOS EN COSTA RICA CON EL EQUIPO HVS, IMPLEMENTACIÓN Y PRIMEROS RESULTADOS

Ing. Fabricio Leiva Villacorta, Ph.D., MBA, Universidad de Costa Rica
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales,
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio,
San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica
E-mail: fabricio.leiva@ucr.ac.cr
Tel +506 2511 2529

Ing. José Pablo Aguiar Moya, Ph.D. Universidad de Costa Rica
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales,
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio,
San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica
E-mail: jose.aguiar@ucr.ac.cr
Tel +506 2511 2529

Ing. Luis Guillermo Loría Salazar, Ph.D. Universidad de Costa Rica
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales,
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio,
San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica
E-mail: luis.loriasalazar@ucr.ac.cr
Tel +506 2511 2542

Innovación Tecnológica Para La Infraestructura Vial

11^{er} Congreso Internacional PROVIAL

20 al 24 de Octubre de 2014, Valdivia

Fecha de envío:	31 de Julio 2014
Número de palabras:	3480 palabras
Número de figuras y tablas:	12 (3000 palabras)
TOTAL	8480 palabras

RESUMEN

Equipos para ensayos acelerados de pavimentos a escala natural como el Simulador de Vehículos Pesados (HVS en inglés) permiten simular el desempeño en campo de una estructura de pavimento en un período reducido de tiempo. El presente proyecto de investigación se enmarca dentro del Proyecto de Aporte Tecnológico para el Mejoramiento de la Infraestructura Vial de Costa Rica (Promevial) con el fin de caracterizar y mejorar los materiales de uso en el país, introducir nuevos materiales o tecnologías, generar o mejorar las especificaciones existentes y desarrollar una guía de diseño estructural de pavimentos para el país. Con tales objetivos es que se han construido las instalaciones del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR) donde se ubican los primeros tramos experimentales. Se pretende con los resultados iniciales de este experimento, determinar la metodología de ensayo a seguir para futuras aplicaciones del HVS; realizar la caracterización física mecánica de materiales y la comparación con resultados de ensayos de laboratorio. Además, se pretende comparar y verificar modelos mecánicos por medio de la recopilación y análisis de respuestas del pavimento (instrumentación embebida en el pavimento). Este artículo incluye resultados obtenidos de los primeros ensayos realizados a escala natural con el HVS sobre estructuras de pavimento flexible con mezclas densas convencionales y ensayos de desempeño a nivel de laboratorio.

INTRODUCCIÓN

Los países que han mostrado un desarrollo significativo en el área de pavimentos lo han logrado, tradicionalmente, a través de la realización de ensayos en tiempo real (RTL, por sus siglas en inglés), debido a que esta técnica no requiere de grandes equipos especializados para la realización de los ensayos (1,2). El tiempo necesario para llevar a cabo el ensayo (más de 10 años de monitoreo continuo de un tramo experimental) está asociado con una gran cantidad de complicaciones, ya que muchos de los tramos experimentales están ubicados sobre carreteras en operación.

En el caso de Costa Rica, se considera que debido a la gran variabilidad climática, de materiales y tráfico a la que están sometidos los pavimentos, el costo de desarrollar un programa adecuado de ensayos RTL que abarque todas estas condiciones por períodos prolongados es prohibitivo. Sin embargo, existe la gran necesidad de poder caracterizar el desempeño a largo plazo de las estructuras de pavimentos del país como método único de poder desarrollar y calibrar metodologías de diseño. Para este propósito se considera que el uso de un equipo de Ensayo Acelerado de Pavimentos (APT en inglés) es idóneo.

Con el fin de poder contar en Costa Rica con pistas para ensayos APT, se realizó un estudio de diferentes equipos y se determinó que para las condiciones tanto técnicas y económicas del país, el Simulador de Vehículos Pesados (Heavy Vehicle Simulator, HVS), es el equipo que mejor se adapta y cuyos resultados serán de mayor impacto en el corto, mediano y largo plazo para el país. Específicamente se ha determinado que el HVS es el equipo que se ajusta a los requerimientos de (3-5):

- Movilidad: Se trata de un equipo que se puede utilizar tanto dentro de instalaciones previamente acondicionadas o bien, puede ser fácilmente transportado a una sección de interés de una carretera.
- Evaluación acelerada de pavimentos: Es capaz de simular el deterioro de hasta 20 años que sufre una carretera en solamente 3 meses aproximadamente.
- Cargas reales: Puede controlarse la cantidad y la ubicación de las aplicaciones de carga.
- Compatibilidad: Los datos obtenidos entre otros equipos similares son compatibles entre sí.
- Desarrollo de modelos calibrados: Los resultados obtenidos permitirán mejorar y calibrar modelos de respuesta y desempeño, y asociarlos con los criterios de diseño y/o métodos de ensayo de laboratorio.

Productos Esperados

El uso del HVS será fundamental en asegurar un gran avance en cuanto al nivel de investigación realizado por el LanammeUCR en el tema de ingeniería vial y por medio del cual se posibilitará la generación de una serie de productos que ya han sido obtenidos en estudios similares (6-8) tales como:

- Metodología de diseño mecanística - empírica de pavimentos, basándose en las condiciones de materiales, climáticas, de tráfico y constructivas reales de Costa Rica.
- Desarrollo de un software que permita la implementación de la metodología de diseño estructural de pavimentos para Costa Rica, que se base en los modelos de desempeño obtenidos mediante el uso de HVS.
- Desarrollo de nuevas especificaciones de materiales que se basen en el desempeño real y aporte estructural de los materiales en campo.
- Optimización de estructuras de pavimentos en uso en el país, basándose en las condiciones climáticas, estructurales, de materiales y tráfico de la zona específica donde se planea construir la estructura.
- Posibilidad de evaluación de materiales mejorados o nuevos materiales en una estructura de pavimento real.
- Posibilidad de evaluar estructuras de pavimentos de alta importancia para el país en campo previo a su apertura al tráfico vehicular con el fin de corroborar el correcto desempeño de la estructura o identificar posible deficiencias en la misma.

PRIMEROS TRAMOS EXPERIMENTALES

Para la primera etapa de ensayos acelerados en Costa Rica se planteó la construcción de 4 tramos experimentales. El objetivo de esta etapa es realizar una comparación estructural en términos de espesores de mezcla asfáltica y tipo de material de base (granular vs. estabilizado con cemento) manteniendo el resto de variables constantes. La Tabla 1 muestra las características de las 4 secciones propuestas donde se incluyen los respectivos espesores de las diferentes capas de las estructuras de pavimento y los módulos de cada capa (estimados). La capa asfáltica es una mezcla en caliente diseñada con la metodología Marshall con tamaño máximo nominal de agregado de 19.0 mm y contenido óptimo de ligante de 4.9% por peso total de mezcla. La base estabilizada con cemento fue diseñada para resistir 35 kg/cm^2 con un contenido óptimo de cemento de 1.7 sacos/m^3 para una densidad máxima de 2013 kg/m^3 . El material de base y sub-base granular se colocó a una densidad máxima de 2217 kg/m^3 con un contenido óptimo de humedad de 8.6% y un valor de CBR de 95%. Finalmente, el material de subrasante se construyó para obtener una densidad máxima de 1056 kg/m^3 con un contenido óptimo de humedad de 52% y un CBR de 6.6%.

TABLA 1 Tramos experimentales propuestos

Propiedades\Tramo	AC1	AC2	AC3	AC4
H1, cm - (MA)	7.0	7.0	12	12
H2, cm - (Base)	24	24	24	24
H3, cm - (SB)	30	30	30	30
E1 @ 25 °C, MPa	3500	3500	3500	3500
E2, MPa	2000	200	200	2000
E3, MPa	140	140	140	140
E4, MPa	35	35	35	35

Instrumentación

Como complemento al equipo HVS, se cuenta con instrumentación para la medición de respuesta del pavimento. Cada uno de estos componentes adicionales al HVS es considerado de gran importancia en el desarrollo del programa de ensayos APT para Costa Rica puesto que permitirán obtener información adicional a la que se obtiene directamente del HVS (presión de inflado, carga aplicada, número de repeticiones de carga). Entre el equipo y partes que se están utilizando se tienen las siguientes (9,10):

- Perfilómetro laser 3D automatizado: Usado para la obtención del perfil tridimensional del tramo de prueba que permite cuantificar la deformación permanente y regularidad superficial.

- Transductores para medición de pavimentos PAST: Usados para la medición de deformaciones horizontales en pavimentos ligados al agrietamiento por fatiga. Figura 1a.
- Transductores para presión en suelos SOPT: Usados para la medición de presión (esfuerzos) en materiales no ligados como gravas, arenas o arcillas. Figura 1b.
- Deflectómetro de Profundidad Múltiple: Usado para medir en sitio las deflexiones elásticas y/o deformaciones permanentes en las distintas capas de un tramo de prueba. Figura 1c.
- Deflectómetro de superficie del pavimento (RSD): Cuenta con una exactitud de medición de 10 micrones, con capacidad de recolección de datos automática de hasta 256 puntos de datos.
- Termocuplas: Hecha con 2 alambres de distinto material (Nickel/Cromo) unidos en un extremo y son del tipo K con rangos de temperatura de -180 a 1300 °C.

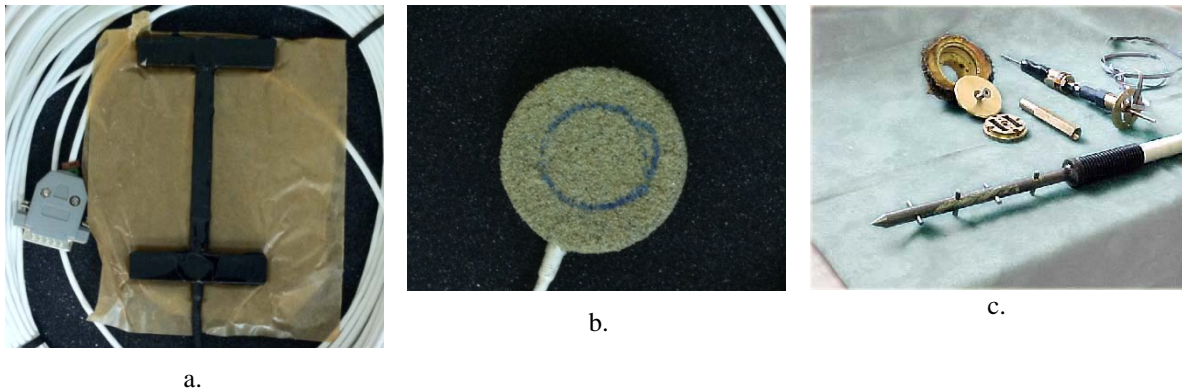


FIGURA 1 Sensores Utilizados. a. Transductor PAST, b. Transductor SOPT, c. Deflectómetro de Profundidad Múltiple.

La Figura 2 muestra el arreglo de instrumentación utilizado para la primera serie de tramos experimentales. Los sensores PAST se colocan en la interface base/capa asfáltica y se pueden colocar en el sentido longitudinal o desplazamiento de la carga y en el sentido transversal o perpendicular al desplazamiento de la carga. La instalación de los sensores MDD está diseñada para 4 profundidades. En cuanto a las termocuplas, se colocan a 4 profundidades: superficie, a media profundidad de la capa asfáltica, a nivel de los sensores PAST y a 5 cm de profundidad de la capa de base. En el caso de los tramos AC1 y AC3 se utilizó el mismo arreglo de sensores pero sin incluir los sensores PAST.

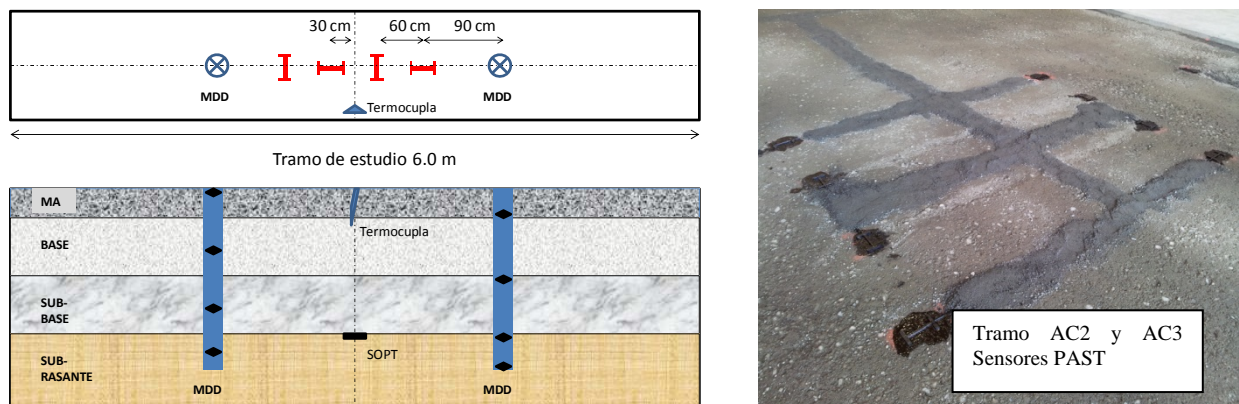


FIGURA 2 Arreglo de instrumentación.

La Tabla 2 muestra una lista de sensores y ensayos complementarios por realizar junto con la frecuencia de toma de datos. La mayoría de estas actividades están relacionadas con el número predeterminado de pasadas de la rueda cargada. A continuación se describe la frecuencia de toma de datos para estas actividades:

TABLA 2 Toma de datos y ensayos complementarios

Tipo de Instrumentación	Dependiente de repeticiones del HVS	Horario	Diario	Otro
Perfil Laser 3D	✓			
Deformaciones Unitarias	✓			
Presión	✓			
Temperatura		✓		
Condiciones climáticas			✓	
Deflección superficial RSD	✓			
Deflección estructural MDD	✓			
Núcleos				✓
FWD/LWD/DCP				✓
Daño superficial			✓	
Caracterización de materiales				✓

FWD: Falling Weight Deflectometer (Deflectometría de Impacto)

LWD: Light Weight Deflectometer (Deflectometría de Impacto)

DCP: Cono Dinámico de Penetración

Toma de datos relacionada con pasadas HVS: toma de datos en la condición inicial, 100, 200, 300, 500, 1 000, 1 500, 3 000, 5 000, 10 000, 15 000 y de aquí en adelante cada 15 000 pasadas hasta la falla.

Toma de núcleos: una vez terminada la construcción de los tramos fuera de la zona de carga. Al final del experimento se extraen núcleos tanto en la zona de carga como afuera de la misma.

Inspección de daños superficiales: inspección de grietas, pérdida de fricción, pérdida de adherencia agregado-asfalto entre otros que pueden ser documentados diariamente cuando se realiza el respectivo mantenimiento diario del HVS.

Ensayos FWD/LWD/DCP: ensayos con los equipos LWD y DCP durante la construcción de los tramos en las capas granulares y suelo; y los ensayos de FWD al terminar la construcción de la capa superficial. Al final del experimento se realizan ensayos con el FWD sobre la estructura fallada y ensayos LWD/DCP sobre las capas granulares y suelo falladas.

Muestreo y caracterización de materiales: material de suelo, material granular, mezcla asfáltica y asfalto durante el proceso de construcción para realizar ensayos de aceptación o calidad del material y ensayos de caracterización y desempeño. Al final de cada experimento se realizará un análisis forense de los materiales constituyentes de cada tramo.

RESULTADOS

Primeramente, para la caracterización de las estructuras finalmente colocadas, se utilizó el radar de penetración para la determinación de los espesores de cada capa. Como se muestra en la Figura 3 se determinó que el espesor promedio de la capa asfáltica para las secciones AC1 y AC2 es de 5,1 cm y de 13,1 cm para las secciones AC3 y AC4. Por otro lado el material de base granular y base estabilizada para las secciones AC1 y AC2 fue en promedio 18.0 cm y 21.2 cm respectivamente. Para las secciones restantes se obtuvo 31,0 cm de base granular y 24,9 cm de base estabilizada. Finalmente se calculó que el espesor promedio de la sub-base granular de 30,1 cm.

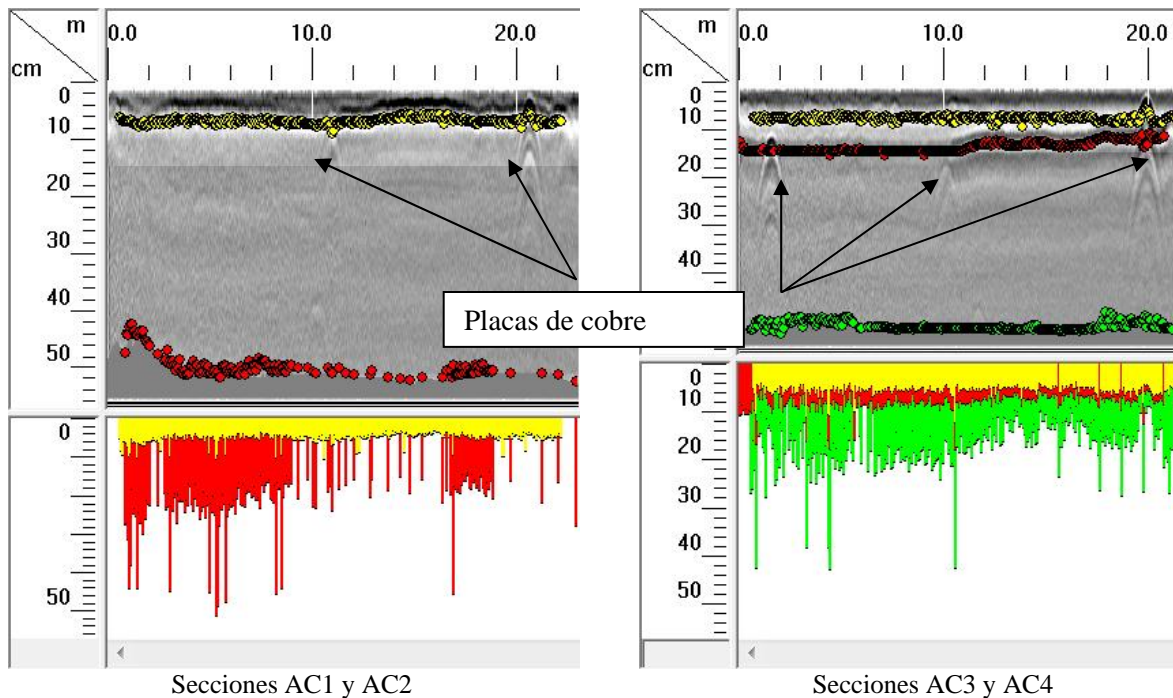


FIGURA 3 Espesores obtenidos con radar de penetración (GPR).

Deflectometría de Impacto

La Figura 4 muestra las deflexiones medidas sobre los 4 tramos experimentales obtenidas con el equipo FWD. Como era de esperarse la sección AC3 presentó las deformaciones más bajas con un promedio de $23,5 \text{ mm}^2$ bajo la acción de una carga de impacto de 40 kN. Seguidamente en orden de mayor a menor capacidad estructural están AC1 ($32,3 \text{ mm}^2$), AC4 ($36,4 \text{ mm}^2$) y finalmente AC2 ($70,4 \text{ mm}^2$).

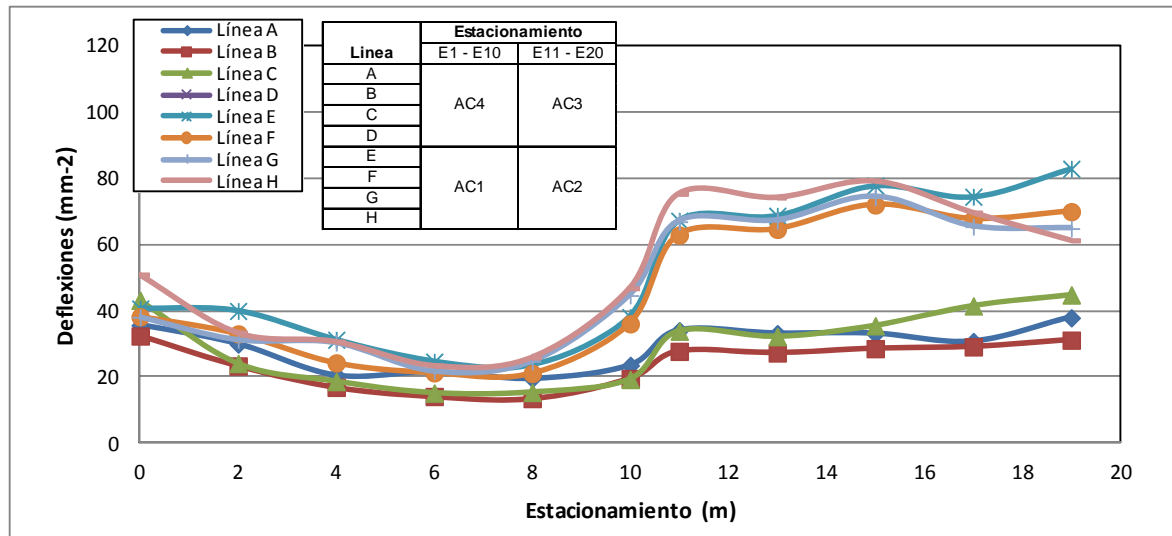


FIGURA 4 Deflectometría de impacto (FWD)

Presión vertical a nivel de subrasante

Inicialmente la carga base establecida fue de 40 kN que corresponde a la carga de medio eje equivalente. Como es propio de estos ensayos acelerados se procedió a realizar diferentes incrementos de carga para acelerar el daño en la estructura. Específicamente, las cargas fueron 60, 70 y 80 kN. La Figura 5 muestra el incremento de carga realizado en función del número de repeticiones aplicadas y muestra el efecto de este incremento sobre el esfuerzo a compresión medido a nivel de subrasante. Cada punto de presión mostrado corresponde al esfuerzo máximo obtenido luego de procesar los datos como se mencionó anteriormente. Se procedió a realizar los incrementos de carga basados en este esfuerzo medido, esencialmente cuando alcanzaba un estado de mínimo daño o estabilización con el aumento en las repeticiones de carga.

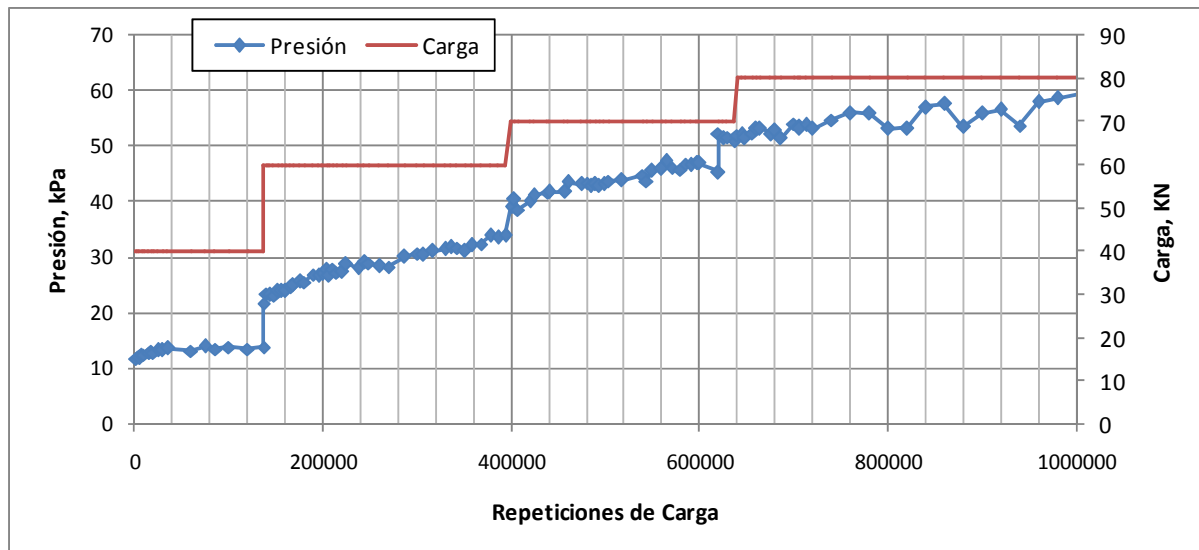


FIGURA 5 Presión vertical medido a nivel de subrasante.

Deformación permanente a nivel superficial

La Figura 6 muestra el segmento del tramo de estudio donde se obtiene el perfil tridimensional y un ejemplo del mismo. El tramo de estudio comprende 8.15 m de largo por 1.6 m de ancho. Se deja 1.0 m en ambos extremos como zona de aceleración/frenado para un total de 6.15 m efectivos de carga aplicada. De ahí, debido a la posición excéntrica del láser con respecto a la posición de la carga, se obtiene una longitud efectiva para el perfil superficial de 5.1 m.

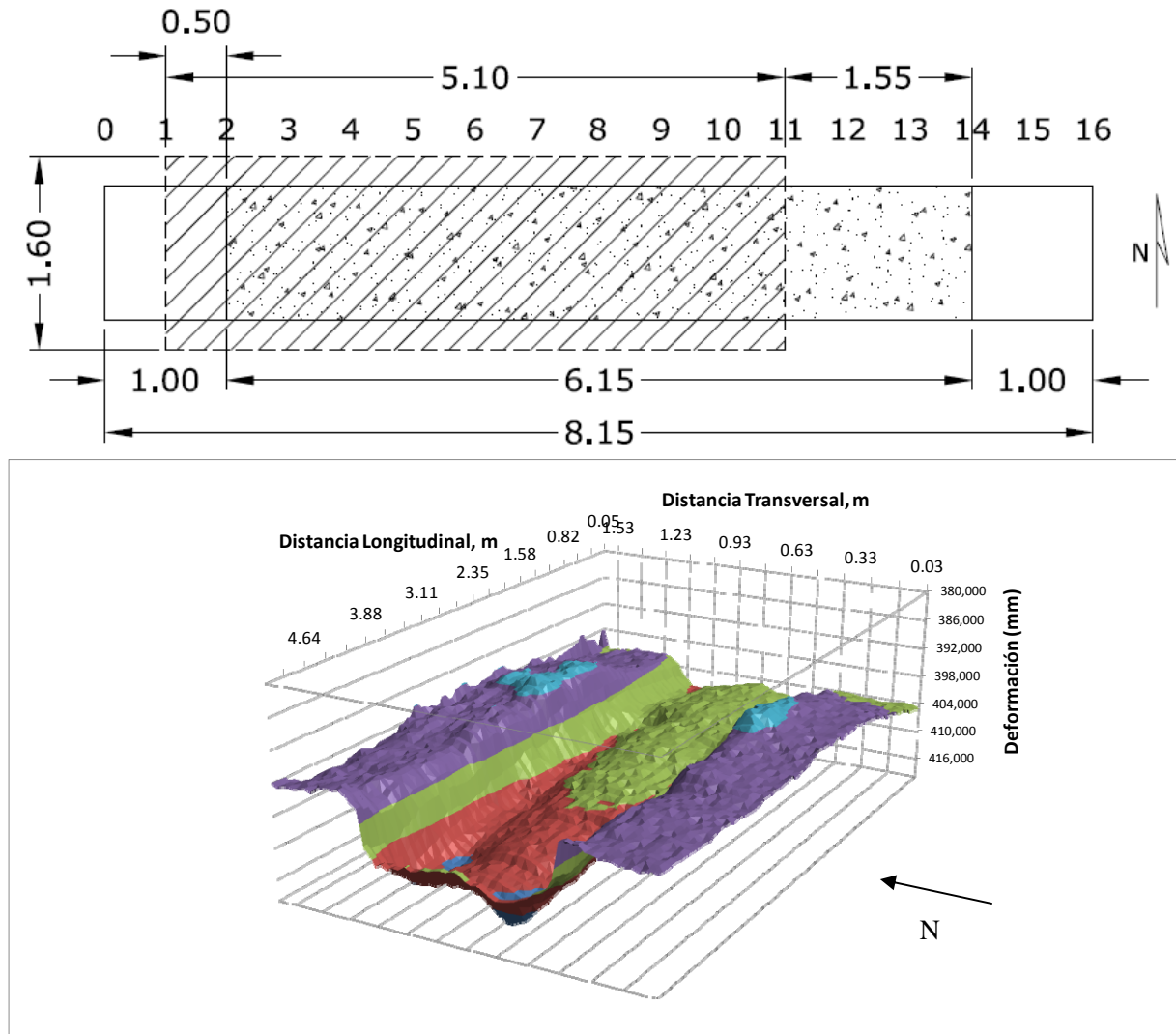


FIGURA 6 Perfil del tramo medido al final del ensayo.

En la Figura 7 se exhiben secciones transversales promedio obtenidas a partir del perfil medido para diferentes niveles de repetición de carga. Aquí se observa no solo el efecto de consolidación de la estructura de pavimento sino también el desplazamiento lateral de la mezcla por los esfuerzos cortantes aplicados en la mezcla asfáltica.

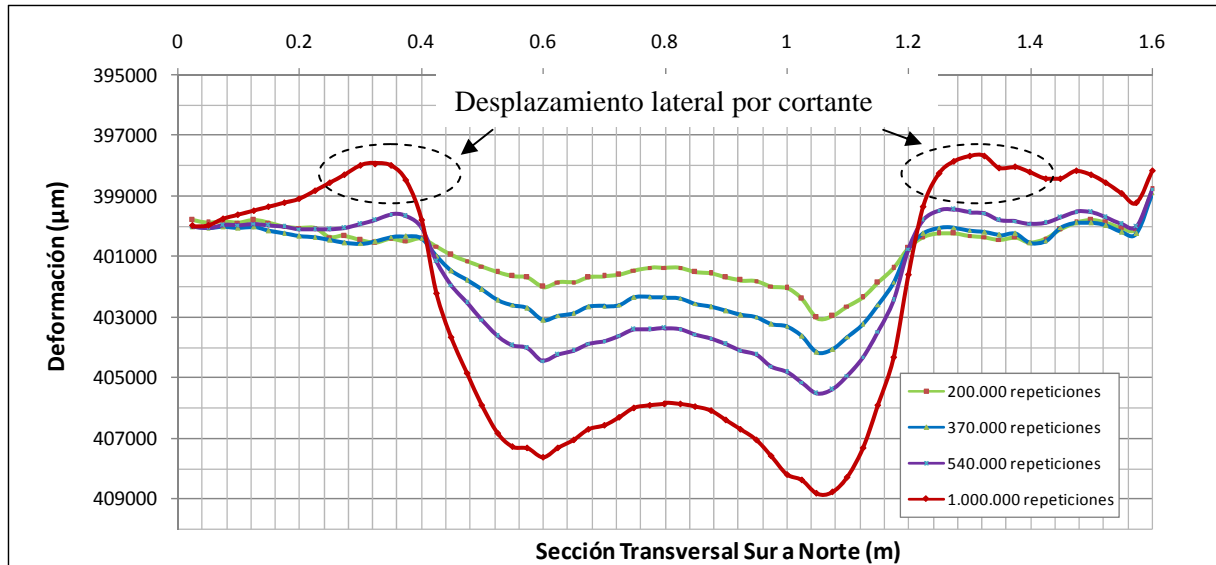


FIGURA 7 Deformación transversal promedio.

La progresión de la deformación permanente a lo largo de las repeticiones de carga y sus respectivos ejes equivalentes de 40 kN se puede apreciar en la Figura 8. Esta figura incluye el valor de máxima deformación, el de mínima deformación y un valor representativo de la sección (seleccionado dentro del tercio medio del tramo) que se utiliza para controlar el avance diario de la deformación y para eventualmente detener el ensayo al alcanzar el criterio de falla. Para pasar de número de repeticiones con diferentes niveles de carga a cantidad de ejes equivalentes de carga se requiere de un factor de daño (Ecuación 1). El factor de daño utilizado para calcular los ejes equivalentes de 40 kN a partir de las otras cargas fue de 4.2. Este valor fue obtenido de experiencias de otros investigadores que han utilizado el mismo equipo y ensayo acelerado de pavimentos (6).

$$ESALS = \left(\frac{P_i}{40 \text{ kN}} \right)^{FD} \times R_i \quad \text{Ec. 1}$$

Donde;

ESALS = Cantidad de ejes equivalentes

P_i = Carga aplicada i

FD = Factor de daño

R_i = repeticiones aplicadas en la carga i

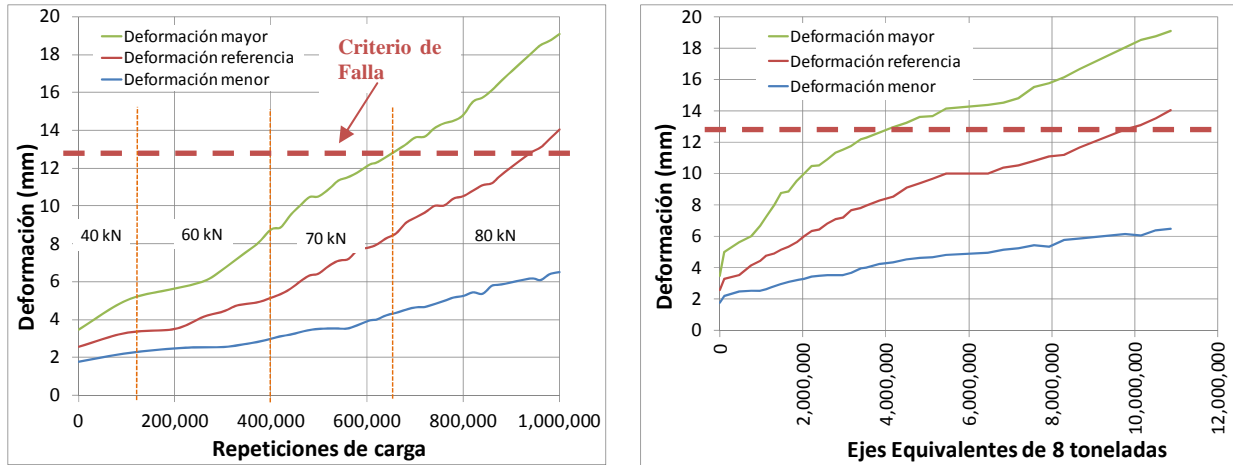


FIGURA 8 Deformación permanente en función de repeticiones y ejes equivalentes.

Regularidad superficial

La regularidad superficial se determinó mediante el parámetro llamado Índice de Regularidad Superficial (IRI). Mediante las lecturas de deformación longitudinal de la superficie, registradas con el sistema laser incorporado, se procedió a calcular el IRI del tramo de análisis para los diferentes momentos del desarrollo del ensayo. En la Figura 9 se aprecia cómo se modificó la regularidad de la superficie conforme avanzaron las repeticiones de carga y la respectiva asociación a los ejes equivalentes de carga.

Como se aprecia, se parte de valores cercanos a 1.5, para luego disminuir ligeramente a 1.3 producto de la post-compactación con la rueda cargada. Posteriormente con el incremento en repeticiones de carga la estructura avanzó en su deterioro mostrando un aumento en el valor de la regularidad superficial. Cabe señalar que los valores bajos del índice están asociados en alguna medida a la poca longitud del tramo.

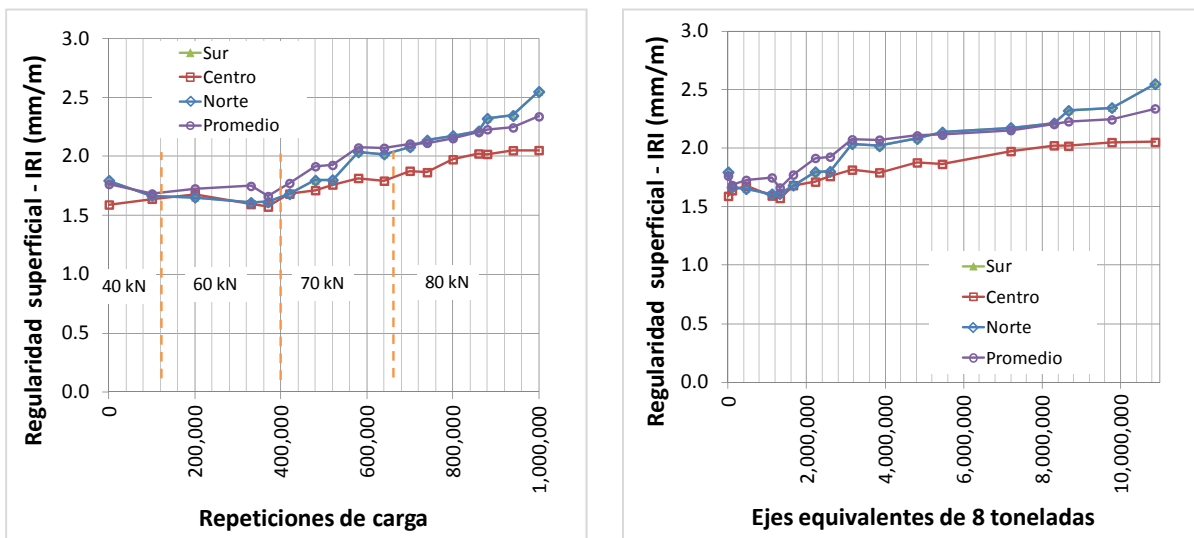


Figura 9 Regularidad superficial (IRI) en función de repeticiones y ejes equivalentes.

Deflexiones y deformaciones obtenidas con los sensores MDD

Los datos de deflexión elástica instantánea y deformación permanente para las diferentes capas a lo largo del ensayo se muestran en las Figura 10. Estos valores obtenidos luego de un proceso de depuración y tratamiento de los datos fueron medidos para una carga de 40 kN. Al igual que en el caso de la presión vertical, un aumento en el nivel de deflexión instantánea para un mismo nivel de carga y temperatura relativamente constante es evidencia de daño acumulado. Para ambos arreglos de sensores MDD colocados en este primer experimento se observó la acumulación de daño para todas las capas siendo las capas superiores las más afectadas. En términos de deformación permanente se observó que el sensor MDD colocado a nivel superficial (mdd1-0) presentó las deformaciones más altas, mientras que el resto de los sensores reportaron deformaciones similares entre ellos. Esto indica que la mezcla asfáltica es responsable por la mayoría de la deformación plástica observada y que por debajo de esta la estructura se deformó uniformemente gracias a la presencia de la capa estabilizada con cemento.

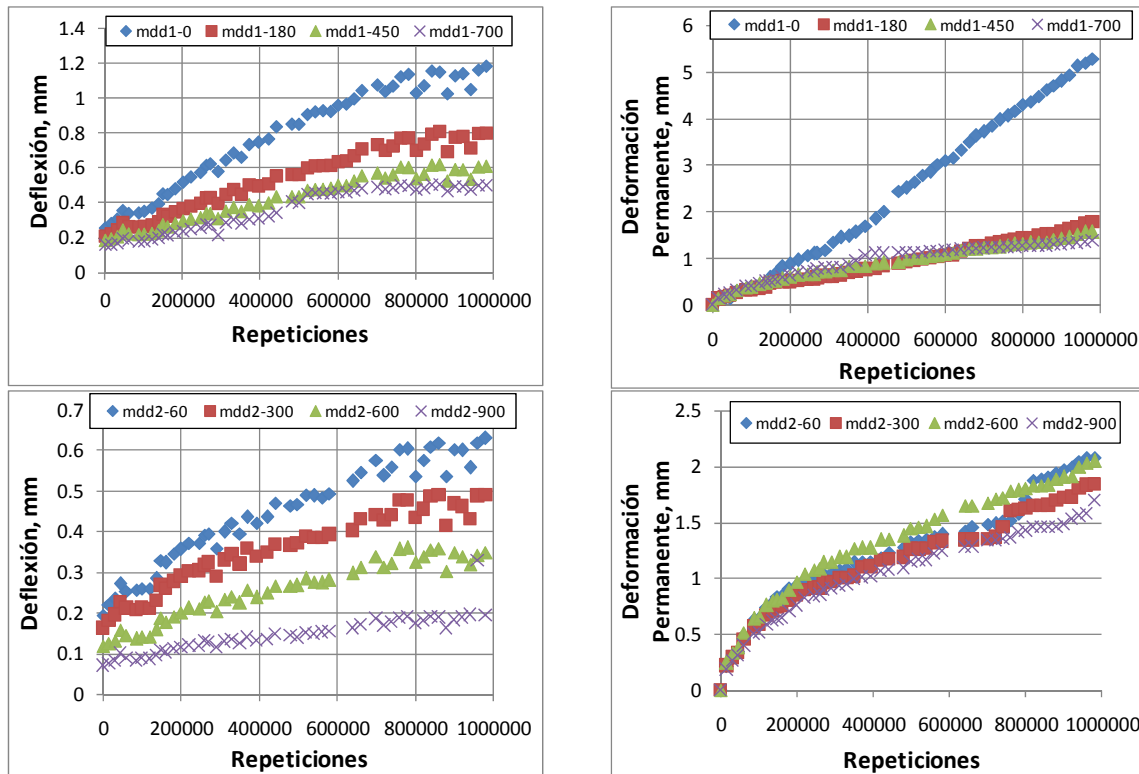


FIGURA 10 Deflexión instantánea y deformación permanente para arreglo sensor MDD2.

CONCLUSIONES

Este artículo analizó algunos aspectos de la implementación y resultados del primer ensayo acelerado de pavimentos a escala natural. Basado en los resultados experimentales se puede concluir que:

- La instrumentación de pavimentos ha demostrado ser una herramienta eficiente para investigar el comportamiento al interior de estas estructuras.
- El manejo de la información recolectada a partir de esquemas de instrumentación permite identificar el cambio de las condiciones estructurales y climáticas de la estructura a lo largo de su vida útil.
- Con este conocimiento es posible desarrollar, entre otras cosas, modelos mecánicos de desempeño y deterioro, los cuales pueden ser eficientemente empleados para revisar y mejorar los procedimientos diseño, construcción y gestión de pavimentos, con el objetivo de promover la consecución de estructuras más durables y confiables.

- Así mismo, esta información se puede emplear para calibrar y/o validar parámetros de entrada requeridos en las nuevas y cada vez más populares metodologías mecanicistas de diseño de pavimentos.

REFERENCIAS

1. LTPP. *LTPP Beyond FY 2009: What Needs to Be Done?*. Reporte FHWA-HRT-09-052. 2009.
2. Metcalf, J. B. *NCHRP Synthesis of Highway Practice 235*. 1996.
3. Coetzee, N et al. *The Heavy Vehicle Simulator in Accelerated Pavement Testing: Historical Overview and New Developments*. 3rd International Conference APT. 2008.
4. Harvey, J. T., Hoover, T., Coetzee, N. F., Nokes, W. A., and Rust, F. C. *Caltrans Accelerated Pavement Test (CAL/APT) Program—Test Results: 1994–1997*. AAPT Symposium on Accelerated Pavement Testing, Boston, MA, March 16-18, 1998.
5. Leiva, Aguiar y Loría. *Ensayos Acelerados De Pavimentos En Costa Rica*. Revista Infraestructura Vial, Vol 15 (#26), 33-41. San José Costa Rica, 2013.
6. Harvey, J. T., L. du Plessis, F. Long, S. Shatnawi, C. Scheffy, B-W. Tsai, I. Guada, D. Hung, N. Coetzee, M. Reimer, and C. L. Monismith. *Initial CAL/APT Program: Site Information, Test Pavement Construction, Pavement Materials Characterizations, Initial CAL/APT Test Results, and Performance Estimates*. Report prepared for the California Department of Transportation. Report No. RTA-65W485-3. Pavement Research Center, CAL/APT Program, Institute of Transportation Studies, University of California Berkeley. 1996.
7. Timm, D. NCAT Report 09-01 *Design, Construction And Instrumentation Of The 2006 Test Track Structural Study*, NCAT. 2009.
8. Leiva-Villacorta, F. and D. Timm, *Analysis of Measured Versus Predicted Critical Pavement Strain Responses*, Proceedings of the 90th Annual Transportation Research Board, Washington, D.C. 2011.
9. Heavy Vehicle Simulator. *Monitoring of test sections and instrumentation*. Documento consultado el 6 de abril del 2010. <http://www.gautrans-hvs.co.za/>
10. Baker Harris B., Buth Michael R., Van Deusen David A. Minnesota Road Research Project: *Load response Instrumentation Installation and Testing Procedures*. Minnesota Department of Transportation. 1994.