

IAG42-07-2013
**IMPLEMENTACIÓN DE ENSAYOS ACELERADOS DE PAVIMENTOS EN
COSTA RICA CON EL EQUIPO HVS**

Ing. Fabricio Leiva Villacorta, Ph.D., MBA
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica,
E-mail: fabricio.leiva@ucr.ac.cr

Ing. José Pablo Aguiar Moya, Ph.D.
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica,
E-mail: jose.aguiar@ucr.ac.cr

Ing. Luis Guillermo Loría Salazar, Ph.D.
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica,
E-mail: luis.loriasalazar@ucr.ac.cr

Ing. Alejandro Navas Carro, MSc.
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica,
E-mail: alejandro.navas@ucr.ac.cr

Resumen

Equipos para ensayo acelerado de pavimentos 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 mecanísticos por medio de la recopilación y análisis de respuestas del pavimento (instrumentación embebida en el pavimento). El paso final de este ensayo comprenderá el análisis forense de las estructuras ensayadas. Este artículo incluye resultados obtenidos de los primeros ensayos realizados con el HVS sobre estructuras de pavimento flexible con mezclas densas convencionales.

Resumo

Equipamento para ensaios acelerados de pavimento como o simulador móvel de tráfego tipo HVS (heavy vehicle simulator) permite simular o desempenho em campo de uma estrutura de pavimento em um período de tempo reduzido. O presente projeto de pesquisa faz parte do Projeto de Contribuição de Tecnologia para o Melhoramento da Infra-estrutura Rodoviária da Costa Rica (Promevial em Espanhol) com a finalidade de caracterizar e melhorar os materiais para uso no

país, a introdução de novos materiais ou tecnologias, gerar ou melhorar especificações existentes e desenvolver uma guia de dimensionamento das camadas de um pavimento. Com estes objetivos foram construídas as novas instalações do Laboratório Nacional de Materiais e Modelos Estruturais da Universidade da Costa Rica (LanammeUCR), que abriga as primeiras seções experimentais. Com os resultados iniciais destes experimentos procura-se determinar a metodologia de ensaio a ser seguida para futuras aplicações do HVS; realizar a caracterização física mecânica de materiais e a comparação com resultados de ensaios de laboratório. Além disso, procura-se comparar e verificar os modelos mecanicistas através da recopilação e análise de respostas do pavimento (instrumentação embutida no pavimento). A etapa final deste processo deste processo incluem a análise forense das estruturas ensaiadas. Este artigo inclui resultados dos primeiros testes realizados com HVS sobre estruturas de pavimentos flexíveis com misturas densas convencionais.

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 (*LTPP*, 2009). 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 (Coetzee, N et al., 2008):

- 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.

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. Adicionalmente, se pretende determinar el factor de daño equivalente causado por cargas superiores a la carga estándar de 40 kN. 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, las propiedades de cada capa (propiedades estimadas), la respuesta mecánica obtenida mediante el análisis de multicapa elástica y el número estimado de pasadas asociados a la magnitud de la carga. La carga modelada fue de un eje dual simple con 20 kN por neumático con una presión de inflado/contacto de 750kPa.

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
$\epsilon_{hAC} \times 10^{-6}$	108	349	229	89
$\epsilon_{vSR} \times 10^{-6}$	246	455	379	196
Nº Cargas Permitidas*	2.60×10^6	8.40×10^5	2.90×10^6	8.00×10^6
Fatiga **	1.21×10^7	2.55×10^5	1.02×10^6	2.29×10^7
Def. Per. **	1.96×10^7	1.25×10^6	2.84×10^6	5.43×10^7
PDMAP 10%	8.84×10^6	1.86×10^5	7.46×10^5	1.67×10^7
PDMAP 45%	1.22×10^7	2.57×10^5	1.03×10^6	2.30×10^7

PDMAP: Probabilistic Distress Models for Asphalt Pavements

* Guía AASHTO 93: R=90%, S=0.5, Δ PSI=2.

** Instituto del Asfalto-E.E.U.U.

***CSIR-South Africa

En este análisis se incluyen las estimaciones de ejes equivalentes de diseño obtenidos mediante la aplicación de la guía de diseño AASHTO 93 ya que ésta es la metodología vigente en Costa Rica. Para los tramos experimentales con base granular se planea realizar un ensayo en condición seca y un ensayo en condición húmeda con ciclos de simulación de agua superficial basados en registros climáticos de lluvia para el valle central.

Se estima que el daño principal será de agrietamiento por fatiga en los casos diseñados con base estabilizada. Además, la cantidad de pasadas que pueden resistir estas estructuras, no deberían superar 1 millón de pasadas para el tramo AC1 y alrededor de 0,3 millones de pasadas para AC2. Para los casos AC3 y AC4 se estima una cantidad de pasadas superior a los 2 millones, que por restricciones de tiempo, esa sería la cantidad máxima por aplicar, para al menos realizar una comparación con los resultados de las estructuras AC1 y AC2.

INSTRUMENTACIÓN

Como complemento al equipo HVS, se requiere de instrumentación para poder realizar todas las mediciones de respuesta deseadas, así como la recolección de la información generada por el HVS. Entre el equipo y partes que se están utilizando se tienen las siguientes (HVS, 2010):

- Perfilómetro laser 3D automatizado: Las mediciones transversales de perfil tomadas en varios puntos a lo largo de la sección de prueba permiten cuantificar la deformación permanente.
- Transductores para medición de pavimentos PAST: Usados para la medición de deformaciones horizontales en pavimentos ligados al agrietamiento por fatiga. Figura 1.
- Transductores para presión en suelos SOPT: Usados para la medición de presión (esfuerzos) en materiales no ligados como gravas, arenas o arcillas. Figura 2.
- 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 3.
- 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.



Figura 1: Transductor PAST

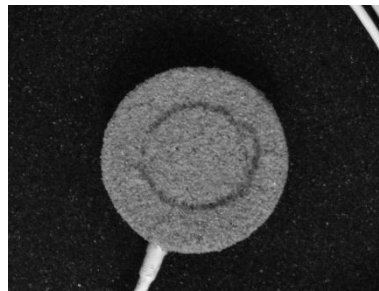


Figura 2: Transductor SOPT

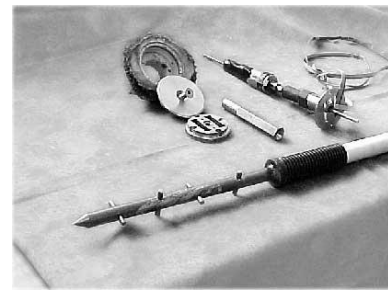


Figura 3: Deflectómetro de Profundidad Múltiple

- 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.

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 mucha información adicional a la que se obtiene directamente del HVS (presión de inflado, carga aplicada, número de repeticiones de carga). Adicionalmente se prevé una evaluación anual de las nuevas alternativas de equipo que salgan al mercado con el fin de asegurar que los nuevos componentes sean desarrollados o adquiridos para garantizar que las capacidades del equipo se mantengan con el estado de la práctica.

Propuesta de Instrumentación

La Figura 4 muestra el arreglo de instrumentación propuesto 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 propone colocar a 4 profundidades: 1 superficie, 1 a media profundidad de la capa asfáltica, 1 a nivel de los sensores PAST y a 5 cm de profundidad de la capa de base. En el caso de los tramos AC3 y AC4 se propone utilizar el mismo arreglo de sensores pero sin incluir los sensores PAST.

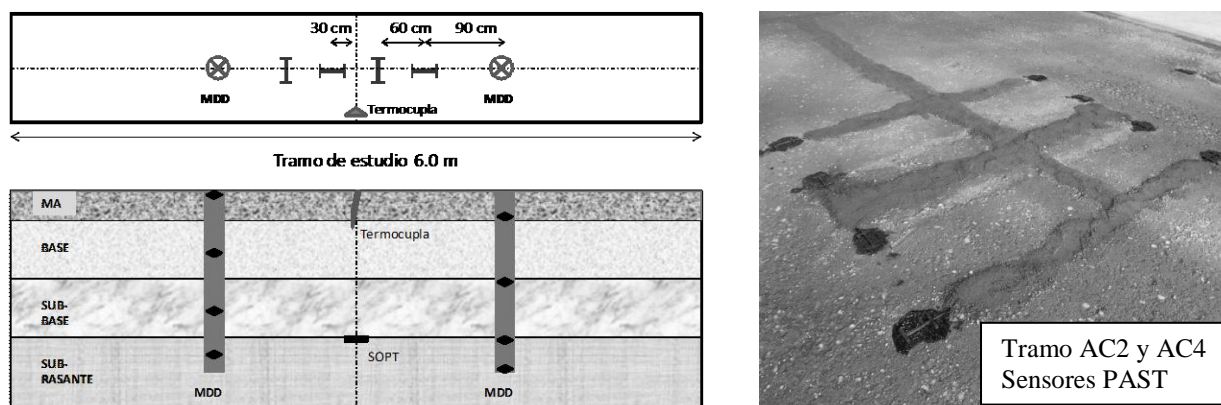


Figura 4: Arreglo de instrumentación

Propuesta de recolección de datos

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	Relacionado a pasadas de 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 propone tomar 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 realice 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 propone realizar 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 propone realizar un análisis forense de los materiales constituyentes de cada tramo y repetir, dentro de lo posible, los mismos ensayos realizados anteriormente.

PRODUCTOS ESPERADOS

El uso del HVS será fundamental en asegurar un gran avance en cuanto al nivel de investigación realizado por el LanammeUCR y por medio del cual se posibilitará la generación de una serie de productos tales como:

1. Metodología de diseño mecánica - empírica de pavimentos, basándose en las condiciones de materiales, climáticas, de tráfico y constructivas reales de Costa Rica.
2. 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.
3. Desarrollo de nuevas especificaciones de materiales que se basen en el desempeño real y aporte estructural de los materiales en campo.
4. 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.
5. Posibilidad de evaluación de materiales mejorados o nuevos materiales en una estructura de pavimento real.
6. 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 posibles deficiencias en la misma.

RESULTADOS PARCIALES DEL PRIMER EXPERIMENTO

Una vez finalizada la construcción de los tramos experimentales se procedió a realizar una serie de ensayos para caracterizar las 4 estructuras. Primero se utilizó el radar de penetración para determinar los espesores de cada capa. Como se muestra en la Figura 5 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 el espesor promedio de la sub-base granular de 30,1 cm. Estos resultados fueron obtenidos con un grado de confiabilidad alta debido a la presencia de placas de cobre colocadas en las interfaces de las distintas capas como se observa en la Figura 5. El espesor medido en cada placa es el más exacto posible debido a que la señal se refleja completamente en el cobre y por ende se utiliza para calibración del equipo para la estimación de espesores y la constante dieléctrica de las capas.

La Figura 6 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 ($70,4 \text{ mm}^{-2}$).

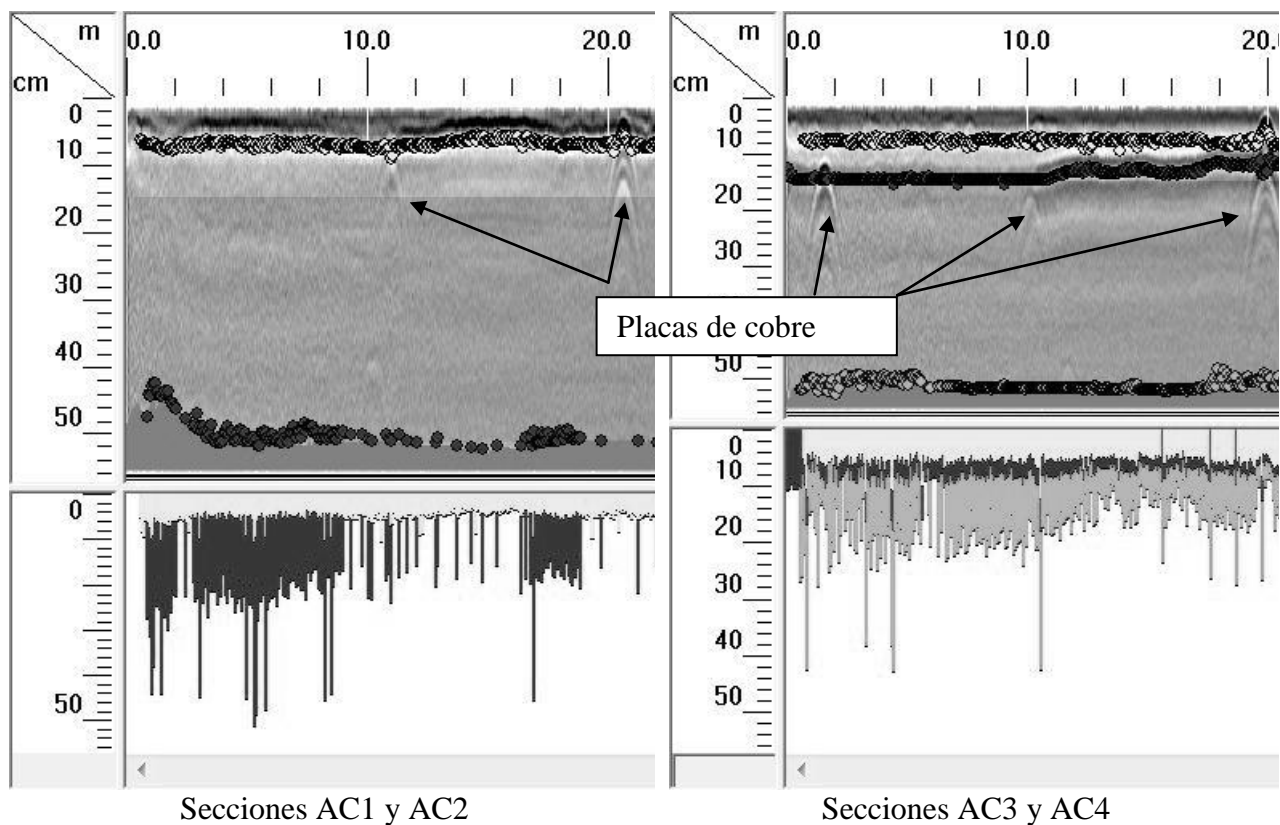


Figura 5: Espesores obtenidos con radar de penetración (GPR)

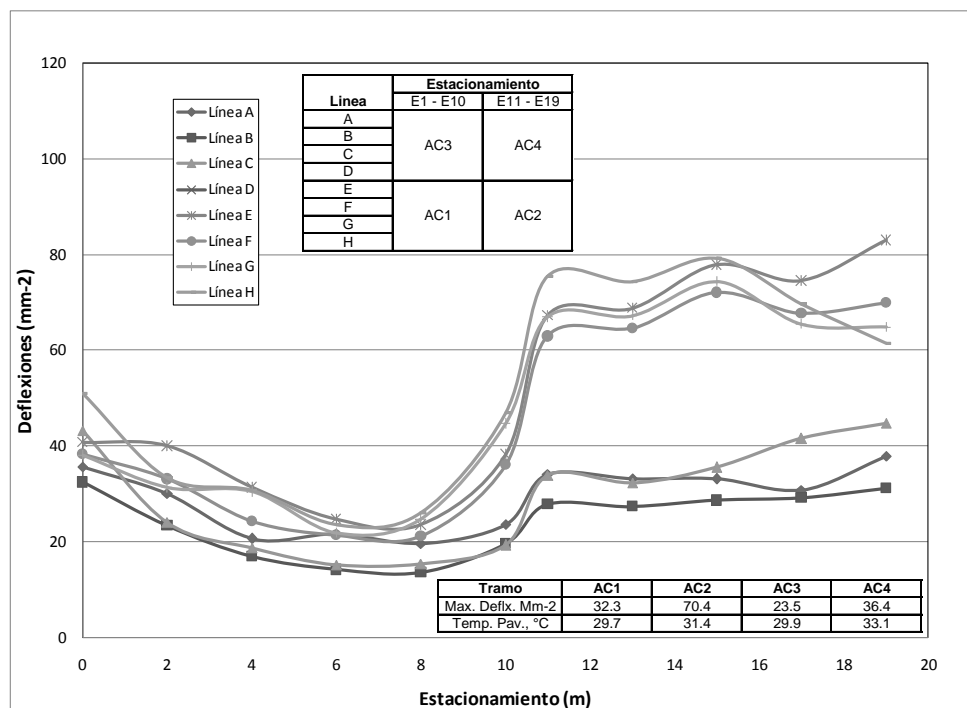


Figura 6: Deflectometría de impacto (FWD)

La Figura 7 muestra los resultados de deflectometría obtenidos con el deflectómetro de superficie (RSD) para la sección AC1. En este ejemplo se utilizó una carga de 20 kN por neumático con una

velocidad de 2 km/h y se aplicó sobre 5 puntos localizados a lo largo del tramos de prueba. De izquierda a derecha del tramo se tomaron mediciones en los puntos N1, S1, CL (centro geográfico del tramo), N2 y S2. Las mediciones se tomaron a una temperatura superficial del pavimento de 23 °C para todos los puntos por lo que las diferencias en deflexión se podrían atribuir a la variabilidad en espesores y variabilidad en rigidez de las distintas capas. Se observó que estos valores entre 20 y 35 mm⁻² de deflexión máxima son consistentes con los valores obtenidos con el FWD.

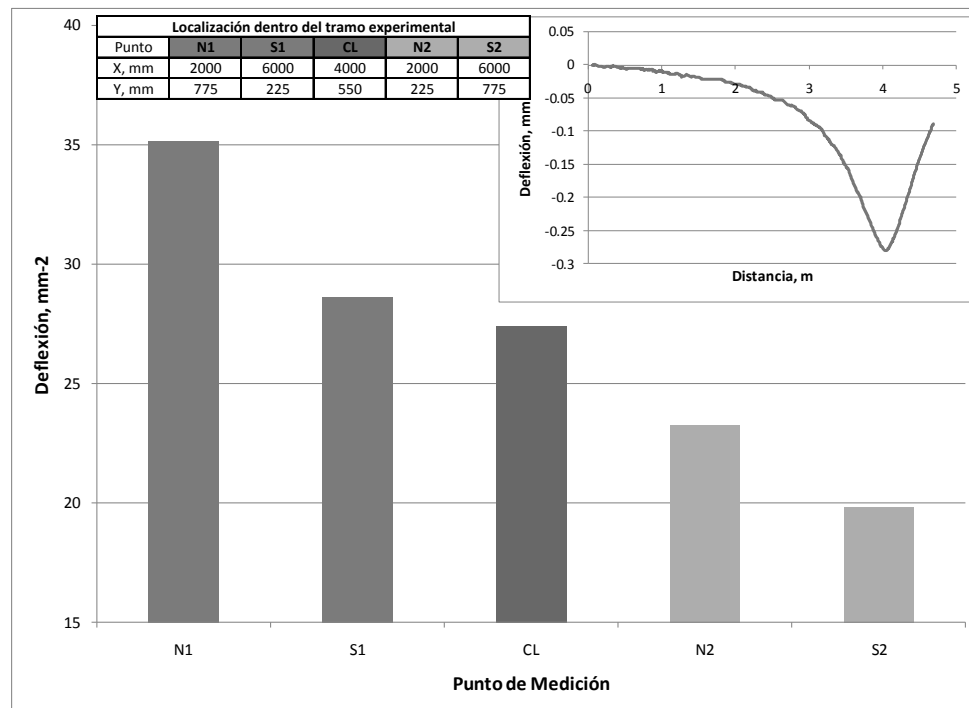


Figura 7: Deflectometría de superficie del pavimento (RSD)

La Figura 8 es un ejemplo de los resultados obtenidos al utilizar los deflectores de profundidad múltiple sobre el tramos de prueba AC1. Los valores mdd1 representan la deflexión medida a las siguientes profundidades: 1) a nivel de superficie, 2) a la mitad de capa granular y 3) a 200 mm dentro de la subrasante. Los valores mdd2 representan la deflexión medida a las siguientes profundidades: a nivel de interface entre capas y a 300 mm dentro de la subrasante. Todo esto se realizó con una carga de 20 kN por neumático a una velocidad de 4 km/h.

Estos mismos sensores se utilizaron para evaluar el efecto en deflexión al variar la carga y la velocidad del ensayo. Para esto se utilizaron 2 niveles de carga (40 kN y 60 kN) y 3 velocidades (4, 7 y 10 km/h). Como se esperaba, al aumentar la carga se obtuvo un aumento en deflexiones a todas las profundidades como se observa en la Figura 9. Por otro lado se obtuvo una leve disminución en la deflexión medida al aumentar la velocidad sin embargo esta disminución no fue estadísticamente significativa para $\alpha = 5.0\%$, lo cual se podría atribuir al rango bajo de velocidades utilizado para este análisis.

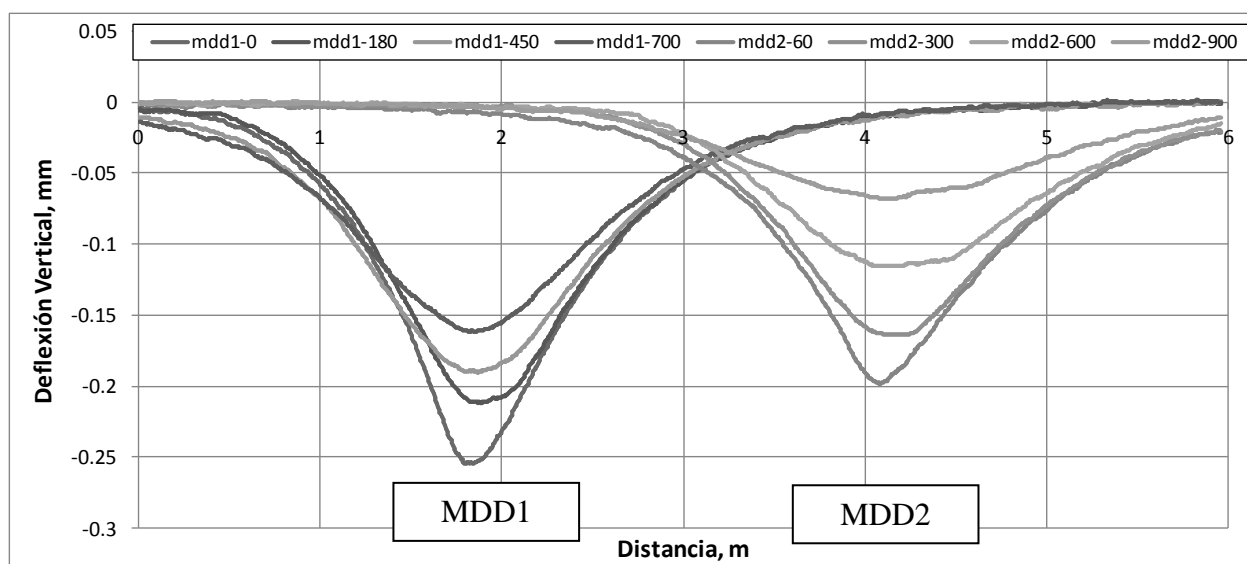


Figura 8: Deflectometría de profundidad múltiple (MDD)

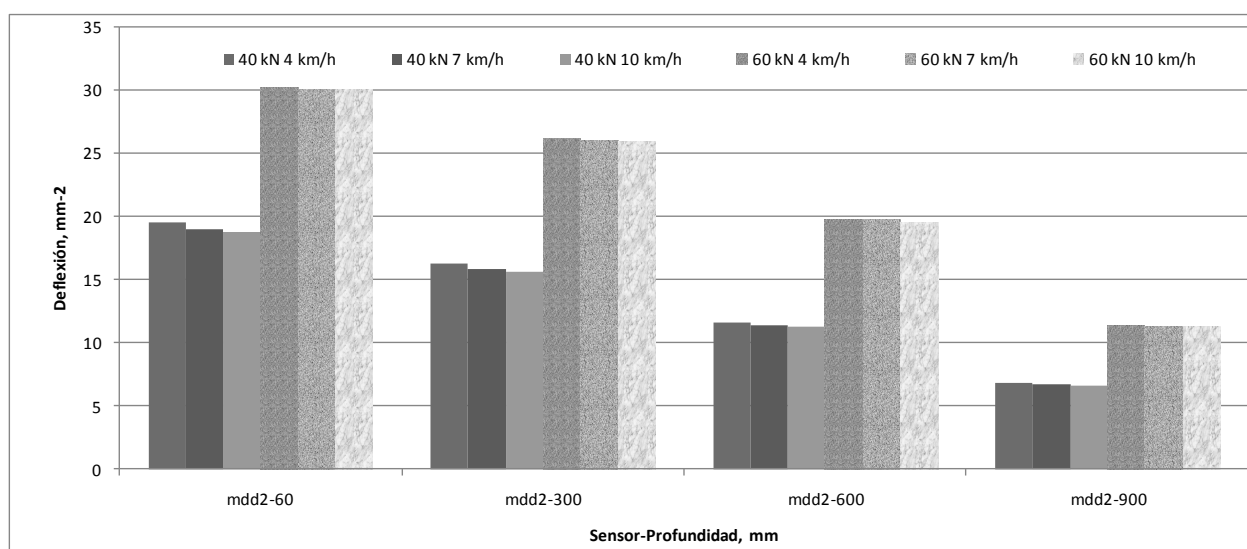


Figura 9: Efecto velocidad y nivel de carga en resultados MDD

Como último ejemplo de la capacidad de medición instalada en el tramo prueba AC1 se muestra en la Figura 10 (a) la respuesta a presión vertical medida con el sensor SOPT para una carga total de 40 kN, a una velocidad de 10 km/h, con una temperatura promedio del pavimento de 22,5 °C y una presión de inflado de 750 kPa. La presión vertical máxima se obtuvo justo donde está localizado el sensor con un valor promedio de 13,2 kPa, lo cual es una indicación de la alta capacidad de atenuación de la presión externa aplicada por las diferentes capas, especialmente por la base estabilizada con cemento. Por otro lado, se observa un incremento en las lecturas de presión conforme se aumenta la cantidad de pasadas de la carga aplicada de 40 kN (Figura 10 (b)). Esto evidencia la acumulación de daño y disminución de la capacidad de soporte de la estructura para disipar la presión que llega a la subrasante lo cual se ha dado dentro de un rango de temperatura de 22.5 ± 1.0 °C.

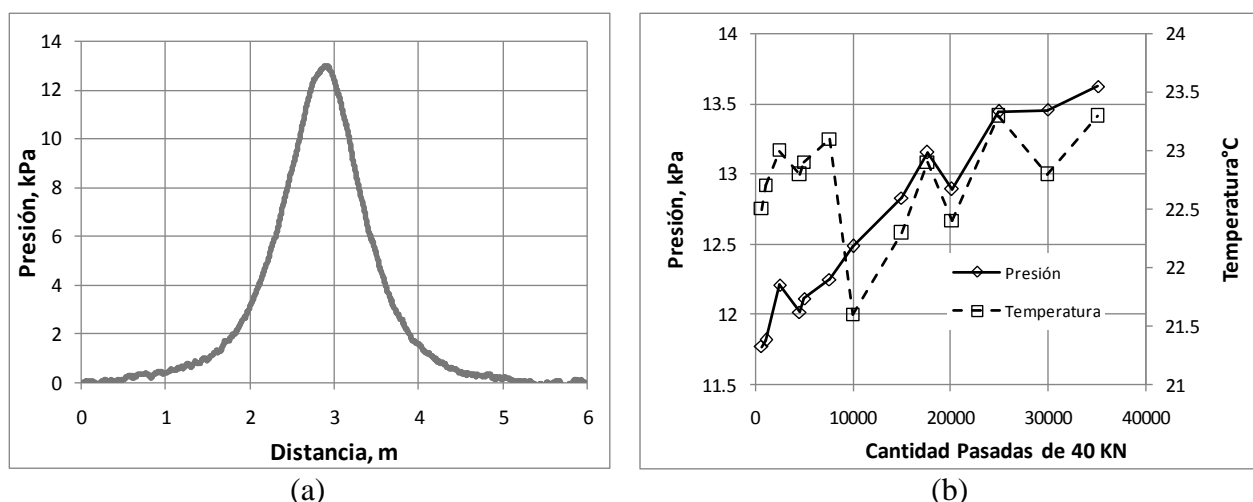


Figura 10: Esfuerzos verticales a nivel de subrasante (SOPT)

CONCLUSIONES

Con los resultados iniciales de este experimento y la experiencia compartida por otros administradores de ensayos acelerados se determinó la metodología de ensayo a seguir para futuras aplicaciones del HVS en Costa Rica. Como pasos paralelos al ensayo acelerado se está realizando la caracterización física mecánica de materiales y la comparación con resultados de ensayos de laboratorio. Con estas propiedades de los materiales se pretende verificar modelos mecanísticos por medio de la recopilación y análisis de respuestas del pavimento (instrumentación embebida en el pavimento). Se estima que este primer experimento este finalizado a mediados del 2014.

REFERENCIAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, Washington, D.C., 1993.
- Asphalt Institute MS-1, Manual Series No. 1, Thickness Design—Asphalt Pavements for Highways and Streets. Ninth Edition (1981).
- Coetzee, N et al. The Heavy Vehicle Simulator in Accelerated Pavement Testing: Historical Overview and New Developments. 3rd International Conference APT. 2008.
- Heavy Vehicle Simulator. Monitoring of test sections and instrumentation. Documento consultado el 6 de abril del 2010. <http://www.gautrans-hvs.co.za/>
- LTPP. LTPP Beyond FY 2009: What Needs to Be Done?. Reporte FHWA-HRT-09-052. 2009.
- Theyse, H.L., Overview of the South African Mechanistic Pavement Design Method, South African Transport Conference, July 2000.