

COMPARACIÓN DE DESEMPEÑO EN PISTA DE ENSAYOS ACELERADOS A ESCALA NATURAL DE DOS ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS SEMI-RÍGIDAS

Luis Guillermo Loria Salazar¹, Fabricio Leiva Villacorta², José P. Aguiar Moya³, Edgar Camacho⁴.

¹ Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales LanammeUCR, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. luis.loriasalazar@ucr.ac.cr

² Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales LanammeUCR, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. fabricio.leiva@ucr.ac.cr

³ Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales LanammeUCR, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. jose.aguiar@ucr.ac.cr

⁴ Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales LanammeUCR, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. edgar.camachogarita@ucr.ac.cr

Resumen

El presente artículo resume los resultados de desempeño de tres pistas de ensayo a escala natural sometidas a carga acelerada mediante un Simulador Pesados de Vehículos. La pista AC1 está compuesta por una capa de mezcla asfáltica en caliente de 7cm de espesor, una base estabilizada con cemento de 25 cm, una sub-base granular de 30 cm y un suelo arcilloso de 2,4m de espesor promedio. La pista AC4 tiene la misma composición pero la capa superior es de 12 cm. Finalmente, la pista AC2 tiene la misma configuración geométrica que la AC1 con la utilización de base granular en lugar de base estabilizada.

El equipo de simulación de tráfico fue usado a una velocidad de 10 km/hr, con distintos niveles de carga, a una temperatura promedio de 23°C. Adicionalmente, las pistas de ensayo cuentan con sensores de deflexión en todas las capas, una celda de presión en la parte superior de Subrasante y un sensor de temperatura en la capa de mezcla asfáltica en caliente. Además, se realizaron mediciones de deflectometría, deformación permanente y el Índice de Regularidad Internacional (IRI).

La deformación permanente máxima fue fijada en 12,5mm. La pista AC2 alcanzó dicho umbral luego de 1 millón de pasadas de carga, equivalentes a 11 millones de ejes equivalentes. Por otro lado las pistas AC1 y AC4 no superaron los 4mm luego de 1,5 millones de pasadas, equivalentes a 25 millones de ejes estándar. Las mediciones de deflexión por capa y totales, así como los esfuerzos a nivel de subrasante muestran incrementos en el tiempo, lo que testifica el deterioro progresivo del pavimento.

Palabras claves: pavimento, acelerado, simulador, pista

1 Introducción

La instrumentación de pavimentos se ha convertido en una importante herramienta de monitoreo del desempeño del material in situ y una forma de cuantificar la respuesta de estos ante las solicitaciones de carga y de clima a que es expuesto. Dentro de los parámetros que requieren mediciones de campo se encuentran: la deformación unitaria, los esfuerzos de tensión y compresión, la humedad y la temperatura. Las mediciones in situ de estos parámetros permiten el desarrollo de modelos de desempeño precisos y la calibración de las técnicas de diseño de pavimentos desde un enfoque mecanístico.

Tradicionalmente, en los países que han generado mayor cantidad de avances en el área de pavimentos, ensayos en tiempo real (RTL, por sus siglas en inglés) se han realizado con mayor frecuencia puesto que no requieren de grandes equipos especializados para la realización de los ensayos [1,2]. No obstante, 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 de Costa Rica, 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, y los definidos previamente, se considera el uso de un equipo de ensayos acelerados en pavimentos (APT, por sus siglas en inglés) es idóneo.

2 Pistas de ensayo

2.1 Caracterización de estructuras

Para la primera etapa de ensayos acelerados en Costa Rica se planteó la construcción de cuatro tramos experimentales. En esta primera etapa de ensayos, fueron evaluadas tres diferentes estructuras, con el objetivo es realizar una comparación estructural en términos de espesores de mezcla asfáltica y tipo de base (estabilizada o granular), manteniendo el resto de variables constantes. La Tabla 1 muestra las características de las tres secciones ensayadas donde se incluyen los respectivos espesores de las diferentes capas de las estructuras de pavimento y los módulos de cada capa (medidos in situ mediante retrocálculo).

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/cm² con un contenido óptimo de cemento de 1.7 sacos/m³ para una densidad máxima de 2013 kg/m³. El material de base y subbase granular se colocó a una densidad máxima de 2217 kg/m³ 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/m³ con un contenido óptimo de humedad de 52% y un CBR de 6.6%.

Tabla 1. Tramos experimentales ensayados

Propiedades/Tramo	AC1	AC2	AC4
H1, cm (MAC)	7	7	12
H2, cm (B.E)	25	25	25
H3, cm (S.B)	30	30	30
E1 @ 25 °C, MPa	3800	3800	3800
E2 °C, MPa	1200	140	1200
E3, MPa	140	140	140
E4, MPa	70	70	70

2.2 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 [3, 4]:

- 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.
- Transductores para presión en suelos SOPT: Usados para la medición de presión (esfuerzos) en materiales no ligados como gravas, arenas o arcillas.
- 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.
- 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.

La Figura 1 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.

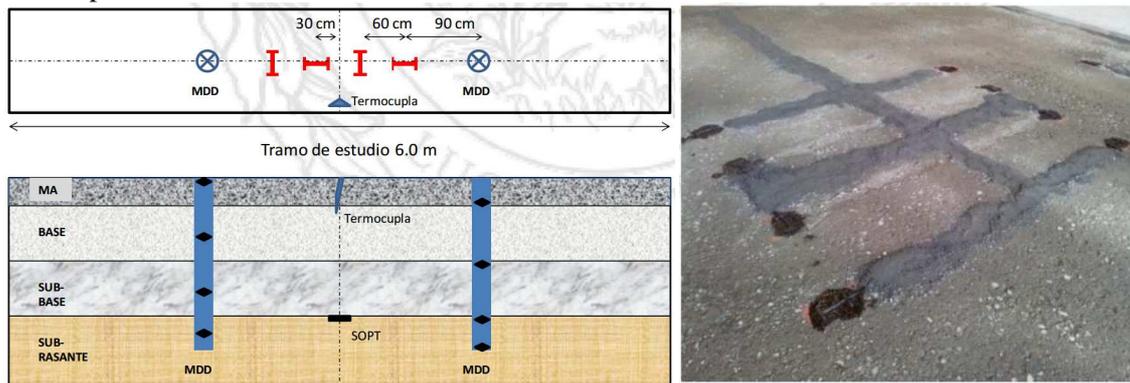


Figura 1. Arreglo de instrumentación

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.

Durante el proceso constructivo, se realizaron ensayos de muestro y caracterización de materiales, incluyendo material de suelo, material granular, mezcla asfáltica y asfalto para realizar ensayos de aceptación o calidad del material y ensayos de caracterización y desempeño.

La toma de datos relacionada con pasadas HVS se da en la condición inicial, y posteriormente a puntos fijos de 100, 200, 300, 500, 1.000, 1.500, 3.000, 5.000, 10.000, 15.000. De este valor en adelante, se toman datos cada 15.000 pasadas hasta la falla. En cuanto a la toma de núcleos así como ensayos de deflectometría de impacto (FWD/LWD) y Cono dinámico de penetración (DCP), estos se realizan una vez terminada la construcción de los tramos fuera de la zona de carga. Al final del experimento se extrajeron núcleos tanto en la zona de carga como afuera de la misma, así como ensayos LWD/DCP sobre las capas granulares y suelo falladas. La inspección de daños superficiales se refiere a la documentación de aparición de grietas, pérdidas de fricción, pérdidas de adherencia agregado-asfalto entre otros.

Tabla 2. Tramos experimentales ensayados

Instrumentación/ Frecuencia muestreo	A intervalos de pasadas HVS	Horario	Diario	Otro
Perfil laser 3D	X			
Deformaciones unitarias	X			
Presión	X			
Temperatura		X		
Condiciones climáticas			X	
Deflexión superficial RSD	X			
Deflexión estructural MDD	X			
Núcleos				X
FWD/LWD/DCP/GPR				X
Daño superficial			X	
Caracterización de materiales				X

2.3 Equipo de ensayo

Como parte de los sistemas que controlan la operación del HVS se recopila una serie de parámetros y datos para cada una de las pasadas ejercidas por el equipo. El equipo lleva un registro completo por cada repetición aplicada con la fecha y hora de la aplicación. De igual los registros muestran que la carga se aplicó bidireccionalmente sobre una distancia de 6 m, con un ancho de huella de 0,77 m y se registró tanto la carga aplicada como la desviación estándar como una forma de control sobre el cumplimiento de la carga esperada, esto se muestra en la Figura 2(a). La velocidad establecida para este ensayo fue de 10 km/h, de tal forma que se aplican 870 repeticiones de carga por hora. El equipo mantiene un registro detallado de la velocidad promedio para cada repetición en ambos sentidos de aplicación de la carga.

La temperatura del aire en el interior de la llanta y la presión de inflado son parámetros que no solo están relacionados pero que también afectan el desempeño del pavimento. La Figura 2(b) muestra un ejemplo de los datos de temperatura que son recolectados para cada repetición de carga. Finalmente, como criterio de falla para detener el ensayo, el HVS registra la deformación para cada repetición de carga, al igual que la ubicación lateral de las cargas aplicadas. Para este ensayo se aplicó una desviación lateral de 10 cm basado en experiencia internacional.

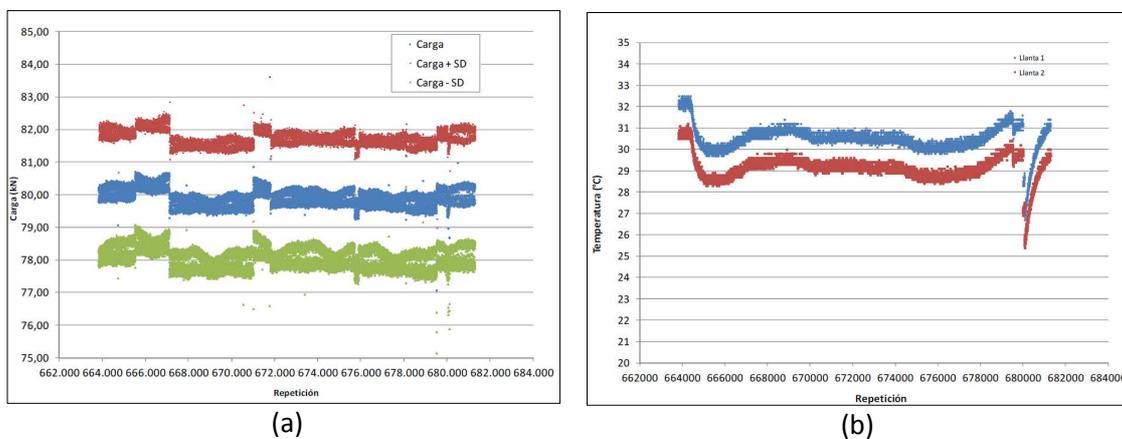


Figura 2. Mediciones de carga y temperatura de neumático en cada repetición del HVS

3 Resultados

3.1 Resultados generales de las estructuras

A manera de ejemplo de la diversidad de datos obtenidos, se presenta a continuación resultados generales de esfuerzos y deformaciones cuantificadas en la pista de pruebas AC1, cuyos datos ya han sido procesados de manera completa. Luego de estos resultados, se procede a la comparación de desempeño en deformación permanente de las pistas AC1, AC3 y AC4.

3.1.1 Esfuerzos de compresión normales a subrasante

Los resultados de esfuerzos obtenidos debieron ser tratados para reducir el ruido propio de sistemas de recolección de datos. Esta reducción se ejecutó mediante la aplicación de una media móvil de 10 datos. Cabe destacar que este tipo de tratamiento de los datos fue necesario para todos los sensores instalados en la estructura de pavimento.

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 3 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. Como era esperado, en cada incremento de carga, el nivel de esfuerzos se incrementó de manera significativa y dentro de cada intervalo de carga constante, los esfuerzos se incrementaron ligeramente, evidenciando un proceso de acumulación de daños en la estructura, así como pérdida de capacidad soportante.

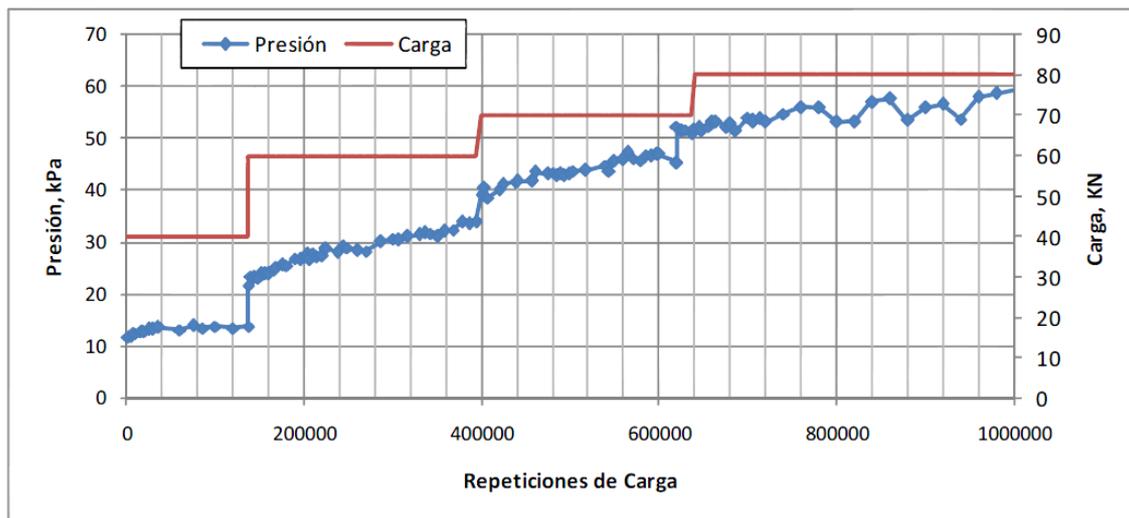


Figura 3. Evolución de la medición de presiones normales a la subrasante según las repeticiones de carga

3.1.2 Deflexiones y deformaciones de capas con 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 4. 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, en este caso particular, a la presencia de la capa estabilizada con cemento.

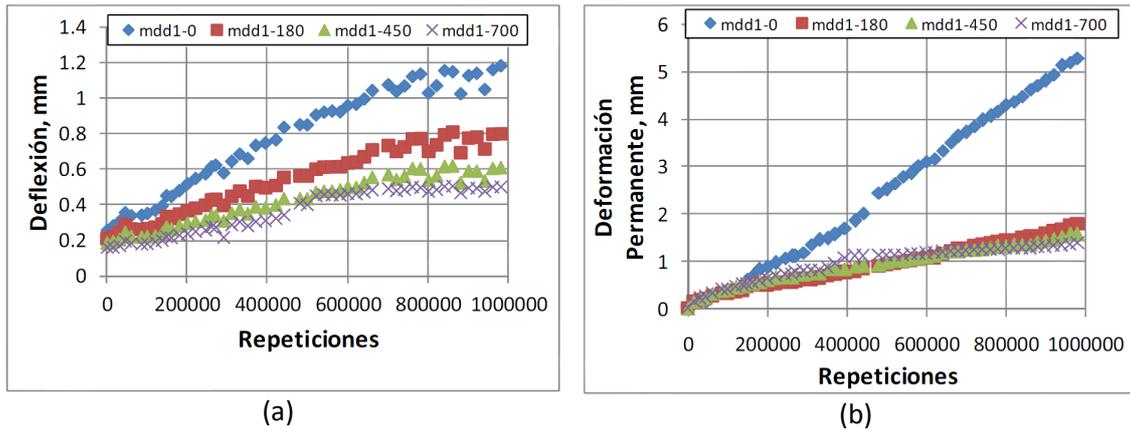


Figura 4. Evolución de la deflexión y deformación permanente de las capas según las repeticiones de carga

3.1.3 Perfil longitudinal

La Figura 5 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. La Figura 6 muestra el perfil tridimensional de la primera pista de ensayo al final de todos los ciclos de repetición de carga.

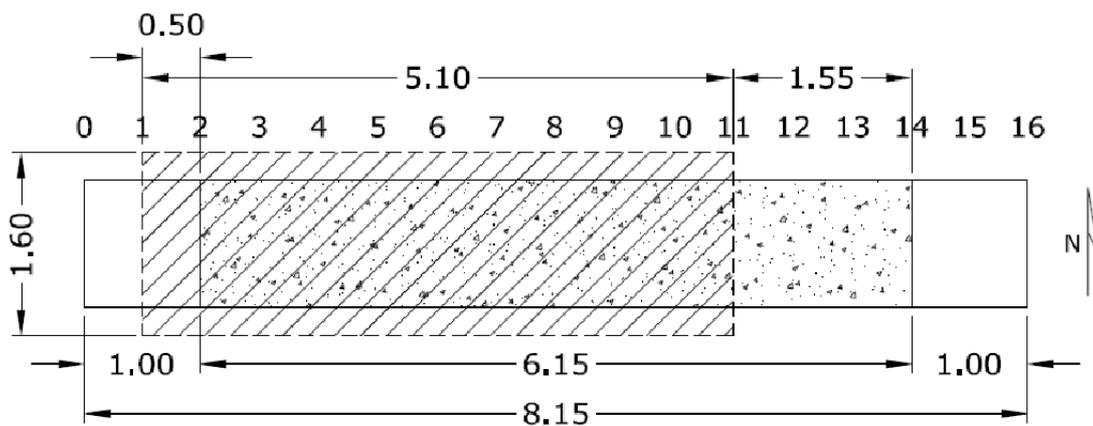


Figura 5. Zona de medición del perfil tridimensional de las pistas de ensayo

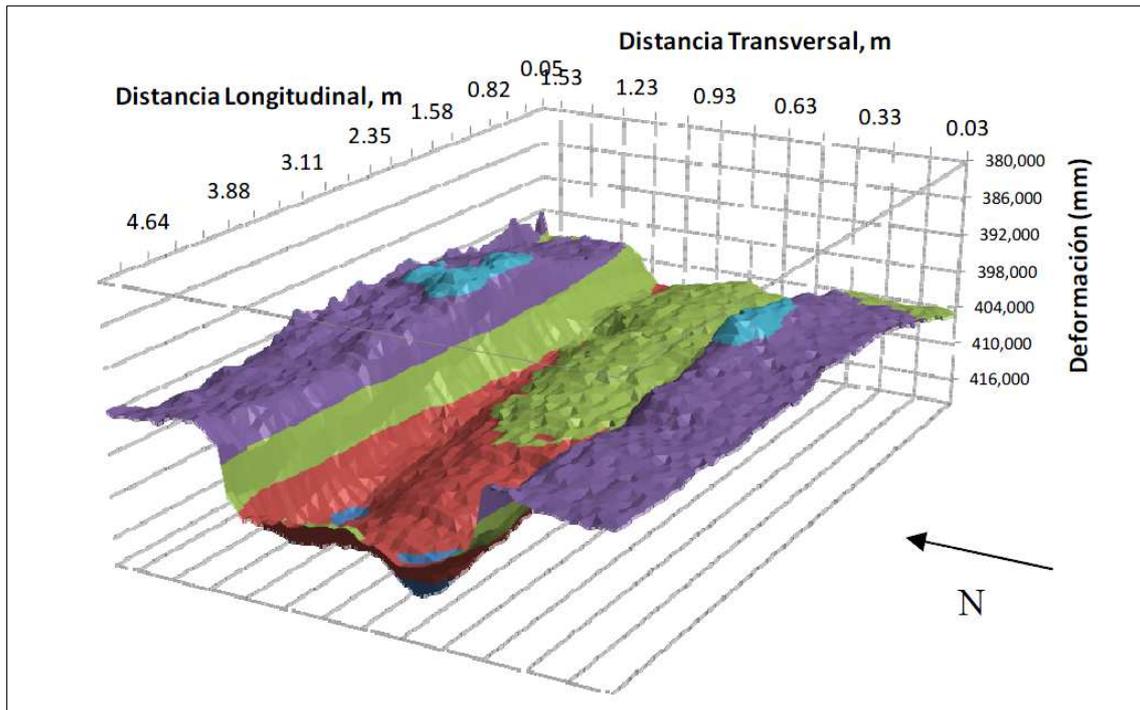


Figura 6. Perfil tridimensional del tramo AC1 al final del ensayo

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.

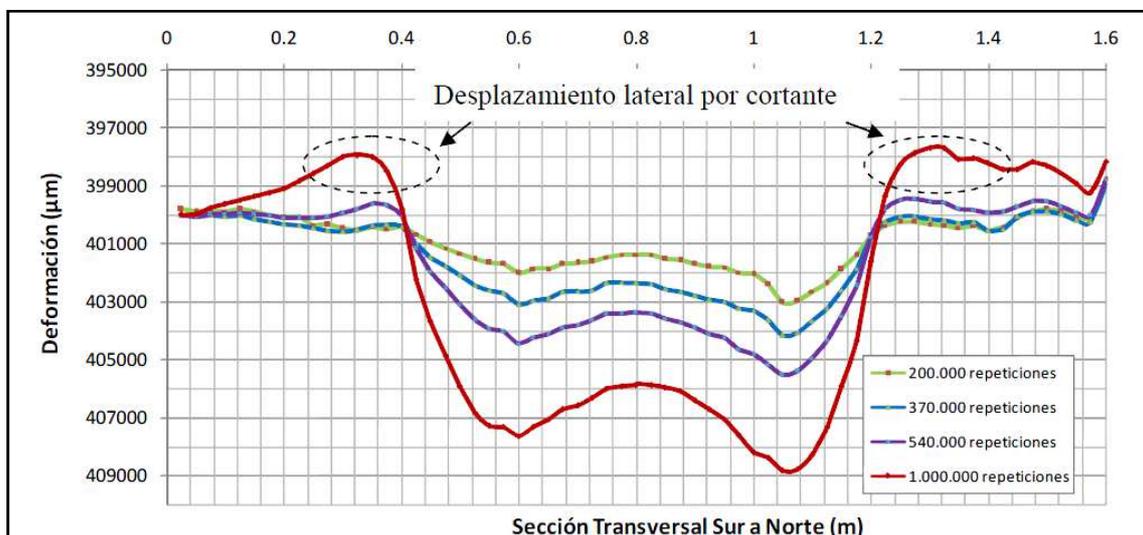


Figura 7. Evolución del perfil longitudinal de la pista AC1 durante el ensayo

3.1.4 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 8 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.

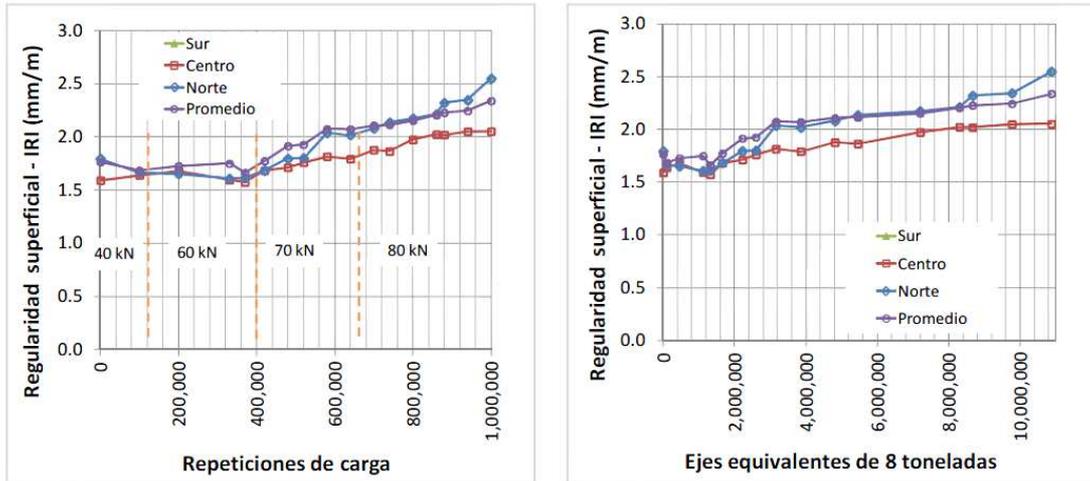


Figura 8. Evolución del IRI de la pista AC1 durante el ensayo

3.2 Comparación de desempeño entre estructuras

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 para la pista AC2, 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 [5].



Figura 8. Evolución del IRI de la pista AC1 durante el ensayo

$$ESAL = \left(\frac{P_i}{40 \text{ kN}} \right)^{FD} * R_i \quad (1)$$

Donde, P_i es el nivel de carga del ciclo i en kN, FD es el factor de daño y R_i es el numero de repeticiones del ciclo de carga i .

La Figura 9 muestra la evolución de la deformación permanente a distintas profundidades de medición para las tres pistas de ensayo. Se puede ver como para las pistas con base estabilizada con cemento (AC1 y AC4), la deformación permanente de las capas subyacentes a la mezcla son muy similares, evidenciando un proceso de deflexion de todo el paquete de capas y no una fuerte deformación de los materiales que la componen. Se puede observar que la mayoría de la deformacion se da en la capa de mezcla asfáltica en caliente. Esto fue comentado anteriormente en la seccion precedente.

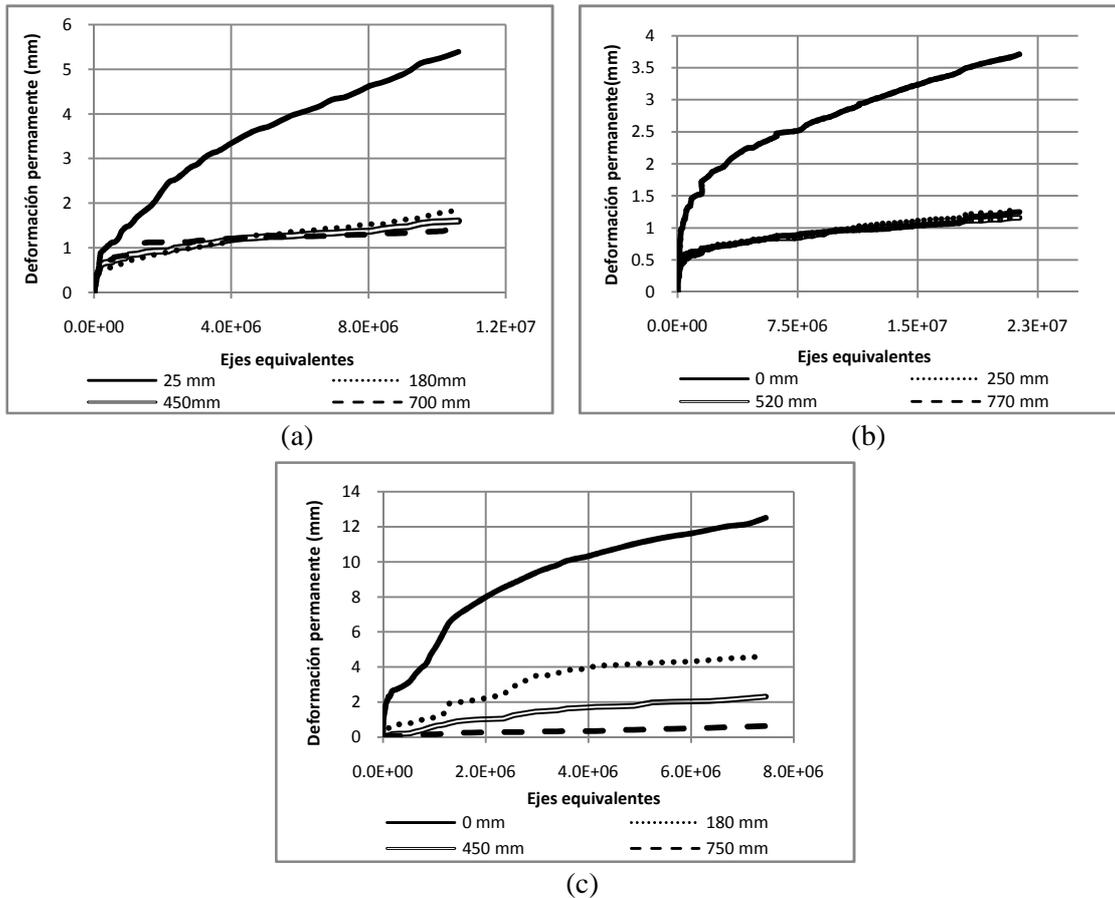


Figura 9. Evolución de la deformación permanente a distintas profundidades de la pista AC1 (a), AC4 (b) y AC2(c)

La Figura 9(c), muestra por su parte el mismo proceso de deformación en la pista AC2, que cuenta con una base granular en lugar del material estabilizado. El comportamiento difiere significativamente. Los valores de deformacion observados son aproximadamente el triple al compararse con la estructura AC1 a un mismo valor de repeticiones de carga. Es importante resaltar que tanto la estructura AC1 como la AC2 comparten la misma configuracion de espesores y difieren unicamente en su material de base. La deformacion de capas subyacentes es tambien evidente. En este caso, se observa que existe una diferencia notable entre las deformaciones de distintas capas, indicando que cada una sufrio un proceso de deformación de manera individual que aporsto al total observado.

Si se compara la evolución del desempeño a la deformación permanente de las tres estructuras, tal y como se presenta en la Figura 10 se observa claramente que la estructura de base granular alcanzó el límite de falla (12,5 mm) de una manera acelerada y difiere totalmente del comportamiento observado para las estructuras con base estabilizada, tal y como era esperado.

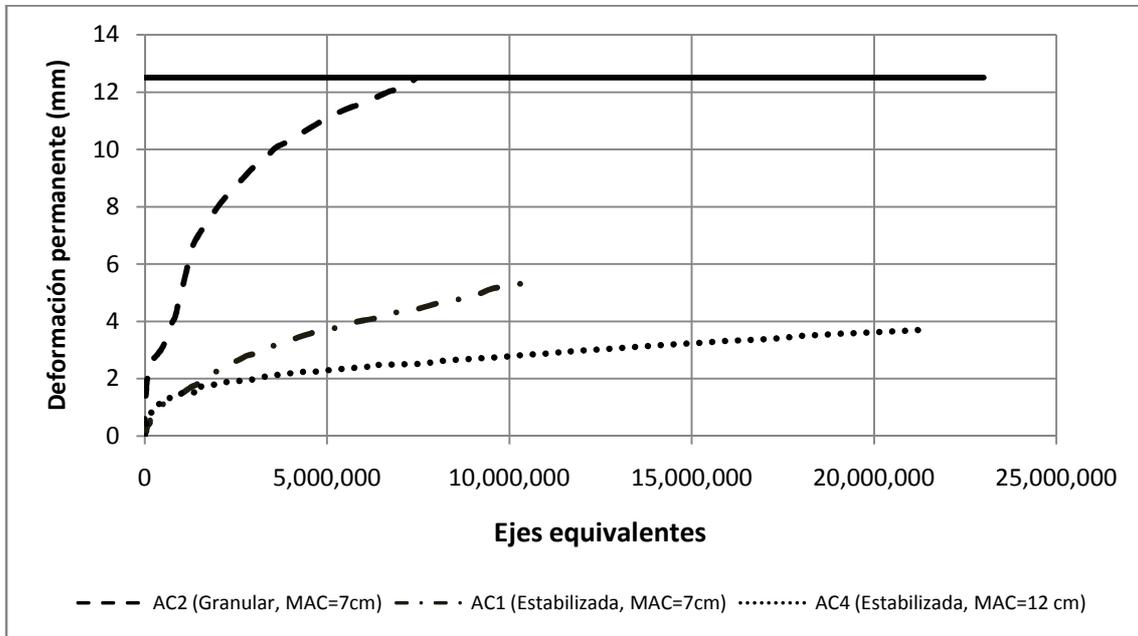


Figura 10. Evolución de la deformación permanente para las estructuras ensayadas

4 Conclusiones

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 generales tales como:

- Metodología de diseño mecánica - 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.

Dentro de los productos específicos esperados de los resultados de este artículo se incluyen:

- Modelos de desempeño preliminares para las diferentes capas del pavimento.
- Junto con la caracterización en laboratorio de los materiales y modelación mecanicista de la estructura se espera realizar una verificación y calibración entre la teoría y los resultados de campo.

- Desarrollo de modelos de retrocálculo de módulos
- Publicaciones científicas.

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.
- El uso de la base estabilizada con cemento reduce significativamente la cantidad de deformación permanente observada en las estructuras típicas de pavimento
- En presencia de base estabilizada el proceso de deformación permanente se observa predominantemente en la capa de mezcla asfáltica en caliente.
- En presencia de base granular, el proceso de deterioro se ve magnificado debido al aporte a la deformación de las capas subyacentes a la mezcla asfáltica

5 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] Heavy Vehicle Simulator. "Monitoring of test sections and instrumentation". Documento consultado el 6 de abril del 2010. <http://www.gautrans-hvs.co.za/>
- [4] 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.
- [5] 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