

# ENSAYOS ACELERADOS DE PAVIMENTO EN COSTA RICA

Fecha de recepción: 04/06/13

Fecha de aprobación: 22/07/13

Ing. Fabricio Leiva Villacorta, PhD., MBA  
Investigador, Unidad de Materiales y Pavimentos, LanammeUCR  
San José, Costa Rica  
fabricio.leiva@ucr.ac.cr

Ing. José Pablo Aguiar Moya, PhD.  
Coordinador, Unidad de Materiales y Pavimentos, LanammeUCR  
San José, Costa Rica  
jose.aguiar@ucr.ac.cr

Ing. Luis Guillermo Loría Salazar, PhD.  
Coordinador General, Programa de Infraestructura del Transporte, LanammeUCR  
San José, Costa Rica  
luis.loriasalazar@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 fin de este presente proyecto de investigación es 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 los primeros tramos experimentales en las instalaciones del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR). Se pretende con los resultados iniciales de este experimento, determinar la metodología de ensayo a seguir para futuras aplicaciones del HVS.

**Palabras clave:** Implementación, Desempeño, Ensayos acelerados, HVS, Instrumentación

## ABSTRACT

*Accelerated pavement testing equipments such as the Heavy Vehicle Simulator (HVS) help evaluate pavement performance in a short period of time. The objective of this research project is to characterize, improve and introduce new materials and technologies, generate or improve specifications and develop a pavement design guide for Costa Rica. The first experimental test tracks were built at the National Laboratory of Material and Structural Models of University of Costa Rica (LanammeUCR). The results of the first experiment will be used as the standard methodology to apply on future tests.*

**Key Words:** Local Calibration, Performance Testing, APT, HVS, Instrumentation

## 1. ANTECEDENTES

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.

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. Esto conlleva a todo un compromiso por parte de la Administración y los Departamentos de Transportes para asegurar que no se hagan intervenciones en dicho tramo y que se le dé monitoreo continuo desde la etapa de la construcción hasta que se saque de servicio.

Frecuentemente esto puede resultar en inconveniencias a los usuarios, pues tramos de carreteras no pueden ser intervenidos a pesar de presentar altos grados de deterioro o falla completa del mismo. Adicionalmente, hay que tomar en cuenta que un tramo experimental sólo permite evaluar un grupo de parámetros específicos asociados a dicho tramo. Sin embargo, el interés radica en poder evaluar la variabilidad en resultados, lo que requeriría realizar ensayos RLT en varios tramos con condiciones similares y en poder evaluar todo el rango de parámetros que afectan el desempeño del pavimento (clima, estructura, materiales, tráfico). Por este motivo se busca realizar ensayos RLT que capturen el efecto de los distintos factores que afectan el deterioro en los pavimentos.

Un ejemplo más reciente de ensayos RTL a gran escala, es un programa iniciado en los Estados Unidos en 1987 y que se continúa hasta la fecha, a pesar de una considerable reducción en los fondos destinados al programa, así como la necesidad de intervención en los tramos o el desconocimiento del estado de los mismos por cambios en la Administración local (1). Este programa que se denominó LTPP (Programa de Desempeño de Pavimentos a Largo Plazo) fue desarrollado dentro del marco SHRP (Programa Estratégico en Investigación de Carreteras) y consta de aproximadamente 2.500 tramos experimentales (cada uno de 152.4 m – 500 ft) localizados en Estados Unidos y Canadá (Ver Figura 1).

### 1.1 Situación Nacional

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.

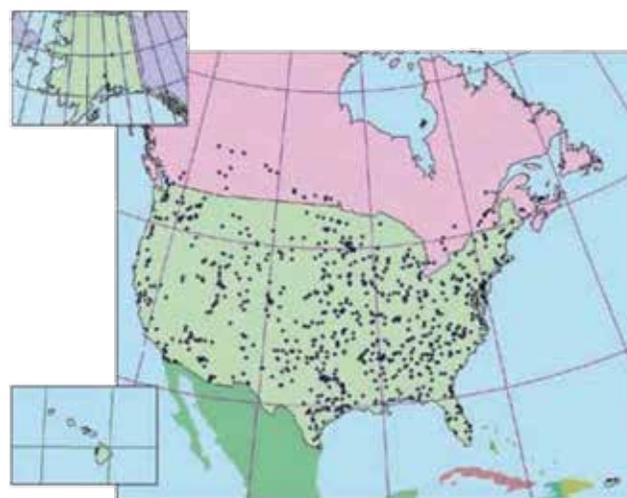
Con el fin de poder contar en Costa Rica con pistas para ensayos APT, se realizó un estudio de diferentes equipos y se determinó que para las condiciones tanto técnicas y económicas del país, el Simulador de Vehículos Pesados (Heavy Vehicle Simulator, HVS),

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 (2,3):

- **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 o métodos de ensayo de laboratorio.

El HVS también brinda la posibilidad de consolidar la plataforma tecnológica del LanammeUCR, de tal forma que se pueda incrementar la proyección de las investigaciones realizadas por la institución tanto a nivel nacional como internacional. Todo esto sin dejar de lado la responsabilidad fundamental de optimizar el uso de los materiales de construcción en las obras de infraestructura,

Figura 1. (a) Ubicación de Tramos Experimentales y (b) Ejemplo de Tramo Experimental del Programa LTPP (IH-393, New Hampshire).

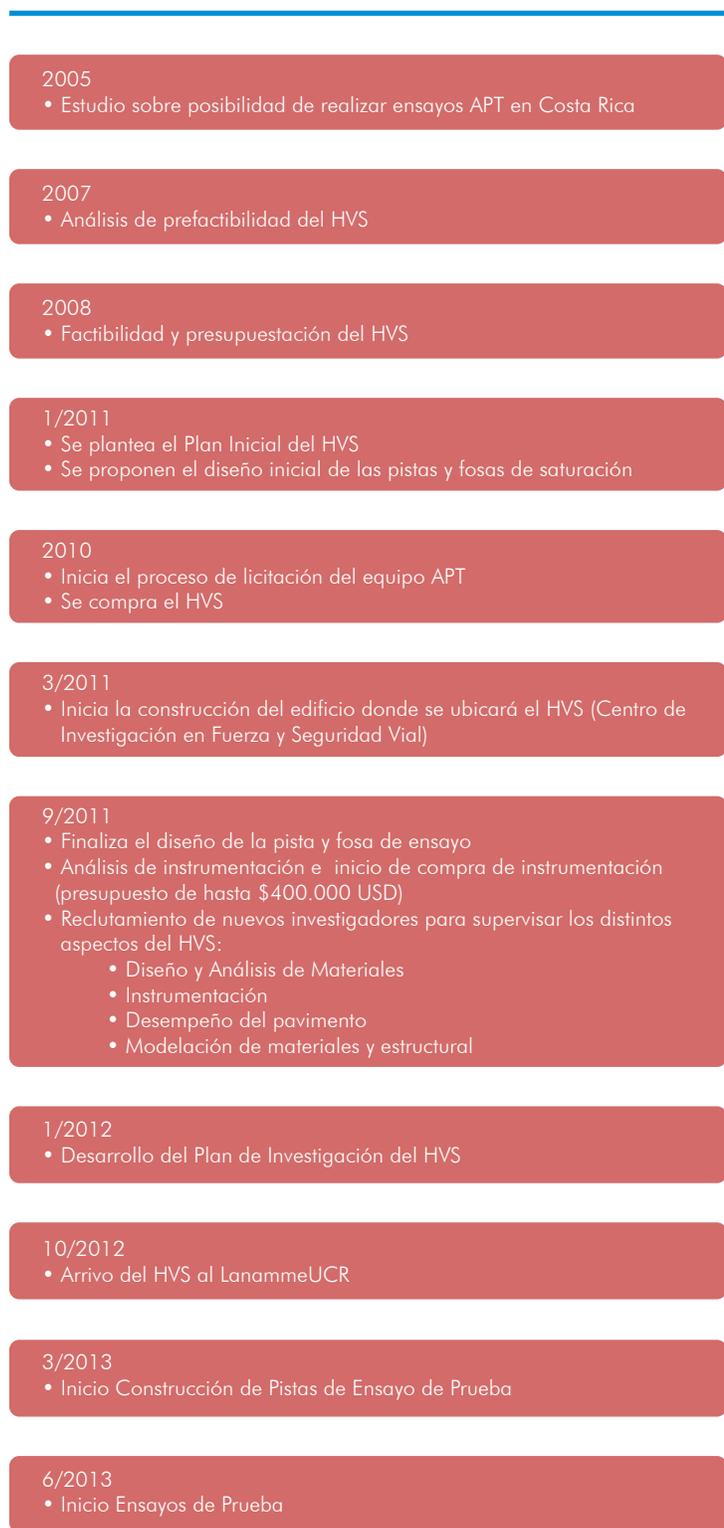


(a)



(b)

Figura 2. Cronograma de implementación



lo cual permitirá impactar de manera positiva el desarrollo del país, generando a futuro grandes ahorros en la inversión en infraestructura.

## 2. CRONOGRAMA DE IMPLEMENTACIÓN

A partir del año 2005 se empezó a analizar la posibilidad de usar los ensayos APT en el país. Esto principalmente debido a la necesidad de evaluar el desempeño a largo plazo de las estructuras de pavimento existentes en el país, así como nuevas tecnologías y materiales que han sido previamente probados en laboratorio, pero que aún no han sido utilizados en campo. Todo lo previo dentro del marco de responsabilidades establecidas por la Ley 8114 de Costa Rica y el plan de investigación establecido internamente por el Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA).

En el 2009 el HVS fue introducido en la reserva presupuestaria del LanammeUCR para los años a seguir. A partir de ese momento, la evolución del proyecto de planeación e implementación del HVS por el LanammeUCR fue programada como se muestra en la Figura 2.

Con base en la programación preparada, los ensayos iniciales del HVS se plantearon en dos etapas principales: 1) del 2013 al 2015 se espera que el HVS sea usado en experimentos controlados dentro de las instalaciones del LanammeUCR, usando las fosas de saturación. Dichas instalaciones se han denominado "Pavelab" y están equipadas con los requisitos necesarios para instrumentar y monitorear la ejecución de los ensayos APT. Esto permitirá comparar diferentes tipos de superficies de ruedo (ej. mezcla asfáltica o concreto hidráulico) y métodos de estabilización de suelos que están actualmente en uso, o que puedan ser usados en el país, en el futuro. 2) en la segunda etapa que empezaría en el 2016, los ensayos no se realizarían únicamente dentro del LanammeUCR, sino que el equipo se llevará a secciones de campo con el fin de evaluar distintos proyectos bajo las condiciones de sitio (propiedades de materiales y clima) y procesos constructivos.

## 3. PRUEBAS PRELIMINARES DE ACEPTACIÓN

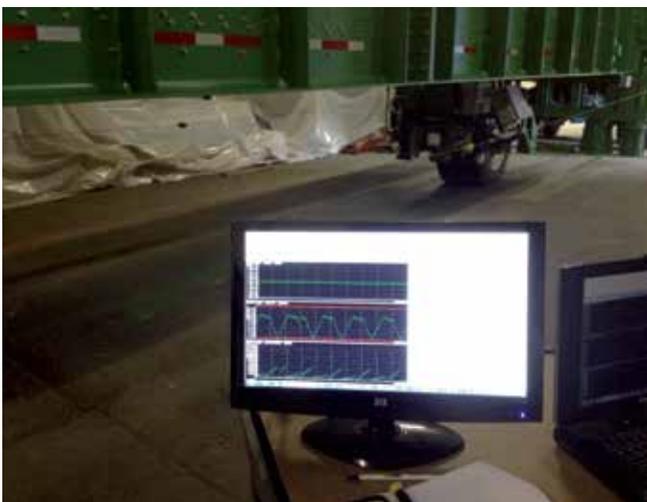
Capacitación durante el Ensayo de Aceptación en Fábrica (Factory Acceptance Test, FAT): en esta etapa de capacitación de 5 días de duración, se suministraron los conocimientos elementales para verificar la operación y mantenimiento básico del HVS en la fábrica. Adicionalmente, se aseguró que el equipo se encontrara completamente funcional y que reuniera las especificaciones físicas y operacionales de producción del equipo en la fábrica, antes de su envío.

## 4. CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO

Con base en los requisitos establecidos por el LanammeUCR, el HVS Mark VI tiene las siguientes características (4):

- Longitud: 23.02 m
- Ancho: 3.07 m en general
- Altura: 3.28 m
- Peso del equipo: 34.000 kg
- Llantas de ensayo: El equipo es capaz de utilizar llantas de camión simple y doble (dual). (Doble neumático 11R22-5 y las ruedas de equipo estándar).
- Método de aplicación de la carga: El equipo es capaz de aplicar la carga hacia delante y hacia atrás sobre una distancia de 6 m, con un ancho de huella (desviación de la llanta) de 1.4 m. La aplicación puede realizarse en forma bidireccional con 26.000 pasadas en periodo de 24 horas, o de manera unidireccional con 13.000 pasadas en el periodo de 24 horas.
- Carga de ensayo: La carga de ensayo que el equipo permite aplicar está entre 30 y 100 kN empleando llantas de camión. Las cargas se aplican sobre un mínimo de 6 metros lineales de sección de prueba.
- Velocidad máxima alcanzable: 12.8 km/h  $\pm$  3.0 km/h.
- Rango de temperaturas: La unidad es capaz de operar entre los -15 °C y los 40 °C.

Figura 3. Ensayo de Aceptación en Fábrica



Se programó que el equipo sea inicialmente utilizado dentro de una de las instalaciones del LanammeUCR de la Universidad de Costa Rica, el Laboratorio de Pavimentos (PaveLab), puesto que así es posible brindar en los ensayos un ambiente seguro para los investigadores y controlado, con la aplicación de un número de cargas que pueden ser aplicadas de manera precisa, y colocadas en lugares específicos de forma más controlada y con mayor rapidez.

Figura 4. Ensamblaje del equipo en instalaciones del LanammeUCR



Figura 5. Calibración de la celda de carga



Figura 6. HVS Mark VI PaveLab, LanammeUCR



## 5. TRAMOS EXPERIMENTALES

### 5.1 Instalaciones para el HVS

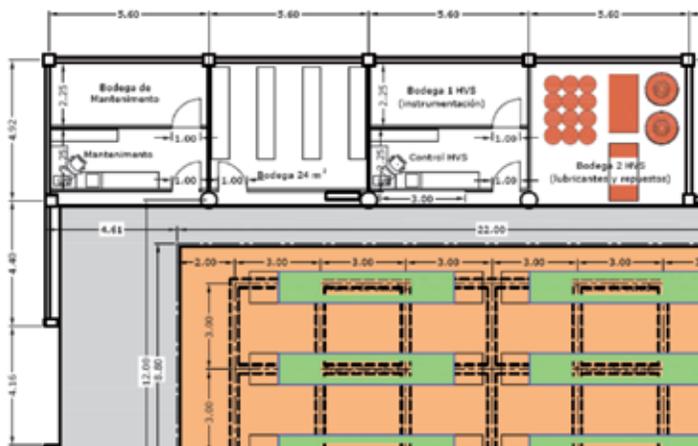
El edificio donde se ubican las instalaciones para ensayos APT cuenta con una fosa de saturación donde se están realizando los ensayos iniciales del HVS, bajo condiciones controladas (Figura 7). No obstante, a pesar que las instalaciones para ensayos APT son parte del proyecto de dicho edificio, la construcción de las mismas es completamente independiente del resto de la estructura, con el fin de garantizar que se cumpla con los requisitos energéticos (principales y de respaldo), el aislamiento ambiental, aislamiento sónico y el suministro y acceso a materiales y equipos de laboratorio necesarios para la operación continua y óptima de los mismos.

Las Figuras 8 y 9 muestran la distribución en planta y la vista frontal de las instalaciones del PaveLab. En la fosa donde se ubican los tramos de prueba, se pueden construir hasta 6 distintos tipos de estructuras simultáneamente cubriendo un área de 22 metros de largo por 8.2 metros de ancho. Para controlar el nivel freático,

Figura 7. Nuevo Edificio del LanammeUCR donde se ubica el HVS y el PaveLab. (Centro de Investigación en Fuerza y Seguridad Vial).



Figura 8. Vista en Planta de las instalaciones del PaveLab.



un sistema de distribución de agua operado por gravedad fue construido junto a la fosa de saturación según se indica en las Figuras 8 y 9 (el tanque de agua se indica en color azul en las figuras). La Figura 10 muestra una vista panorámica de las instalaciones del PAVELAB, con la fosa de ensayo terminada.

### 5.2 Primeros Tramos Experimentales

Para la primera etapa de ensayos acelerados en Costa Rica se planteó la construcción de 4 tramos experimentales, en la Tabla 1 se muestran las características de cada una de las secciones propuestas. Aquí se incluyen los respectivos espesores de las diferentes capas de las estructuras de pavimento, las propiedades de cada capa, la respuesta mecánica obtenida mediante el análisis de multicapa elástica y el número estimado de pasadas asociados a la magnitud de la carga. Se estima que el daño principal será de agrietamiento por fatiga en los casos diseñados con base granular.

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. Se estima que 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 debido a restricciones de tiempo, sería la cantidad máxima de pasadas por aplicar, con el fin de realizar una comparación con los resultados de las estructuras AC1 y AC2.

Para estos ensayos se espera un rendimiento de 75.000 pasadas (bidireccional) por semana (15.000 por día - 5 días a la semana) de forma conservadora. En este análisis se incluyen las estimaciones de ejes equivalentes de diseño obtenidos mediante la aplicación de la guía de diseño AASHTO 93 (5) 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.

Figura 9. Vista Frontal de las instalaciones del PaveLab, con Detalle de Sistema de Agua.

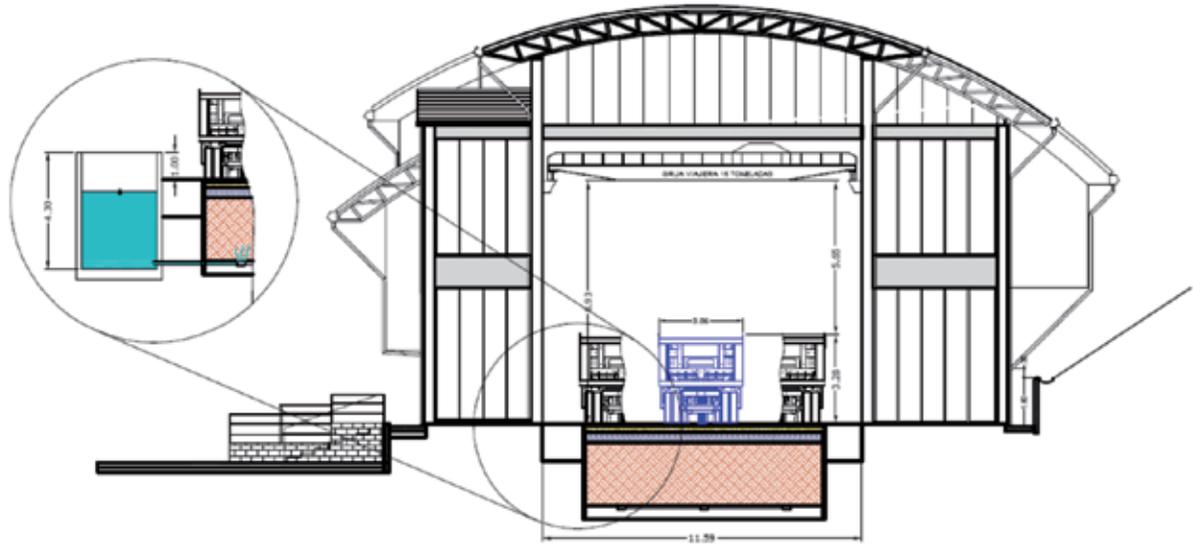


Figura 10. Pistas de Ensayo del PaveLab.



## 6. 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 (8-10):

- Perfilómetro láser 3D automatizado: La cabeza de medición se mueve a lo largo de la viga del HVS y toma mediciones cada 10 mm. Las mediciones transversales de perfil son tomadas en varios puntos a lo largo de la sección de prueba.
- Transductores para medición de pavimentos PAST: Los PAST (por sus siglas en inglés) son usados para la medición de esfuerzos y deformaciones en pavimentos de concreto asfáltico o concreto hidráulico. Este tipo de medidor consiste de una celda de carga de resistencia eléctrica cubierto por una tira de fibra de vidrio reforzada con epóxico que lo recubre en varias capas. (Figura 11).
- Transductores para presión en suelos SOPT: Los SOPT (por sus siglas en inglés) son usados para la medición de presión (esfuerzos) en materiales sueltos como gravas, arenas o arcillas. (Figura 12).
- Deflectómetro de Profundidad Múltiple: El Deflectómetro de Profundidad Múltiple (MDD por sus siglas en inglés) es usado para medir en sitio las deflexiones elásticas o deformaciones permanentes en las distintas capas de un tramo de prueba.

Consiste en una serie de módulos de “transductores diferenciales lineal-variables” (LVDTs) que se montan sobre una varilla dentro de un agujero de 39 mm de diámetro que se perfora sobre el tramo de prueba. (Figura 13).

- Medidor de Actividad de Grietas: El Medidor de Actividad de Grietas (CAM por sus siglas en inglés) es un instrumento que se coloca entre las llantas duales de un eje y mide el movimiento relativo de la grieta transversal durante el movimiento de las llantas. Tanto los movimientos verticales como horizontales, son grabados. (Figura 14).
- 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 15).

- Termopar (conocidas también como termocupla): fabricadas con 2 alambres de distinto material (nickel/cromo) unidos en un extremo, estos dispositivos con rangos de temperatura de 180 a 1300 °C, se denominan como tipo K. Al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera un voltaje muy pequeño del orden de los milivolts (máximo de 54.8 mV) el cual aumenta con la temperatura.

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 prevee 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.

Tabla 1. Tramos experimentales propuestos

PROPIEDAD /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
Carga, kN	40	40	40	40
Presión, kPa	700	700	700	700
Asfalto	PG 64-22	PG 64-22	PG 64-22	PG 64-22
$\epsilon_{hAC} \times 10^{-6}$	108	349	229	89
$\epsilon_{vSR} \times 10^{-6}$	246	455	379	196
Nº Cargas Permitidas *	$2.60 \times 10^6$	$8.40 \times 10^5$	$2.90 \times 10^6$	$8.00 \times 10^5$
Fatiga **	$1.21 \times 10^7$	$2.55 \times 10^5$	$1.02 \times 10^5$	$2.29 \times 10^5$
Def. Per. **	$1.96 \times 10^7$	$1.25 \times 10^6$	$2.84 \times 10^5$	$5.43 \times 10^5$
Fatiga **	$2.77 \times 10^6$	$9.51 \times 10^4$	$4.57 \times 10^5$	$3.72 \times 10^5$
Def. Per. SA ***	$6.20 \times 10^9$	$8.15 \times 10^6$	$9.64 \times 10^5$	$4.51 \times 10^5$
PDMAP 10%	$8.84 \times 10^6$	$1.86 \times 10^5$	$7.46 \times 10^5$	$1.67 \times 10^5$
PDMAP 45%	1.22	$2.57 \times 10^5$	$1.03 \times 10^5$	$2.30 \times 10^5$

PDMAP: Probabilistic Distress Models for Asphalt Pavements

\* Guía AASHTO 93: R=90%, S=0.5, ΔPSI=2

\*\* Instituto del Asfalto (6)

\*\*\* CSIR-South Africa (7)

Figura 11. Transductor para medición de deformaciones unitarias.



## 7. Propuesta de Instrumentación

La Figura 16 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, con diferentes niveles para cada una de las 2 configuraciones mostradas en la Figura 16. En cuanto a los termopares, se propone colocar a 4 profundidades: una en la superficie, una a media profundidad de la capa asfáltica, una a nivel de los sensores PAST y una 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 12. Transductor para medición de presión.



Figura 13. Deflectómetro de Profundidad Múltiple.



Figura 14. Medidor de actividad de grietas.

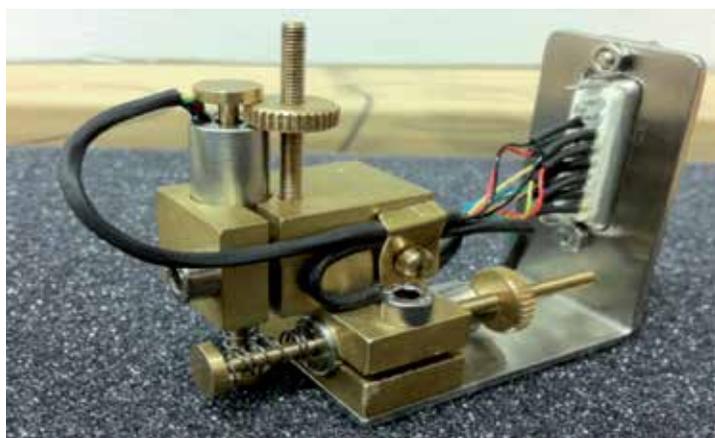
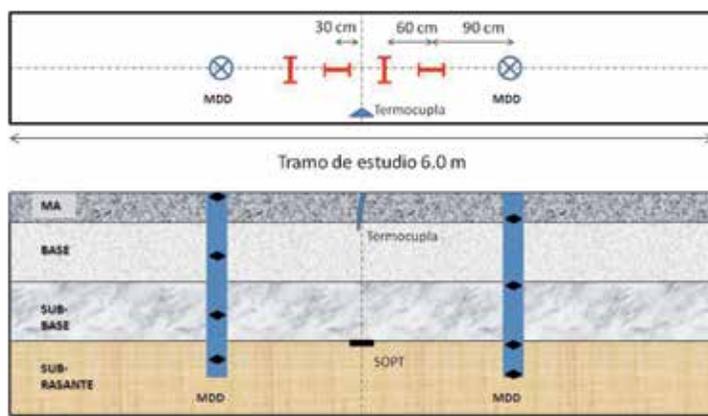


Figura 15. Deflectómetro de superficie del pavimento.



Figura 16. Arreglo de instrumentación



## 8. 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 Láser 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, liviana o portátil)  
 DCP: Cono Dinámico de Penetración

Toma de datos relacionada con pasadas del HVS: se propone tomar datos en la condición inicial, y posteriormente a 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: se propone la 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.

Ensayos FWD/LWD/DCP: se propone realizar 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 después de su falla.

Inspección de daños superficiales: este se refiere, por ejemplo, a la aparición 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.

Muestreo y caracterización de materiales: se propone realizar el muestreo de 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.

## 9. 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:

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 (propriadamente 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.

## REFERENCIAS

1. LTPP (2009). LTPP Beyond FY 2009: What Needs to Be Done?. Reporte FHWA-HRT-09-052.
2. Coetzee, N et al. (2008). The Heavy Vehicle Simulator in Accelerated Pavement Testing: Historical Overview and New Developments. 3rd International Conference APT. Documento consultado el 14 enero del 2013.
3. [www.cedex.es/apt2008/.../The\\_Heavy\\_Vehicle\\_Simulator\\_in\\_accelerated.pdf](http://www.cedex.es/apt2008/.../The_Heavy_Vehicle_Simulator_in_accelerated.pdf)
4. Wiman, L. (2009). Heavy Vehicle Simulator. Documento consultado el 14 de enero del 2013. [http://www.vti.se/templates/Page\\_3250.aspx](http://www.vti.se/templates/Page_3250.aspx)
5. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, Washington, D.C., 1993.
6. Asphalt Institute MS-1, Manual Series No. 1, Thickness Design—Asphalt Pavements for Highways and Streets. Ninth Edition (1981).
7. Theyse, H.L., Overview of the South African Mechanistic Pavement Design Method, South African Transport Conference, July 2000.
8. 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, June 1996, 350 pp.
9. 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 Accelerated Pavement Testing, Boston, MA, March 16-18, 1998.
10. Heavy Vehicle Simulator. Monitoring of test sections and instrumentation. Documento consultado el 6 de abril del 2010. <http://www.gautrans-hvs.co.za/>