
S E C C I Ó N
I N G E N I E R Í A

DESARROLLO DEL CARRUSEL DE FATIGA DE LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

Bernardo Caicedo H.¹

Sergio A. Pérez R.²

RESUMEN

Due to the different problems of pavements in Colombia and willing to contribute to the knowledge on this issue, the research center CITEC at Universidad de los Andes has developed a circular test track. At the present time this equipment is in a preliminary testing stage and the objective, at the center, is to set the proper instrumentation, which can be based on two types of systems. These systems allow the measurement of deformations, strains, temperatures, humidity and other characteristics of each layer in the pavement structure. The final purpose of the circular test track is to permit researchers to be able to backup and improve the existing design methods of pavements.

PALABRAS CLAVES

Carrusel de fatiga, sistemas de instrumentación, sensores de medición, deflexión dinámica.

1. INTRODUCCIÓN

La previsión del comportamiento de los pavimentos es un tema indispensable para poder calibrar modelos que permitan la gestión y la optimización del diseño de los mismos. Es claro que para poder tomar decisiones sobre el diseño y el mantenimiento de pavimentos sería de vital importancia conocer su comportamiento a mediano y largo plazo. En particular se debería conocer con anticipación el modo de degradación del pavimento para que de esta forma se puedan tomar decisiones sobre la estrategia de mantenimiento y de esta forma optimizar el diseño desde el punto de vista de los costos esperados.

Ante esta necesidad es importante anotar que las leyes de degradación todavía no son muy bien conocidas a pesar de los avances teóricos que se han realizado en los últimos años. Esto se explica por la incertidumbre en las variables que intervienen en el comportamiento del pavimento ya que algunas de ellas pueden ser muy dispersas: las propiedades del suelo, la hidrogeología, la calidad y los espesores de los materiales colocados y

otras variables son imposibles o muy difíciles de conocer con anticipación (variación de las condiciones climáticas, evolución de la agresividad del tráfico).

Los estudios necesarios para conocer las leyes de degradación de los pavimentos se deben realizar sobre pavimentos reales, construidos utilizando las mismas técnicas que se usan en una obra normal. El seguimiento y la auscultación deben realizarse con los equipos necesarios que permitan la correcta evaluación del estado del pavimento: medidas de densidad de fisuración, medidas del perfil transversal y longitudinal, medidas de deflexión dinámica y eventualmente medidas de esfuerzos y deformaciones.

Para estudiar las leyes de degradación se puede recurrir a dos tipos de pruebas:

- Los ensayos en tiempo real (RTL = Real Time Loading Test) que consisten en realizar un seguimiento a un tramo de prueba hasta un tiempo igual a la vida útil del pavimento (aproximadamente diez o quince años).

1 Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de los Andes

2 Asistente Graduado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de los Andes.

- Los ensayos acelerados (ALT = Accelerated Loading Test) en los cuales se aplica una carga artificial que reproduce los efectos de una circulación normal pero a una escala de tiempo más corta (algunas semanas o algunos meses).
- Los ensayos acelerados utilizan bien sea pistas especialmente creadas que reciben los vehículos con una frecuencia de paso acelerada, este fue el caso de los ensayos AASHTO de los Estados Unidos (HRB 1961) o los dispositivos especiales tales como los carruseles de fatiga que existen en diversos laboratorios alrededor del mundo.

Las pruebas en tiempo real son las que se realizan con mayor frecuencia ya que ellas se pueden ejecutar sin necesidad de grandes equipos. Sin embargo, el largo tiempo necesario para llevar a cabo la experiencia hace que sus resultados sean difíciles de interpretar, además es frecuente que se interrumpa prematuramente el estudio. Existen también dificultades en la interpretación debido a que las técnicas de construcción, medida y cargas actuantes pueden evolucionar en el tiempo.

Como ejemplos recientes de ensayos a gran escala en tiempo real tenemos la experiencia iniciada en los Estados Unidos en 1987 y que se continúa hasta hoy en día (FHWA 1996). Esta experiencia se denomina LTPP (Long Term Pavement Performance Program) y se lleva a cabo dentro del marco SHRP (Strategic Highway Research Program) este programa consta de aproximadamente 2000 secciones de vías localizadas en los Estados Unidos y Canadá.

En Europa no existe actualmente ninguna acción unificada en este sentido, sin embargo la suma de los programas iniciados por los diferentes países europeos superan ampliamente el tamaño de estudio LTPP. Con base en estos resultados la comisión Europea decidió realizar un banco de datos que agrupan los resultados de las experiencias realizadas en los diferentes países de la Unión.

Con el fin de poder contar en Colombia con una pista de carga acelerada sobre pavimentos ALT, en 1998 la Universidad de los Andes comenzó el desarrollo de un carrusel de fatiga de pavimentos. Este equipo comenzó su operación a comienzos del año 2000 y actualmente se encuentra en la etapa de pruebas preliminares e instalación de la instrumentación.

2. DESCRIPCIÓN DEL CARRUSEL DE FATIGA DE LA UNIVERSIDAD LOS ANDES

El Carrusel de Fatiga de la Universidad de los Andes se diseñó con el fin de cumplir con los siguientes propósitos:

- Mejorar la comprensión del comportamiento mecánico de los pavimentos,
- Comparar la agresividad de las diferentes cargas por eje,
- Verificar la validez de los procedimientos de diseño,
- Conocer de manera acelerada el mecanismo de degradación del pavimento,
- Comparar las metodologías de estudio en el laboratorio con los resultados obtenidos en el terreno,
- Estudiar la influencia de los parámetros climáticos en el comportamiento del pavimento.

2.1 Descripción de las Instalaciones

El carrusel de fatiga de la universidad de los Andes está ubicado en el Centro de Innovación Tecnológica de la Facultad de Ingeniería CITEC el cual se encuentra localizado en la zona de Puente Aranda en la ciudad de Bogotá. Debido a que el comportamiento de los pavimentos depende en gran medida de las condiciones climáticas, condiciones que son difíciles de reproducir en laboratorio, el diseño del carrusel se realizó de tal forma que sea posible su transporte e instalación en cualquier sitio del país. El carrusel (fotografía 1) posee una pista circular de 4 m de ancho y 35 m de largo promedio, la cadencia de aplicación de cargas es elevada, se puede llegar hasta 200.000 repeticiones de carga en un mismo punto por semana. La utilización del equipo es muy flexible ya que puede aplicar cargas de peso variable



Fotografía 1. Carrusel de Fatiga del laboratorio de la Universidad de los Andes (CITEC)

hasta quince toneladas por eje, la velocidad de circulación de las cargas rodantes es variable y puede llegar hasta 40 km por hora.

Con el fin de realizar estudios comparativos, es posible construir una pista conformada por diferentes tramos de prueba, estos tramos pueden tener estructuras de pavimento diferentes y de esta forma se pueden realizar análisis comparativos bajo las mismas condiciones de tráfico, clima y nivel freático.

Las cargas del carrusel simulan el paso de ejes simples, estas cargas circulan alrededor de un radio medio de 11 m. Con el fin de evitar el ahuellamiento, el radio por el cual circulan las cargas puede variar durante el ensayo en una amplitud de 50 cm; es posible programar diferentes opciones para el paso de las cargas rodantes sobre un mismo punto del perfil transversal. En efecto, con respecto al radio medio se puede programar el seguimiento de un ciclo de barrido de cargas similar al que se aprecia en las vías reales; este ciclo de barrido se puede representar por una ley de distribución normal caracterizada por un radio medio y una desviación estándar alrededor de este radio. Tal como ya se anotó, la velocidad de las cargas rodantes puede variar entre 5 y 40 km por hora y las cargas pueden variar hasta quince toneladas por eje, en principio se prevee utilizar cargas de 8, 11 o 13 toneladas por eje.

2.2 Instrumentación de las Estructuras de Pavimento

Se prevee utilizar dos tipos de instrumentación: un sistema de instrumentación destinado al seguimiento y la auscultación del comportamiento del pavimento y otro sistema destinado a la medida de las variables climáticas. Los diferentes tramos de prueba (hasta 4 estructuras diferentes) se pueden instrumentar hasta con 48 sensores de diferente tipo: deformímetros eléctricos, sensores de deflexión dinámica, sensores de esfuerzo total, sensores de deformación vertical. Para la medida de los factores ambientales y climáticos se pueden colocar sensores de temperatura, tensiómetros, sondas TDR, psicrómetros, etc. Estas medidas se pueden complementar con otros métodos de auscultación a partir de la superficie del pavimento: deflexión, perfil longitudinal, perfil transversal, fisuración. Estas medidas se pueden realizar periódicamente o siguiendo sensiblemente un ritmo semilogarítmico en función del número de repeticiones de carga, si la estructura lo justifica se pueden realizar observaciones con mayor frecuencia.

2.3 Adquisición e Interpretación de

Resultados

Los resultados de los sensores se reciben en una central de adquisición de datos multi canal. Esta central realiza medidas de 8 canales simultáneamente en alta frecuencia (100 KHz). Estas señales se archivan en la memoria del computador con el fin de realizar el análisis posterior.

2.4 Instrumentación para la Medida del Comportamiento del Pavimento

Tal como ya se anotó, el comportamiento del pavimento puede medirse durante el paso de las cargas rodantes. Para el diseño de los sensores destinados a la medida de los diferentes parámetros de control se deben tener en cuenta dos tipos de problema: la confiabilidad en la respuesta medida y la durabilidad del sistema de medida.

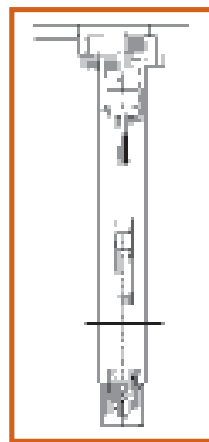
Cuando se instala un sensor en un material de pavimento, éste puede tener un efecto en la distribución de esfuerzos y deformaciones en el material. Para que un sensor sea confiable, la respuesta debe ser la misma que ocurriría en ese punto si no existiese el sensor.

La durabilidad también puede ser un problema cuando los ensayos se deben extender en un periodo de tiempo muy elevado.

Los diferentes tipos de sensores que se pueden utilizar son: sensores de desplazamiento, sensores de deformación y sensores de esfuerzos.

2.4.1 SENSORES DE DESPLAZAMIENTO

Los desplazamientos pueden medirse en la superficie del pavimento. Estas medidas pueden realizarse con acelerómetros colocados al interior de la estructura.



Para determinar las deflexiones, las señales de los acelerómetros pueden manipularse mediante un algoritmo de doble integración y de esta forma se pueden obtener los desplazamientos. Puesto que la señal de respuesta en aceleración que produce el paso de una carga rodante tiene un alto contenido en bajas frecuencias, esta integración pue-

Figura 1. Sensores de deflexión dinámica

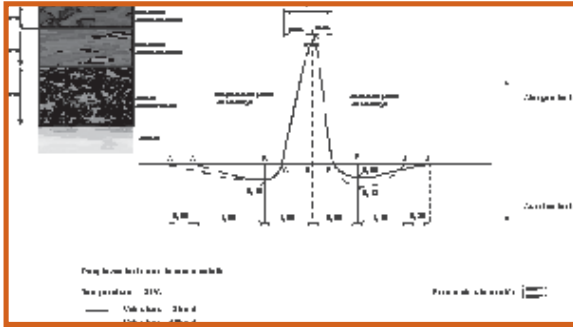


Figura 2. Señal recibida ante el paso de carga

de presentar problemas. Una alternativa es utilizar el deflectómetro de profundidad múltiple (MDD de Beer 1988) el cual está basado en un deformímetro tipo LVDT con referencias fijas a varias profundidades. Este tipo de dispositivo puede utilizarse en configuración única y de esta forma se convierte en un sensor de deflexión dinámica.

Los sensores de deflexión dinámica tienen la forma que se indica en la figura 1, estos sensores constan de una barra de longitud aproximada de 6 m la cual está anclada en su extremo en un punto en donde las cargas rodantes no producen desplazamiento del suelo. El otro extremo de la barra sirve de referencia para un sensor de desplazamiento inductivo el cual está fijo a la superficie del pavimento. Con este sensor es posible medir la deflexión durante el paso de la carga rodante y compararla con las previsiones de los modelos de cálculo (figura 2).

2.4.2 MEDIDAS DE DEFORMACIONES EN LAS CAPAS ASFÁLTICAS

La deformación horizontal en la parte inferior de una capa asfáltica es un parámetro de diseño muy importante. En 1982 la OCDE inició un programa de investigación para el desarrollo de instrumentación capaz de realizar medidas dinámicas en un pavimento. A raíz de este

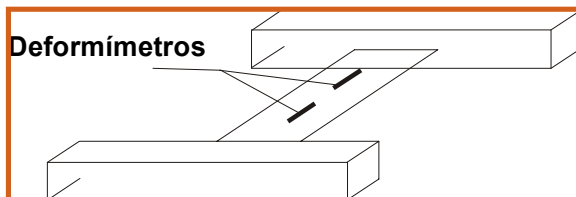


Figura 3. Sensores para medición de Deformaciones horizontales en la base de materiales asfálticos

estudio se pudieron comparar diferentes dispositivos hasta llegar a deformímetros compuestos por varias capas protegidas contra la temperatura y el impacto mecánico (figura 3).

Este tipo de sensores tienen la forma que se indican la figura 3 y permiten realizar medidas de deformación horizontal en la base de materiales asfálticos tales como se muestra en la figura 4. Estas mediciones permiten calibrar modelos de cálculo en computador y comparar la resistencia a la fatiga que se obtiene en el campo con la resistencia a la fatiga obtenida en laboratorio.

2.4.3 MEDIDA DE ESFUERZOS EN LOS MATERIALES NO LIGADOS.

Numerosos estudios teóricos se han realizado con el fin de desarrollar sensores que tengan una alta rigidez en relación con el medio en el cual se colocan (baja flexibilidad) y que tengan una relación entre la radio y el espesor baja. Las celdas de presión total que se utilizarán en el carrusel fueron desarrolladas por Askegard (1998) y tienen la forma que se indica en la figura 5.

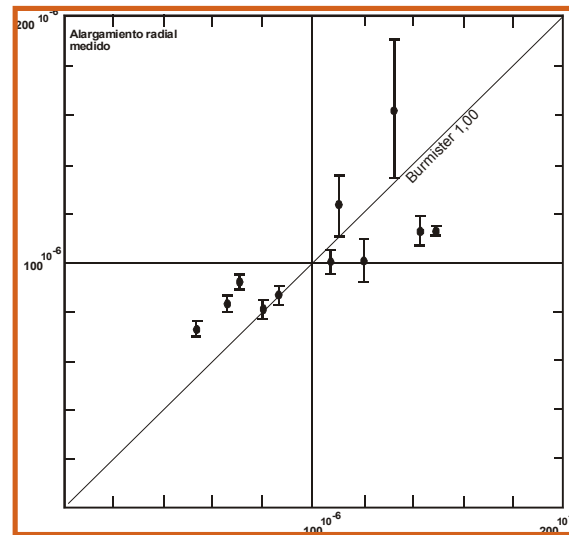


Figura 4. Medidas de deformación horizontal en la base de materiales asfálticos

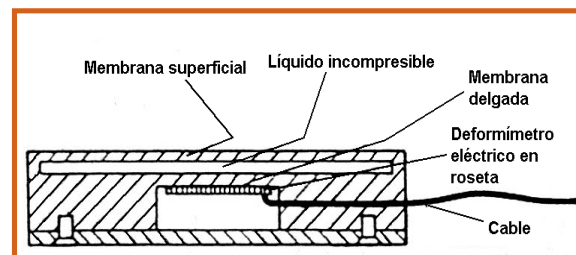


Figura 5. Celdas de baja presión

Estas celdas tienen una cavidad llena con un líquido que asegura una alta rigidez, al mismo tiempo el líquido suprime las altas frecuencias y de esta forma se obtiene una señal con un bajo nivel de ruido.

2.4.4 DEFORMACIONES EN LOS MATERIALES NO LIGADOS

Las medidas de deformación tanto estáticas como dinámicas se pueden realizar utilizando deformímetros del tipo que se muestra en la figura 6. El tipo de dispositi-

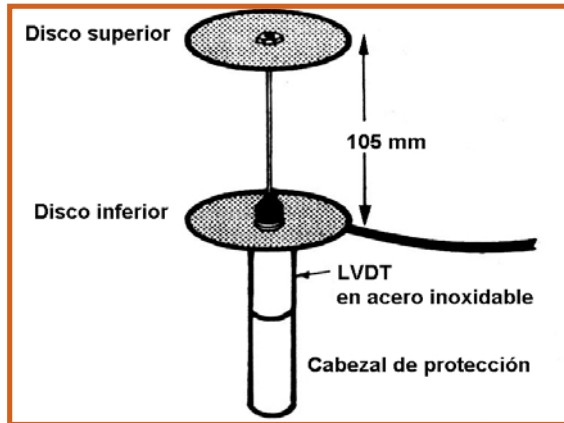


Figura 6. Deformímetro de placas para mediciones estáticas y dinámica

vos que se pueden utilizar en el carrusel de fatiga consta de dos placas fijas en dos niveles diferentes de la capa de pavimento, estas dos placas están conectadas por medio de un eje que a su vez acciona un deformímetro del tipo LVDT.

2.5 Medidas de las Condiciones Climáticas

Las condiciones climáticas desempeñan un papel de vital importancia en el comportamiento de los pavimentos. En particular en el caso de los pavimentos flexibles la temperatura juega un papel preponderante y en el caso de estructuras asfálticas gruesas el gradiente de temperatura también es del mayor interés. Además de la temperatura, es importante medir las variaciones de humedad y succión en las capas no ligadas ya que de



Fotografía 2. Sondas de reflectometría

estas variables depende la rigidez de los materiales no ligados.

2.5.1 SENSORES PARA LA MEDIDA DE TEMPERATURA

Como sensores para la medida de la temperatura se pueden utilizar termopares. El principio de funcionamiento de estos dispositivos consiste en la medida de la corriente inducida en un par eléctrico constituido por cables de metal diferente. Estos sensores son de bajo costo y por esta razón es posible instalarlos en numerosos puntos de la estructura de pavimento.

2.5.2 SENSORES DE MEDIDA DE LA HUMEDAD DE MATERIALES NO LIGADOS

La humedad es un parámetro fundamental en la rigidez de los materiales no tratados. El control de la humedad también es de vital importancia en el estudio de la migración de agua bajo los pavimentos y en el estudio de la influencia de las condiciones climáticas en el desempeño del pavimento.

Para la medida de la humedad se prevé la instalación de sondas de reflectometría en el dominio del tiempo TDR, estas sondas tienen la apariencia que se muestra en la fotografía 2 y están basadas en la medida de la constante dieléctrica del suelo. La constante dieléctrica del suelo está directamente relacionada con la humedad volumétrica de suelo y mediante una correlación apropiada este tipo de sensor permite obtener la humedad ponderal del suelo.

2.5.3 MEDIDA DE LA SUCCIÓN DE LOS MATERIALES NO LIGADOS

El aumento o disminución de la succión está directamente ligado con las variaciones de humedad del suelo. La succión (presión de poros negativa) es el parámetro que permite relacionar la humedad del suelo con su rigidez o resistencia. Por esta razón es importante conocer los cambios de succión para así poder ligar los aspectos climáticos con las propiedades mecánicas de las capas de pavimento.



Fotografía 3. Equitensiómetro para medir la succión



Figura 7. Psicrómetro

Para medir la succión se utilizan sensores de diferentes tipos: los equitensiómetros (fotografía 3) basados en la medida del cambio de humedad de un bloque de cerámica con porosidad calibrada y los psicrómetros los cuales están basados en la medida del calor de condensación o evaporación en un par termoeléctrico (figura 7).

2.5.4 MEDIDAS A PARTIR DE LA SUPERFICIE

Además de las medidas dinámicas que se realizan durante la operación del equipo, es posible realizar medidas sobre la superficie del pavimento una vez se detiene el carrusel. Estas medidas pueden ser: deflexiones estáticas con viga Benkelman, deformaciones en un perfil transversal, deformaciones en perfil longitudinal y densidad de fisuras. Con base en estas medidas es posible calibrar los modelos de evolución de la degradación del pavimento en el tiempo o en función del número de repeticiones de carga.

3. CONCLUSIONES

Con el Carrusel de Fatiga de la Universidad de los Andes se espera avanzar en diferentes temas de investigación en el tema de los pavimentos. En particular se espera realizar investigaciones en los siguientes temas entre otros:

- Verificación de modelos de cálculo.
- Durabilidad de los pavimentos.
- Estudios comparativos de estructuras de pavimentos.
- Influencia del clima en el comportamiento del pavimento.
- Estudios forenses de vías construidas

- Optimización del diseño de pavimentos.

Tal como se puede observar, el carrusel de fatiga de pavimentos de la Universidad de los Andes es una máquina que sin duda alguna servirá de gran apoyo al desarrollo de la infraestructura vial del país.

Los estudios que se realicen con este equipo servirán para conocer mejor las formas de degradación de los pavimentos y de esta forma se podrán diseñar obras con una durabilidad conocida.

4. REFERENCIAS

- Askegaard, V. "Stress and strain measurement in solid materials", Report N° 9508, Series S, Department of Structural Engineering and Materials, The Technical University of Denmark, 1996.
- Gomes Correia, A. "Unbound Granular Materials. Laboratory Testing, In-situ Testing and Modelling", Technical University of Lisbon, A.A. Balkema, Rotterdam, 1999.
- Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, "French Design Manual for Pavements Structures", LCPC - SETRA, 1997.
- Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, "Journées d'information. Bitumes et Enrobés Bitumineux", Ministère de l'Équipement et du Logement LCPC, Paris CEDEX 15, 1972.
- OECD "Full-scale Pavement Test", Road Transport Research, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris 1985a.
- OECD "Strain measurements in Bituminous Layers", Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris 1985b.
- Ullidtz, P., Askegaard, V. & Sjølin, F.O. "Normal Stresses in a Granular Material Under Falling Weight Deflectometer Loading", Transportation Research Record 1540, Transportation Research Board, 1996.
- Ullidtz, P., "Modelling Flexible Pavement Response and Performance", Polyteknisk Forlag, Lyngby 1998.