

NO-LINEALIDAD DE MATERIALES GRANULARES Y SUELOS EN DEFLECTOMETRÍA

Luis Guillermo Loría Salazar, Edgar Camacho Garita y Fabricio Leiva Villacorta

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica,
400 metros norte Muñoz y Nanne, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica

Tel: (506) 2511-2500 / 2511-2524

luis.loriasalazar@ucr.ac.cr, edgar.camachogarita@ucr.ac.cr, fabricio.leiva@ucr.ac.cr

Introducción

El comportamiento no lineal de materiales granulares y suelos ha sido ampliamente conocido desde los planteamientos de Terzagui hasta investigaciones recientes. La evaluación adecuada de dicho comportamiento es fundamental para la determinación correcta de los módulos de rigidez de las capas de un pavimento y su evaluación estructural. Si este fenómeno no se considera de manera precisa, se pueden cometer errores importantes al estimar las respuestas (esfuerzos, deformaciones y deflexiones) de un pavimento.

Como parte de la investigación de ensayos acelerados en pavimentos a escala natural realizada por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, se construyeron e instrumentaron cuatro estructuras de pavimento para ser evaluadas mediante un Simulador Pesado de Vehículos. La rueda de carga fue utilizada a una velocidad promedio de 10 km/hr, con niveles de carga de 40 kN, 60kN, 70 kN y 80 kN, a una temperatura promedio de 23 °C y con una desviación lateral de 10 cm – para cubrir un área de ensayo de 1,2m de ancho por 6m de largo.

El perfil deflectométrico de cada pavimento fue estudiado por sensores de deflexión de profundidad, deflectómetro superficial y deflectómetro de impacto. Acá se presentan los resultados de las mediciones de deflexión realizadas y la estimación de módulos de rigidez para la primera pista ensayada (7 cm de mezcla asfáltica en caliente, 25 cm de base estabilizada con cemento, 30 cm de sub-base granular y subrasante).

El análisis realizado muestra resultados similares en las curvas de deflexión obtenidas mediante los sensores de deflexión de profundidad y el deflectómetro superficial. Ambos equipos evidencian ampliamente el comportamiento no lineal esperado. El deflectómetro de impacto reportó resultados contrastantes con los otros equipos.

Aspectos generales

El experimento presentado se enmarca en el proyecto denominado Promeval, desarrollado por la Unidad de Materiales y Pavimentos (UMP) del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR). Promeval es una iniciativa enfocada al mejoramiento de la infraestructura vial de Costa Rica, mediante el desarrollo tecnológico en el campo de las carreteras y el diseño estructural de pavimentos.

Como parte de la necesidad de profundizar en el estudio del comportamiento y desempeño de las diferentes estructuras de pavimento en Costa Rica se adquirió un equipo para el ensayo acelerado de pavimentos. Mediante dicho equipo desde el año 2013 se realizan ensayos acelerados de pavimentos a escala real en Costa Rica, constituyéndose el laboratorio de pavimentos conocido como PaveLab.

Equipos utilizados

Deflectómetro de superficie del pavimento (RSD)

El RSD es básicamente una versión electrónica de la viga Benkelman, con capacidad de transferencia de datos de forma inalámbrica. Se utiliza para medir el cuenco de deflexión de la superficie bajo la carga del equipo HVS. Para esto se hace pasar la rueda cargada, normalmente con 40kN sobre el centro del tramo de ensayo a una velocidad de 2 km/hr.

El RSD consiste de una viga T que tiene un punto de medición en el filo de la viga constituido por un tornillo ajustable; y dos apoyos de referencia en el otro lado de la viga. A un 1/6 de la longitud de la viga desde la intersección T, se localiza el Transductor Diferencial Variable Lineal (LVDT) el cual se encarga de realizar la lectura con referencia al punto de medición.

Para el ensayo el punto de soporte ajustable del RSD se localiza entre o junto a las dos llantas de una configuración de llanta dual. Los neumáticos se alejan del punto de referencia del RSD y se desplazan más allá del punto de medición. La posición de los neumáticos se registra a intervalos regulares (preseleccionados). El pavimento se deflecta y el LVDT registra el movimiento relativo de la superficie del pavimento con respecto al punto de referencia.

Esos datos se registran y el cuenco de deformación elástica generada a partir de los datos también. La exactitud en la medición es aproximadamente 10 micrones. La recolección de datos es automática y de esta manera puede ser utilizado el RSD para calcular el cuenco de deflexiones entero, que consiste de 256 puntos de datos. Debido a la naturaleza del ensayo y a la velocidad de medición es necesario detener el funcionamiento del HVS durante las mediciones del RSD. El RSD es un dispositivo versátil de monitoreo del pavimento, el cual se puede utilizar para medir los cuencos de deflexión separadamente del HVS.

Deflectómetro Multi-profundidad (MDD)

Los deflectómetros de profundidad múltiple o MDD consisten en una serie de dispositivos patentados de medición que se instalan, en carretera o en una sección de prueba, mediante una perforación en la superficie.

El componente primario del sistema patentado MDD es una serie de módulos LVDT, los cuales se colocan en un agujero de 39 mm de diámetro taladrado en la superficie. Se pueden montar hasta 6 módulos de LVDT a varias profundidades, separados al menos 150 mm.

Una vez que el agujero ha sido taladrado en la sección de prueba, se coloca una varilla de anclaje en la subrasante aproximadamente 3 m por debajo de la superficie del pavimento. La varilla de referencia está conectada a la varilla de anclaje por medio de un conector para permitir la remoción

y reúso de los módulos LVDT. Se instala una membrana antes de la instalación de los módulos LVDT.

El MDD se utiliza para medir la deflexión elástica instantánea y la deformación permanente acumulada en las diferentes capas del pavimento. Los datos de deformación plástica o permanente se han utilizado para desarrollar las funciones de transferencia que relacionan las repeticiones de carga con la deformación de los materiales de construcción de carreteras. Los datos de deflexión elástica se pueden utilizar para determinar el módulo elástico efectivo de cada capa del pavimento.

El anclaje de los módulos LVDT al suelo se lleva a cabo por medio de un número de pequeños balones de acero que son forzados a salir de una manga en contra de la membrana a la profundidad deseada. Los módulos LVDT miden el desplazamiento del suelo relativo a la barra de referencia con una precisión de ± 10 micrones. La parte superior del agujero del MDD se sella con una tapa, lo cual contiene un conector al sistema que toma los datos.

Deflectómetro de Impacto

El deflectómetro de impacto (FWD por sus siglas en inglés) es un equipo ampliamente utilizado para la evaluación del estado estructural de pavimentos flexibles, semirrígidos y rígidos. El operador controla todas las funciones del deflectómetro desde el ordenador que se instala en el vehículo remolcador (en caso de ser con remolque).

La deflectometría de impacto se trata de un ensayo no destructivo, que simula el comportamiento del pavimento ante el paso de los vehículos pesados. A través del análisis de este cuenco se obtiene información de la rigidez de la estructura de pavimentos y del suelo de fundación, siendo muy importante para definir la condición de la estructura a lo largo de un proyecto.

La configuración de geófonos utilizado comúnmente con los equipos del LanammeUCR incluye mediciones a distancias de 0, 200, 300, 450, 600, 900, 1200, 1500 y 1800 mm. Para el equipo FWD, tanto el despliegado del medidor de carga y almacenamiento tienen una resolución máxima de 200 Newtons. De igual forma el despliegado de las mediciones de deflexión y almacenamiento tiene una resolución máxima de $\pm 1.0 \mu\text{m}$. Adicionalmente, la duración del impulso de la carga se encuentra entre 20 y 60 ms.

Análisis comparativo de las deflexiones

Las mediciones deflectométricas se realizaron antes, durante y después del desarrollo del ensayo (aplicación de carga), permitiendo con esto tener un mejor panorama del comportamiento de la estructura.

Las tres fuentes de información como se mencionó anteriormente son mediciones mediante FWD, RSD y MDD. Donde las diferencias de las mediciones consisten esencialmente en la naturaleza de los equipos y en la forma en que se aplicada la carga

La carga del FWD consiste en una carga de impacto 40kN, mientras que para aplicar las cargas para RSD y MDD se utiliza la rueda del equipo HVS, la cual se aproxima a los puntos de medición. La velocidad de la rueda es de 2km/hr para la medición RSD y de 10km/hr para la medición por MDD. Constituyendo estas variaciones en la mayor limitación de la comparación.

En la Figura 12 se pueden apreciar las deflexiones medidas y el respectivo módulo de superficie calculado. En la primera parte de la imagen se observa la comparación de las tres mediciones realizadas para la condición inicial.

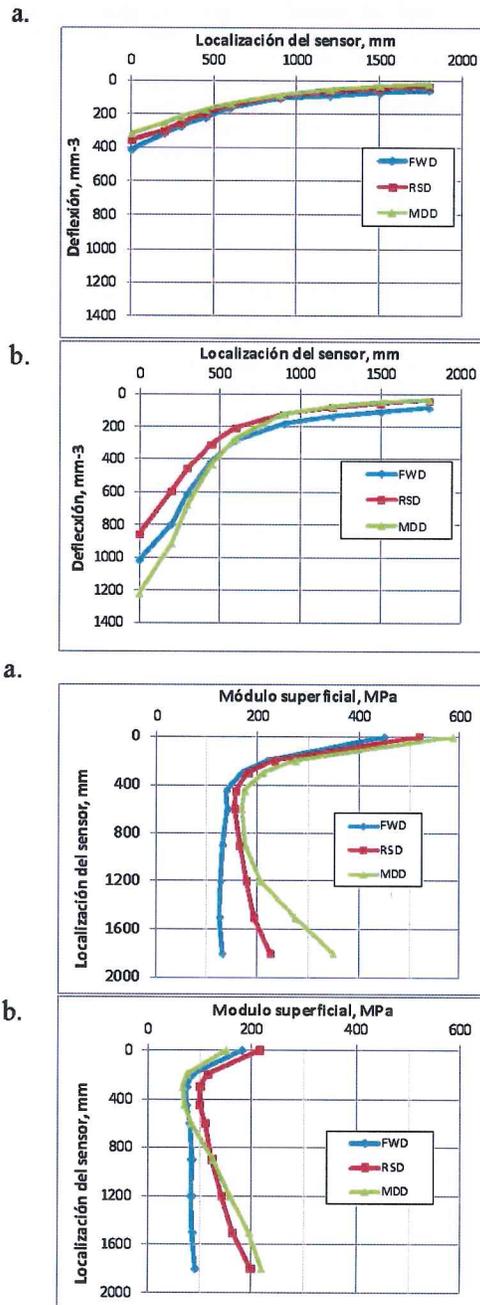


Figura 12.-Comparación de los valores medidos y calculados para deflexión y módulo superficial. Para la condición inicial (a) y para la condición final (b).

Al inicio del ensayo las tres mediciones de deflexión fueron similares, siendo ligeramente más altas las realizadas mediante FWD. Un análisis mediante el cálculo del módulo superficial muestra que las mediciones con FWD teóricamente reflejan el comportamiento de un material elástico lineal de las capas inferiores; mientras que las mediciones realizadas

mediante RSD y MDD reflejan un comportamiento moderadamente elástico no lineal (Ullidtz, 1987).

Por lo tanto, un mayor módulo superficial cerca del centro de la carga aplicada sugiere una mayor capacidad de soporte en las capas superiores (mayor módulo). Al final del ensayo se obtuvieron deflexiones significativamente mayores, asociadas a una reducción en la capacidad de soporte de la estructura; esto se observa en la Figura 12.

De forma similar, para el final del ensayo se puede apreciar una reducción de los módulos superficiales, siendo mayor dicha reducción para las capas superficiales. Así mismo es un poco mayor la reducción de capacidades medida con MDD, ante lo cual es importante indicar que el dispositivo está más expuesto al efecto del paso de la rueda, lo cual podría llegar a afectar un poco su lectura respecto a la referencia inicial.

Respecto a la linealidad del comportamiento de las capas inferiores, podemos apreciar que las lecturas mediante FWD son consistentemente lineales, aún con la reducción de los módulos superficiales. Para las lecturas con RSD y MDD se mantiene un comportamiento no lineal de las lecturas. Considerando los resultados y lo planteado por Bazi (2012), los resultados reflejan un comportamiento no lineal del material de subrasante y no necesariamente un efecto de capa rígida del fondo de la fosa de ensayo.

Conclusiones y recomendaciones

De los resultados del estudio realizado se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Las deflexiones medidas al final, respecto a las iniciales aumentaron 247% para FWD, 241% para RSD y 387% para MDD.
- De forma similar el módulo superficial en se redujo a 40,5% para FWD, 41,5% para RSD y a 25,8% para MDD; esto respecto a los valores iniciales.
- Las mediciones muestran las limitaciones de la deflectometría de impacto para documentar la no linealidad de los materiales granulares y suelos cohesivos.
- La velocidad de aplicación de la carga es una variable que debe ser estudiada con mayor detalle para profundizar en el fenómeno.
- Las mediciones realizadas mediante RSD y MDD reflejan de mejor forma la reacción real de las estructuras por la forma en que la carga se aproxima a los sensores.
- Se deben ampliar el análisis de módulo superficial a otros tramos de ensayo, de manera que se puedan comparar los resultados.

Referencias Bibliográficas

- Baker Harris B., Buth Michael R., Van Deusen David A. (1994). "Minnesota Road Research Project: Load response Instrumentation Installation and Testing Procedures". Minnesota Department of Transportation.
- Leiva-Villacorta, F. and D. Timm. (2011). "Analysis of Measured Versus Predicted Critical Pavement Strain Responses". *Proceedings of the 90th Annual Transportation Research Board*, Washington, D.C.
- Coetzee, N et al. (2008). "The Heavy Vehicle Simulator in Accelerated Pavement Testing: Historical Overview and New Developments". *3rd International Conference APT*.
- LTPP. (2009). "LTPP Beyond FY 2009: What Needs to Be Done?".

Report FHWA-HRT-09-052.

- Metcalf, J. B. (1996). "NCHRP Synthesis of Highway Practice 235".
- Ullidtz, P. (1987). "Pavement Analysis Development in Civil Engineering". *Vol. 19*, Amsterdam, the Netherlands.
- Harvey, J. T., L. du Plessis, F. Long, S. Shatnawi, C. Scheffy, B-W. Tsai, I. Guada, D. Hung, N. Coetzee, M. Reimer, y C. L. (1996). "Monismith. Initial CAL/APT Program: Site Information, Test Pavement Construction, Pavement Materials Characterizations, Initial CAL/APT Test Results, and Performance Estimates". *Reporte preparado el California Department of Transportation. Reporte No. RTA-65W485-3*. Pavement Research Center, CAL/APT Program, Institute of Transportation Studies, University of California Berkeley. 1996.
- Leiva-Villacorta, F. y D. Timm. (2011). "Analysis of Measured Versus Predicted Critical Pavement Strain Responses". *Proceedings of the 90th Annual Transportation Research Board*, Washington, D.C. 2011.
- Vargas Nordbeck, A., Leiva Villacorta, F., & Aguilar Moya, J. P. (2013). "Capacidad de soporte estructural de la Ruta Nacional 32". San José: LanammeUCR.
- Bazi, G. (2012) "Notas del Curso Evaluation of Layer Moduli and Overlay Desing", San José, Costa Rica. Noviembre 2012.