

DIAGNÓSTICO DE NO LINEALIDAD DE MATERIALES GRANULARES Y SUELOS MEDIANTE EL USO DE TÉCNICAS DEFLECTOMÉTRICAS

Luis Guillermo Loría¹, Edgar Camacho Garita², Fabricio Leiva Villacorta³

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

² Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica. edgar.camachogarita@ucr.ac.cr

³ Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica. fabricio.leiva@ucr.ac.cr

Resumen

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. Aquí 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.

Palabras clave: Simulador de Vehículos Pesados (HVS), no-linealidad, deflectometría de impacto

1 Aspectos generales

El experimento presentado se enmarca en el proyecto denominado Promevial, desarrollado por la Unidad de Materiales y Pavimentos (UMP) del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR). Promevial 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 (Figura 1). 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.



Figura 1 Equipo para ensayo de pavimentos a escala real del LanammeUCR, HVS Mark VI (Dynatest).

2 Módulo superficial

El módulo superficial es un parámetro utilizado para medir la capacidad estructural que tiene una estructura de pavimento. Este parámetro es independiente del espesor de cada una de las capas que tiene la estructura del pavimento. Depende de la rigidez aparente o equivalente de la estructura de pavimento. El módulo superficial se utiliza para asegurar la calidad de los datos de deflexión del pavimento, por lo que es un parámetro de gran utilidad en la deflectometría, donde las mediciones de módulo superficial más cercas al plato de carga están relacionadas con la capacidad estructural de a las capas superiores de la estructura (superficie de rodadura), mientras que las mediciones de módulo superficial más lejanas al plato de carga se encuentran asociadas a la capacidad estructural de las capas inferiores (subrasante). El modulo superficial se puede utilizar para realizar una revisión rápida de si se cuenta con una capa rígida o lecho rocoso.

La información obtenida de los módulos superficiales puede ser muy importante ya que obtiene características fundamentales del pavimento. Algunas de las características que se pueden obtener a partir de la información de módulos superficiales es el determinar si se cuenta con una capa rígida cuando el gráfico de módulo superficial contra distancia radial tiene forma de “C” (caracterizado por una “cola larga”) [14], si se cuenta con agrietamiento cuando hay discontinuidades en forma de “S” o si la capa de subrasante es lineal o no lineal dependiendo de si el gráfico tiende a ir paralelo con el eje vertical de distancia radial (si no se cumple, es una capa de subrasante no lineal).

El cálculo del módulo superficial se basa en las ecuaciones de Boussinesq utilizando las deflexiones superficiales. Las ecuaciones de Boussinesq fueron desarrolladas en el año 1885. La teoría original de Boussinesq consiste en determinar los esfuerzos, deformaciones unitarias y deflexiones en un semi-espacio infinito homogéneo e isotrópico de una capa, para una carga concentrada perpendicular a la superficie. Estos valores deben responder a la caracterización de la capa, por lo cual dependen del módulo de esta y su razón de Poisson. Con el tiempo esta teoría se fue desarrollando hasta poder ser aplicadas en sistemas multicapa para cargas circulares.

$$E_0 = 2\sigma_0(1 - \mu^2) \left(\frac{a}{d_0}\right) \quad \text{para } r = 0 \quad (1)$$

$$E_0 = \sigma_0(1 - \mu^2) \left(\frac{a^2}{rd_r} \right) \quad (2)$$

donde, E_0 : módulo superficial, σ_0 : esfuerzo de contacto bajo el plato de carga, μ : módulo de Poisson (típicamente = 0.35), a : radio del plato de carga, r : distancia radial, d_r : deflexión a la distancia r , d_0 : deflexión bajo el plato de carga.

Para los valores presentados se utilizaron una serie de equipos de medición, los cuales se presentan en la siguiente sección.

3 Equipos utilizados

3.1 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.

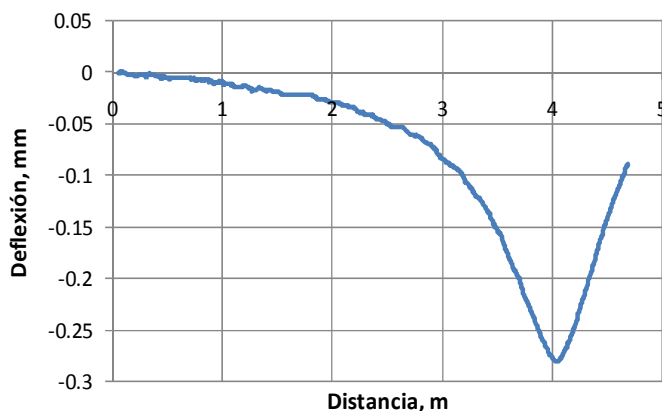
El RSD consiste de una viga T que tiene un punto de medición en el filo de la viga constituido por un tornillo ajustable; y dos apoyos de referencia en el otro lado de la viga. A un 1/6 de la longitud de la viga desde la intersección T, se localiza el Transductor Diferencial Variable Lineal (LVDT) el 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. La Figura 2 muestra al equipo RSD junto al equipo HVS y una curva de deflexión medida a lo largo del primer tramo evaluado.



(a)



(b)

Figura 2 (a) Deflectómetro de superficie del pavimento (RSD) y (b) señal procesada

3.2 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 aspecto superficial de la instalación una vez concluida se puede apreciar en la Figura 3, donde se puede un corte adicional en el sentido transversal del tramo de ensayo permite la colocación de los cables que conectan los sensores LVDT y el sistema de adquisición de datos.



Figura 3 Aspecto superficial de la instalación concluida

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. La Figura 4 muestra al sensor MDD junto a un curvas de deflexión medidas a lo largo del primer tramo evaluado.



(a)

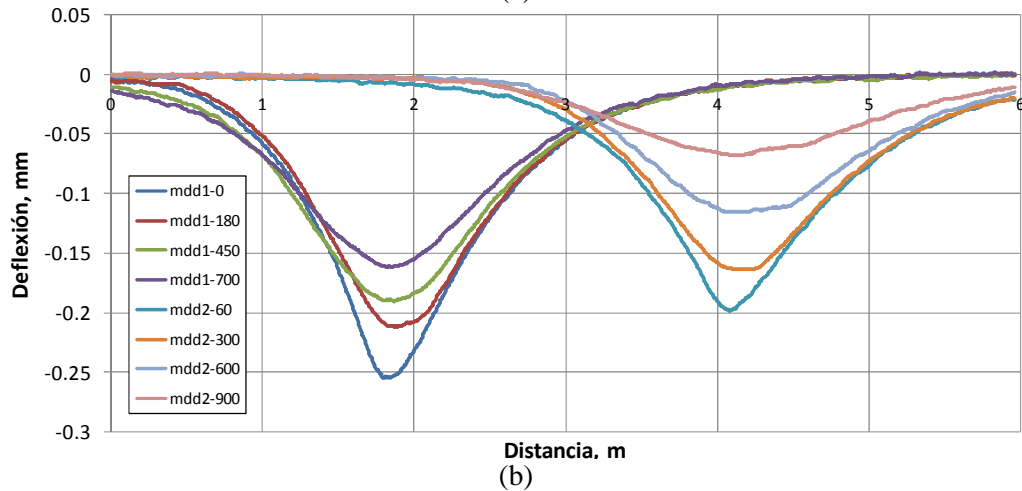


Figura 4 (a) Deflectómetro de Profundidad Múltiple y (b) señal procesada del conjunto instalado

3.3 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). El FWD es un equipo que aplica una carga de impacto a la superficie del pavimento, determinando las deflexiones verticales (envolvente de deflexiones) como se muestra en la Figura 5.

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 desplegado del medidor de carga y almacenamiento tienen una resolución máxima de 200 Newtons. De igual forma el desplegado 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.

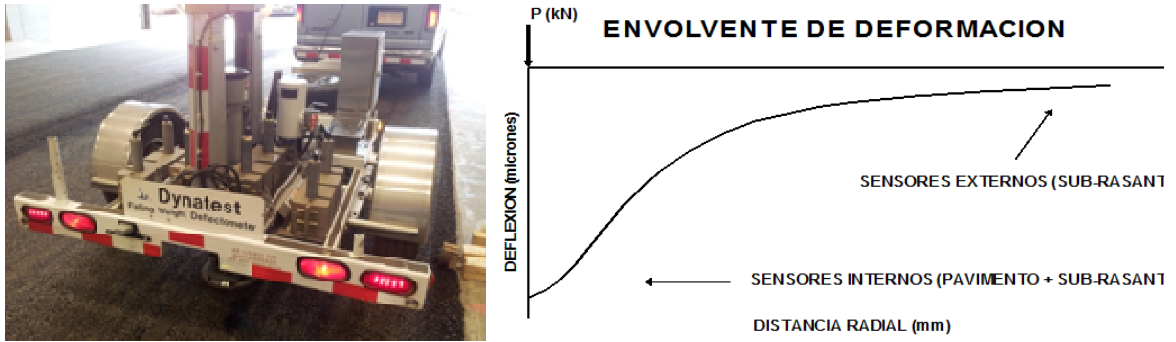


Figura 5 Deflectómetro de Impacto (FWD)

4 Características del proceso de ensayo

Los resultados presentados se refieren al tramo de ensayo denominado 001AC1 el cual es la primera pista ensayada mediante el equipo HVS en Latinoamérica.

La estructura de esta estructura está constituida por 7 cm de mezcla asfáltica en caliente, 25 cm de base estabilizada con cemento, 30 cm de sub-base granular; así como subrasante. La totalidad de la estructura está contenida en una fosa de ensayos especialmente diseñada, la cual mide 22 metros de largo por 9 metros de ancho.

Tanto este tramo experimental como la réplica tienen una longitud de 8.15 m por un ancho de 1,1 m; ambos centrados en el sentido longitudinal con respecto a la sección de pavimento.

El proceso de ensayo de dicha pista se caracterizó por la aplicación repetida de cargas iniciando en 40kN y terminando en 80kN, como se muestra en la Figura 6.

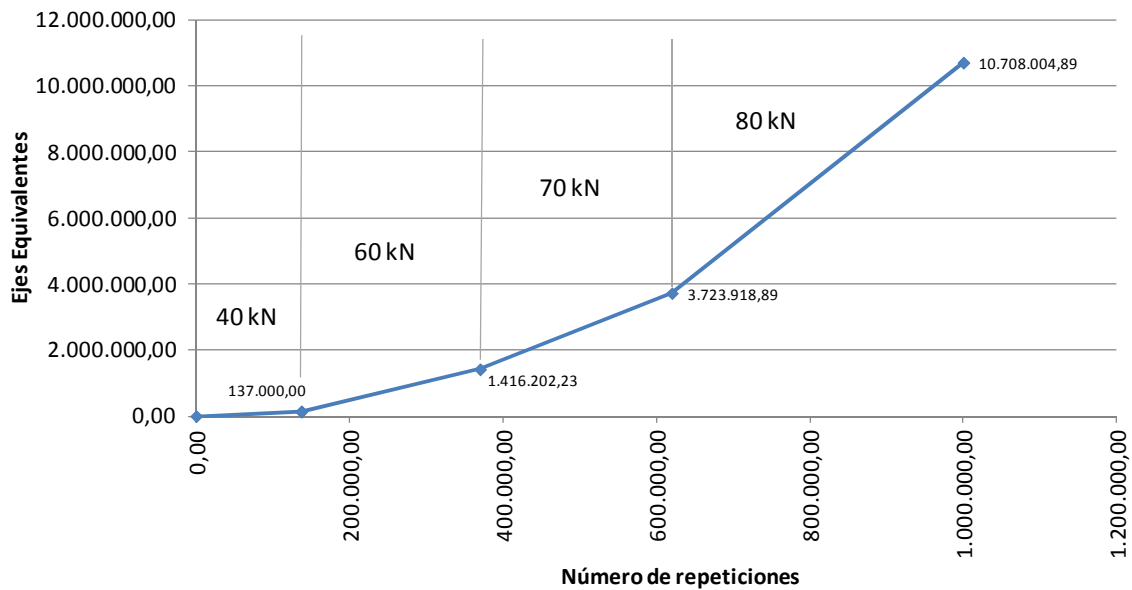


Figura 6 Régimen de aplicación de cargas para el tramo 001AC1

Así mismo el proceso de ensayo de la estructura se caracterizó por agrietamientos leves al final del proceso de ensayo, así como un proceso gradual y sostenido de la deformación superficial; dicho proceso de deformación se puede apreciar en la Figura 7. Donde se alcanzó un criterio de falla del tramo por deformación de la superficie.

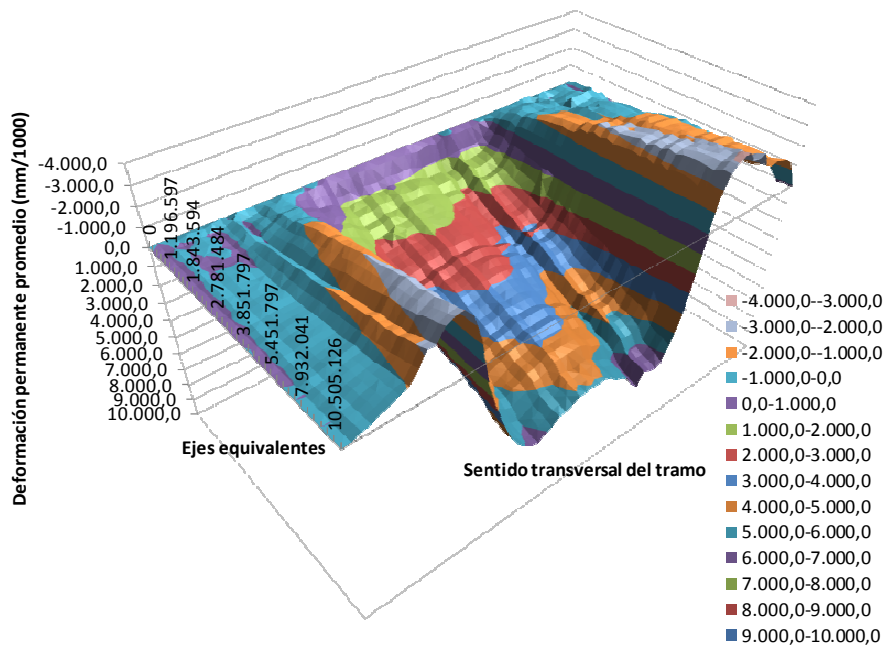


Figura 7 Evolución de la deformación permanente del tramo a lo largo del ensayo

Comparación de la estructura ensayada con las restantes estructuras construidas, según los resultados de deflectometría de impacto (FWD) inicial para las cuatro estructuras construidas.

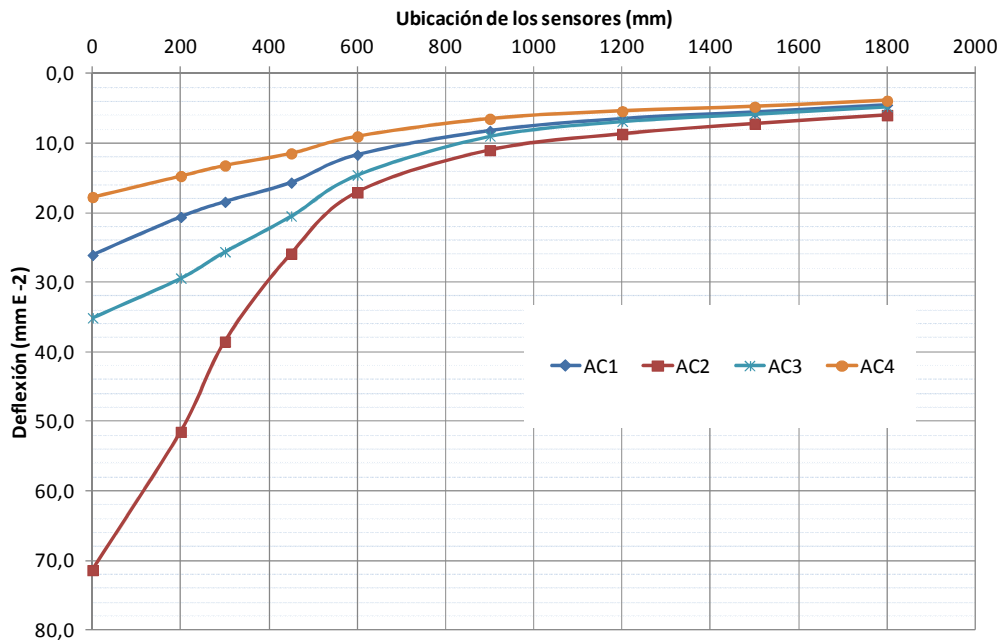


Figura 8 Representación gráfica del promedio de los resultados de deflectometría de impacto, separados por estructura

5 Resultados de las mediciones

A continuación se presentan los resultados procesados de los diferentes sensores instalados y equipo utilizado para obtener una respuesta mecánica en la primera pista de ensayo llamada 001AC1.

5.1 Deflectometría de Impacto

La Figura 9 muestra el promedio de 2 repeticiones de ensayo al mismo nivel de carga de 40 kN para las deflexiones medidas en los 9 sensores por cada estación utilizando el deflectómetro de impacto (FWD). Esto para la sección de pavimento donde se ubica el tramos experimental AC1.

Se observan deflexiones relativamente altas en los extremos de la sección. Cabe resaltar que este comportamiento se da en los sensores cercanos al plato de carga, lo cual es una indicación de que las deflexiones medidas se deben a la capacidad de soporte de las capas superiores y a la vez indica una heterogeneidad en las propiedades de los materiales de las respectivas capas. Por el contrario se observan valores de deflexión en los sensores más alejados del plato de carga relativamente uniformes a lo largo del tramo. Esto es una indicación de poca variabilidad en las propiedades de las capas inferiores.

Con el fin de validar las observaciones previas, existen además algunos indicadores con base en las medidas de deflexión que se usan a nivel internacional para cuantificar la capacidad del paquete estructural o las distintas capas. A saber, estos parámetros se conocen como: Índice Base de Curvatura (BCI por sus siglas en inglés), Índice Base de Daño (BDI por sus siglas en inglés) e Índice de Curvatura Superficial (SCI por sus siglas en inglés).

Los valores de BCI, BDI y SCI se definen matemáticamente de la siguiente forma:

$$BCI = D_5 - D_6 \quad (3)$$

$$BDI = D_3 - D_5 \quad (4)$$

$$SCI = D_1 - D_3 \quad (5)$$

En general se establece que valores altos de BCI y BDI corresponden a estructuras de pavimento con baja resistencia. Para bases estabilizadas con cemento, valores de BCI cercanos o mayores a 80×10^{-3} mm (10) indican potenciales deficiencias estructurales en las capas intermedias. Como puede observarse en la Figura 10 ninguno de los puntos supera este valor. Valores de BDI cercanos o mayores a 100×10^{-3} indican potenciales deficiencias estructurales en las capas de base y como es evidente de la Figura 10, los puntos localizados cerca de los extremos del tramo excedieron dicho límite. Finalmente, el parámetro SCI es indicativo de la capacidad de la capa asfáltica. Sin embargo, dicho valor es muy sensible al espesor de dicha capa.

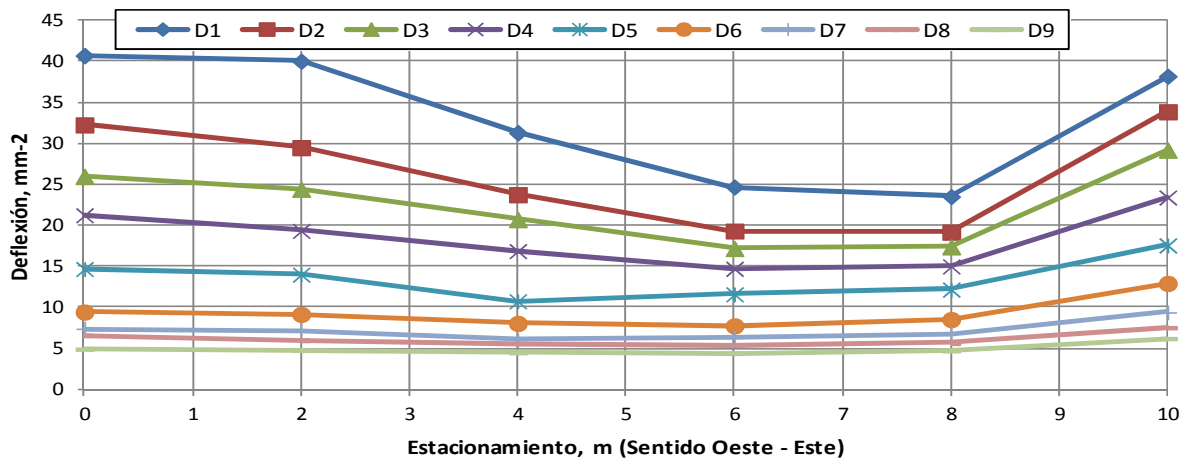


Figura 9 Resultados de ensayo de deflectometría de impacto

De la misma Figura 10 se puede observar que este indicador se encontró por debajo de 160×10^{-3} mm y con poca variabilidad, lo cual es una indicación de homogeneidad de la capas asfáltica a lo largo de la sección donde se realizaron los ensayos de deflectometría. Valores de

SCI cercanos o mayores a 300×10^{-3} mm indican potenciales deficiencias estructurales en las capas superiores. Como puede observarse en la Figura 10 ninguno de los puntos supera este valor. Finalmente, en el caso de la deflexión D0, valores cercanos o mayores a 400×10^{-3} mm indican potenciales deficiencias estructurales del pavimento. En este caso se obtuvieron valores superiores a 400×10^{-3} mm al inicio del tramo.

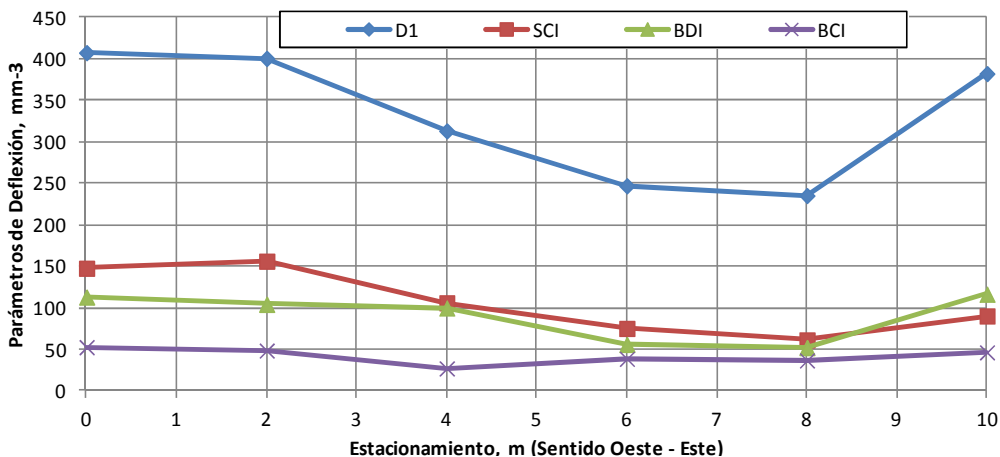


Figura 10 Parámetros de deflexión

Típicamente, la capa de subrasante contribuye entre 60 a 80% con la deflexión obtenida directamente bajo la carga aplicada. Utilizando la teoría de Boussinesq es posible obtener un promedio ponderado de los módulos de una estructura equivalente al pavimento existente. Este valor resultante se conoce como módulo superficial que se puede calcular a lo largo de la curva de deflexión.

A partir del análisis de módulos superficiales se determinó que la subrasante se podía modelar como material infinito y lineal-elástico. Al mantener una relación módulo superficial y distancia radial del plato de carga para los sensores más alejados como se muestra en la Figura 11 se descarta un comportamiento no-lineal y se descarta la influencia de manto rocoso o en este caso la influencia de la losa inferior del tramo experimental.

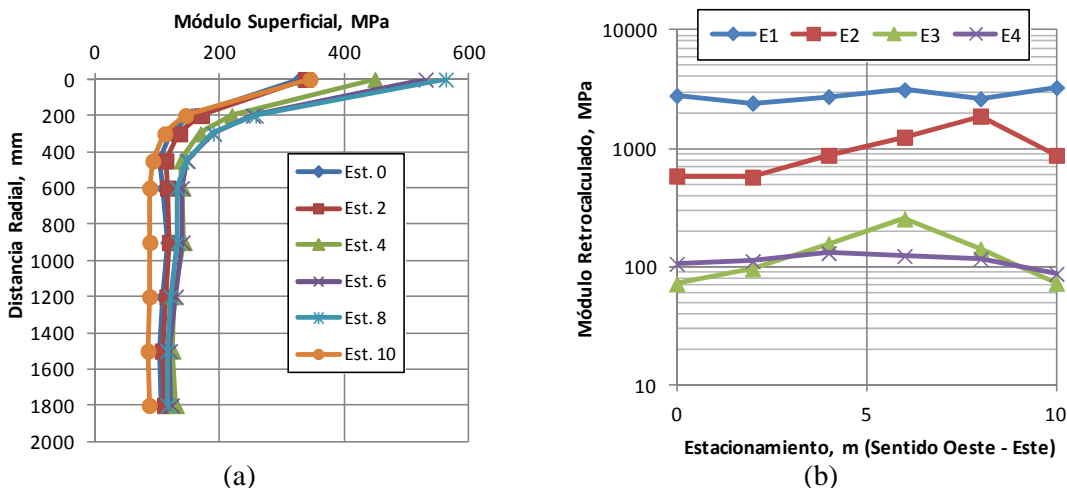


Figura 11 (a)Análisis de módulos superficiales y (b) retrocalculados

El retrocálculo de módulos se realizó simulando una estructura de 4 capas, a saber: capa de subrasante con espesor infinito, subbase granular de 30 cm, base estabilizada con cemento de 24

cm y carpeta asfáltica de 6.3 cm. Los valores de módulo retrocalculados con el programa Elmod se muestran en la Figura 11.

En promedio, el módulo de la capa asfáltica fue de 2826 MPa, el de la base estabilizada de 1004 MPa, y los módulos de la subbase y subrasante de 132 y 76 MPa respectivamente. Este último valor es cercano al valor promedio de módulo superficial de los sensores más alejados de 98 MPa, el cual es una aproximación al módulo de la subrasante.

El comportamiento observado para la subbase granular se puede explicar por la baja compactación aplicada durante el proceso constructivo. El estacionamiento cero del tramo corresponde con la pared de la fosa donde se colocaron los materiales, donde no es posible usar el compactador de rodillo. Por el contrario, hacia el centro del tramo se realizó efectivamente la compactación deseada donde se obtuvieron valores de módulo esperados para este tipo de material.

5.2 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 es 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.

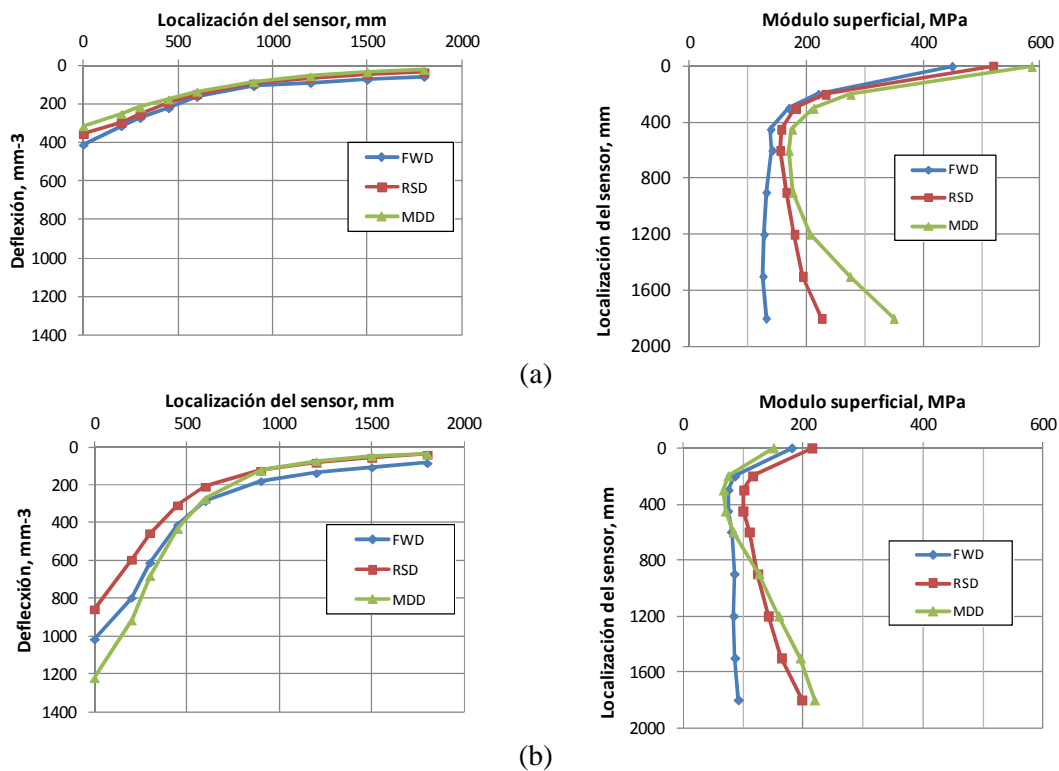


Figura 12 Comparación de los valores medidos y calculados para deflexión y módulo superficial. Para la condición inicial (a) y para la condición final (b)

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 [7].

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 [14], 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.

6 Conclusiones

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.

7. Referencias bibliográficas

- [1] Leiva, Aguiar y Loría. "Ensayos Acelerados De Pavimentos En Costa Rica". Revista Infraestructura Vial, Vol 15 (#26), 33-41. San José Costa Rica, 2013
- [2] 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.
- [3] Leiva-Villacorta, F. and D. Timm. "Analysis of Measured Versus Predicted Critical Pavement Strain Responses". Proceedings of the 90th Annual Transportation Research Board, Washington, D.C. 2011.
- [4] Coetzee, N et al. "The Heavy Vehicle Simulator in Accelerated Pavement Testing: Historical Overview and New Developments". 3rd International Conference APT. 2008.

- [5] LTPP. "LTPP Beyond FY 2009: What Needs to Be Done?". Report FHWA-HRT-09-052. 2009.
- [6] Metcalf, J. B. "NCHRP Synthesis of Highway Practice 235". 1996.
- [7] Ullidtz, P., Pavement Analysis. "Development in Civil Engineering". Vol.19, Amsterdam, the Netherlands. 1987.
- [8] 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 on Accelerated Pavement Testing, Boston, MA, March 16-18, 1998.
- [9] 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. "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.
- [10] Timm, D. "Construction And Instrumentation Of The 2006 Test Track Structural Study". NCAT Report 09-01 Design. 2009.
- [11] Leiva-Villacorta, F. y D. Timm "Analysis of Measured Versus Predicted Critical Pavement Strain Responses". Proceedings of the 90th Annual Transportation Research Board, Washington, D.C. 2011.
- [12] Horak, E. "Benchmarking the structural condition of flexible pavements with deflection bowl parameters". Journal of the South African Institution of Civil Engineering Volume 5 2 0 Number 2, 2008.
- [13] Asphalt Research Consortium página web. <http://www.arc.unr.edu/Software.html>. Date Accessed 03-20-2014.
- [14] Bazi, G. "Notas del Curso Evaluation of Layer Moduli and Overlay Desing". San José, Costa Rica. Noviembre 2012.
- [15] Vargas Nordbeck, A., Leiva Villacorta, F., & Aguiar Moya, J. P. (2013). "Capacidad de soporte estructural de la Ruta Nacional 32". San José: LanammeUCR.