

IAG441-07-2013
NUEVA GENERACIÓN DE DEFLECTÓGRAFOS DE MEDICIÓN
CONTINUA Y SU APLICACIÓN PARA LA GESTIÓN DE PAVIMENTOS A
NIVEL DE RED
NOVA GERAÇÃO DE DEFLECTOGRAFOS DE MEDIÇÃO CONTÍNUA E
SUA APLICAÇÃO PARA A GESTÃO DO REVESTIMENTO AO NÍVEL
DA REDE

Gerardo W. Flintsch

Director, Center for Sustainable Transportation Infrastructure, Virginia Tech Transportation
Institute. Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Virginia Tech
Blacksburg, VA, USA
GFlintsch@vtti.vt.edu

James Bryce

Graduate Research Assistant, Virginia Tech Transportation Institute, Department of Civil and
Environmental Engineering, Virginia Tech
Blacksburg, VA, USA
jmbp54@vt.edu

Samer Katicha

Senior Research Associate, Virginia Tech Transportation Institute Virginia Tech
Blacksburg, VA, USA
SKaticha@vtti.vt.edu

Edgar David de León Izeppi

Senior Research Associate, Virginia Tech Transportation Institute, Virginia Tech
Blacksburg, Virginia
edeleoni@vt.edu

Resumen

Los dispositivos de medición continua de deflexión de pavimentos o deflectómetros de medición continua fueron evaluados recientemente como parte del Segundo Programa Estratégico de Investigación de Autopistas (SHRP 2), proyecto número R06 (F). Múltiples dispositivos y sus capacidades fueron evaluadas, y sus aplicaciones prácticas identificadas e ilustradas. El objetivo de este artículo es presentar los resultados de la evaluación de tecnologías actuales implementadas en estos dispositivos con un enfoque en su potencial uso para la obtención de índices estructurales a nivel de redes que se puedan utilizar como soporte en las decisiones de gerencia o gestión de pavimentos. Los índices evaluados son: el Índice de Curvatura de la Superficie (SCI), el Índice de Daño de Base (BDI), la Deformación elástica en la parte inferior de la capa de asfalto, y el Número Estructural Efectivo (S_{Neff}). Estos índices se calcularon utilizando el Deflectómetro a Velocidad de Tráfico (TSD), que es un dispositivo de medición

continua de la deflexión de pavimentos, estos índices fueron comparados con los calculados utilizando el Deflectómetro de Impacto (FWD). Los resultados sugieren comparaciones razonables entre el TSD y el FWD con el fin de ser usados como soporte en la gestión de pavimentos a nivel de redes.

Resumo

Os equipamentos de medição continua da deflexão dos pavimentos, ou defletômetros de medição continua, foram recentemente avaliados no âmbito do projecto numero R06(F) do Programa Estratégico de Investigação de Auto-estradas. Vários equipamentos e respectivas capacidades foram avaliados, e as suas aplicações práticas identificadas e exemplificadas. O presente artigo tem como objetivo a apresentação da avaliação das tecnologias utilizadas pelos defletômetros de medição contínua, com particular destaque na sua aptidão para a obtenção de indicadores estruturais ao nível da rede, que possam ser utilizados no apoio à decisão na gestão dos pavimentos. Vários indicadores foram avaliados, nomeadamente o Índice de Curvatura na Superfície (SCI), o Índice de Dano da Base (BDI), a deformação elástica no limite inferior das camadas betuminosas, e o Numero Estrutural Efectivo (SEN). Estes indicadores foram obtidos através da utilização de um defletómetro de medição continua designado por Defletómetro à Velocidade de Tráfego, e posteriormente comparados com os resultados obtidos através da utilização do Defletómetro de Impacto (FWD). Os resultados sugerem uma concordância razoável entre o TSD e FWD em relação à sua aplicabilidade no apoio à decisão na gestão dos pavimentos ao nível da rede.

INTRODUCCIÓN

La evaluación estructural no destructiva del pavimento es realizada usando mediciones de deflexión de pavimentos como respuesta a una carga aplicada. El dispositivo más común para medir la respuesta a la deflexión de los pavimentos es el deflectómetro de impacto (FWD) (Hadidi y Gucunski 2010). El FWD es un dispositivo que genera una carga establecida al dejar caer un peso sobre la superficie del pavimento imitando la carga de un vehículo que se desplaza sobre el mismo, la medición de la respuesta de pavimento se realiza con un conjunto de geófonos colocados a distancias definidas desde la carga aplicada (MACTEC Ingeniería 2006). Una desventaja importante del FWD es la limitada cobertura espacial que se puede lograr en un marco de tiempo dado debido al hecho de que es un dispositivo de medición estática (es decir, el dispositivo debe ser desplegado en cada ubicación a realizar el test lo que puede congestionar el tráfico). Debido al extenso tiempo requerido para medir grandes redes de pavimento utilizando el FWD, el dispositivo se ha utilizado principalmente para evaluar los proyectos específicos. Sin embargo, como se informó Flintsch y McGhee (2009), muchos departamentos estatales de Transporte (DOT) han reconocido la necesidad y los posibles beneficios de la medición de deflexiones del pavimento a nivel de red.

En los últimos años, los dispositivos de medición continua de deflexión, o deflectómetros de medición continua, se han desarrollado para hacer frente a las necesidades de evaluación estructural del pavimento a nivel de red. Estos dispositivos son camiones modificados que miden la respuesta del pavimento a una carga aplicada mientras viajan a, o cerca de la velocidad del tráfico. Diferentes dispositivos y tecnologías de medición disponibles se evaluaron extensamente como parte del Segundo Programa Estratégico de Investigación de Autopistas (SHRP 2) proyecto

numero R06 (F) (Flintsch et al. 2013). Los deflectómetros continuos tienen el potencial de permitir a los organismos estatales evaluar la capacidad estructural de grandes porciones de sus redes de pavimento en un período de tiempo considerablemente más corto que cuando se utiliza el FWD, y también minimizan la necesidad de control de tráfico durante las pruebas.

Síntesis del SHRP 2 Proyecto numero R06 (F)

SHRP 2 proyecto numero R06 (F) evaluó las capacidades y tecnologías disponibles aplicadas en diferentes tipos de dispositivos de medición continua de deflexión, identificó los dispositivos más prometedores para apoyar efectivamente las decisiones de gestión de pavimentos, evaluó las capacidades de estos dispositivos, e identificó las aplicaciones que pueden ser útiles para apoyar la gestión del pavimento. Los resultados de la investigación se documentan en SHRP 2 Reporte S2-R06F-RW-1 (Flintsch et al 2013.), Así como en varias publicaciones (Flintsch et al 2012; Bryce et al 2012;. Katicha et al 2012. , 2013a y 2013b)

El proyecto ocurrió en dos fases. En la primera fase, documentada en Flintsch et al. (2012) y Flintsch et al. (2013) se evaluó varios deflectómetros y se determinó que los dos dispositivos actualmente disponibles más prometedores en términos de las necesidades del usuario son: el Deflectómetro de Peso Rodante (RWD) y el Deflectómetro a Velocidad de Tráfico (TSD), Las necesidades de los usuarios se determinaron a través de una encuesta a varios profesionales del transporte para determinar los parámetros clave que deseen obtener de las pruebas de deflexión (Flintsch et al. 2013). Además, se aprobó una definición para los dispositivos de medición continua de deflexiones y se incluyó aquellos dispositivos que puedan obtener datos a intervalos de aproximadamente 300 mm (1 pie) o menos, mediante el uso de cargas típicas de los camiones [es decir, de 40 a 50 kN (9 al 11 de kips) por rueda o conjunto de carga], así como también los dispositivos que podrían operar sin la necesidad de que el vehículo o el dispositivo de medición permanezca estacionario, y dispositivos que podría operar a la velocidad normal de tráfico sin la necesidad de control de tráfico.

La segunda fase del proyecto abarcó una evaluación profunda de los datos producidos por los dos dispositivos. Los datos provienen de las pruebas en los Estados Unidos para el RWD, así como el Reino Unido para la TSD (los detalles de los sitios de prueba se pueden encontrar en Flintsch et al. (2013)). Por otra parte, la repetitividad del RWD y TSD, así como comparaciones con el FWD se puede encontrar en (Flintsch et al 2012, 2013; Bryce et al 2012; Katicha et al 2012, 2013a y 2013b). La segunda fase también investigó la aplicación potencial de los dispositivos de medición continua de deflexiones para la gestión de pavimento nivel de red usando mediciones obtenidas con el TSD, que será discutida con más detalle en secciones posteriores de este documento.

Descripción de los deflectómetros continuos

El RWD (Figura 1) es un deflectómetro continuo que puede tomar datos de aproximadamente 320 a 480 km (200 a 300 millas) de pavimentos por día utilizando una carga, mecanismo de carga, y tasa de carga, que se piensa coincidan más estrechamente con los efectos dinámicos reales causados por la carga del vehículo. El RWD mide la distancia a la superficie del pavimento deflejada y no deflejada usando varios láseres alineados, y emplea una metodología espacialmente coincidente para medir la deflexión del pavimento. La deflexión se determina

comparando las mediciones de los varios láseres mientras el RWD se mueve hacia adelante. Los láseres montados en el RWD toman datos a una frecuencia de 2-kHz, que, a una velocidad de 89 km/h (55 mph), producen mediciones aproximadamente cada 11 mm (0,5 pulgadas). Con el fin de reducir el ruido en las mediciones y tamaño de los archivos, la deflexión es promediada y presentada sobre una distancia de 160 m (0,1 millas). Detalles adicionales sobre el proceso de medición del RWD se pueden encontrar en Flintsch et al. (2013), Steele (2005a) y Steele (2005b).

El TSD (Figura 2) es un dispositivo que mide la velocidad de deflexión del pavimento, usando láseres Doppler espaciados a distancias específicas de la carga aplicada. Las mediciones se dividen entonces por la velocidad instantánea del vehículo con el fin de eliminar la dependencia de las mediciones de la velocidad, y los resultados son presentados como la pendiente de la deflexión del pavimento (en milímetros por metro). Los láseres están montados en una viga de acero, y un sistema de control climático mantiene la temperatura de remolque a una temperatura constante de 20°C (68°F) para evitar deflexiones térmicas de la viga. Los datos se colectan típicamente a una velocidad de 70 km/h (45 mph) y a una tasa de 1.000 Hz, lo que resulta en una separación de las mediciones de 20 mm (0,8 pulgadas). En general, los resultados se presentan como promedio sobre 10 m (33 pies). Detalles adicionales acerca del TSD y el proceso de medición se pueden encontrar en Flintsch et al. (2013), Baltzer (2009) y Ferne et al. (2009).



Figura 1: FHWA RWD foto de lado y acercamiento de seis sensores laser

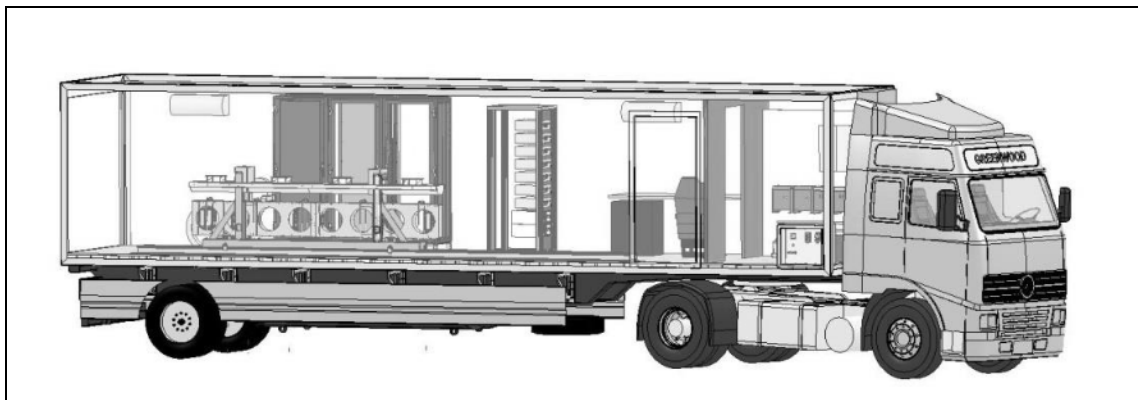


Figura 2: Vista diagramática de la segunda generación de TSD

APLICACIONES POTENCIALES DEL USO DE DEFLECTOMETROS CONTINUOS

Estimación de los índices de salud estructural del pavimento

El índice de curvatura de la superficie (SCI) de un pavimento, que se define como la diferencia entre la deflexión en el centro del FWD y la deflexión a 300 mm (12 pulgadas) de la carga aplicada, ha demostrado ser un excelente indicador de la deformación elástica de la capa de asfalto en un pavimento flexible (Xu et al, 2002;.. Thyagarajan et al 2011). Dado que el SCI se basa en la diferencia entre dos mediciones, se puede calcular directamente usando la pendiente de la deflexión medida con el TSD como se muestra en la ecuación 1. Las ecuaciones desarrolladas para la determinación de la deformación elástica para el espesor completo del pavimento y para pavimento con base de agregado se presentan en las ecuaciones 2 y 3, respectivamente:

$$\int_a^b s(x)dx = D(b) - D(a) \quad SCI \quad (1)$$

Donde, $s(x)$ es la pendiente en la posición x para el TSD y $D(x)$ es la deflexión a la distancia x para el FWD. La deformación elástica puede ser calculada como sigue:

$$\text{Log}(\varepsilon_{AC}) = 0.9977 * \text{Log}(BDI) + 3.3057 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{Log}(\varepsilon_{AC}) = & 0.5492\text{Log}(SCI) + 0.3850\text{Log}(BDI) + 0.7812\text{Log}(H_{AC}) \\ & - 0.0017H_{AC} + 1.7353 \end{aligned} \quad (3)$$

Donde, ε_{AC} es la deformación elástica al fondo de la capa de asfalto, H_{AC} es el espesor (mm) de la capa de asfalto, y BDI es el Índice de Daño de Base (mm) definido como la diferencia entre la deflexión a 300 mm y la deflexión a 600 mm.

Estas ecuaciones fueron inicialmente desarrolladas con medidas tomadas con el FWD, y en consecuencia pueden no ser enteramente adecuadas cuando se usan datos tomados usando cargas móviles a velocidad de tráfico como es el caso del TSD.

SCI, BDI y deformaciones elásticas de pavimentos ensayados

Para demostrar la aplicabilidad de los métodos descritos anteriormente, la deformación elástica al fondo de la capa de asfalto se estimó para un sitio de prueba en el Reino Unido (etiquetado como sitio F1). F1 es un sitio estructuralmente variable con un espesor estimado de 75 mm (3 pulgadas) con una subyacente capa estabilizada de cemento relativamente débil. La comparación del SCI calculado a partir de los datos recogidos con el TSD y FWD se presenta en la Figura 3. La relación que se muestra se determinó mediante regresión ortogonal, ya que ambas

estimaciones contienen errores de medición. La comparación de las deformaciones elásticas en la parte inferior de la capa de asfalto utilizando el FWD y el TSD se presenta en la Figura 4. Como puede verse en la Figura 3 y la Figura 4, el rango de valores estimados por el TSD es muy similar al calculado utilizando el FWD. Esto nos muestra que el TSD se puede utilizar "de manera precisa" para evaluar las deformaciones elástica en la parte inferior de la capa de asfalto para propósitos de gestión de pavimentos a nivel de red.

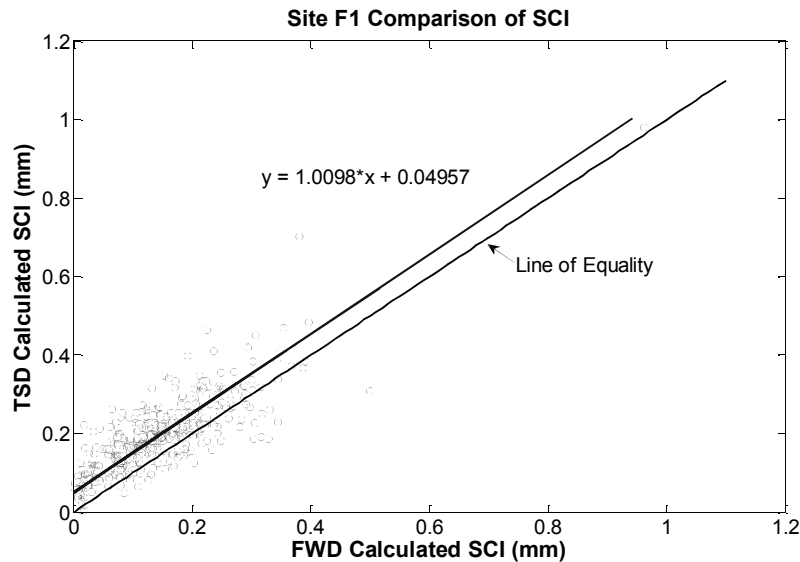


Figura 3: SCI calculado usando TSD versus SCI calculado usando FWD

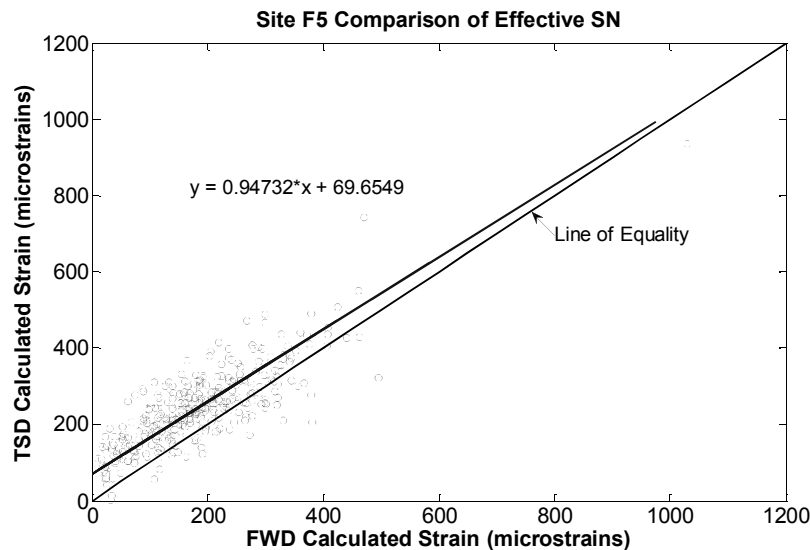


Figura 4: Deformaciones elásticas al inferior de la capa de asfalto estimadas con TSD y FWD

Estimación del número estructural efectivo del pavimento

El número estructural efectivo del pavimento (SN_{eff}) es otro indicador estructural que se ha utilizado para la gestión de pavimentos a nivel de red (Bryce et. Col 2013a, 2013b). (Rhode, 1994) desarrollaron un método para estimar el número estructural efectivo del pavimento utilizando pruebas de deflexión como se muestra en la ecuación 4 a continuación:

$$SN_{eff} = k_1 SIP^{k_2} H_p^{k_3} \quad (4)$$

Donde, $SIP = D_0 - D_{1.5H_p}$, D_0 es la deflexión pico bajo una carga de 9.000 lb (micras), $D_{1.5H_p}$ es la deflexión a 1.5 veces el espesor del pavimento (micras). Para pavimentos asfálticos, $k_1 = 0.4728$, $k_2 = -0.4810$, $k_3 = 0.7581$ (Rohde, 1994).

SN_{eff} de sitios ensayados

La metodología para la estimación de la SN_{eff} se evaluó en el sitio F5. F5 es un pavimento flexible ensayado utilizando tanto el TSD como el FWD. La estructura del sitio F5 se muestra en la Tabla 1. Los coeficientes de capa límite superior e inferior son representativos de valores típicamente encontrados en el diseño de nuevos tramos de pavimento, y se utilizaron para estimar los valores iniciales de SN. La roca base (de alto modulo) del pavimento es tratada como una capa de base asfáltica.

Tabla 1: Estructura del sitio F5

Capa	Material	Espesor [in.]	Coefficiente capa superior	SN 1	Coefficiente capa inferior	SN 2
4	Capa superficial	1.38	0.44	0.61	0.4	0.55
3	Roca base (de alto módulo)	2.36	0.4	0.71	0.3	0.47
2	Roca base (de alto módulo)	8.46	0.4	2.54	0.3	1.69
1	Tipo 1 Granular	5.91	0.12	0.71	0.1	0.59
			SN =	5.65	SN =	4.39

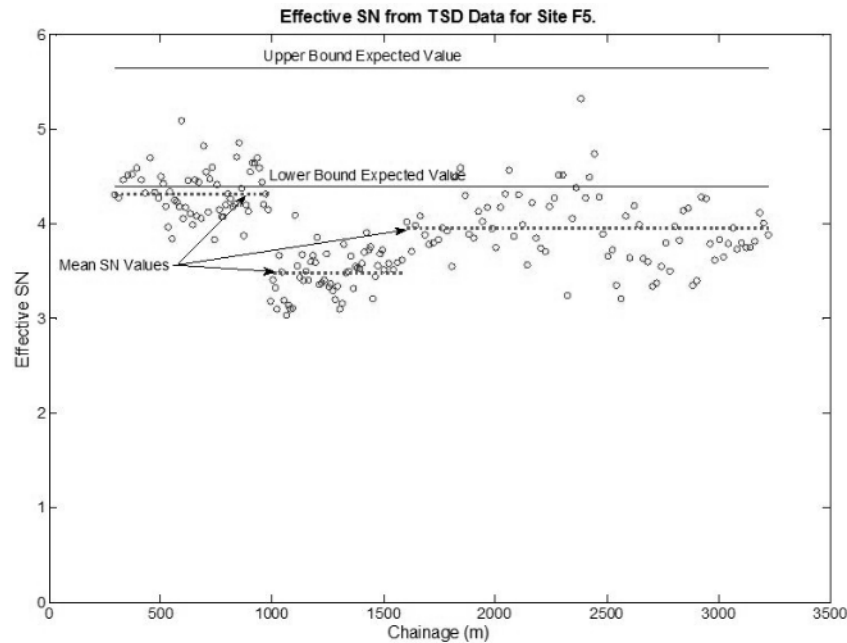


Figura 5: SN efectivo calculado con datos del TSD; sitio F5

El SN_{eff} para la sección se estimó a partir de las mediciones del TSD, y los resultados se presentan en la Figura 5. Los resultados parecen indicar tres secciones estructurales distintas dentro del sitio. Estas tres secciones se separaron visualmente y el SN_{eff} promedio y el intervalo de confianza superior del 95% se representaron gráficamente en la figura. Además, el rango de valores estimados por el TSD parece caer apreciablemente por debajo de del rango de valores esperados para un pavimento construido con estas capas, como se ve en la Figura 5, como sería de esperar para un pavimento deteriorado. Los valores esperados fueron encontrados estimando las propiedades de capa para cada material definido en la tabla 1 usando la literatura correspondiente.

CONCLUSIONES

Los deflectómetros continuos tienen el potencial de convertirse en una herramienta valiosa para el análisis y la gestión de pavimentos, y también proporcionan varios beneficios potenciales, tales como una mayor cobertura espacial comparados con los deflectómetros tradicionales y además los deflectómetros continuos requieren mínimo control de tráfico durante las pruebas. En particular, los dispositivos prometedores incluyen el TSD y el RWD debido a su capacidad para medir a la velocidad del tráfico y reportar resultados en términos de deflexión (o pendiente deflexión) a una frecuencia razonable para aplicaciones de gestión de pavimento. Es importante tener en cuenta que esta tecnología está en desarrollo y futuras investigaciones se deben llevar a cabo con el fin de: evaluar más a fondo las capacidades de medición de estos dispositivos, la utilidad de los datos recogidos, y cómo interpretar mejor las mediciones tomadas con este tipo de dispositivos. Sin embargo, la investigación llevada a cabo bajo SHRP 2 proyecto R06 (F) ha demostrado que los deflectómetros continuos son sin dudar una herramienta prometedora para mejorar la gestión de pavimentos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue patrocinado por la Administración Federal de Carreteras (FHWA), en colaboración con la Asociación Americana de Carreteras Estatales y Oficiales del Transporte (AASHTO), y se llevó a cabo dentro del Programa Estratégico de Investigación de Autopistas (SHRP), el cual es administrado por la Junta de Investigación del Transporte de las Academias Nacionales. Los autores agradecen a Chuck Taylor de SHRP 2 y a los miembros expertos del “Task Group” por su orientación y retroalimentación informativa, y la Dirección General de Carreteras del Reino Unido por brindar acceso a las mediciones del TSD.

REFERENCIAS

- Baltzer, S. (2009). “Three years of High Speed Deflectograph Measurements of the Danish state road network.” *8th Int. Conf. on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*, Champaign, Illinois.
- Bryce, J. Flintsch, G., Katicha, S. and Diefenderfer, B. (2013a). “Developing a Network-Level Structural Capacity Index for Asphalt Pavements.” *ASCE Journal of Transportation Engineering*, 139(2), 123–129.
- Bryce, J. Flintsch, G., Katicha, S. and Diefenderfer, B. (2013b). “Enhancing Network-Level Decision Making Through Use of Structural Capacity Index.” *Transportation Research Record*, Transportation Research Board, Washington, DC, *In Press*.
- Bryce, J., Katicha, S., Flintsch, G., and Ferne, B. (2012). “Analyzing Repeatability of Continuous Deflection Device Measurements.” *Presentation at the 91st Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, DC.
- Ferne, B., P. Langdale, N. Round, and R. Fairclough (2009). “Development of the UK Highways Agency Traffic Speed Deflectometer.” *8th Int. Conf. on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*, Champaign, Illinois.
- Flintsch, G., and McGhee, K. (2009). “Managing the quality of pavement data collection.” Synthesis 401, National Cooperative Highway Research Program, Washington, DC.
- Flintsch, G., Ferne, B., Diefenderfer, B., Katicha, S., Bryce, J., and Nell, S. (2012). “Evaluation of Traffic Speed Deflectometers.” *Transportation Research Record No. 2304*, Transportation Research Board, Washington, DC, 37–46.
- Flintsch, G., Katicha, S. Bryce, J., Ferne, B., Nell, S., and Diefenderfer, B. (2013). “Assessment of Continuous Pavement Deflection Measuring Technologies.” Strategic Highway Research Program of the Transportation Research Board of the National Academies. Washington, DC.
- Hadidi, R., and Gucunski, N. (2010). “Comparative study of static and dynamic falling weight deflectometer back-calculations using probabilistic approach.” *ASCE Journal of Transportation Engineering*, 136(3), 196–204.
- Katicha, S., Flintsch, G., and Ferne, B. (2013a). “Limits of agreement method for comparing TSD and FWD measurements.” *International Journal of Pavement Engineering*, *In Press*.

- Katicha, S. (2013b). "Optimal Averaging and Localized Weak Spot Identification for Traffic Speed Deflectometer Deflection Slope Measurements." *Transportation Research Record*, Transportation Research Board, Washington, DC, *In Press*.
- Katicha, S., Flintsch, G., and Ferne, B. (2012). "Estimation of Pavement Traffic Speed Deflectometer Slope Measurement Repeatability from Single Measurement Series." *Presentation at the 91st Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, DC.
- MACTEC Engineering and Consulting, Inc. (2006). "LTPP manual for falling weight deflectometer measurements version 4.1", Federal Highway Administration, Washington, DC.
- Rohde, G. (1994). "Determining pavement structural number from FWD." *Transportation Research Record No. 1448*, Transportation Research Board, Washington, DC, 61–68.
- Steele, D.A. (2005a). "Final Report for Rolling Wheel Deflectometer (RWD) Demonstration for the Indiana Department of Transportation." ARA Project No. 16860/1. Applied Research Associates, Champaign, IL.
- Steele, D.A., and Hall, J.W. (2005b). "Final Report for Rolling Wheel Deflectometer (RWD) Demonstration and Comparison to Other Devices in Texas." ARA Project No. 15874. Applied Research Associates, Champaign, IL.
- Thyagarajan, S., Sivaneswaran, N., Petros, K., and Muhunthan, B. (2011). "Development Of A Simplified Method For Interpreting Surface Deflections For In-Service Flexible Pavement Evaluation." *8th International Conference on Managing Pavement Assets*, Santiago, Chile, Nov 15-19, 2011.
- Xu, B., Ranjithan, R., & Kim, R. (2002). "New Relationships Between Falling Weight Deflectometer Deflections and Asphalt Pavement Layer Condition Indicators." *Transportation Research Record, No. 1806*, Transportation Research Board, pp. 48-56.