

DESARROLLO DE UN DEFLECTÓMETRO CONTINUO RODANTE DE ALTA VELOCIDAD

DEVELOPMENT OF A HIGH-SPEED ROLLING WHEEL DEFLECTOMETER

Por /By **Douglas Steele, Jim Hall, Jr., Richard Stubstad, Andres Peekna, y Robert Walker**

Resumen

Applied Research Associates, Inc. (ARA) está desarrollando un deflectómetro continuo rodante de Alta Velocidad (RWD) conforme a una investigación auspiciada por SBIR (Small Business Innovation Research) / FHWA (Federal Highway Administrator). El RWD consiste de un acoplado de un solo eje de doble rodado equipado con cuatro láser de tipo punto, montados en una viga de aluminio debajo de un camión. Se utilizaron tres láser para medir la superficie del pavimento sin carga, y el cuarto láser, ubicado cerca del centro de las dos ruedas, mide la cuenca de deflexión para una carga de un solo eje de 80 kN. El RWD ha sido ensamblado, y las pruebas de camino preliminares han sido efectuadas en secciones de pavimento delgado y grueso de concreto asfáltico. Los resultados del RWD han sido comparados con el Deflectómetro de Impacto (FWD) y las deflexiones determinadas por acelerómetro en las mismas secciones de pavimento y han obtenido resultados alentadores, aunque con algunas limitaciones. Se identificaron varias mejoras necesarias. Los planes futuros para el RWD incluyen una actualización del sistema, pruebas adicionales en terreno con diversidad de tipos y condiciones de pavimento, incluyendo comparaciones con pruebas instrumentadas de pavimento y eventualmente la fabricación de un aparato a nivel de producción.

Palabras clave: *Deflectómetro continuo rodante, deflectómetro de impacto, administración de pavimentos, deflexiones, láser de tipo punto, evaluación de pavimentos.*

Abstracts

Applied Research Associates, Inc. (ARA) is developing a high-speed Rolling Wheel Deflectometer (RWD) under SBIR/FHWA-sponsored research. The current RWD consists of a dual-wheel, single-axle semi-trailer equipped with four spot laser mounted on an aluminum beam beneath the trailer. Three laser are used to measure the unloaded pavement surface, and the fourth laser, placed near the center of the dual tires, measures within the deflection basin under an 18-kip single axle load. The RWD has been assembled, and preliminary field runs have been made on thin and thick AC pavement sections. The RWD results have been compared to Falling Weight Deflectometer (FWD) and accelerometer-determined deflections on the same pavement sections and have produced encouraging results, although with some limitations. Several needed improvement were identified. Future plans for the RWD include system upgrade, further field testing over a wider variety of pavement types and conditions, demonstrations, including comparisons to instrumented test pavements, and eventually the manufacture of a production-level device.

Keywords: *Rolling wheel deflectometer, falling weight deflectometer, pavement management, deflections, spot laser, pavement evaluation.*



1.- OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN

El objetivo de la investigación es desarrollar un RWD (Rolling Wheel Deflectometer), que satisfaga las necesidades de evaluación de pavimento estructural para los responsables de la gestión de pavimentos. El principal desafío es desarrollar un medio de medición de alta velocidad para medir deflexiones de pavimento bajo la carga de un camión en movimiento.

Conforme a las instrucciones del auspiciador del proyecto, el RWD debería ser capaz de desarrollar las siguientes funciones:

- Medir deflexiones producidas por un camión de carga en movimiento
- Recolectar datos a un mínimo de 50 millas por hora
- Realizar mediciones continuas de deflexiones
- Producir resultados compatibles con las aplicaciones de gestión a nivel de redes de pavimentos

2. EL DESAFÍO

El principal desafío de esta investigación es detectar las deflexiones de pavimento (medidos a milésimas de pulgadas), que se superponen en las superficies de los pavimentos con una rugosidad y textura que tienen un orden de magnitud mayor que la deflexión del pavimento en sí. Asimismo, por razones de productividad y seguridad, resulta deseable recolectar datos a velocidades normales de carretera. Por consiguiente, los movimientos dinámicos de los camiones complican aún más la medición de las deflexiones.

3. DIFERENCIAS ENTRE DEFLEXIONES INDUCIDAS POR RWD Y FWD

El FWD (Falling Weight Deflectometer), se ha convertido en el estándar para evaluar la respuesta estructural de los pavimentos, en especial para análisis a nivel de proyectos. El FWD genera un impacto en el pavimento y mide en forma muy exacta las deflexiones de pavimento resultantes, cuando están en la posición estática. Por otra parte, la cuenca de deflexión del RWD se origina por el movimiento transiente de un eje. El prototipo actual tiene el propósito de medir una deflexión única (ligeramente delante de la carga de rueda), y no una cuenca de deflexión completa. Los datos no tienen el grado de precisión del FWD estándar; sin embargo, el objetivo es obtener suficiente precisión y capacidad de repetición que, combinados con la productividad y medición continua del RWD, los datos son apropiados para aplicaciones a nivel de redes.

Algunas de las diferencias entre las deflexiones inducidas por RWD y FWD, se indican a continuación:

- Impacto versus carga transiente: debido a los efectos inerciales y viso-elásticos de los materiales que se usan en los pavimentos, las mismas cargas en RWD y FWD pueden producir cuencas de deflexión que difieren en magnitud y forma de cuenca. El FWD aplica un pulso de carga vertical a una frecuencia casi constante con profundidad, en tanto que el RWD aplica tanto una componente de carga vertical y horizontal con una frecuencia que decrece con la profundidad.
- El RWD transmite una carga a la superficie del pavimento por medio doble rodado de goma espaciadas unas pocas pulgadas aparte. Las huellas del doble rodado son levemente elípticas. El FWD usa una rueda circular única para transmitir la carga al pavimento. Esto afecta la forma de la cuenca, especialmente cerca de los puntos de carga, pero no tiene un efecto significativo más allá de la carga.
- Los FWDs típicamente almacenan solo la deflexión máxima para cada sensor individual, aún cuando las deflexiones en los sensores exteriores no han alcanzado sus máximos valores al mismo instante que la deflexión central, debido a la propagación del pulso de la deflexión. Las deflexiones máximas



están superpuestas para formar una cuenca de deflexión única que nunca existió en el tiempo. La RWD ve la cuenca de deflexión que de hecho existe en el tiempo a medida que el artefacto viaja a lo largo del pavimento.

- Ubicación de la deflexión máxima y simetría: la deflexión máxima del FWD se produce debajo de la rueda de carga, y la cuenca es aproximadamente simétrica. La deflexión máxima del RWD se produce típicamente unas pocas pulgadas detrás de la rueda en movimiento, y la cuenca de la deflexión trasera es más ancha que la cuenca delantera, ya que el pavimento no rebota con la misma rapidez con que se refleja hacia abajo.
- Los programas típicos para probar FWD requieren dejar caer un peso fijo desde una o más múltiples alturas de caída prefijadas. Cuando una masa dada se deja caer desde una altura fija en múltiples ubicaciones a lo largo del camino la única variable que afecta a la carga medida es la rigidez del pavimento mismo. En el caso del RWD, la carga sobre la superficie del pavimento varía a lo largo de longitud de la vía, a medida que se producen rebotes debido a la rugosidad del pavimento. De consiguiente, la carga que de hecho se aplica al pavimento por el RWD varía más que la carga relativamente constante de la carga del FWD, lo que resulta en una mayor variabilidad de la deflexión para una sección dada.

4. METODOLOGÍA DE MEDICIÓN DEL RWD

4.1 Perfiles que Coinciden Espacialmente

La metodología utilizada para determinar las deflexiones de la rueda en movimiento se basa en el desplazamiento (vale decir, calce) de los perfiles de láser fijos coincidentes en el espacio que representan condiciones no deflectadas o reflectadas del pavimento. Esta metodología fue propuesta por primera vez por TRRL (Dickerson y Mace, 1976), y desarrollada posteriormente en la Purdue University bajo la dirección del Prof. Milton Harr a fines de la década de los 70 (Harr y Ng-A-Qui, 1977). Esta técnica fue empleada posteriormente en el prototipo de RWD desarrollado por Dynatest/Quest. La Figura 1 muestra una ilustración del concepto.

El método espacialmente coincidente utiliza tres sensores guía, A, B, y C, para definir al perfil del pavimento no deflectado en el tiempo=0. Cuando el RWD avanza 8 pies, los sensores B, C, y D miden al perfil previamente definido por los láser A, B, y C. Debido a los efectos dinámicos del camión (por ejemplo, rebotes e inclinación), las lecturas B_2 y C_2 serán diferentes a las correspondientes lecturas previas, A_1 y B_1 . Suponiendo que el haz es rígido con un curvado insignificante, el perfil definido por las lecturas B_2 y C_2 se desplaza en pendiente y magnitud para calzar con las lecturas previas en las mismas ubicaciones, A_1 y B_1 . Esto permite una comparación de la superficie del pavimento en la misma ubicación entre dos estados no deflectados y deflectados (vale decir, D_2 y C_1). La deflexión se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{deflexión} = [(B_2 - 2C_2 + D_2) - (A_1 - 2B_1 + C_1)] \quad (1)$$

En que:

A_1, A_2, A_3 = Lecturas láser A, B, y C en tiempo=0

$B_2, C_2, y D_2$ = Lecturas láser B, C, y D después de 8 pies de trayectoria



Lo anterior está configurado para medir la deflexión en un solo punto de la cuenca, bajo el sensor D. El sistema puede modificarse también para medir la deflexión en puntos adicionales delante del sensor D. Para cada punto adicional, dos sensores adicionales serían requeridos, uno delante del sensor D y el otro la misma distancia delante del sensor C. La deflexión en él (los) punto(s) adicional(es) está dada por una versión modificada de la ecuación precedente.

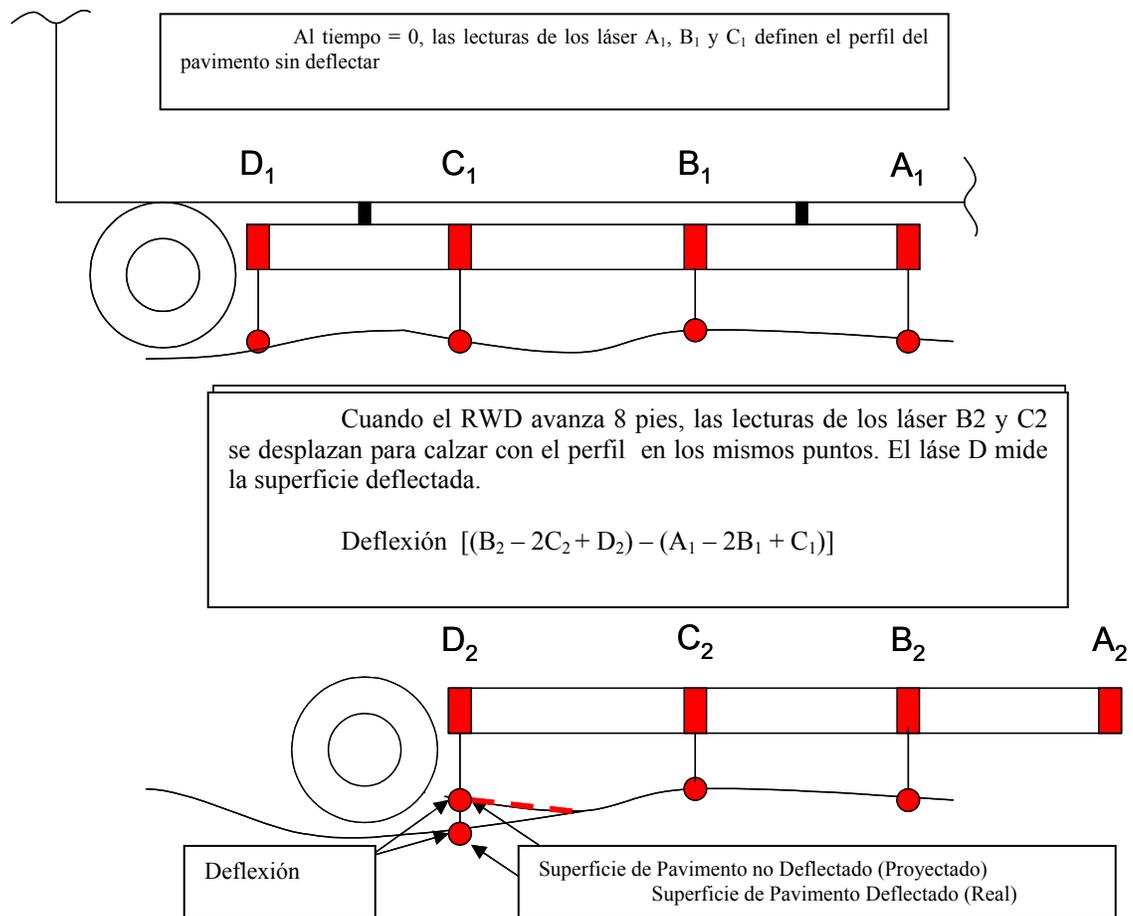


Figura 1. Los perfiles espacialmente coincidentes son calzados para determinar la diferencia entre perfil de pavimento en estado no deflejado y deflejado

4.2 Tratamiento de Errores Aleatorios

La teoría de la propagación de los errores aborda el problema “¿En qué grado las incertidumbres en cada uno de las diversas cantidades medidas en forma directa afectan al resultado final?”. El equipo del proyecto consideró la propagación de errores aleatorios para determinar tanto el número de láser y espaciamentos láser. Nosotros determinamos que la menor propagación de errores aleatorios resultaba cuando se usaban cuatro láser, espaciados a intervalos iguales de 8 pies. No obstante esto, un gran número de factores contribuye a errores aleatorios potencialmente grandes en el sistema de medición. Estos incluyen factores de camino (por ejemplo, textura y rugosidad), exactitud y precisión del láser, y factores del RWD, tales como el rebote y la inclinación del acoplado RWD.

Peekna (Peekna, 2002), ha mostrado que, a medida que las lecturas de la deflexión se promedian sobre una longitud dada de camino, el error de las lecturas promedio disminuye por un factor de $1.29/\sqrt{n}$. Por lo tanto, si se usan un número suficiente de lecturas para calcular la deflexión media, el error asociado disminuirá a un nivel aceptable para propósitos de trabajo a nivel de red. En una encuesta RWD una velocidad de 55 millas por hora y una tasa de muestreo láser de 2 kHz, se toma una muestra aproximadamente cada 0.5



pulgadas. Basados en esta tasa de recolección de datos, Peekna estima que, con una rugosidad y textura de superficie de camino comparables a las secciones ensayadas, una longitud de 50 pies de camino proporciona un número suficiente de lecturas para disminuir el error aleatorio en la deflexión media dentro de un nivel aceptable.

4.3 Tratamiento de Errores Sistemáticos

Tomando en cuenta la propagación de errores sistemáticos y correlacionados resultó muy útil para definir ciertas líneas directrices para la calibración con sensor láser, ciertas características de diseño y conducta de los conductores, tales como minimizar las correcciones repentinas de manejo.

5. DISEÑO

ARA ha diseñado y fabricado un semi-acoplado en el que se montan los láser y la viga. La Figura 2 muestra una fotografía del RWD, y sus atributos de diseño pertinentes se describen en los párrafos que siguen.



Figura 2. Visión general del RWD

5.1 Acoplado

El acoplado de eje simple, doble rodado tiene una longitud de 53 pies y puede variar la carga del eje simple desde 18.000 a 24.000 libras (mediante el uso de tanques de agua instalados en forma permanente sobre el eje trasero). Fue fabricado con una suspensión para trabajo pesado que minimiza el movimiento lateral y tiene una baja frecuencia natural (1.45 a 1.8 Hz), tal que la frecuencia de rebote del acoplado es muy baja con relación a la vibración de la viga de aluminio. Se eligió un acoplado largo para minimizar la inclinación longitudinal (vale decir, el rebote diferencial desde la parte delantera a trasera del acoplado) y para permitir una longitud de viga, en que los láser delanteros están suficientemente alejados del eje trasero del camión.

5.2 Montaje de Viga y Ruedas

El corte transversal de la viga de soporte de aluminio es de 2 pulgadas x 8.5 pulgadas. La distancia entre los láser A y D es de 24 pies. Sus dimensiones fueron seleccionadas para proporcionar una rigidez suficiente tal que las vibraciones de alta frecuencia de la viga no se acoplan con el rebote de baja frecuencia del acoplado RWD. Está apoyado en puntos intermedios adecuados para minimizar el curvado de la viga debido a la aceleración vertical y envuelto en aislación para mantener temperaturas internas uniformes.

ARA instaló bordes de acero y espaciadores de aluminio fabricados especialmente para proporcionar aproximadamente 1 pulgada de galibo a cada lado del láser trasero y del doble rodado. El punto láser en el láser trasero está 10.9 pulgadas delante de la línea de centro del eje trasero. La Figura 3 muestra la viga de aluminio viga con el láser trasero extendido entre el doble rodado.





Figura 3. Viga de aluminio con láser trasero extendido entre el doble rodado. (Cabe notar que la fotografía se tomó antes de envolver la viga de aluminio con aislamiento térmico.)

5.3 Láser

El RWD utiliza cuatro 16-kHz LMI-Selcom láser de tipo punto con una tasa máxima de salida análoga de 2.000 muestras por segundo. Esto corresponde a una muestra cada 0.48 pulgadas a una velocidad de 50 millas por hora- Los láser Selcom-LMI tienen un tamaño de punto de 1.5 milímetros con un rango de medición de 70 milímetros y están montados a 300 milímetros sobre el pavimento. Su resolución es de aproximadamente 18 micrones (1 micrón = 0.001 milímetros) con una precisión de 0.2 por ciento o mejor del rango de medición. .

5.4 Sistema de Adquisición de Datos, Software Operacional y Software para el Análisis de Datos

Las señales láser son captadas por una placa de adquisición de datos instalado en un computador portátil Pentium III ubicado en el acoplado RWD. ARA ha desarrollado un software que activa los láser, genera archivos de salida y almacena los archivos en el disco duro del computador. Las lecturas láser son referenciadas en forma longitudinal al monitorear el contador de tono ABS que es parte del sistema de frenos del eje trasero. Además de los láser y distanciómetro, el RWD mide en forma continuada la temperatura de la superficie del pavimento con un termómetro infra-rojo Raytek. Por último, el sistema de adquisición de datos es capaz de manejar la salida desde los acelerómetros montados en la viga de aluminio. Los acelerómetros se utilizan para monitorear los movimientos de la viga y con propósitos de diagnóstico durante el desarrollo del prototipo.

ARA ha desarrollado software de procesamiento de datos para analizar los datos de láser usando la metodología espacialmente coincidente. En la actualidad, los datos son post-procesados dentro de cosa de minutos en el mismo computador que se utiliza en la recolección de datos.

6. CALIBRACIÓN LASER

Cada uno de los láser Selcom-LMI están dotados de sus factores de calibración proporcionados de fábrica. No obstante esto, ARA desarrolló un procedimiento de calibración con agua para que sea utilizado cuando los láser se monten sobre la viga. Se desarrolló este procedimiento con dos propósitos —para determinar la diferencia relativa en elevación de los láser con respecto a una superficie plana, y para determinar el factor de escala relativo de cada laser a una alta precisión. El sistema de calibración con agua consiste de cuatro recipientes interconectados de agua, uno colocado debajo de cada laser en la condición estática. Se coloca un flotador de polipropileno con un blanco adhesivo en cada recipiente. Dado que los



contenedores con agua están interconectados, se establece una superficie de medición a nivel con los cuatro flotadores.

La metodología espacialmente coincidente en efecto supone que todos los láser están ubicados en una línea recta; sin embargo, esto no se puede lograr mecánicamente al grado de exactitud que este sistema requiere. Por lo tanto, la calibración con agua compara todas las lecturas de láser con la viga paralela al nivel de agua para determinar la diferencia exacta en elevación de cada láser, conforme están montados sobre la viga. Aún más, al aumentar o disminuir el nivel de agua en el sistema, cada láser experimenta el mismo cambio en elevación entre el agua y el láser. Los cambios registrados en elevación son comparados entre los cuatro sensores, y sus factores de escala se ajustan conforme a esto. Estos factores de ajuste se aplican primero a los datos crudos de calibración que se usan para determinar las diferencias relativas en elevación de láser. Tanto la diferencia en elevación relativa como los factores de escala ajustados se aplican a las lecturas de láser crudas que se obtuvieron durante las pruebas de campo para determinar las lecturas de láser finales utilizadas para calcular la deflexión.

7. PRUEBA DE ENSAYO DE CONCEPTO

7.1 Secciones de Prueba en Terreno

ARA desarrolló las pruebas de campo del RWD durante la semana del 21 de julio de 2002 para determinar el potencial del mecanismo prototipo para medir en forma exacta deflexiones de pavimento repetibles. La verificación de la prueba del concepto se desarrolló en Champaign, IL, sobre secciones pavimento delgado y grueso ubicados en el Camino Staley. Las secciones pavimento delgado consistían de 6 pulgadas de concreto asfáltico (AC) sobre una base granular de 10 pulgadas. La sección de pavimento grueso es un pavimento de 11 pulgadas en toda su profundidad de AC colocado sobre 12 pulgadas de **subrasante** tratado con cal. El **subsuelo** natural para ambas secciones de pavimento es una arcilla limosa. Realizamos pruebas en secciones de 500 pies en ambas pistas de las secciones de pavimento delgado y grueso. En general, ambos pavimentos estaban en condiciones buenas con pequeñas cantidades de agrietamiento transversal y longitudinal, ahuellamiento de baja severidad y superficies afectadas por los fenómenos climáticos. Los pavimentos tienen un Índice de Rugosidad Internacional (IRI) de aproximadamente 1.5 m/km.

7.2 Resultados RWD

El RWD realizó múltiples pasadas sobre las secciones de prueba de 500 pies entre el 24 y el 26 de Julio. En cada sección de prueba, las pasadas fueran hechas a velocidades objetivo de 30 y 55 millas por hora. El RWD recolectó datos a una tasa de 2,000 muestras por segundo, y se calculó una deflexión media para toda la sección de 500 pies sobre la base de miles de lecturas individuales. En total, se hicieron seis pasadas en cada una de las secciones delgadas y gruesas.

Para expandir el conjunto de datos RWD, se realizaron pasadas adicionales sin instrumental in situ durante el 6 y 7 de agosto del 2002. Las Figuras 4 y 5 presentan los datos de RWD tanto para julio como agosto. Resulta importante recordar que los puntos de datos en las figuras representan la deflexión RWD media para la sección de 500 pies sobre la base del promedio de miles de lecturas láser.

La Figura 5 muestra que las deflexiones medias de la sección delgada variaron desde aproximadamente 11 a 17 milímetros, dependiendo del día y hora en que se realizó la prueba. Es importante notar que las deflexiones no han sido normalizadas a una temperatura única y que, de consiguiente, reflejan las condiciones de temperatura que se daban al momento de realizar las pruebas. La temperatura ambiente durante este período varió desde aproximadamente 85 a 100 °F.

Las deflexiones del pavimento grueso en la Figura 4 tenían rangos entre aproximadamente 8 a 14 milímetros, dependiendo también del día y hora en que realice la prueba.



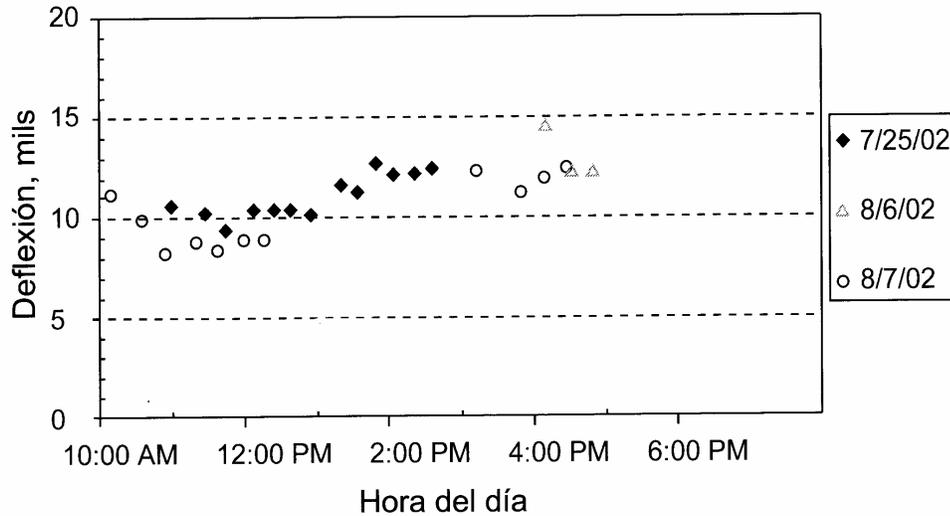
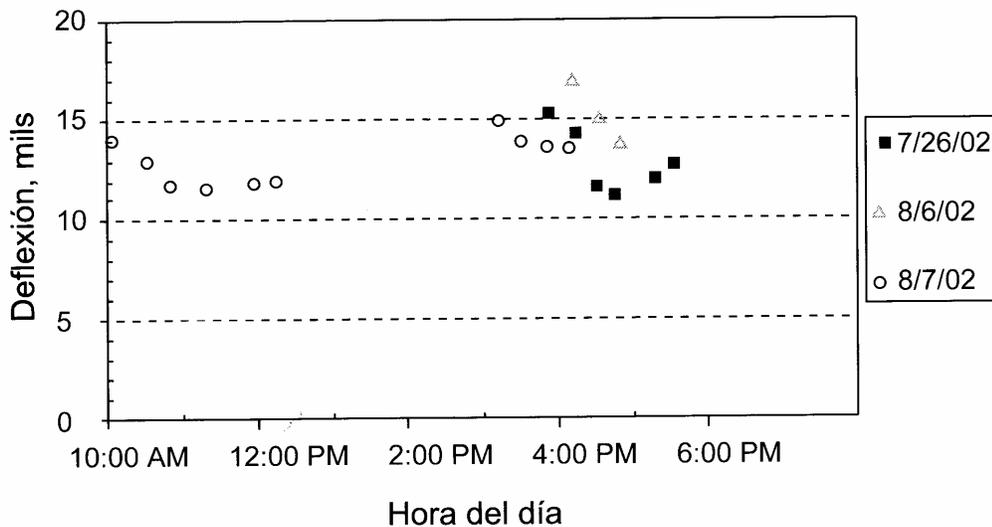


Figura 4. Deflexión media del RWD a 18 kN, pavimento de concreto asfáltico grueso-fechas múltiples



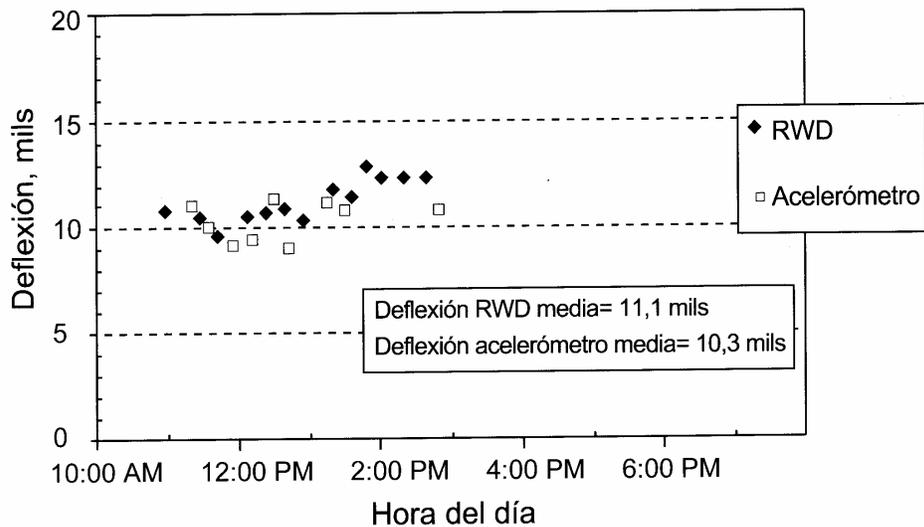


Figura 6. Comparación de las deflexiones RWD y acelerómetro. Pavimento de concreto asfáltico grueso- julio 24-26, 2002

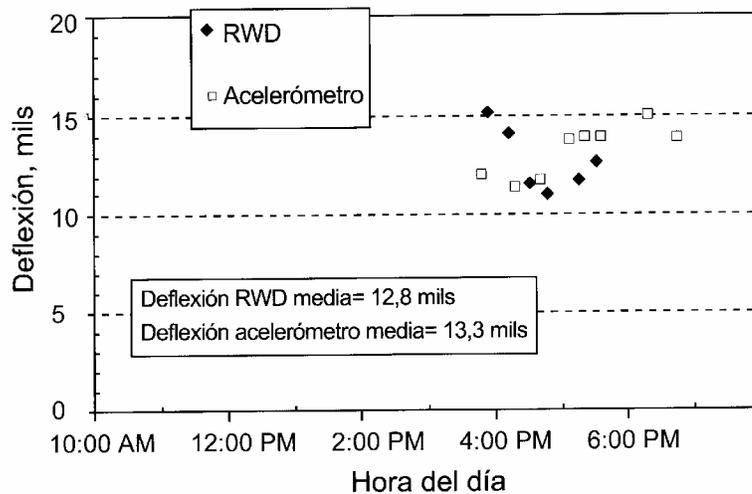


Figura 7. Comparación de las deflexiones RWD y acelerómetro. Pavimento de concreto asfáltico delgado- julio 24-26, 2002

Los datos muestran una Buena comparación entre las deflexiones de las secciones de pavimento determinadas con RWD y acelerómetro tanto para las secciones de pavimento grueso como delgado. En el caso del pavimento grueso, las deflexiones medias de todas pruebas realizadas fueron 11.3 y 10.3 milímetros para el RWD y el censor de referencia, respectivamente. Para el pavimento delgado, las deflexiones con RWD y el censor de referencia tuvieron un promedio de 12.8 y 13.3 milímetros, respectivamente.



Es importante tener presente que, en la actual configuración RWD, el láser colocado entre el doble rodado está de hecho 10.9 pulgadas delante de la línea de centro del eje. Asimismo, para cargas de ruedas en movimiento, la deflexión máxima se produce de hecho unas pocas pulgadas detrás del centro de carga. Otras referencias indican que este rezago o demora en la distancia puede variar entre 5 y 8 pulgadas, dependiendo de la estructura del pavimento. Consiguientemente, la deflexión medida por el RWD es de aproximadamente 16 a 18 pulgadas delante de la deflexión máxima. Para este análisis, se supuso que la deflexión máxima RWD (peak RWD deflection) se produce 6 pulgadas detrás de la línea de centro del eje, haciendo que la ubicación del láser RWD esté 16.9 pulgadas delante de la ubicación de la deflexión máxima (es decir, $6+10.9$ pulgadas = 16.9 pulgadas). Por lo tanto, determinamos que la deflexión en la ubicación correspondiente (vale decir, 16.9 pulgadas) en la cuenca de deflexión determinada por acelerómetro para comparación con los resultados FWD.

7.4 Comparación con deflexiones FWD

ARA ha realizado pruebas FWD en el Camino Staley con fecha 12 de julio de 2002, para evaluar la uniformidad de la sección y seleccionar ubicaciones para los instrumentos. Las condiciones de temperatura a la fecha de las pruebas FWD eran similares, pero no idénticas, a aquellos presentes dos semanas más tarde durante las pruebas RWD. Las Figuras 8 y 9 muestran las deflexiones FWD a 18 pulgadas normalizadas por censor a 40 kN para las secciones delgada y gruesa, respectivamente.

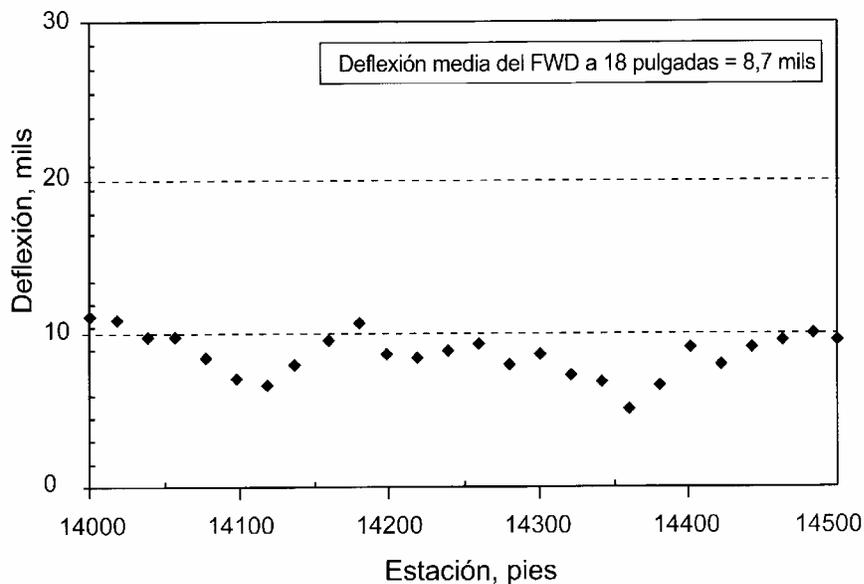


Figura 8. Deflexión FWD a 18 pulgadas normalizadas por censor a 40 kN. Pavimento concreto alfáltico grueso- julio 12, 2002



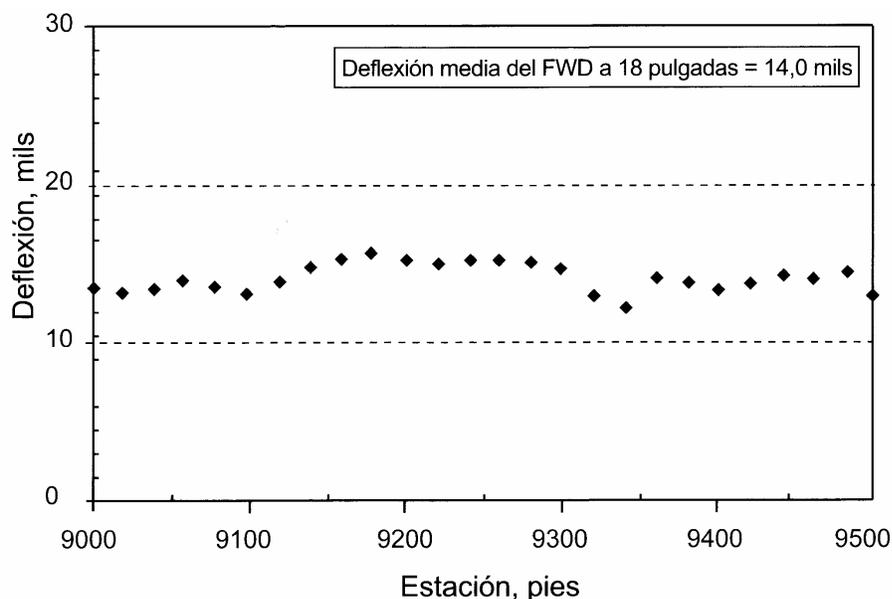


Figura 9. Deflexión FWD a 18 pulgadas normalizadas por censer a 40 kN. Pavimento concreto alfáltico delgado-julio 12, 2002

La Tabla 1 muestra una comparación de las deflexiones medias para RWD, acelerómetro y FWD (a una distancia de 18 pulgadas).

Tabla 1. Resumen de resultados RWD, acelerómetro y FWD.

Instrumento	RWD	Acelerómetro	FWD
Fecha prueba	Julio 25-26, 2002	Julio 25-26, 2002	Julio 12, 2002
Deflexión media pavimento grueso, mils (milésimas de pulgada)	11.1	10.3	8.7
Deflexión media pavimento delgado, mils (milésimas de pulgada)	12.8	13.3	14.0

8. CONCLUSIONES Y DESARROLLO FUTURO DE RWD

El principal objetivo de esta investigación fue probar que el concepto de usar láser de tipo punto montados en una viga rígida puede medir en forma efectiva las deflexiones producidas por una carga de semi-acoplado que se mueve a velocidades de carretera normales. El instrumento que se analiza es un prototipo que tiene como finalidad determinar una deflexión representativa para una sección dada de pavimento para ser usada por los administradores de pavimentos. No ha sido diseñado para proporcionar el nivel de exactitud o definición de cuenca para un análisis a nivel de proyecto y, de consiguiente, no tiene por finalidad reemplazar a los FWDs.

Probamos el instrumento en terreno con secciones de pavimento AC delgadas y gruesas y comparamos las deflexiones con aquellas tomadas mediante instrumentos para pavimento, así como también las deflexiones FWD. Sobre la base de las pruebas en terreno, aprendimos lo siguiente:

- Múltiples pasadas de RWD efectuadas en varios días para la misma sección se produjeron resultados que fueron razonables en magnitud y que mostraron una adecuada posibilidad de repetición. El RWD pudo detectar cambios en la rigidez del pavimento debido a cambios en la temperatura entre diferentes días y a diferentes horas del mismo día.



- Los resultados RWD se comparan bien con las deflexiones obtenidas en un acelerómetro insertado en la capa AC al momento de la prueba. Los resultados RWD se comparan menos bien con las deflexiones FWD; sin embargo, esto podría deberse a diferencias en temperaturas de pavimento entre las fechas en que se tomaron las pruebas FWD y RWD, así como también a las inherentemente distintas cuencas de deflexión producidas por el impacto y por las cargas de las ruedas en movimiento.
- El prototipo RWD está físicamente limitado en cuanto a la capacidad para medir deflexiones directamente en la línea de centro del eje, entre el doble rodado. En su forma actual, el láser usado para calcular la deflexión está ubicado 10.9 pulgadas delante de la línea de centro del eje. Combinado con la demora en la deflexión máxima (peak deflection) con respecto a la línea de centro del eje (aproximadamente 6 pulgadas detrás del eje), el RWD efectivamente mide 16 a 18 pulgadas antes de la deflexión máxima. Esto origina deflexiones menores y proporciona menos contraste entre pavimentos de rigidez variable. Los enfoques que se planifican para las próximas etapas en el desarrollo pueden superar esta situación total o parcialmente.
- Los resultados RWD son sensibles a factores que no afectan a las deflexiones medidas con FWD, tales como hábitos de los conductores (velocidad uniforme y minimizar repentinas correcciones de conducción), textura de pavimento, y rigidez.
- Los planes futuros incluyen la actualización del sistema para medir o inferir la deflexión directamente debajo del eje con una precisión razonable. También anticipamos pruebas en el terreno con una variedad mayor de tipos y condiciones de pavimentos, demostraciones para instituciones, incluyendo comparaciones con pavimentos instrumentados y la fabricación de instrumentos a nivel de producción capaz de someter a pruebas a redes de pavimentos.

8. AGRADECIMIENTOS

Los autores quisieran expresar sus agradecimientos a los auspiciadores del proyecto, SBIR y FHWA. En especial, queremos expresar nuestra gratitud al gerente del proyecto, el Sr. Frank Botelho de FHWA, por su apoyo y compromiso en cumplir los objetivos del proyecto. También, queremos agradecer al representante técnico de FHWA, por su valiosa revisión y contribuciones al diseño, calibración y pruebas del RWD.

9. BIBLIOGRAFÍA

- DICKERSON, R. S. y MACE, D. G. (1976), "A High Speed Profilometer - Preliminary Description," TRRL Supplementary Report 182, Transport and Road Research Laboratory, Inglaterra,
- HARR, M. E. y NG-A-QUI, N. (1977), "Noncontact Nondestructive Determination of Pavement Deflection Under Moving Loads," FAA Report FAA-RD-77-127, Federal Aviation Administration, Washington, DC.
- PEEKNA, A. (2002) "Data Reduction Procedures and Effects of Propagation of Errors for the Rolling Deflectometer," IM-02/6, 7 de Septiembre.



Douglas Steel

Ingeniero Senior
Applied Research Associates, Inc.
Carolina del Norte
Estados Unidos

Senior Engineer
Applied Research Associates, Inc.,
North Carolina
USA
dsteele@eresnet.com

Jim Hall, Jr.

Ingeniero Principal
Applied Research Associates, Inc.,
Carolina del Norte
Estados Unidos

Principal Engineer,
Applied Research Associates, Inc.,
North Carolina
USA

Richard Stubstad

Ingeniero Principal
Applied Research Associates, Inc.,
Carolina del Norte
Estados Unidos

Principal Engineer,
Applied Research Associates, Inc.,
North Carolina
USA

Andres Peekna

Consultor
Innovative Mechanics, Inc.,
Estados Unidos

Consultant
Innovative Mechanics, Inc.,
USA

Robert Walker

Consultor
Alpha to Omega
Estados Unidos

Consultant
Alpha to Omega,
USA

