

**Título del trabajo: APLICACION DE DEFLECTOGRAFOS A IMPACTO (FWD)
EN ARGENTINA**

Autores: Ings. Oscar GIOVANON y Jorge TOSTICARELLI

Dirección: Riobamba y Berutti 2000 Rosario

Teléfono: (041) 812121 / 813194 / 821671 Fax: (041) 813209

Entidad u Organismo al que pertenece: Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario

RESUMEN

La auscultación estructural de carreteras es una técnica que proporciona un conocimiento detallado del estado de los pavimentos, lo que permite efectuar el monitoreo de su comportamiento a través del tiempo y programar el mantenimiento de un modo racional y más económico.

La metodología de auscultación estructural ha ido variando con el tiempo en función de los continuos avances de la técnica y se requiere que los nuevos equipos de medición permitan la evaluación sistemática de los parámetros característicos del pavimento, que además posibiliten un gran rendimiento operacional y que su trabajo interfiera lo menos posible con el uso normal de la carretera.

Los deflectógrafos a impacto (FWD) son equipos de última generación que cumplen con las características citadas; los mismos evalúan la capacidad estructural de la calzada a través de la medición de la deflexión de la superficie, bajo la acción de una carga de impacto, simultáneamente en el centro del área cargada y en varios puntos alejados de la misma; de tal forma que se obtiene el cuenco de la deformada bajo una carga dinámica, similar a la de un vehículo pesado. A través de un software específico de retroajuste modular es posible modelizar la estructura del pavimento y caracterizar las distintas capas componentes de la misma.

En el presente trabajo se realiza una descripción de los deflectógrafos por impacto, de la técnica de medición, del software para el retroajuste modular y se exponen los resultados obtenidos con el primero de estos equipos incorporados al medio Vial Argentino.

Se efectúa además un análisis comparativo de los resultados obtenidos, con los logrados por las metodologías de difundida aplicación en nuestro país, o sea la Regla Benkelman y el Deflectógrafo Lacroix.

I. INTRODUCCION

El Laboratorio Vial del IMAE ha estado siempre presente, en el medio Vial Argentino, en la actualización, desarrollo y difusión de las técnicas relacionadas con la medición de la deformabilidad estructural y su metodología de explotación.

Podríamos recordar como puntos relevantes el desarrollo de la Regla Benkelman Doble, la posibilidad de su instrumentación, y el énfasis puesto en la importancia no solo de la deflexión sino también del radio de curvatura como indicadores globales del estado estructural del camino.(1)

Posteriormente con la introducción de los deflectógrafos LACROIX a nuestro país se realizó la coordinación entre la Dirección Nacional de Vialidad y la misión francesa lo que dio lugar a publicaciones conjuntas, donde se analizaron particularidades del equipo, metodologías de medición y se plantearon también correlaciones con las deformaciones medidas con la Regla Benkelman de acuerdo a diferentes tipos estructurales.(2)

El desarrollo de programas de retroajuste modular BACKMOD por medio del Grupo de Trabajo del Laboratorio Vial del IMAE posibilitó la explotación de las mediciones de deformabilidad con las distintas tecnologías, con el objetivo de su utilización para alimentar con datos más confiables a los métodos de diseño racional.(3)

Al presente, desde el mes de abril de 1994, ha transcurrido un año durante el cual el Laboratorio Vial canalizó actividades de difusión tecnológica y asistencia técnica al medio mediante el uso de un equipo deflectógrafo dinámico por impacto (Falling Weight Deflectometer) perteneciente a la firma KUAB Konsult and Utreckling A.B. de Suecia. Para lo cual fue firmado un Convenio con el acuerdo de las partes.

II. DESCRIPCION DEL EQUIPO

El KUAB 2M-FWD consiste básicamente de un trailer que contiene el equipamiento para la realización del ensayo de carga por impacto con la correspondiente medición de las deformaciones en la superficie del pavimento, el cual es remolcado por un vehículo en el que se encuentran instalados la computadora y los puentes destinados al control de la medición y adquisición de resultados. Figuras 1 y 2.

El mismo permite la auscultación de todo tipo de pavimentos mediante la aplicación de una carga de impacto sobre la calzada. La magnitud y forma del pulso de carga son controlados mediante la altura de caída, la masa que efectúa el impacto y las características de los

amortiguadores intermedios, de manera de simular fielmente la sollicitación de los vehículos sobre la calzada. Figura 3.

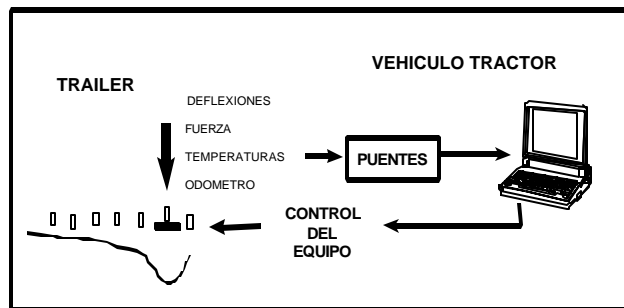


Figura 1. Esquema de un deflectógrafo a impacto (tipo FWD)



Figura 2. Foto del Equipo FWD-KUAB

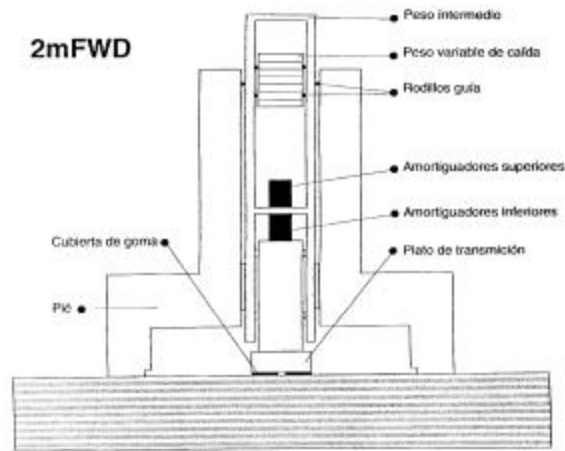


Figura 3. Esquema del sistema de carga

Este esquema es importante ya que valora el comportamiento de los materiales en una condición de trabajo similar a la real del tránsito y por lo tanto se minoran las diferencias de:

- comportamiento de las mezclas asfálticas a frecuencias reducidas.
- comportamiento no lineal de los suelos y materiales granulares.

El sistema de doble masa permite una mejor repetibilidad de resultados, mejorando el contacto inicial entre el plato de carga y la calzada antes de aplicar el impacto.

Para lograr una mayor uniformidad en la presión de contacto dispone de un plato de transferencia de carga segmentado adaptándose de esa manera a las irregularidades de la superficie de pavimentos deteriorados y aproximándose en mayor grado a la hipótesis de presión uniforme realizada habitualmente en la utilización de los programas destinados a la explotación de los resultados. Figura 4.

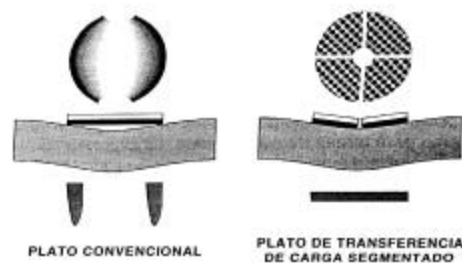


Figura 4. Esquema del plato de carga

Sus siete sensores de deflexión (tipo sismógrafos) permiten valorar la deformación absoluta de los puntos elegidos para la auscultación con precisión suficiente para la realización de mediciones sobre pavimentos rígidos, pudiendo estar el sensor más alejado a 180 cm del centro de la carga, y siendo posible ubicar sensores delante del eje de carga para el análisis de movimiento de juntas en pavimentos de hormigón.

La existencia de una señal odométrica, con posibilidad de diferenciar movimientos en reversa, proveniente de una de las ruedas del trailer permite en todo momento conocer la progresiva sobre la que se encuentra el equipo, posibilitando la programación de alarmas con equiespaciamiento para la ejecución de ensayos.

Completan la información recabada en cada punto de medición un sensor de carga y dos de temperatura, uno del aire y el otro de la superficie del pavimento.

III. CARACTERISTICAS DE LA MEDICION

El rendimiento del equipo en operación depende del número de cargas aplicada por punto de auscultación, al menos dos, de la distancia entre puntos de auscultación y de la precisión con que deba posicionarse. Orientativamente puede considerarse un ciclo de medición cada 2 minutos, o sea que si se releva un punto cada 500 metros se evalúan 15 kilómetros por hora.

Las normas ASTM 4694/5-87 fijan la metodología general de medición de deflexiones y en particular de los FWD, estableciendo para la temperatura un rango de operabilidad de los equipos entre -10 y 50 grados centígrados(4). Consideramos deseable corregir las mediciones por temperatura para poder valorar a estas en conjunto y recordando el espíritu con el que se concibió el equipamiento, esta temperaturas de referencia puede adoptarse como la temperatura de la mezcla asociada a la media anual ponderada.

Entre las utilidades principales podemos mencionar:

- Determinación de tramos de comportamiento homogéneos
- Obtención de datos para el cálculo de refuerzos por métodos empíricos o racionales mediante el retrocálculo de módulos.
- Auscultación en pavimentos de hormigón de transferencia de cargas en juntas y huecos bajo las mismas.

- Evaluación de pistas en Aeropuertos.

Las mismas serán comentadas en el punto V donde se exponen algunas de las tareas realizadas.

IV. SOFTWARE

IV.1. SOFTWARE PROPIO DEL EQUIPO KUAB

El control del equipo y la adquisición de datos son realizados mediante una PC Notebook ubicada en la cabina del vehículo tractor, cada una de estas funciones son realizadas a través de un software específico dado por el fabricante.

Los programas de control efectúan chequeos internos, dan instrucciones al operador vía pantalla, preguntan al operador datos de identificación, fuerza máxima a utilizar, etc. Operan los sistemas hidráulicos y de medición, archivan y exponen los datos recolectados, y finalmente los presentan en una tabla.

Los programas encargados de manejar los datos presentan tablas de deflexiones, etc., vía pantalla o impresora, editan datos, unen archivos de datos, normalizan, ordenan, calculan módulos de superficie, dividen secciones de testeo en subsecciones con deflexiones homogéneas, calculan valores de media y característica, además grafican perfiles de deflexiones y módulos de superficie vía pantalla.

La realización rutinaria de un muestreo consiste en ajustar inicialmente las variables deseadas, número de golpes por punto, alturas de caída, equiespaciamiento, datos generales de la sección y luego una vez comenzado el programa de medición sólo hace falta oprimir una tecla de función en la PC para realizar un ciclo de medición e introducir los comentarios asociados al punto auscultado.

IV.2. SOFTWARE DE RETROAJUSTE

Es importante destacar que el disponer de mayor cantidad de datos sobre la forma de la deformada en superficie (con este tipo de equipamiento hasta 7 puntos ubicados hasta 180 cm de la carga), permite utilizar programas de retroajuste de módulos estructurales con mayor grado de precisión. Siendo de particular importancia si el análisis se realiza sobre estructuras como las de aeropuertos donde el bulbo de tensiones provocado por las cargas es mayor.

Este análisis y el software correspondiente no forma parte del equipo sino que es un servicio de ingeniería adicional al de las mediciones. Si bien la empresa KUAB proporciona software específico, por el momento para realizar un mayor control de las variables puestas en juego hemos preferido la utilización del software propio.

En el Laboratorio Vial del IMAE se desarrolló, con bastante anterioridad a este convenio, el Programa BACKMOD. A través del mismo puede realizarse el ajuste de los módulos de las distintas capas existentes en la estructura del pavimento a partir del conocimiento de los espesores de las mismas y de la deformada en superficie, siendo de gran utilidad en este análisis el poseer datos de ensayos de penetración con Penetrómetros Dinámicos de Cono DCP para la adopción de los módulos de partida en el proceso iterativo de retroajuste modular. (5)

El Programa BACKMOD permite la simulación de cuatro tipos de mediciones de la deformada: deflectógrafos tipo Lacroix, regla Benkelman simple, regla Benkelman doble y mediciones absolutas, en esta última se encuentran las mediciones con KUAB. Pueden además ser definidas las características modulares de las distintas capas como: dato, con variación de su módulo en función de las tensiones, con escalonamiento modular con respecto a la capa inferior o como incógnita, característica que va de acuerdo al tipo de datos de la deformada que se posea, y distintas condiciones de interface, ligadas o no ligadas.

V. TRANSFERENCIA DE TECNOLOGIA - TRABAJOS A TERCEROS

En el año que se dispuso del equipo, se realizaron trabajos con diferentes objetivos los que resumen las distintas aplicaciones de los equipos FWD.

Como punto de partida puede comentarse su utilidad como cualquier deflectómetro para obtener parámetros estructurales globales que contribuyan a la **definición de tramos de comportamiento homogéneo**. Pero gracias a la mayor precisión de los resultados de deformabilidad logrados, pueden obtenerse valores del radio de curvatura con menores dispersiones manteniendo prácticamente solo la variabilidad motivada por las distintas condiciones estructurales.

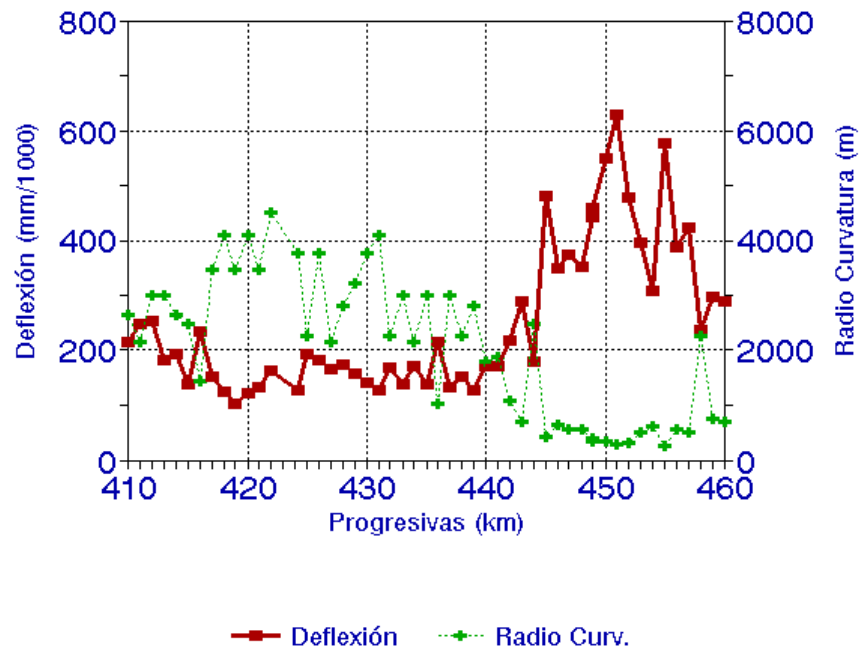


Figura 5. Medición de deformabilidad para determinación de tramos homogéneos

En la Figura 5 se muestra un caso en el que se realizaron mediciones sobre estructuras semirígidas, notándose una buena homogeneidad dentro de los subtramos que se pueden diferenciar tanto en la deflexión como en el radio de curvatura, sin las grandes variaciones observadas punto a punto en el radio de curvatura que son habituales en las mediciones con regla Benkelman.

La mayor utilidad consiste en que todo el equipamiento está diseñado de manera de obtener valores adecuados para la **realización del retroajuste modular de la estructura auscultada**. En la medida que la frecuencia y nivel de la sollicitación impuesta resulta similar al del tránsito que provoca el deterioro del camino, se obtienen los módulos de la calzada para esta condición de trabajo, salvando así diferencias que alteran las predicciones sobre el comportamiento.

Recordemos que los materiales no ligados presentan un módulo de trabajo función del nivel de sollicitaciones (6) cobrando así importancia la carga por eje utilizada para la auscultación; de similar manera la frecuencia condiciona las capas asfálticas afectando los módulos obtenidos en el retroajuste.

Consideramos muy útil la realización de ensayos en paralelo (como ser el penetrómetro dinámico de como) que guíen/confirmen el proceso de ajuste modular a partir del conocimiento de los espesores . Una vez obtenidos los módulos de las distintas capas es posible realizar un análisis utilizando teorías mecanicistas o las guías para el Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO 1993.

A título de ejemplo se muestran en las Figuras 6 y 7 los modelos estructurales obtenidos a partir de valores medios y característicos de las deformabilidades medidas sobre un tramo homogéneo en el que pueden comentarse la menor rigidez obtenida para el Suelo Cal con respecto al Suelo Seleccionado para ambas condiciones, como así también la existencia bajo la subrasante de un estrato de mayor rigidez.

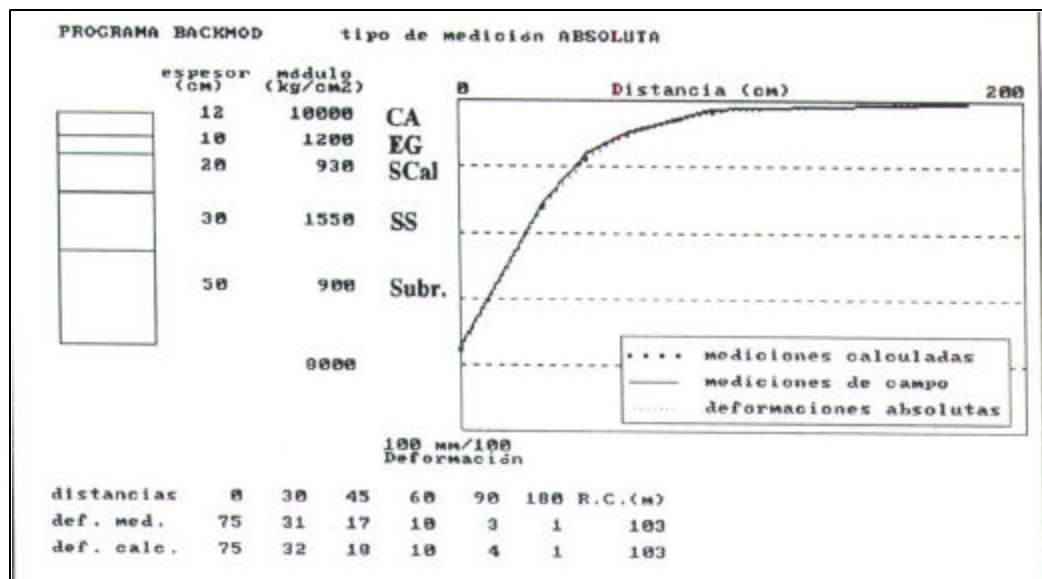


Figura 6. Ajuste modular en condiciones medias para un tramo homogéneo

Es importante recalcar las limitaciones de esta metodología a las reales capacidades de modificar la deformada en superficie de las distintas capa; es aquí la mayor importancia de realizar ensayos adicionales.

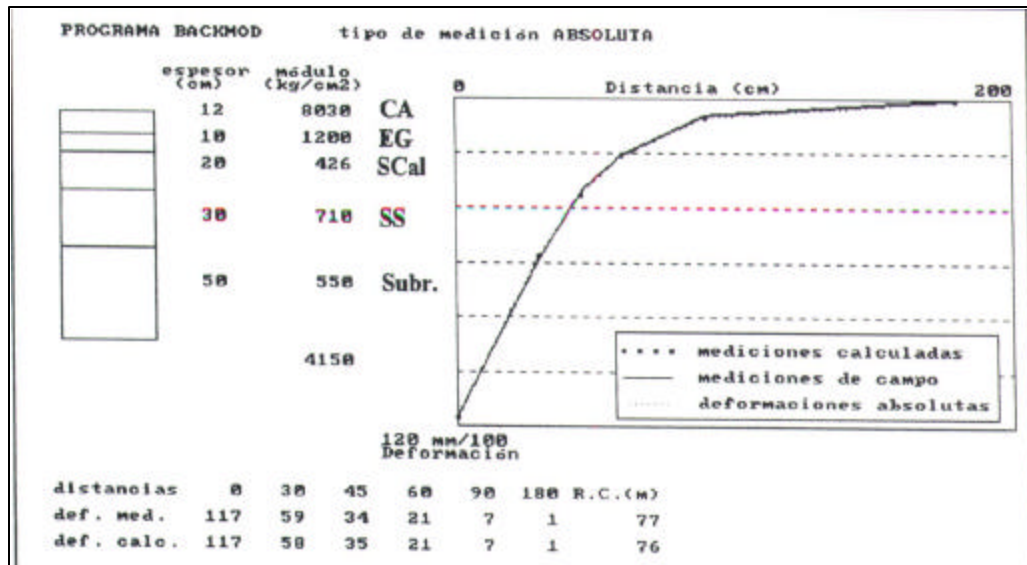


Figura 7. Ajuste modular en condiciones características (20%) para el mismo tramo

La precisión de las mediciones realizadas permite extender esta metodología a los pavimentos rígidos y semirígidos de difícil o nula aplicabilidad con las metodologías convencionales en nuestro país Benkelman o Lacroix.

Es posible el **cálculo del coeficiente de balasto Kc** a partir de las mediciones efectuadas con los equipos FWD, para lo cual pueden utilizarse las recomendaciones dadas por las guías para el Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO 1993 pag. II 44.(7)

Es posible realizar el **análisis del estado de las juntas de pavimentos de hormigón**, para lo cual la metodología consiste en evaluar las deformaciones producidas con la carga próxima a la junta, siendo factible el posicionamiento a ambos lados de la misma; una auscultación en el centro de la losa complementa la información respecto a la condición de trabajo como medio multicapa sin la interferencia de las juntas.

En la Figura 8 se muestran las cinco auscultaciones realizadas sobre una losa, en este caso pertenecientes a una calle de acceso dentro del puerto Rosario; la A1 y la A5 con la carga aplicada en las losas adyacentes y con el plato de carga lo más próximo posible a la junta mientras que la A3 corresponde a una auscultación en el centro de la losa.

En este caso particular puede observarse una completa analogía entre las 5 mediciones lo que pone de manifiesto el buen estado de la junta pero además una importante colaboración de la sub-base, en este caso de suelo arena escoria cal.

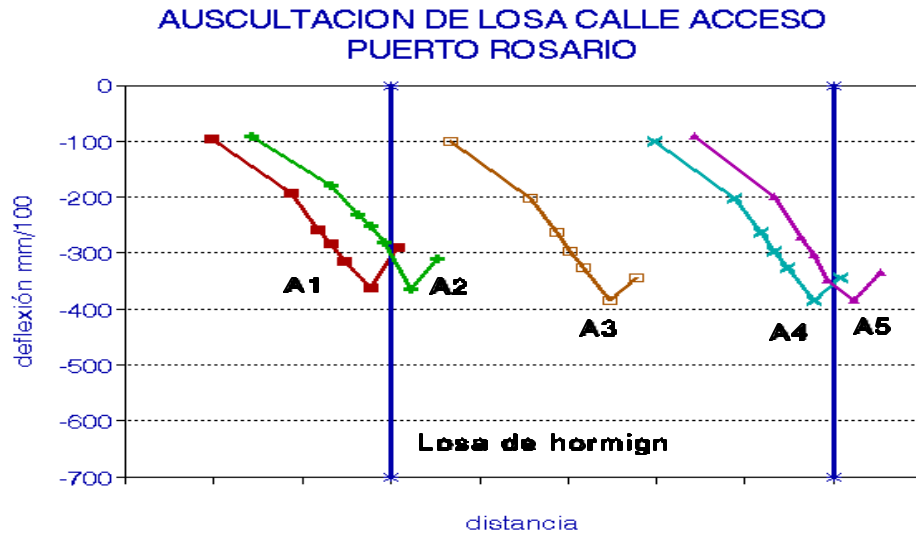


Figura 8. Juntas de una losa de hormigón en perfecto estado

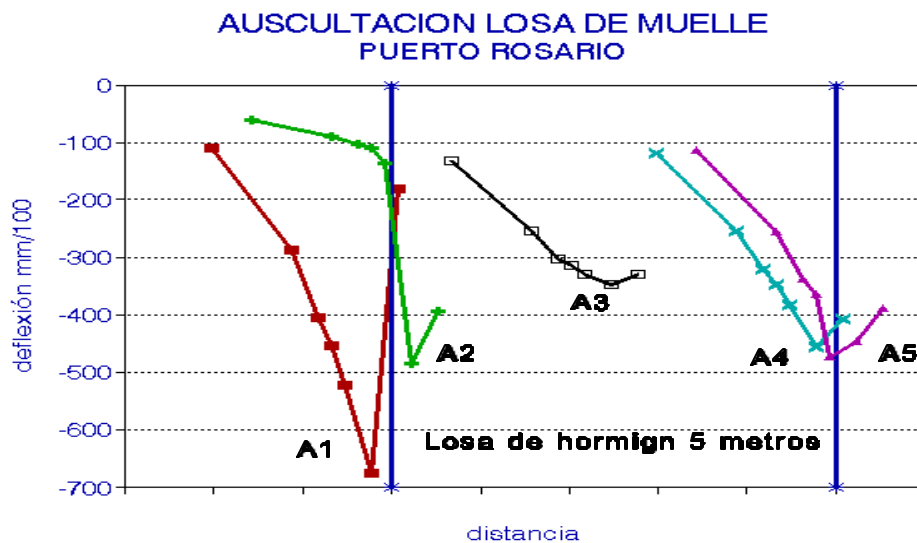


Figura 9. Losa de hormigón con junta en estado deficiente.

Por el contrario la losa de muelle correspondiente a la Figura 9 presenta la junta valorada con las auscultaciones A1 y A2 donde es muy manifiesta la menor deformación de la losa adyacente a la que se esta aplicando la carga y por lo tanto pone en evidencia una baja

transmisión de carga en la misma.

Gracias a la calidad y cantidad de la información suministrada los FWD son indicados para incluir dentro del equipamiento destinado a la **valoración y seguimiento de tramos testigo**; en esta línea se utilizó en el análisis de mejoras realizadas con la técnica de reciclado en frío tarea que es descripta en el trabajo "Reciclado en frío in situ - "RFS" interesante herramienta para la recuperación de Pavimentos Asfálticos", presentado a este mismo congreso(8).

Dentro de otro trabajo realizado se estudió la diferente deformabilidad en la junta longitudinal entre una calzada de hormigón existente y el ensanche de la misma realizado como tipo estructural semirígido. El objetivo fue proyectar la estrategia para retardar la aparición de fisuras reflejas y disponer de datos confiables para el análisis futuro de eventuales tramos experimentales. La Figura 10 muestra parte de la información recabada, en esta gráfica se indican la deformación a cada lado de la junta longitudinal auscultada. En la losa de hormigón es notoria la variación punto a punto, motivada por la evaluación sistemática de centro de losa y junta. En la Figura 11 puede verse una foto del equipo en el momento de realización de este trabajo.

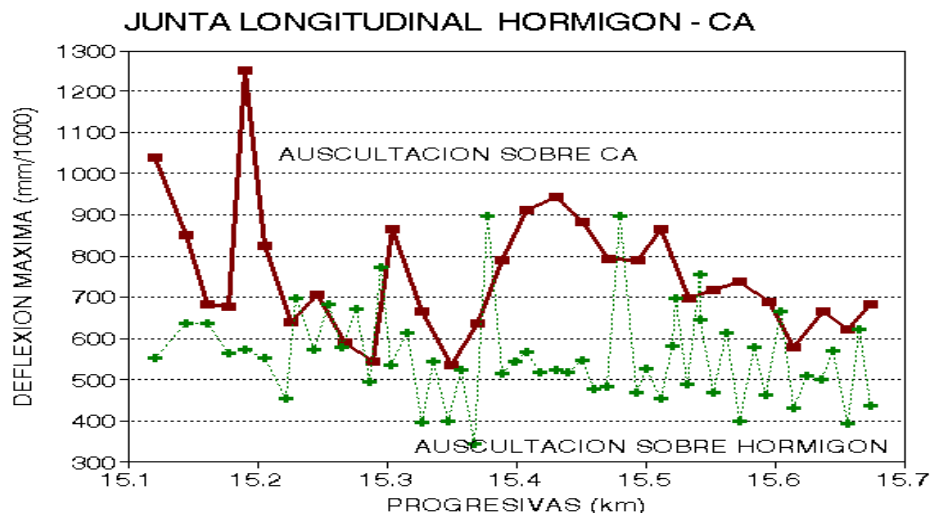


Figura 10. Deformación en ambos lados de una junta longitudinal

El comentario de algunos de los trabajos realizados no pretende el desarrollo de los mismos dentro de este artículo sino solo poner de manifiesto la versatilidad del equipo y el interés puesto en el medio por la utilización de nuevas tecnologías que compiten comercialmente con las convencionales.



Figura 11. Vista del equipo FWD-KUAB en operación

VI. COMPARACION CON OTRAS METODOLOGIAS EN USO

Frente al requerimiento de como correlacionan las deflexiones medidas con el FWD KUAB respecto a las en uso en nuestro país (Benkelman y Lacroix) pensamos que **lo realmente importante es como difieren los modelos** estructurales logrados por las diferentes metodologías y finalmente que error en la prognosis del comportamiento motivan estas diferencias.

Este segundo planteo es lo que estamos estudiando, pero por el momento no tenemos conclusiones definitivas. Con respecto a la primera podemos realizar algunos comentarios:

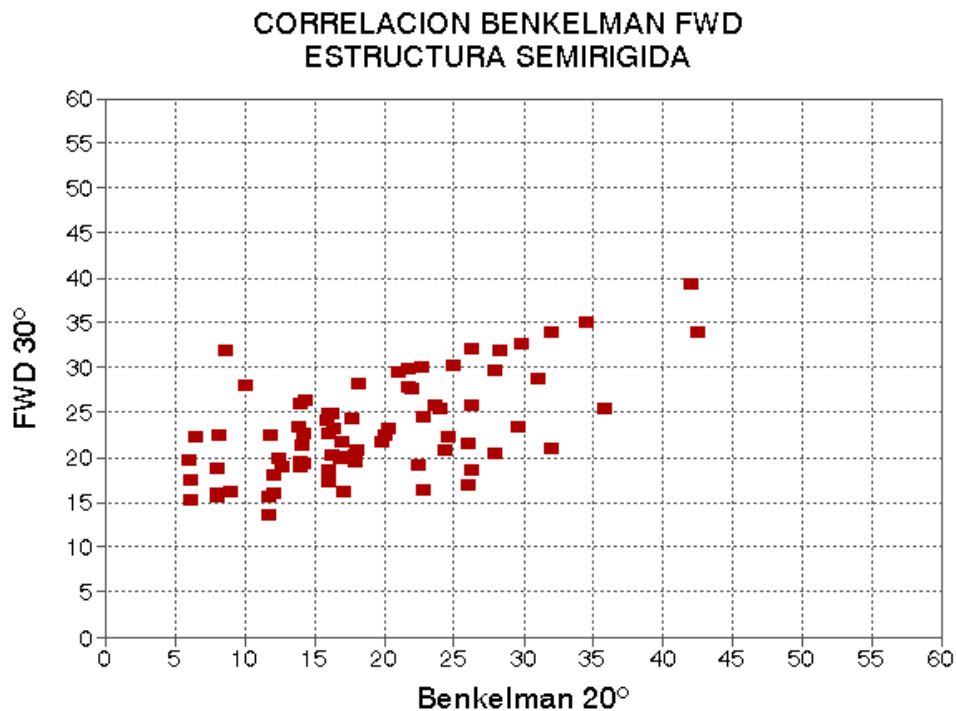
-La magnitud de la carga juega un papel fundamental y difiere en las distintas metodologías, con el FWD realizamos la auscultación rutinaria con una carga de 5000 kg que representa un eje de 10000 kg. Por ser mayor a la de los otros sistemas, este aspecto motivaría la obtención de mayores deflexiones.

-La frecuencia de ensayo es mayor en el caso de los FWD (similar a la del tránsito pesado), por lo cual en este aspecto las diferencias resultan dependientes del tipo estructural logrando mayor reducción de la deflexión y aumento del radio de curvatura en la medida que aumente el espesor de las capas asfálticas y estas se mantengan íntegras.

-No es de menor importancia la temperatura de ensayo que en este caso depende de las circunstancias particulares en que se realizó la auscultación. Recordemos que consideramos como temperatura óptima para la realización de las determinaciones con FWD la temperatura media anual ponderada asociada a la mezcla del orden de los 30°C en la zona litoral y mayor a los 20°C normalizados para la deflexión Benkelman.

-El medir las deformaciones por medio de sismógrafos permite, en los FWD, la valoración total de la deformada y no respecto a puntos situados en general dentro del mismo cuenco, con lo que se arriba en los métodos por impacto y a mayores valores. Y además sensibles a capas de mayor profundidad (razón por la cual poseen amplia ventaja en la auscultación de aeropuertos). Esta circunstancia plantea en realidad un aumento de la dispersión de los resultados cuando se pretende relacionar solo las deformaciones máximas de cada sistema de medición

Solo a título de ejemplo mostramos en la Figura 12 la correlación obtenida entre mediciones Benkelman y FWD realizadas sobre un tipo estructural semi-rígido, es necesario tener en cuenta lo reducido de las deformabilidades valoradas, lo que puede motivar importantes dispersiones en las mediciones Benkelman. En la actualidad estamos teniendo buenos resultados en regresiones obtenidas de las deflexiones Benkelman o Lacroix con respecto a un conjunto de deformaciones FWD (0, 30 y 180 cm de la carga) y no solo respecto a la máxima deformación.



FigFigura 12. Ejemplo de correlación Benkelman -FWD

BIBLIOGRAFIA

- (1) J. TOSTICARELLI. "Sobre la determinación de deflexiones y radio de curvatura en pavimentos flexibles". XVII Reunión anual del Asfalto, 1971.
- (2) A. TAGLE, J. TOSTICARELLI, E. PETRONI y grupos de trabajo. "Premières espériences d'utiisation des déflectographes Lacroix en Argentine". Bulletin de liaison des L.C.P.C n° 121, sept-oct 1982.
- (3) O. GIOVANON y M. PAGOLA. "El programa Backmod, para el cálculo de los módulos estructurales a partir de mediciones de la deformada en superficie". XXVII Reunión del Asfalto, Buenos Aires, diciembre 1992.
- (4) Normas ASTM 4694/5-87 "Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device" y "Standard Guide for General Pavement Deflection Measurements". Annual book of ASTM STANDARDS.
- (5) S. ANGELONE, J. TOSTICARELLI y F. MARTINEZ. "Aplicación del penetrómetro dinámico de cono en obras viales y controles de compactación". 3^{er} Encuentro anual de Centros IPC de Transferencia de Tecnología, Brasil, 1994.
- (6) S. ANGELONE y F. MARTINEZ. "Módulo Resiliente de Suelos y Materiales Granulares no tratados. Su aplicación al Diseño Estructural de Pavimentos en la Argentina". Vigesima quinta Reunión del

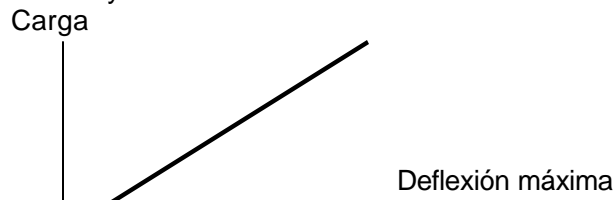
Asfalto..

(7) American Association of State Highway and Transportation Officials. "AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993"

(8) COVINORTE, IMAE, WIRTGEN BRASIL y PRODUCTORA QUIMICA. "Reciclado en frío in situ - "RFS" interesante herramienta para la recuperación de Pavimentos Asfálticos" XXVIII Reunión del Asfalto.

COMENTARIOS ADICIONALES EN EL USO DEL FWD

- Siguiendo las recomendaciones del fabricante del equipo KUAB para la obtención de mediciones más confiables, se aplican en cada punto de ensayo un primer golpe para acondicionamiento y luego los golpes para la medición de la deformabilidad.
Pueden requerirse incluso más de dos golpes en condiciones críticas, altas temperaturas y altas macrotexturas, pues el hincado de algún agregado puede dar una deflexión máxima falsamente elevada.
- Pueden consultarse las normas específicas donde se expresan los requerimientos del instrumental, ASTM D4694-87 (Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device).
- Para valorar huecos bajo las juntas consultar la guía AASHTO. Una de las opciones es en cada punto aplicar cuatro cargas 15000, 15000, 10000 y 5000 Kg y valorar el corrimiento de la curva carga deformación, se hace referencia que valores mayores de 50 micrones es un indicador de huecos en las juntas.



- Según la metodología brindada en la guía de diseño AASHTO 1993 apéndice L (Documentación del procedimiento de diseño), en los pavimentos de hormigón se relacionan en base a las siguientes fórmulas el espesor de la losa, el módulo del hormigón, el coeficiente de balasto compuesto.

$$\text{Area} = 6 [1 + 2 (D_{30} / D_0) + 2 (D_{60} / D_0) + (D_{90} + D_0)]$$

$$L_K = [\ln ((36 - \text{Area}) / 1812.279133) / (-2.559340)]^{4.387009}$$

$$K = (8 / (P D_0 L_K^2) \{ 1 + (1 / (2 \delta)) (\ln (a / (2 L_K) + 0.57721566490 - 1.25)) (a / L_K) \})$$

$$L_K = [E_{PCC} D_{PCC}^3 / (12 (1 - u_{PCC}^2) K)]^{1/4}$$

Donde:

Area, L_K variables intermedias
 D_l deflexión a la distancia l (inch)
 Ln logaritmo neperiano
 K coeficiente de balasto compuesto (psi/inch)
 E_{PCC} módulo del hormigón (psi)
 D_{PCC} espesor de la losa de hormigón (inch)
 U_{PCC} coeficiente de poisson del hormigón
 P carga aplicada (lbs)