

MODELIZACIÓN ESTRUCTURAL CON DEFLECTOMETRÍA LACROIX

Msc. Ing. Oscar Giovanon y Msc. Ing. Marta Pagola
Laboratorio Vial IMAE - Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Universidad Nacional de Rosario
Berutti y Riobamba – 2000 Rosario – Argentina
Email: ogiovano@eie.fceia.unr.edu.ar

Resumen

La modelización estructural de una estructura existente se basa en la caracterización de los materiales existentes y suele complementarse con la medición deflectométrica, posibilitando esta práctica la realización del retroajuste modular.

La técnica del retroajuste modular consiste en lograr un modelo mecanicista de la estructura auscultada que presente valores deflectométricos similares a los evaluados en campo, logrando de esta forma una más ajustada predicción del comportamiento esperado.

Habitualmente esta metodología es aplicada basándose en mediciones con deflectógrafos a impacto FWD, en el presente trabajo se muestra la posibilidad de la realización de retroajustes modulares en base a las mediciones de deflectógrafos Lacroix.

Se comentan los criterios utilizados para la simulación en el modelo de la medición deflectométrica Lacroix y el filtrado realizado sobre los datos de la medición para lograr una determinación consistente del cuenco de la deformada relevado.

Finalmente se ejemplifican resultados obtenidos y se comentan las posibles diferencias modulares originadas por la metodología de evaluación. Diferencias que se justifican en la simplificación habitual, realizada al adoptar módulos constantes.

LA AUSCULTACIÓN ESTRUCTURAL

En referencia a la auscultación estructural, esta tiene como objetivo principal lograr los datos requeridos para realizar la Caracterización de la Estructura consistente en un modelo que representa a la estructura existente y que posibilita evaluar la aptitud de la misma para soportar el nivel del tránsito que la solicita.

En este sentido la Caracterización Estructural desde un punto de vista mecanicista puede resumirse en el conocimiento de los materiales existentes y sus espesores. Si bien el conocimiento de los materiales implica un conjunto importante de parámetros, su módulo de rigidez puede expresarse como uno de los más relevantes.

Dentro de esta auscultación se realizan acciones generales y puntuales, como así también acciones destructivas y no destructivas. Es deseable, dentro de estas dualidades, lograr una buena representatividad del modelo minimizando las acciones destructivas sobre la calzada.

Para lograr una adecuada representatividad se requiere realizar un gran número de mediciones a lo largo de la traza, en este sentido la medición deflectométrica consiste en un indicador global de la estructura adecuado para realizar un muestreo exhaustivo de la totalidad del tramo a estudiar. Particularmente los deflectógrafos Lacroix cumplen este objetivo al realizar sistemáticamente mediciones en ambas huellas cada poco más que seis metros.

Continuando con las mediciones no destructivas, la medición de espesores con sistema de Georradar permite la realización de un muy importante número de determinaciones complementando adecuadamente la deflectometría y operando a velocidades del tránsito.

El conocimiento de las deformaciones bajo carga y de los correspondientes espesores del pavimento, permite la aplicación de la técnica de retroajuste modular, que consiste en el ajuste de los módulos de rigidez de las capas de la estructura de manera de aproximar en el modelo las deformaciones evaluadas en el campo.

El retroajuste modular es habitualmente realizado a partir de mediciones de deformación realizadas con deflectógrafos dinámicos por impacto, en el presente trabajo se comenta la optimización de las mediciones efectuadas con el deflectógrafo Lacroix para utilizarlas con este fin.

DEFLECTOMETRÍA

Aspectos Generales

El equipamiento de los Deflectógrafos Dinámicos por Impacto FWD fue concebido de manera de representar el pasaje de la carga del semi eje del eje de referencia sobre la calzada a velocidad de tránsito y valorar los desplazamientos totales producidos por dicha carga. En este sentido su aplicación al Retroajuste Modular de pavimento se plantea como directa.

El equipamiento de los Deflectógrafos Lacroix, a diferencia del FWD, fue concebido teniendo presente la realización de un exhaustivo muestreo y la no detención del equipo sobre la calzada a auscultar. Esta temática plantea diferentes particularidades para su uso en el Retroajuste Modular de pavimentos, pueden citarse:

- El punto inicial de apoyo del palpador presenta un desplazamiento vertical previo, y por lo tanto no considerado en la medición.
- La base de referencia de las mediciones (los puntos de apoyo del trineo) no es absoluta, ya que pueden encontrarse dentro del propio cuenco, además también se desplaza a lo largo de la medición.
- La velocidad de medición difiere de la utilizada por los vehículos pesados en ruta, si bien podría ser adecuada para representar condiciones críticas en intersecciones o cruces urbanos.
- La precisión de los valores obtenidos.

Dado que las deflexiones medidas no son desplazamientos absolutos no es posible su directa comparación y ajuste, la solución es plantear dentro del modelo la simulación completa del

proceso de medición, ajustando la deflexión simulada con la deflexión medida.

La valoración de la deflexión de un punto del cuenco no es simplemente su desplazamiento, sino que consiste en evaluar la diferencia de desplazamientos entre el palpador B y el desplazamiento en la posición B del plano del sistema de referencia triangular A C(C' C'') A', descontando además el desplazamiento del punto de apoyo inicial. La Figura 1 muestra el esquema del trineo de medición utilizado en la simulación y el conjunto de datos requeridos.

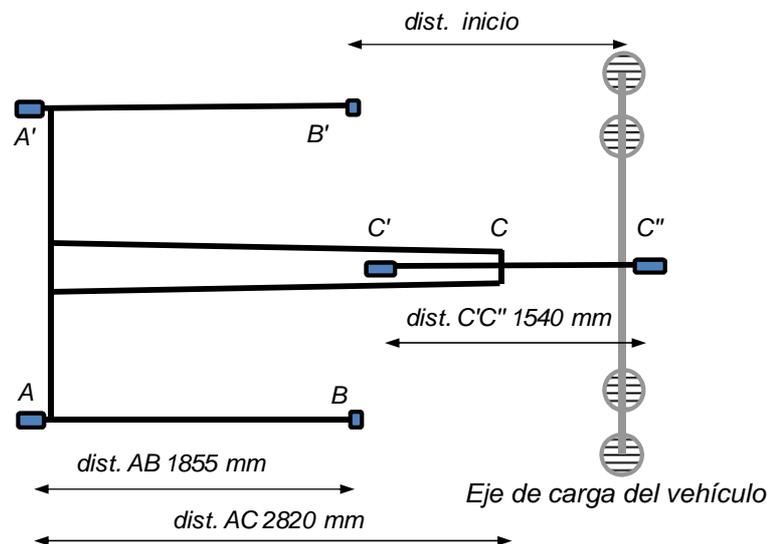


Figura 1. Esquema del trineo de medición y valores relevados en el Equipo I de la Dirección Nacional de Vialidad Argentina

Relación entre mediciones y módulos

La metodología de retroajuste modular es posible gracias a que las deflexiones auscultadas sobre la calzada son una consecuencia de la estructura existente, la que puede resumirse en espesores de los materiales, sus módulos de rigidez (para la condición de ensayo) y la condición de las interfaces.

Luego, conocidos los espesores y condición de las interfaces mediante otros procedimientos es posible realizar el ajuste del conjunto de las rigideces modulares. Este ajuste para una capa determinada será posible sólo si la variación de su módulo afecta en forma significativa las mediciones deflectométricas realizadas y además estas variaciones no son también obtenibles por variaciones producidas en otra capa o conjunto de otras capas.

Para analizar esta temática se analizaron diferentes estructuras mediante su simulación en el programa BackVid (Giovanon e Pagola 2007), de los cuales se ejemplifican los resultados con una de las estructuras analizadas indicada en la Figura 2. Se evaluaron las variaciones de las deflexiones obtenidas al reducir el módulo de cada una de sus capas al 50% de su valor de referencia.

Las Figuras 3 y 4 muestran gráficas de Deflexiones y Variaciones de Deflexiones, respecto a la de referencia, obtenidas para la simulación de la medición con FWD. En ellas puede observarse que con sensores distribuidos en longitud se satisfacen las condiciones requeridas para la realización del retroajuste modular de las diferencias capas estructurales, por ejemplo

deflexiones distantes más de 1200 milímetros de la carga sólo son condicionadas por la subrasante.

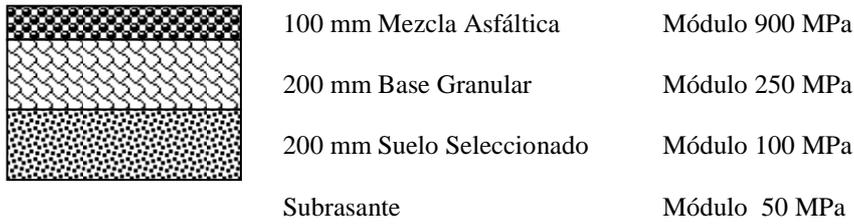


Figura 2. Esquema estructural, indicando espesores materiales y módulos de referencia

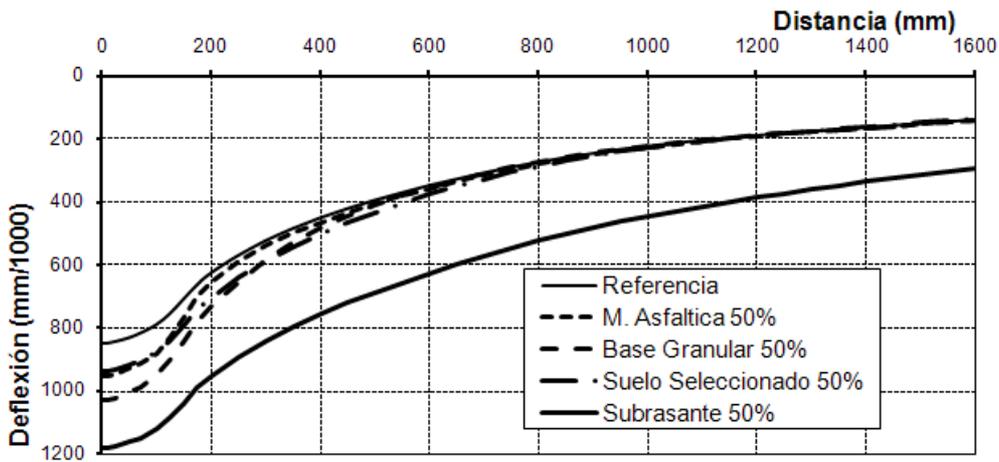


Figura 3. Deflexiones FWD, simuladas para diferentes valores modulares

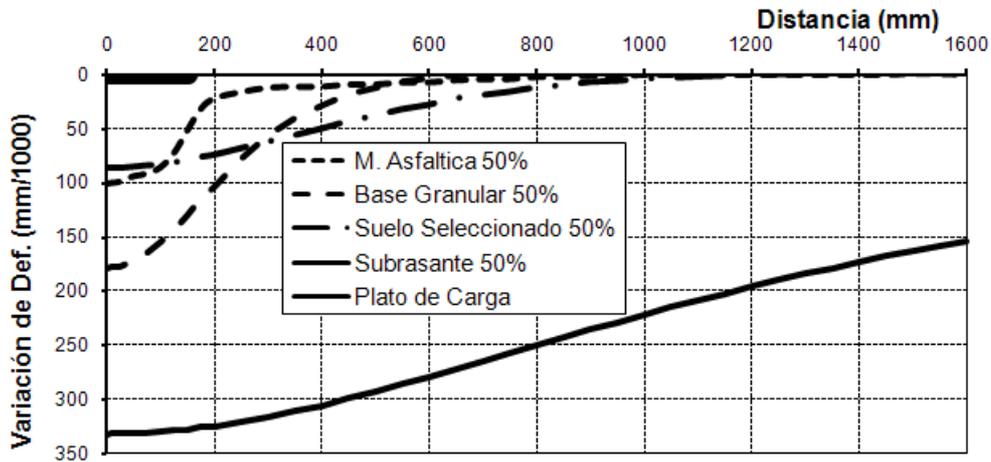


Figura 4. Variaciones de las Deflexiones FWD, respecto a la referencia

Al realizar este mismo análisis sobre la simulación de la deflectometría Lacroix se obtuvieron los gráficos de las Figuras 5 y 6. En ellos se distingue claramente el punto de apoyo del palpador a 1600 milímetros de la máxima deflexión donde todos los valores medidos son nulos y como obvia consecuencia también son nulas todas las sensibilidades respecto a las diferentes capas. Este hecho es una diferencia trascendente respecto a la medición con FWD,

ya que para este último los desplazamientos a esta distancia son sólo consecuencia de la subrasante y capas profundas.

La deflexión presenta para Lacroix una menor sensibilidad respecto a la capa de superficie, hecho motivado por la diferente posición del sensor, que en el FWD se encuentra en el centro del plato de carga.

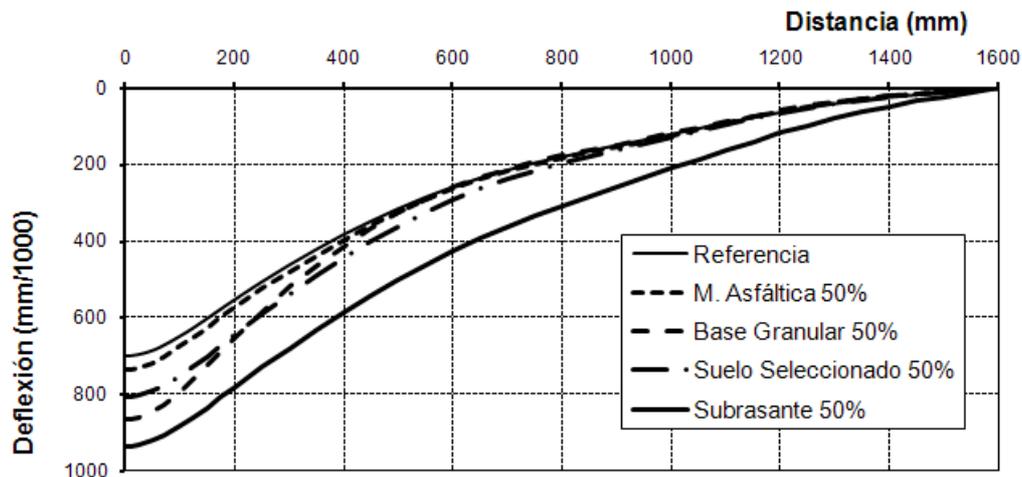


Figura 5. Deflexiones Lacroix, simuladas para diferentes valores modulares

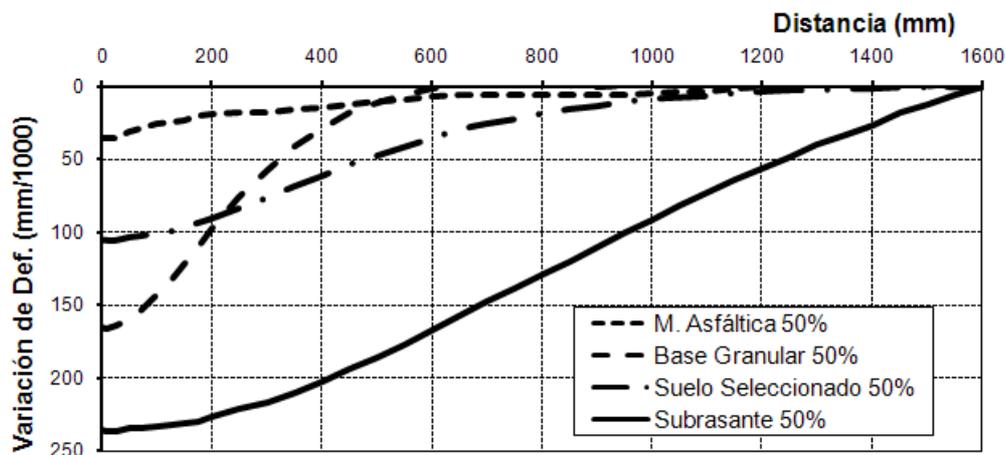


Figura 6. Variaciones de las Deflexiones Lacroix, respecto a la referencia

En las Figuras 5 y 6 se observa finalmente que las variaciones de deflexión provocadas por las diferentes capas a lo largo del cuenco no se presentan con proporcionalidad, lo que posibilita el proceso de retroajuste. Pero se muestran con menores diferencias de forma, respecto a la medición con FWD, implicando un mayor riesgo de diferentes soluciones numéricas posibles. Hecho por el cual serán más relevantes las recomendaciones generales para el retroajuste, que se realizan a continuación:

- Adoptar módulos semilla adecuados a los materiales.
- Adoptar o relacionar con alguna de las capas adyacentes, los módulos de las capas de reducido aporte a la rigidez estructural.
- Disponer de ensayos, como ser, penetrómetro dinámico de cono y módulo de los testigos calados, para evaluar la coherencia de los resultados del retroajuste.

Otro tema trascendente, en la metodología de retroajuste modular, es la posible variación del módulo de la subrasante, dada ya sea por la existencia de capas profundas de diferente características a la subrasante y/o por la no linealidad de la subrasante. Se recomienda para el caso general de la deflectometría Lacroix no agregar una capa profunda, dada su menor relevancia en los valores de deflexión y el mayor riesgo de indeterminación que esto ocasionaría.

OPTIMIZACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA MEDICIÓN LACROIX

Al auscultar un pavimento con el deflectógrafo Lacroix puede optarse por relevar solo la deflexión máxima o relevar el cuenco de la deformada, esta última opción es la que brinda las mayores posibilidades para la realización del retroajuste modular.

La versión actual de estos equipos en Argentina releva, en la medición de cuencos, un valor de deflexión cada centímetro en una longitud que se encuentra en el orden de 180 centímetros, para cada una de las huellas.

Se describe a continuación el procedimiento utilizado a los fines de llegar desde este importante número de mediciones, con sus posibles interferencias físicas, mecánicas y de digitalización, a un conjunto de nueve valores de deflexión a distancias definidas por el usuario y medidas desde el valor máximo de deflexión. Para ejemplificar el proceso se seleccionó un cuenco medido que presentaba dificultades.

Se optó como primer paso aplicar el criterio histórico de estos equipos y aproximar el conjunto de puntos discretos con una función polinómica de grado seis, pero aplicada en intervalos, ver Figura 7. Un primer intento realizado con una única ecuación para el conjunto del cuenco arrojó ocasionalmente errores relevantes, errores detectados por el programa de procesamiento al utilizar la opción de visualización detalle de cuencos.

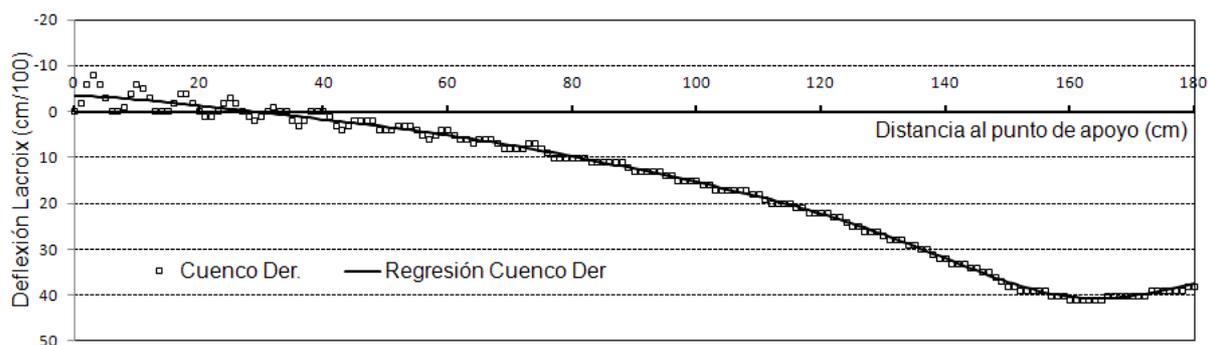


Figura 7. Cuenco relevado y su función de aproximación

Mediante el procedimiento anterior se logra filtrar posibles vibraciones del equipo y reducir errores de digitalización, dado que el equipo tiene una precisión de centésimas de milímetros. Pero como puede visualizarse, en la Figura 7, existe aún una incongruencia del cuenco ya que en la distancia nula la deflexión tiene que ser también nula. Se procedió entonces a efectuar una corrección de la curva basada en la forma de los primeros centímetros, este error de cero se puede motivar en un acomodamiento inicial de apoyo, tanto del palpador como del sistema de referencia, en la Figura 8 se muestra el cuenco corregido por error de cero.

El último paso consiste en ubicar la deflexión máxima y, si se encuentra dentro de un rango de distancias adecuado, asumirla como la posición del palpador al centro de las ruedas duales e informar las distancias del cuenco solicitadas a partir de él, informando además la distancia de este punto al inicio.

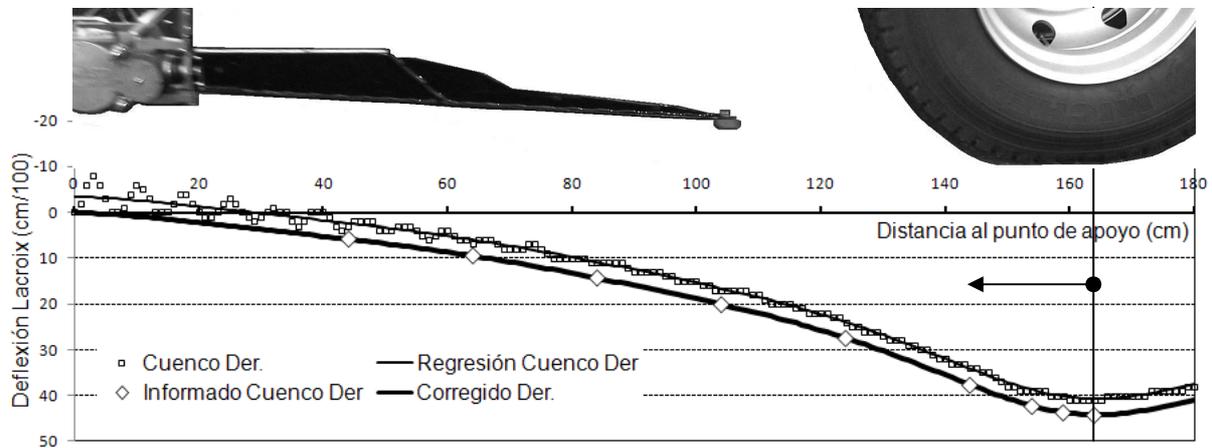


Figura 8. Cuenco relevado, función de aproximación y corrección de cero

EJEMPLO DE APLICACIÓN

Retroajustes con Diferentes Metodologías Deflectométricas – Modelo Lineal

Se muestra a continuación el retroajuste modular de un pavimento en su condición media, donde se utilizan ambas metodologías deflectométricas Lacroix y FWD. La estructura seleccionada es un sector de una autopista, construida en terraplen sobre una subrasante de material granular fino. La Figura 9 muestra los materiales existentes y sus espesores medios.

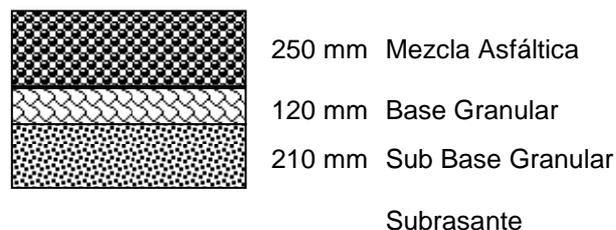


Figura 9. Estructura del sector de autopista

Las Figuras 10 y 11 muestran los resultados obtenidos del retroajuste modular, a partir de las deflexiones medias de cada metodología, luego de eliminar las deflexiones atípicas. Los criterios del ajuste fueron:

- Plantear el retroajuste de un modelo lineal, o sea módulos constantes dentro de cada capa.
- Relacionar con un escalonamiento genérico los módulos de la Base y Sub Base.
- Agregar en la metodología FWD una capa adicional, subrasante profunda.

Con respecto a los resultados obtenidos pueden realizarse los siguientes comentarios:

- En ambos ajustes se logró una adecuada coincidencia entre las deflexiones medidas y

calculadas.

- En el ajuste con FWD las deflexiones absolutas, desplazamientos, coinciden con las deflexiones calculadas.
- En el ajuste con Lacroix las deflexiones absolutas difieren de las deflexiones calculadas, como consecuencia de proceso de la medición.
- Las diferencias obtenidas en los módulos de la mezcla asfáltica, visualmente íntegra, son coherentes con las diferentes frecuencias atribuibles a los ensayos deflectométricos y una temperatura de 23 °C.
- Los módulos obtenidos en las capas no ligadas presentan apropiadas similitudes, es relevante destacar aquí que en Argentina los deflectógrafos Lacroix operan con una carga del eje de 104 KN (Tagle et al, 1981) y con el equipo FWD se simula un eje de 80 KN, semieje de 40 KN.

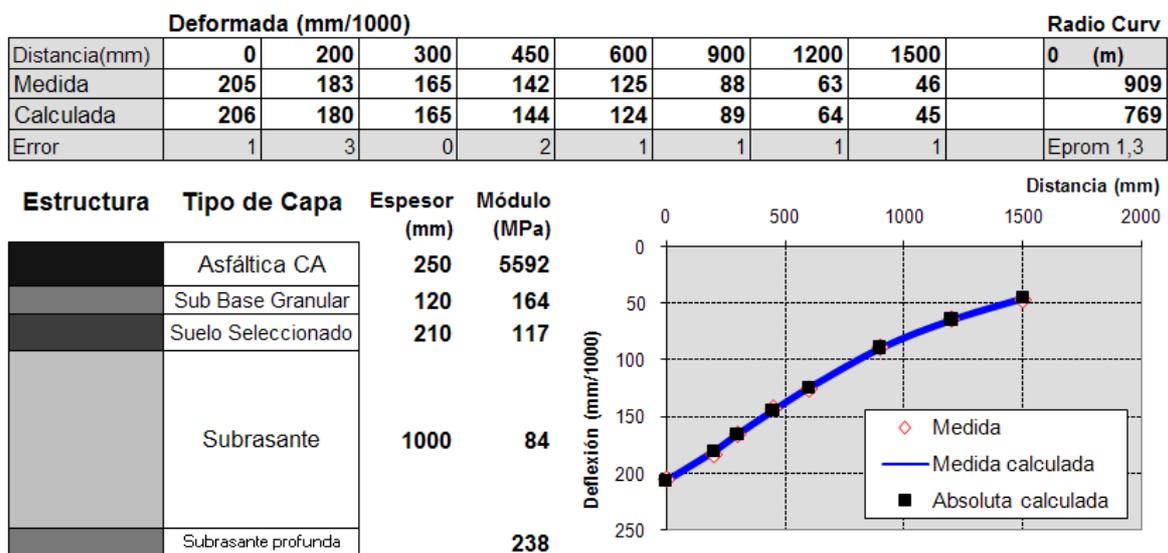


Figura 10. Retroajuste con Deflectometría FWD

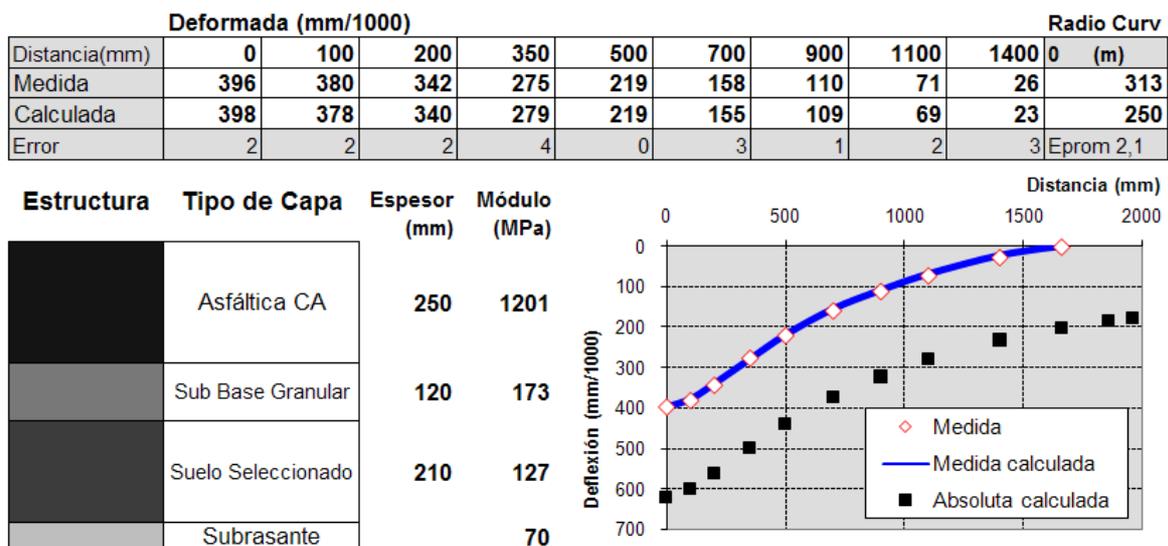


Figura 11. Retroajuste con Deflectometría Lacroix

Es siempre relevante tener presente que los módulos obtenidos de un Retroajuste Lineal son los asociados a las condiciones del ensayo de deflectometría utilizado, condiciones que en general difieren de las medias de servicio para esa estructura y que podrán aún modificarse más relevantemente si la auscultación estructural es con el objetivo de la realización de una mejora (Giovanon e Pagola 1997).

Variaciones Modulares en Capas no Ligadas – Modelo No Lineal

Con el objetivo de evidenciar las posibles variaciones modulares en las capas no ligadas originadas por las condiciones de ensayo y continuando con el ejemplo anterior, se utilizaron las posibilidades del programa de retroajuste BackVid, para realizar un ajuste no lineal (Giovanon e Pagola 2008). La ecuación constitutiva utilizada para representar los materiales no ligados es del tipo potencial, obtenida a partir del ensayo triaxial dinámico, considerando el tensor desviador y el primer invariante de tensiones.

Se plantea inicialmente el ajuste No Lineal con las mediciones FWD, para luego con el modelo obtenido simular la medición deflectométrica Lacroix y poder comparar los módulos en las diferentes condiciones, obtenidos a partir de las ecuaciones constitutivas fijas; los criterios utilizados son:

- Ajustar un módulo fijo para la mezcla asfáltica.
- Ajustar un módulo fijo para la subrasante profunda.
- Ajustar una ecuación constitutiva para la subrasante.
- Adoptar para la Base y Sub Base ecuaciones genéricas de materiales apropiados.
- Al simular la medición con Lacroix, mantener el módulo de la mezcla asfáltica determinado en el ajuste lineal con esta misma metodología, 1200 MPa ver Figura 11.

Los módulos obtenidos para los materiales granulares en el ajuste con FWD y en la simulación de la medición con Lacroix se grafican en la Figura 12, donde se pone de manifiesto que las diferencias modulares obtenidas en los modelos lineales del punto anterior son adecuadas.

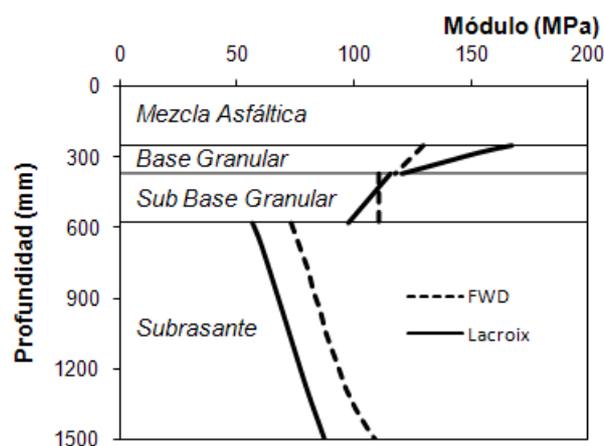


Figura 12. Módulos en profundidad según el tipo de medición

Para las condiciones de ensayos y materiales existentes es lógico que a partir de la deflectometría Lacroix se obtenga un menor módulo de la subrasante y un mayor módulo de la Base Granular. El modelo no lineal, obtenido a partir de cualquiera de las metodologías,

representa satisfactoriamente estas variaciones y las que pudieran motivar diferentes condiciones de carga en servicio.

CONCLUSIONES

Se mostró la posibilidad de utilizar el cuenco de la deformada obtenido por deflectometría Lacroix al Retroajuste modular, aplicando con mayor rigurosidad las mismas recomendaciones planteadas para la utilización del FWD.

Es siempre relevante tener presente que los módulos obtenidos de un Retroajuste Lineal son los asociados a las condiciones del ensayo de deflectometría utilizado, condiciones que en general difieren de las medias de servicio para esa estructura y que podrán aún modificarse más relevantemente si la auscultación estructural es con el objetivo de la realización de una mejora.

El ajuste de un modelo no lineal es una alternativa interesante si se parte de un adecuado conocimiento de los materiales integrantes de la estructura.

REFERENCIAS

Giovanon O. y Pagola M. (2008) *Going to an expert system in pavement design*. Transport Research Arena , Ljubana, Slovenia.

Giovanon O. y Pagola M. (2007) Hacia un Sistema Experto en el diseño de pavimentos” XIV Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Cuba.

Giovanon O. y Pagola M. (1997). *Retroajuste modular de estructuras de Pavimentos - Influencia de la metodología de auscultación*, XXIX Reunión del Asfalto, Mar del Plata, 1996. IX Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Paraguay. M.

Tagle A., Tosticarelli J. y Petroni E. (1981). *Primeras experiencias de utilización de Deflectógrafos Lacroix en Argentina*, Primer Congreso Latinoamericano del Asfalto, Río de Janeiro, Brasil.