

Título del trabajo: MODELIZACIÓN DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS, NO-LINEALIDAD

Autores: Ings. Oscar Giovanon y Marta Pagola.

Dirección: Berutti y Riobamba – 2000 Rosario

Teléfono: 0341-4808538 / 4808539 int.36

Fax: 0341-4808540

Email: ogiovano@eie.fceia.unr.edu.ar

Entidad u Organismo al que pertenece: Laboratorio Vial IMAE - Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario. CIUNR

1. RESUMEN

La existencia de metodologías de retroajuste se justifica en la necesidad del conocimiento de los módulos de trabajo de las distintas capas integrantes de un pavimento existente. Este requerimiento se presenta tanto en el proyecto de mejoras como en el seguimiento de tramos testigo, que optimizan las técnicas constructivas y/o avalan los métodos de diseño.

El comportamiento modular de cada una de las distintas capas de una estructura vial se pone adecuadamente de manifiesto mediante las ecuaciones constitutivas de las mismas. Si se pretende simplificar el modelo asignando un valor fijo a cada una de las capas integrantes de la estructura es necesario tener en cuenta el contexto estructural de la misma que determina las sollicitaciones en ella impuestas. Esta simplificación es realizada en forma indirecta al ajustar los módulos basándose en mediciones de deformabilidad.

En el presente trabajo se plantea la posibilidad de realizar un retroajuste no lineal de las capas integrantes de la estructura. Esta opción consiste en ajustar los parámetros de la ecuación constitutiva del material en lugar de ajustar un valor modular fijo.

Finalmente, se presenta la aplicación de esta metodología a casos particulares, de rutas nacionales y tramos del LTPP (Programa de seguimiento a largo plazo de la Federal Highway Administration USA).

2. INTRODUCCIÓN

El conocimiento de los módulos de trabajo de cada una de las capas integrantes de un pavimento existente es uno de los principales requerimientos, tanto en el proyecto de mejoras como en el seguimiento de tramos testigo. El seguimiento del comportamiento sobre tramos reales permite la optimización de las técnicas constructivas como así también el desarrollo y validación de las metodologías de diseño.

Para cumplimentar en forma óptima esta exigencia, lo deseable es la realización de ensayos específicos sobre cada uno de los distintos materiales que conforman la estructura. Obteniendo como resultado la ecuación constitutiva de cada material, que brinda el módulo de trabajo en función de los distintos modos de carga en los que se puede comportar.

De todas formas, siempre resulta interesante y útil disponer de ensayos de deformabilidad estructural, que permitan una confirmación a escala global de las rigideces mediante la realización de un retroajuste modular (Backcalculation).

Si bien a veces el retroajuste modular podría pensarse como una confirmación innecesaria, las naturales variaciones existentes, constructivas y de evolución de los deterioros, justifican plenamente la realización de ensayos de deformabilidad para realizar el retroajuste modular, aún disponiendo de ecuaciones constitutivas de los materiales. Lo más habitual, es disponer sólo de ensayos puntuales y que caracterizan al material en forma indirecta (como ser el valor soporte relativo de los suelos), en cuyo caso es de suma importancia la realización de ensayos de deformabilidad.

La realización del retroajuste modular permite, entre otros aspectos:

- Ajustar los módulos de trabajo de la estructura en la condición de ensayo.
- Valorar los diferentes módulos de trabajo en las distintas épocas del año, acorde a las variaciones de temperaturas y humedades.
- Valorar el progreso del deterioro de materiales ligados o estabilizados.

Las metodologías de retroajuste permiten la adopción de los módulos elásticos de las distintas capas de una estructura vial, sobre la base de la medición de deformaciones en superficie. Los distintos programas posibilitan, en general, el ajuste de módulos fijos basándose en la deformada absoluta valorada mediante deflectógrafos a impacto.

Se propone en este trabajo la posibilidad de ajustar los coeficientes de la ecuación constitutiva, como así también la consideración de otras metodologías de medición de la deformada en superficie.

3. REQUISITOS DEL RETROAJUSTE

3.a. Conceptos para su validez teórica

Las metodologías de retroajuste se basan en la diferente forma en que cada capa de la estructura condiciona la deformación en superficie frente a una dada carga. Sobre este punto de partida, cada capa a ajustar resulta una incógnita y cada sensor de medición en superficie nos brinda una ecuación adicional.

La figura 1 muestra, para una estructura tomada como ejemplo y en la que se aplica una carga de 40 KN con un FWD, la distinta forma en que las capas condicionan la

deformada en superficie. En esta figura se grafica la variación producida en el cuenco de la deformada para la estructura de referencia, cuando se duplica el módulo de cada una de las capas integrantes de la estructura en forma individual.

En este ejemplo particular pueden visualizarse algunos aspectos generales interesantes de mencionar:

- Se ponen de manifiesto las diferencias en las variaciones provocadas en el cuenco de la deformada, producidas por la variación modular de las distintas capas.
- Las diferencias provocadas por las capas de superficie tienen una mayor variación en las proximidades de la carga, afectando al radio de curvatura de la deformada en mayor grado que las capas profundas.
- A las mayores distancias del eje de la carga, sólo la subrasante introduce variaciones significativas.

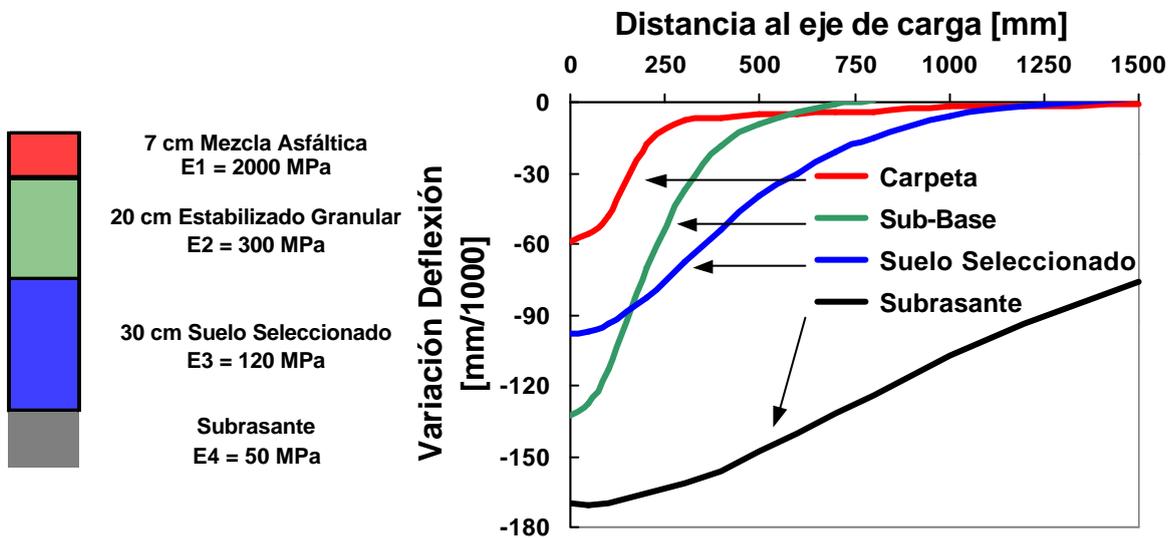


Figura 1. Variaciones teóricas de la deflexión bajo una carga de 40 kN con FWD

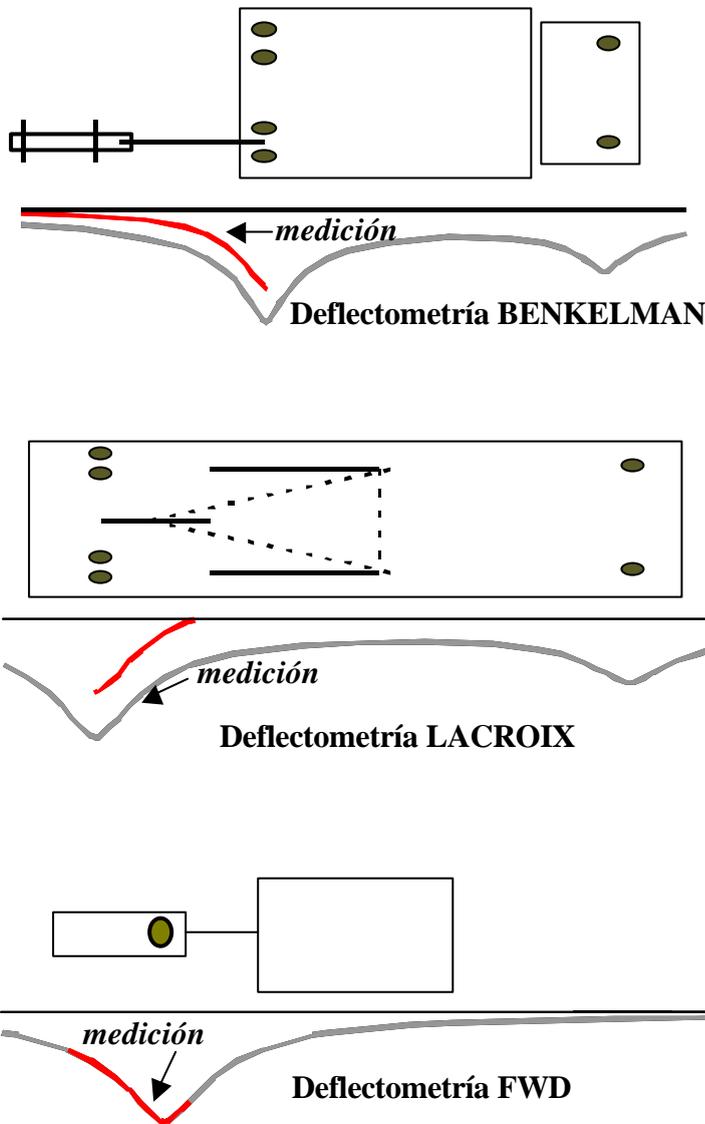
Este ejemplo particular resultó apropiado para la realización del retroajuste modular de sus capas, pero existen una serie de comentarios que se consideran necesarios realizar para no caer en un descrédito de la metodología por un uso inapropiado, que se desarrollarán en los puntos siguientes.

3.b. Metodología de auscultación

Es importante tener presente que los módulos obtenidos del retroajuste son acordes a las condiciones en que se realizó el ensayo deflectométrico, tanto del sistema de aplicación de la carga como de la estructura. Entre ellas se pueden nombrar:

- carga aplicada
- frecuencia de aplicación de la carga
- temperatura de los materiales
- condiciones de humedad de los materiales
- estado de deterioro de cada material

Esto plantea la necesidad de analizar las diferencias entre estas condiciones de ensayo y las condiciones de diseño, para plantear ajustes en los módulos en caso de ser requerido.



Otro aspecto importante es que no todos los métodos de medición de la deformada valoran la totalidad de los desplazamientos producidos. La figura 2 esquematiza los tres métodos de medición más habituales, indicando una planta del equipo y en correspondencia una gráfica con el cuenco de la deformada real producida, y que parte de este cuenco es valorado por cada metodología.

Como puede verse, los sensores utilizados en las metodologías FWD permiten la valoración de la totalidad de la deformación producida. Pero cuando se modeliza sobre la base de otras metodologías, como ser la regla Benkelman o el Deflectógrafo Lacroix, el programa de retroajuste utilizado tendrá que ser capaz de estimar la medición del equipo, modelizando la geometría del sistema de medición y su posición dentro del cuenco de la deformada en cada momento.

Figura 2. Esquema de diferentes metodologías

3.c. Capas profundas

En general, en pavimentos de carreteras, las capas ubicadas a más de un metro por debajo de la superficie de rodamiento no condicionan la vida útil de la estructura, pero si alteran de forma notoria el cuenco de la deformada en superficie.

Esta circunstancia plantea la necesidad de su consideración dentro del retroajuste modular. Su importancia tendrá diferente peso según la metodología de auscultación utilizada, ya que no todas valoran la totalidad de la deformación producida.

Continuando con el mismo ejemplo planteado inicialmente, ítem 3.a, se realizó el análisis considerando que la subrasante tenía 90 centímetros de espesor y bajo esta se agregó una capa adicional (capa profunda). En la figura 3 se indica la estructura modificada y se grafica la variación en la medición de la deformada obtenida al realizar la modelización considerando diferentes métodos de medición, al variar al doble el módulo de la capa profunda ($E_5 = 100$ MPa).

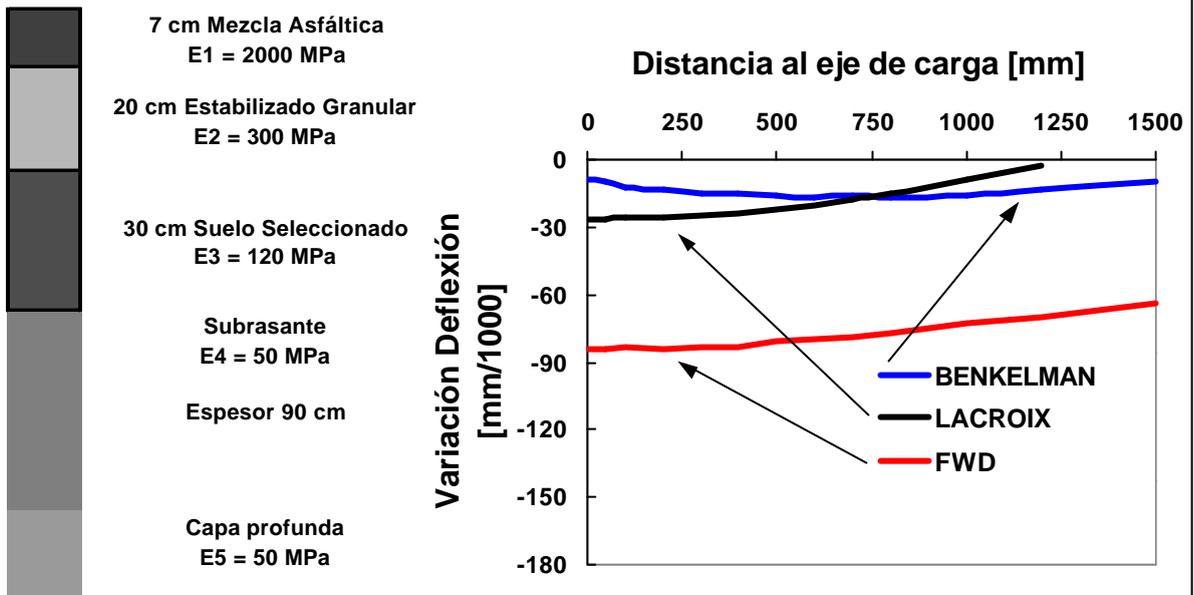


Figura 3. Importancia de las capas profundas en la medición de deflexiones

Se pone de manifiesto la importancia de la consideración de posibles diferencias modulares en profundidad cuando se utiliza la modelización de la estructura en base a metodologías FWD. Estas posibles diferencias modulares contemplarían tanto un diferente material, como variaciones de condición de la subrasante o el comportamiento no lineal del mismo.

Surge una clara recomendación de incluir en el caso FWD una capa incógnita adicional en profundidad, posibilitado por el mayor número de sensores de medición (se recuerda que cada sensor brinda una ecuación adicional).

Cuando se realiza la modelización estructural en base a mediciones Benkelman o Lacroix la consideración de capas profundas es de menor relevancia, dado que la variación observada en la deflexión por la variación de las capas profundas es de pequeña magnitud.

3.d. Capas de pequeño espesor

Se deberá tener especial precaución en el análisis cuando existan capas de pequeño espesor, dado que en general no condicionan en forma apreciable los valores medidos de desplazamientos en superficie o condicionan a estos en forma similar a otras capas próximas.

Estas circunstancias pueden complicar la solución matemática del ajuste modular, pudiéndose obtener, en condiciones críticas, diferentes soluciones al ajuste que dependerían de los valores de módulo inicialmente adoptados para las capas incógnitas (valores semilla) y del proceso de ajuste utilizado.

En la figura 4 se muestra este análisis realizado para una nueva estructura, adoptada como ejemplo, la misma posee un espesor asfáltico construido en tres capas, y se muestran las variaciones producidas en la deformada valorada con un FWD y una carga de 40 KN, cuando se plantea una modificación al doble de cada uno de los módulos de las capas constituyentes de la mezcla asfáltica.

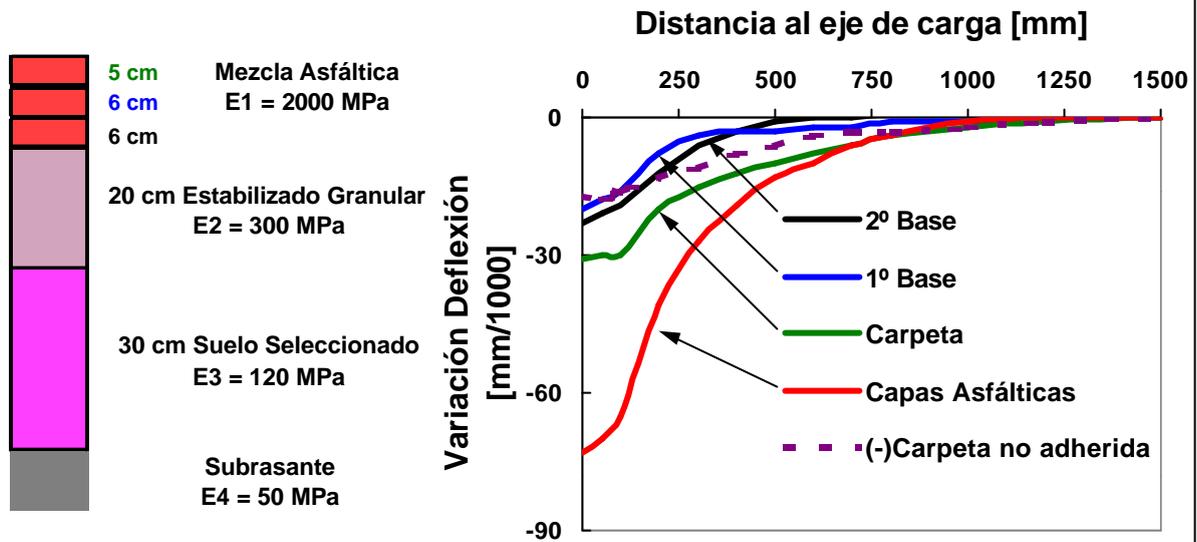


Figura 4. Influencia en la deformada de capas de pequeño espesor próximas

En la gráfica de la figura 4 puede observarse que las tres capas asfálticas poseen influencias semejantes en la variación de la deformada. Esta circunstancia permitiría arribar a equivalentes valores de deflexión con diferentes combinaciones de módulo. Adicionalmente y también con similar influencia se incluyó la variable de la condición de adherencia de la interfase entre la carpeta y la primera base asfáltica, lo que sumaría una incógnita no independiente dentro del problema.

En el análisis de estructuras como la planteada se podría recomendar la adopción del conjunto asfáltico como una única incógnita (si se corresponden a similares materiales y fechas de construcción) o la adopción de algunas de ellas como dato (si se dispone de antecedentes que permitan la estimación de su módulo). En la misma figura 4, la curva inferior se corresponde con la variación producida en la deformada al considerar la duplicación del módulo de las capas asfálticas como un conjunto, el cual resulta similar a la sumatoria de las influencias de cada una.

3.e. Importancia de la información

No tiene que suponerse que la medición de deflexiones permite obviar la realización de ensayos adicionales, muy por el contrario es el criterio de los autores

propiciar la necesidad de disponer de ensayos adicionales que permitan tanto, la adopción de hipótesis modulares como la evaluación de la coherencia del modelo obtenido.

Como ya fue comentado, el disponer de un elevado número de sensores aumenta las posibilidades de ajuste. Por el contrario si sólo se dispone de dos mediciones de deformación, como en el caso de la regla Benkelman doble, se podrán a lo sumo ajustar dos valores modulares y se estará obligado a realizar hipótesis sobre el resto de las capas.

En los análisis realizados se ha utilizado el programa Backmod, este permite la realización de las siguientes hipótesis o adopciones modulares de cada capa:

- ecuación constitutiva, módulo dependiente de las tensiones
- valor modular constante
- escalonamiento modular dado por las ecuaciones de Barker de base o de sub-base
- escalonamiento modular adoptado por el usuario

En el caso que se plantee como incógnita el módulo o la ecuación constitutiva (como se verá más adelante), la información adicional disponible sobre estas capas permite adoptar módulos semilla más próximos a los finales; este aspecto es de importancia en los casos en los que las incógnitas no son francamente independientes.

Respecto a los espesores es importante su correcta valoración en cada punto de modelización, ya que si existen errores de estimación en los espesores el modelo planteará errores en los módulos, de manera de compensar y obtener la misma deflexión.

En definitiva la mayor información disponible permite arribar a módulos más confiables para la estructura.

4. EVALUACIÓN DE LA COHERENCIA DEL MODELO OBTENIDO

Una vez realizado el retroajuste modular es necesario evaluar el modelo obtenido. Pueden diferenciarse distintos aspectos a considerar, que se detallan a continuación. En caso de que estos criterios no se verifiquen satisfactoriamente, será requisito un nuevo análisis del conjunto de la información y la revisión de las hipótesis planteadas.

4.a. El modelo simula la medición de deflexión

Una primera condición es visualizar si el modelo matemático planteado logra representar la estructura real en su aspecto de deformabilidad. Es decir la deflexiones estimadas teóricamente son suficientemente similares a las medidas.

En el caso particular del retroajuste realizado en base a mediciones Benkelman, el modelo podrá en general reproducir exactamente los valores de la medición insitu. En otros casos, donde se disponga un mayor número de mediciones de deflexión que capas a ajustar, no existirá una coincidencia exacta entre los valores teóricos y las mediciones de campo de los desplazamientos en superficie.

Con carácter indicativo, el procedimiento para retroajuste del programa estratégico de carreteras SHRP-P-655 tolera diferencias medias porcentuales inferiores al 2% entre la deformada medida y la calculada.

4.b. Adecuado escalonamiento modular

En particular, los materiales que no contienen agentes cementantes hidráulicos o bituminosos, que podemos llamar genéricamente no ligados, mantienen relaciones modulares entre capas contiguas que a lo sumo alcanzan valores de tres. Esto sucede aún si la capa superior es de muy buena calidad y puede alcanzar mayores módulos, basándose en relaciones de indicadores como ser el valor soporte relativo.

Si este valor de escalonamiento modular es superado en los módulos obtenidos del retroajuste, se plantea la necesidad de revalorar la información, fundamentalmente las adopciones modulares y los espesores de ambas capas.

Por el contrario, es posible que existan escalonamientos menores a uno, inversión modular, y esto no resulta una incompatibilidad, si es avalado por las calidades de los materiales.

4.c. Rango de los módulos

Si se dispone de un cierto conocimiento respecto a los materiales integrantes de las capas, es lógico pensar que el valor final obtenido del retroajuste modular no tendrá que diferir exageradamente del valor supuesto inicialmente, planteado como semilla, a no ser que el mismo resulte condicionado por el escalonamiento modular, como se mencionó en el punto anterior.

En particular, para las mezclas asfálticas, será de importancia tanto la información concerniente a su composición como la relativa al estado de deterioro, y además las condiciones de frecuencia y temperatura en las que se realizó la determinación de deformabilidad, sobre la base de las cuales se realizó el retroajuste.

Nuevamente, con carácter indicativo, el procedimiento para retroajuste del programa estratégico de carreteras SHRP-P-655 tolera un amplio rango para el módulo obtenido del retroajuste, comprendido entre la cuarta parte y el triple del valor del módulo semilla.

5. PLANTEO DEL AJUSTE NO LINEAL

En el presente trabajo se analiza la posibilidad de generalizar el concepto del retroajuste no lineal al retroajuste de la ecuación constitutiva para los materiales no ligados. Se toma como referencia la siguiente ecuación constitutiva, que expresa la dependencia del módulo respecto a las tensiones y resulta apta tanto para suelos friccionales, cohesivos e intermedios.

$$M_r = A Q^B S_d^C$$

Donde: M_r módulo del material [MPa]
 A, B, C constantes que caracterizan al material y estado
 Q primer invariante de tensiones (confinamiento) [MPa]
 S_d tensor desviador [MPa]

En la figura 5 se ejemplifican las observaciones realizadas en diferentes casos analizados, se indica en ella la estructura adoptada como referencia y como varía el cuenco de la deformada, bajo una carga de 40 KN aplicada con un FWD, al variar en la capa de subrasante cada coeficiente de la ecuación constitutiva en forma independiente.

Puede observarse la gran similitud en la forma de la variación producida, esto pone de manifiesto la imposibilidad de ajustar en forma simultánea los tres coeficientes, pues existirían múltiples combinaciones que producirían el mismo efecto en la variación del cuenco de la deformada.

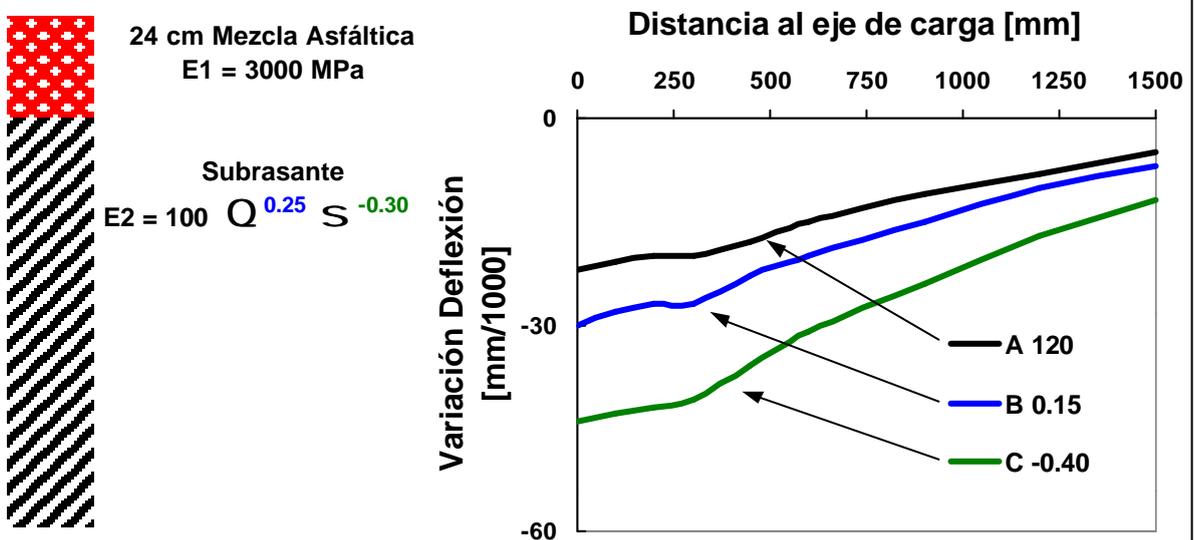


Figura 5. Variaciones del cuenco para diferentes ecuaciones constitutivas de la subrasante

Esta circunstancia queda claramente reflejada en la figura 6, donde de ex profeso, para la misma estructura, se plantean tres variaciones de la ecuación constitutiva que provocan muy similares variaciones del cuenco de la deformada.

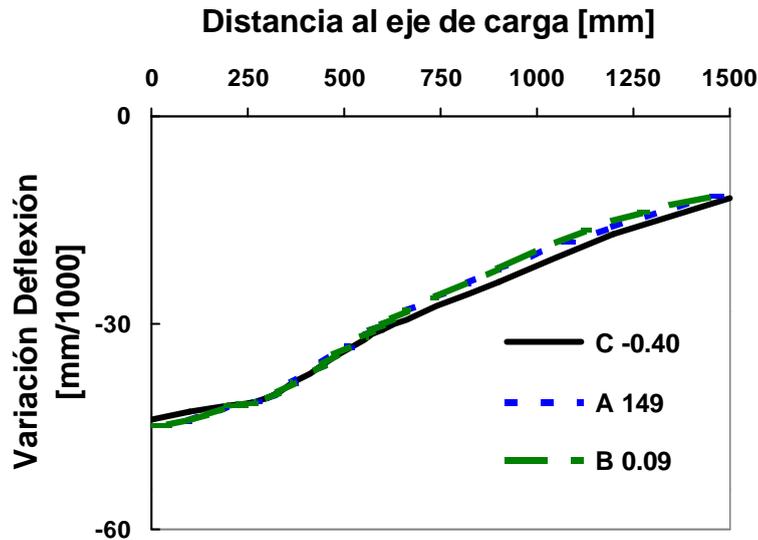


Figura 6. Similares variaciones para diferentes ecuaciones constitutivas

Puede concluirse que la variación de los coeficientes de la ecuación constitutiva plantea variaciones en el cuenco de la deformada, pero estas poseen similares influencias. Las posibilidades de ajuste no lineal se restringen entonces a un sólo grado de libertad por ecuación a ajustar, algunas opciones pueden ser:

- Ajustar el coeficiente A adoptando B y C
- Plantear una ecuación de relación entre los coeficientes a ajustar, por ej. ajustar A planteando $B = f(A)$ y $C = f(A)$

6. EJEMPLOS DE RETROAJUSTE NO LINEAL

A continuación se plantean dos ejemplos de ajuste de la ecuación constitutiva.

6.a. Ajuste en diferentes épocas del año

La estructura correspondiente se indica en la figura 7, el análisis se centró en el estudio del material de la subrasante, constituida por un suelo que caracteriza como A4 (8) según HRB. En este caso se dispuso de adecuados ensayos de caracterización de los materiales constituyentes de estructura



Los numerosos ensayos de módulo resiliente en carga triaxial dinámica sobre la subrasante brindaron diferentes ecuaciones constitutivas. Del conjunto de resultados obtenidos se grafica en la figura 8 la relación encontrada entre los coeficientes A, B, C y el contenido de humedad, tomando como variable de referencia al coeficiente A.

Figura 7. Estructura existente

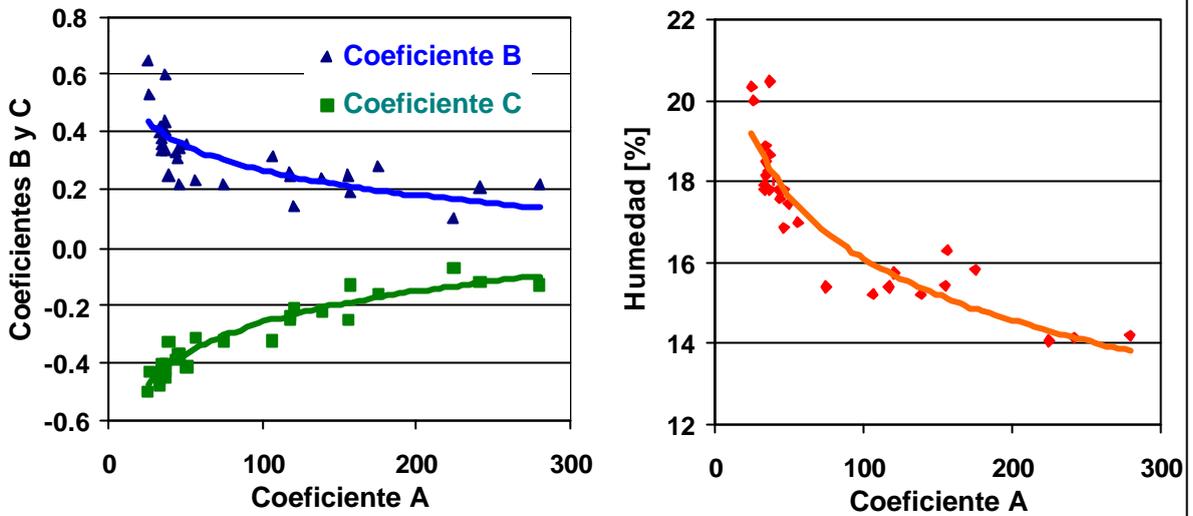


Figura 8. Relación entre coeficientes y el contenido de humedad, obtenidas en ensayos de laboratorio

Partiendo de estas relaciones entre coeficientes, y de mediciones FWD en diferentes momentos a lo largo de diferentes épocas del año, se realizó el retroajuste de la estructura en cada momento de medición. Se planteó el ajuste del coeficiente A, obteniendo el resto de los coeficientes a partir de las relaciones de ensayo indicadas, resultando para la subrasante un rango del coeficiente A entre 93 y 320, correspondiente a humedades entre 13 y 16%. En el resto de las capas se obtuvieron también módulos acordes con los ensayos disponibles, realizando consideraciones de temperatura y deterioro.

La figura 9 muestra para un tramo homogéneo, con la estructura de la figura 7, los diferentes cuencos de la deformada que pudieron ajustarse correspondientes a distintas épocas de la vida en servicio, manteniendo los materiales y considerando en estos las variaciones de humedad, temperatura y deterioro (con símbolos se indican los valores medidos y con líneas los calculados por el modelo).

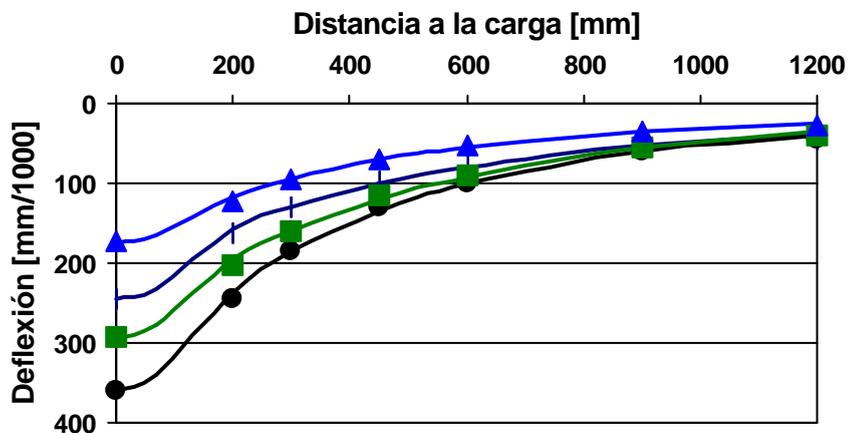


Figura 9. Diferentes cuencos ajustados para un mismo tramo homogéneo

6.b. Ajuste en la sección 1310-28 del LTPP

La estructura de este ejemplo se corresponde con el tramo 1310-28 del plan de seguimiento a largo plazo de secciones del programa SHRP.

En este caso la estructura estaba compuesta por 24.1 cm de capas asfálticas colocadas sobre la subrasante, como indica la figura 10. Como dato se dispuso de mediciones FWD realizadas en la sección en distintas fechas y con diferentes cargas. En la figura 10 se encuentran graficadas las deflexiones máximas de cada una de las fechas y cargas.

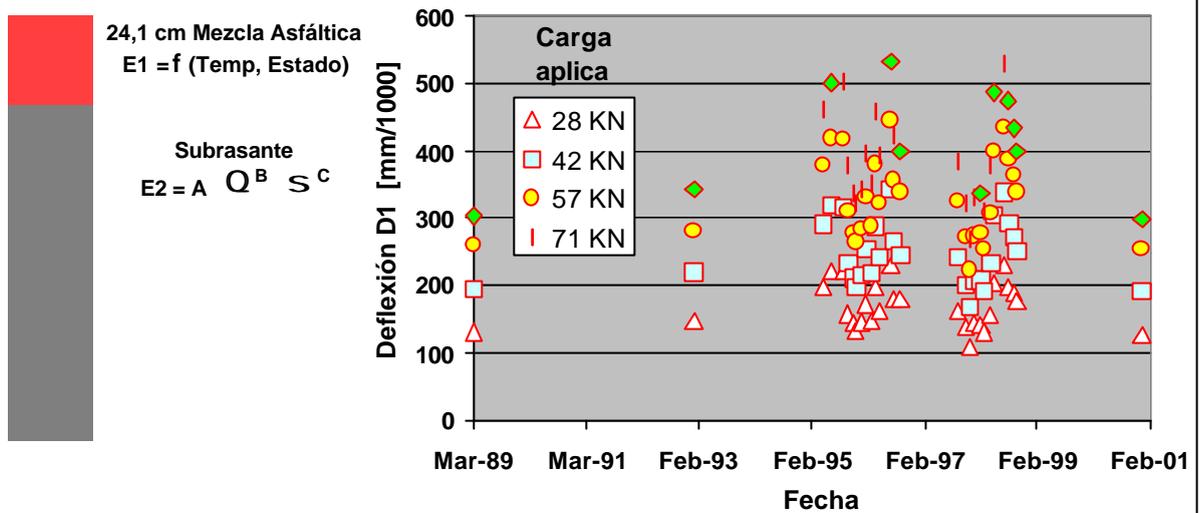


Figura 10. Estructura y mediciones FWD de la sección

En este caso no se dispuso de las ecuaciones de módulo resiliente para distintos contenidos de humedad, pero resultó interesante por disponerse de un gran número de mediciones en diferentes épocas del año y con diferentes niveles de carga aplicada. La figura 11 muestra los valores medios de los módulos de la subrasante ajustados para cada mes, información que permitió un análisis estructural detallado, considerando efectos estacionales.

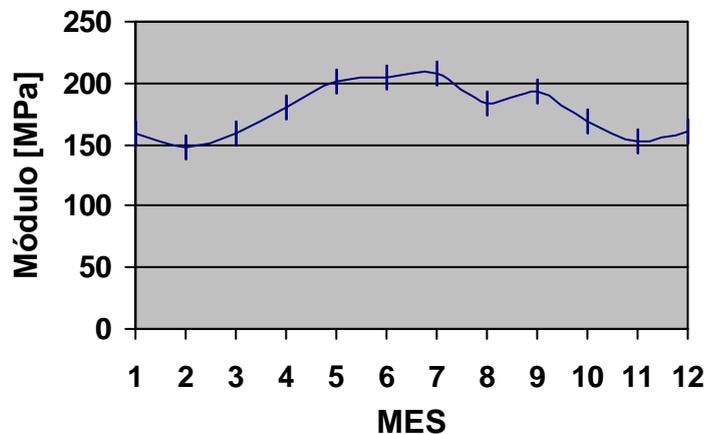
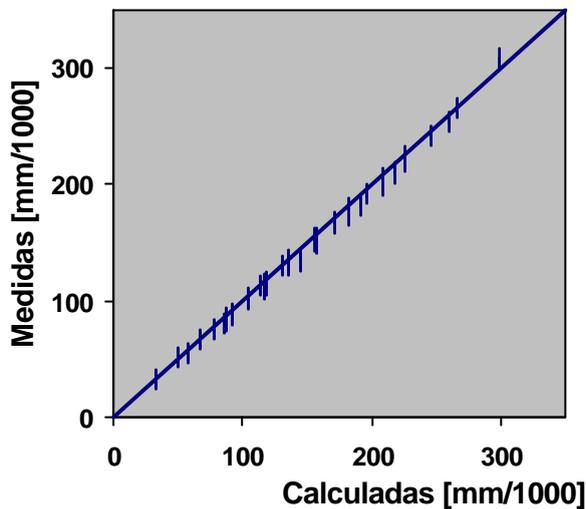


Figura 11. módulos medios de la subrasante para cada mes

En este caso se realizó el retroajuste no lineal del metro superior de la subrasante para cada mes, y se obtuvo la ecuación constitutiva que ajusta los diferentes niveles de carga de ensayo. En este análisis el módulo de la capa asfáltica fue ajustado resultando acorde a las condiciones de deterioro y temperatura de la misma.



Por ejemplo para el mes de marzo integrando los años 1989 y 1998, por considerar semejantes condiciones de trabajo de la subrasante, se obtuvo la ecuación promedio:

$$M_r = 99 Q^{0,15} S_t^{-0,20}$$

Manteniendo esta ecuación constante, se recalcularon las deflexiones para todas las mediciones obteniéndose un muy buen acuerdo en todos los niveles de carga y distancias como muestra la figura 12.

Figura 12. Deflexiones medidas vs. Calculadas

7. CONCLUSIONES

- Se pone énfasis, en que se obtiene una mayor confiabilidad en el retroajuste modular realizado, si se dispone de información adicional sobre los materiales integrantes de la estructura.
- Es importante reflexionar sobre que criterio se utilizará en cada una de las capas al realizar el ajuste, basándose en la información disponible y las limitaciones del ajuste:
 - ajustar su ecuación constitutiva
 - ajustar su valor modular
 - adoptar una ecuación constitutiva
 - adoptar un criterio de escalonamiento modular
 - adoptar un módulo fijo

En general, y especialmente cuando el número de incógnitas es limitado, es conveniente que las variables a ajustar se encuentren distribuidas en profundidad.

- Es imprescindible el análisis crítico de los resultados obtenidos del retroajuste.

- El modelo obtenido del retroajuste representa la estructura en el momento y bajo las cargas impuestas por el equipo deflectométrico, por lo que pueden requerirse modificaciones para su uso en el diseño estructural.
- Es posible la realización de retroajustes no lineales, las ecuaciones ajustadas permiten representar los módulos de trabajo que el material tendrá en función de las tensiones que lo solicitan.

6. BIBLIOGRAFÍA

"Módulos resilientes de materiales granulares no tratados. Su aplicación al diseño estructural de pavimentos en Argentina, 2da. Parte", Angelone, S. y Martínez F. , 1988, XXV Reunión Anual del Asfalto, Córdoba - Argentina, 1988.

"Ajuste de modelos estructurales de pavimentos" Giovanon O. y Pagola M. VI Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. Santiago de Chile – Chile, 1991.

"El Programa BACKMOD para el cálculo de los módulos estructurales a partir de mediciones de la deformada en superficie" Giovanon O. y Pagola M. XXVII Reunión del Asfalto celebrada dentro del XI Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, Buenos Aires - Argentina, 1992.

"Caracterización reológica de mezclas asfálticas mediante el ensayo de tracción indirecta con cargas repetidas" Angelone S., Martínez F. y Tosticarelli J. XXVII Reunión Anual del Asfalto dentro del marco del XI Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito. Buenos Aires – Argentina, 1992.

"SHRP-P-655 Layer Moduli Backcalculation Procedure", Strategic Highway Research Program - National Research Council - Washington, DC, 1993.

"Retroajuste modular de estructuras de Pavimentos - Influencia de la metodología de auscultación" Giovanon O. y Pagola M. IX Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Paraguay, 1997.

"Analysis of non-linear models describing the resilient behaviour for soils and unbound materials" Angelone S. y Martínez F. International Symposium on Unbound Aggregates in roads UNBAR 5, Nottingham , England, 2000.