

## "AJUSTE DE MODELOS ESTRUCTURALES DE PAVIMENTOS"

VI Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. Santiago de Chile. 1991  
Oscar GIOVANON y Marta PAGOLA

RESUMEN: El objetivo del presente trabajo es presentar una metodología de ajuste de los modelos estructurales a partir de la medición rutinaria de la deformabilidad en la superficie del pavimento (Back Calculation of Moduli) lo que redundará en una mayor fiabilidad de los diseños estructurales y por lo tanto permite un mejor análisis - optimización de las inversiones a realizar.

Se muestra una metodología de retro-ajuste de los modelos estructurales con la posibilidad de considerar ecuaciones constitutivas en los materiales intervinientes, valorando así su real dependencia del nivel de sollicitaciones alcanzado. La deformabilidad de la superficie es valorada a partir de mediciones de deflexiones según la técnica Benkelman o Lacroix.

Dentro de esta metodología se contemplaron los siguientes ítems :

- las diferencias en la frecuencia y temperatura de medición que condicionan las rigideces de los materiales asfálticos.
- los distintos niveles de sollicitación (provocados por la carga total, presión de contacto y módulos de las capas asfálticas) que determinan las rigideces en los materiales no ligados.
- las deformaciones provocadas por la totalidad del vehículo de carga y no solo por las ruedas duales bajo las cuales se efectúa la medición.
- la existencia de valores iniciales no nulos al comenzar las mediciones con el deflectógrafo Lacroix, registrándose por lo tanto solo una parte de la deformada.
- la no existencia en ninguno de los sistemas de una base de referencia absoluta, sino que el equipo de medición se encuentra dentro del cuenco de la deformada que se desea medir.

Esta metodología permite el correcto ajuste del modelo estructural considerando las reales condiciones de deformabilidad in situ del pavimento, y fundamentalmente hacer un adecuado uso del gran número de mediciones LACROIX efectuadas por la D.N.V. a lo largo de toda la red vial nacional pavimentada de la República Argentina.

### 1. INTRODUCCIÓN

El retro-ajuste modular consiste básicamente en la aplicación de una carga conocida sobre una estructura y la valoración de las deformaciones que esta produce mediante algún tipo de captore, para plantear luego un cálculo teórico del mismo fenómeno de manera de obtener el conjunto de módulos de los distintos materiales de la estructura que aproxime teóricamente la respuesta estructural medida.

Como es lógico existe una relación entre el número de deformaciones medidas por cada punto de auscultación y la posibilidad de ajuste del modelo, pasando desde la existencia de infinitos modelos que ajustan en forma exacta si se mide un reducido número de deformaciones a la necesidad de algún criterio de minimización de errores si se eleva el número de deformaciones medidas. Es recomendable la realización de múltiples mediciones de deformación por cada punto de auscultación de manera de poder ajustar los módulos de todas las capas sin la necesidad de realizar hipótesis simplificadoras.

La primera posibilidad es la que corresponde a las metodologías Benkelman y Lacroix donde en la generalidad de los casos se dispone de una o dos mediciones de deformación, la deflexión y el radio de curvatura. Por lo que existe sólo la posibilidad de ajustar el valor modular de la subrasante en base a la deflexión, y ajustar las hipótesis de escalonamiento modular planteadas para los materiales granulares y/o el grado de deterioro del módulo de las capas ligadas, en función del radio de curvatura.

En el presente trabajo no se plantea un nuevo o ideal equipo para la realización de mediciones de deformación con el fin de su utilización en el retro-ajuste de módulos, sino por el contrario se analiza una metodología para realizar un racional aprovechamiento de la gran cantidad de mediciones rutinarias ya existentes.

## 2. MÓDULOS PARA LOS MATERIALES NO LIGADOS

Es necesario como se declaró en el capítulo 1 la realización de hipótesis para los materiales intermedios, estas pueden diferenciarse de acuerdo con el modelo de comportamiento elástico que se utilice. Comentaremos los casos de modelo elástico lineal (módulo constante) y elástico no lineal (donde el módulo es dependiente del nivel de tensiones alcanzado).

### 2.1. Modelo lineal

La solución consiste aquí en plantear una real relación modular entre las distintas capas a partir de diferentes módulos propuestos de la subrasante.

Esto puede realizarse mediante la utilización de las conocidas fórmulas de Barker (1), que permiten un real escalonamiento modular cuando las distintas capas guardan una relación habitual de aumento de calidades hacia la superficie:

Para las capas granulares inferiores

$$E_i = E_{i+1} \times (1 + 7,18 \times \log h_i - 1,56 \times \log E_{i+1} \times \log h_i)$$

y para las capas granulares de base

$$E_i = E_{i+1} \times (1 + 10,52 \times \log h_i - 2,10 \times \log E_{i+1} \times \log h_i)$$

donde:

$h_i$  espesor de la capa en pulgadas

$E_i$  módulo de la capa  $i$  en psi

Otra posibilidad consiste en la realización de ensayos de penetrómetro dinámico de cono (2)(3) que permiten tanto la confirmación de los espesores como la adopción de un valor modular a partir de correlaciones establecidas entre este y los milímetros penetrados por cada golpe. Esta opción es particularmente interesante para detectar casos en que capas de suelos seleccionados o suelos cales deteriorados brindan una escasa o nula mejoría respecto a capas inferiores (figura 1).

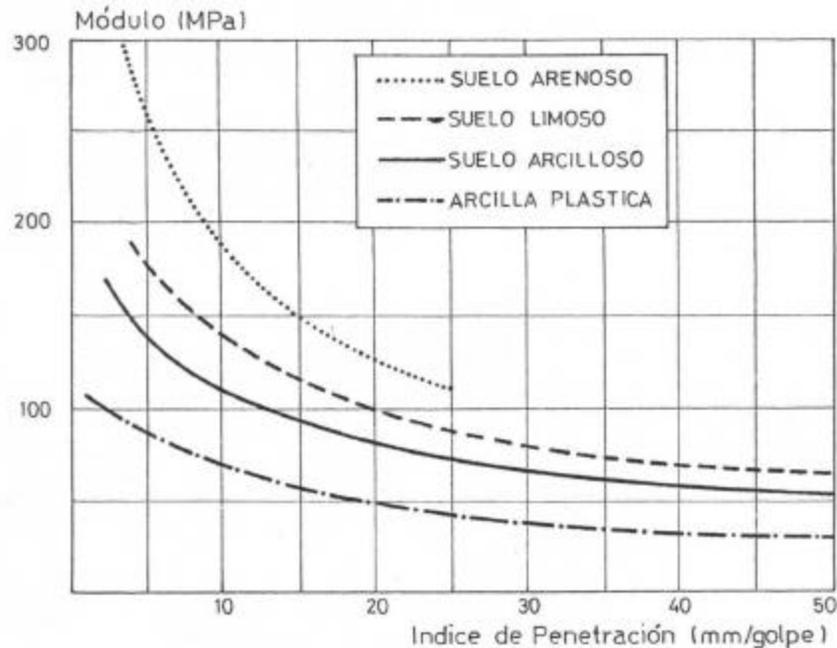


Fig. 1 Relación entre el módulo de los materiales no ligados y el índice de penetración

## 2.2. Modelo no lineal

En este modelo se plantea la dependencia existente entre el módulo y el nivel de solicitaciones alcanzado (4)(5), para lo cual se utiliza la ecuación constitutiva del material expresada bajo alguna de las siguientes formas:

$$Mr = A \times q^B \times sd^C$$

$$Mr = D \times s3^E \times sd^F$$

donde:

$Mr$  Módulo Resiliente del material

$\theta$  Primer invariante del tensor de tensiones

$\sigma_d$  Tensor desviador (acotado por un valor mínimo que define de esta forma un módulo tangente en el origen para bajos niveles de solicitación)

$\sigma_3$  Tensión de confinamiento

A,B,C,D,E,F Constantes dependientes del material (pudiendo algunas de ellas adoptar valores nulos y generar casos particulares)

Un planteo de este tipo permite una vez ajustadas las ecuaciones constitutivas de las distintas capas conocer su variación frente a la modificación del estado tensional que puede provocarse por:

- Distinto tipo de cargas actuantes por posibles diferencias entre la carga utilizada para realizar el retro-ajuste y aquellas para las cuales se desea realizar el posterior análisis de comportamiento estructural.

- Variación de las condiciones ambientales, al existir capas asfálticas es habitual que la temperatura y frecuencia de auscultación difieran de las de cálculo.

- Análisis en condiciones iniciales, por el deterioro de las capas ligadas, que se pueden encontrar fisuradas en el momento de la evaluación pero se encontraban íntegras al realizarse la obra.

-Realización de una mejora estructural, es lógico que una auscultación responda a la necesidad de la realización de una obra que generalmente disminuye las solicitaciones en los materiales no ligados.

Se indica en la figura 2 la variación producida en los módulos de los materiales no ligados de la estructura indicada en la misma figura, al modelizar por retro-ajuste modular las mediciones Lacroix y la realización de un futuro refuerzo de 10cm de concreto asfáltico.

Se observa en el ejemplo planteado (como es normal frente a realización de una mejora), un aumento de la rigidez tanto en la subrasante como en el suelo seleccionado, en este caso del orden del 20%. Esta tendencia no tiene que adoptarse como regla general pues si las capas asfálticas se encontrasen sanas y la evaluación se hubiera realizado en el periodo invernal podría plantearse una situación opuesta.

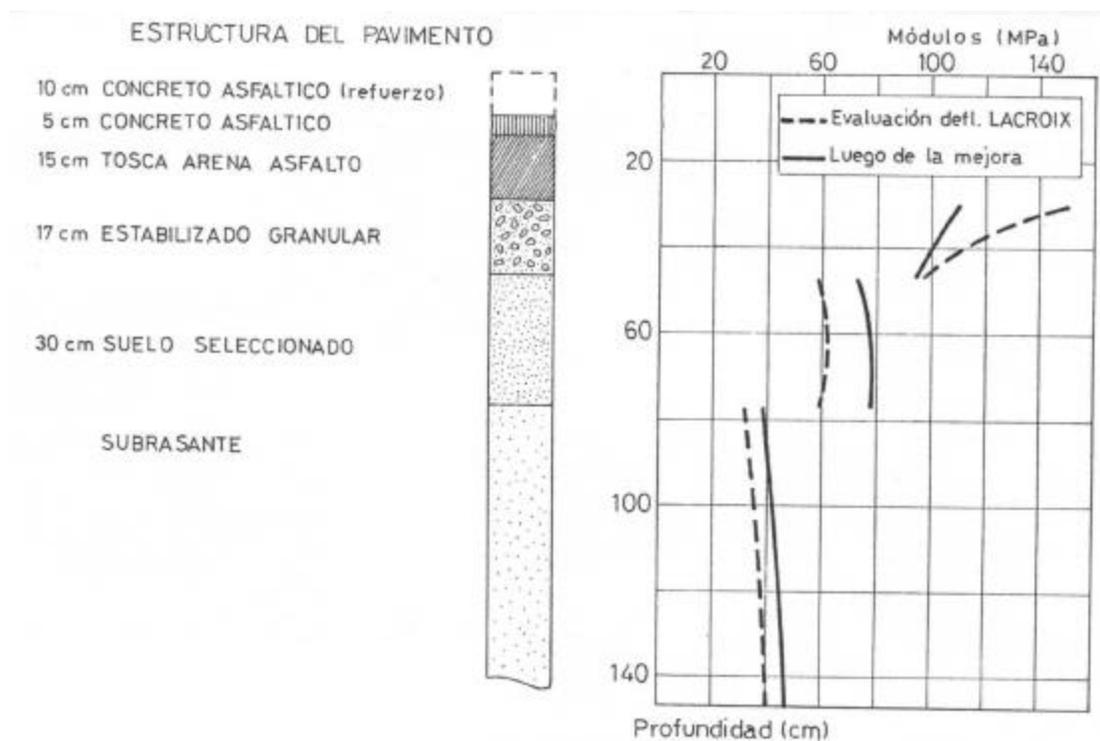


Fig. 2 Variaciones predichas de los módulos luego de la realización de una mejora estructural

### 3. MÓDULOS EN LOS MATERIALES ASFÁLTICOS

Como es conocido el módulo de los materiales asfálticos depende para cada mezcla considerada de la frecuencia, temperatura y grado de fisuración.

Las frecuencias adoptadas para representar las mediciones de deformación son de 1Hz para el deflectógrafo Lacroix y 0.05Hz para la regla Benkelman. En la figura 3 se indican las curvas de deformaciones específicas tangenciales producidas en las fibras superiores e inferiores de la capa asfáltica a lo largo de la trayectoria del eje de carga del deflectógrafo Lacroix, las que permiten

estimar la frecuencia de las solicitaciones inducidas que se encuentran, en general, en un rango comprendido entre 2 y 0.5 Hz, lo que justifica la adopción realizada. Esta frecuencia puede obtenerse si observamos la distancia correspondiente a un cuarto de período de la gráfica de deformaciones, leyendo sobre la escala adicional de frecuencias (asociada a la velocidad de circulación del deflectógrafo Lacroix).

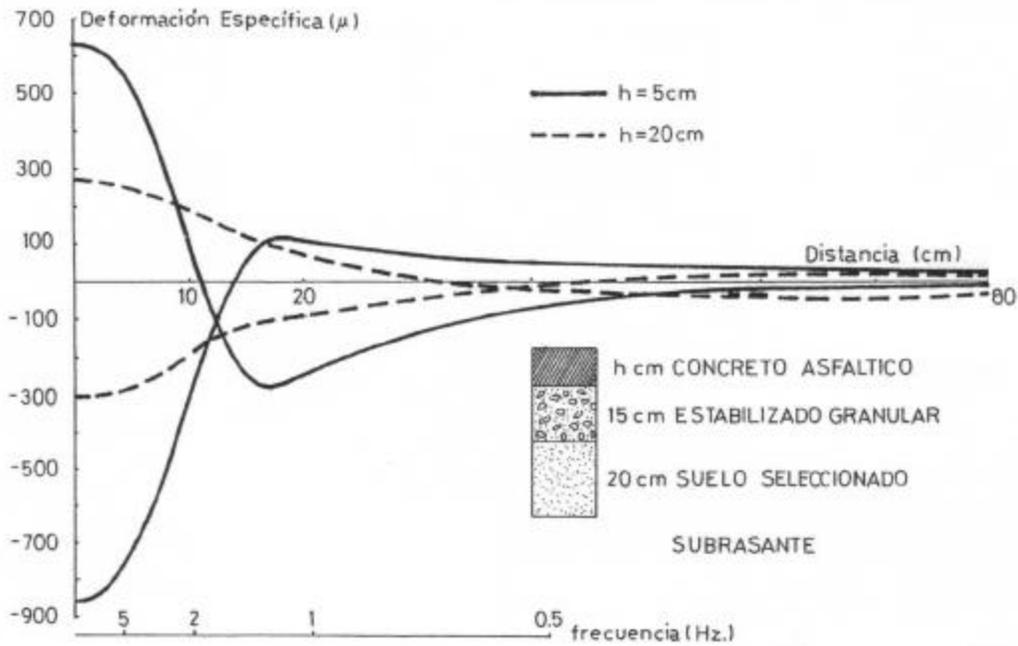


Fig. 3 Deformación específica tangencial inducida por el deflectógrafo Lacroix en la fibras superior e inferior de la capa asfáltica

Con respecto a la temperatura en un análisis correctamente ejecutado debe considerarse la realmente existente en el momento de medición, pudiendo tomarse como aproximación la media predicha para esa zona y época del año (6). Se ejemplifica en la figura 4 curvas de módulos de materiales asfálticos para las frecuencias de interés y un rango factible temperaturas, obtenidas en el IMAE mediante ensayos de laboratorio de mezclas típicas (7).

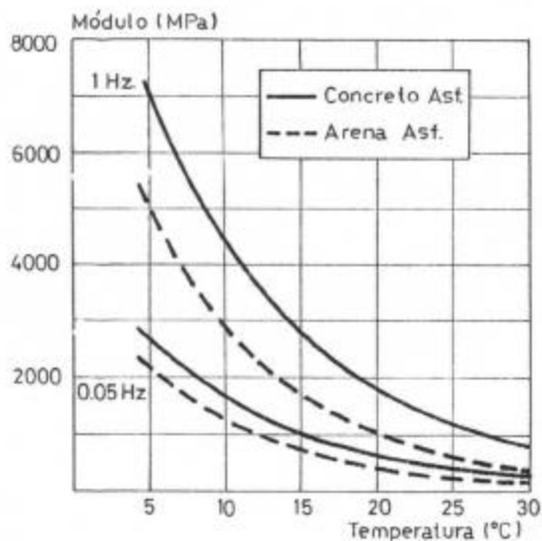


Fig. 4 Módulos de distintas mezclas asfálticas

#### 4.PROFUNDIDAD DE ANÁLISIS

Otro aspecto importante a definir consiste en la real homogeneidad de la subrasante en profundidad, como así también la necesidad de discretizar la misma si se trabaja con no linealidad. Variaciones solo en los módulos de capas profundas no afectan apreciablemente los esfuerzos críticos ni tampoco la vida de diseño pero sí las deformaciones de superficie, por lo que pueden ser importantes cuando se pretende ajustar los módulos del conjunto a partir de dichas deformaciones.

La existencia de capas profundas con una marcada diferencia de rigidez respecto a la subrasante puede inducirnos a la obtención de valores modulares erróneos, para mesurar la importancia de dicha posibilidad se indica en la figura 5 para una estructura tomada como ejemplo, el valor de la deflexión teórica a distintas profundidades considerando un modelo lineal y mostrando la importancia de la contribución de las capas profundas en el valor total de la deflexión.

Donde queda claro que si se trabaja con base de referencia profunda (8) como forma de medir las deflexiones para realizar el retro-ajuste de los módulos, debe obtenerse en el modelo la diferencia de deflexiones respecto a esta base y no la deflexión absoluta. Es decir lograr la convergencia entre puntos medidos y calculados de:

$$d_i = D_i - D_{ref}$$

donde:

$d_i$  deflexión medida en el punto  $i$  con respecto a la base de referencia.

$D_i$  deflexión absoluta calculada en el punto  $i$

$D_{ref}$  deflexión absoluta calculada para el punto tomado como referencia.

De no ser así, se arribaría a módulos de la subrasante mayores que los reales.

Nótese en la figura 5 la menor importancia de las capas profundas si se plantea el mismo análisis por un modelo no lineal, motivado por la mayor rigidez de estas al estar sometidas a una menor carga pulsante, y que además resulta en un menor valor de la deflexión total o motivaría un menor módulo de la subrasante si mantenemos el valor de la deflexión y ajustamos las ecuaciones constitutivas para obtenerla.

Sobre esta estructura al modelizar la medición de deflexiones Benkelman y Lacroix se obtiene la gráfica de la figura 6 que considera el análisis de la subrasante con su ecuación constitutiva hasta distintas profundidades y a partir de allí con un módulo constante. Las mayores variaciones se producen en el primer metro por lo que el análisis rutinario se hace subdividiendo la subrasante en cuatro capas de 20, 30, 40cm y semi-infinita; situación que además brinda una convergencia de los esfuerzos internos críticos.

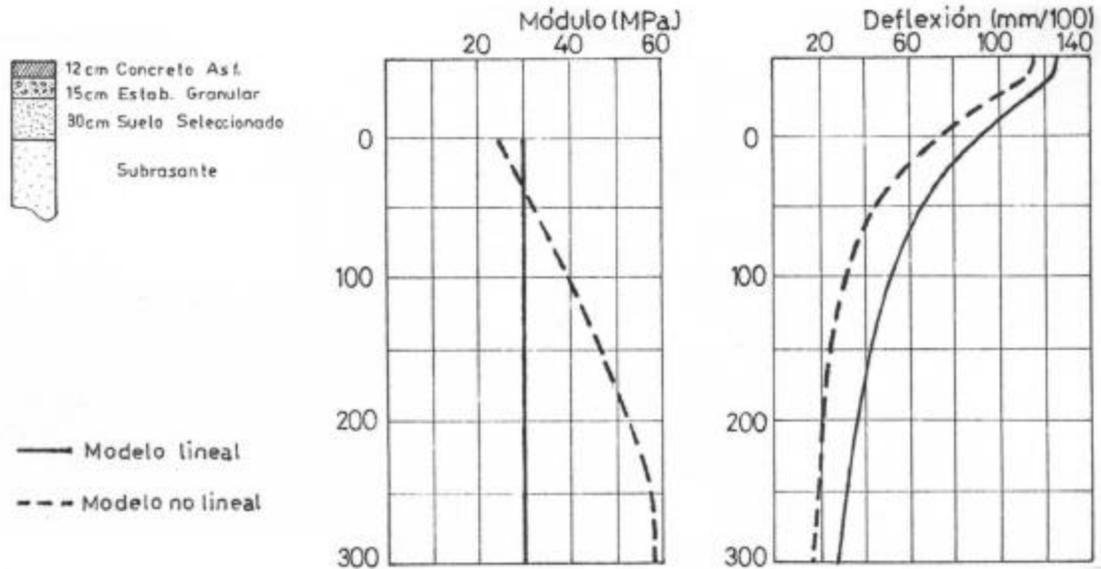


Fig. 5 Módulos de trabajo y deflexiones absolutas en función de la profundidad

Obsérvese que el valor de deflexión Lacroix no presenta en este caso una variación apreciable por ser esta medición el resultado de una diferencia entre la posición final e inicial del palpador.

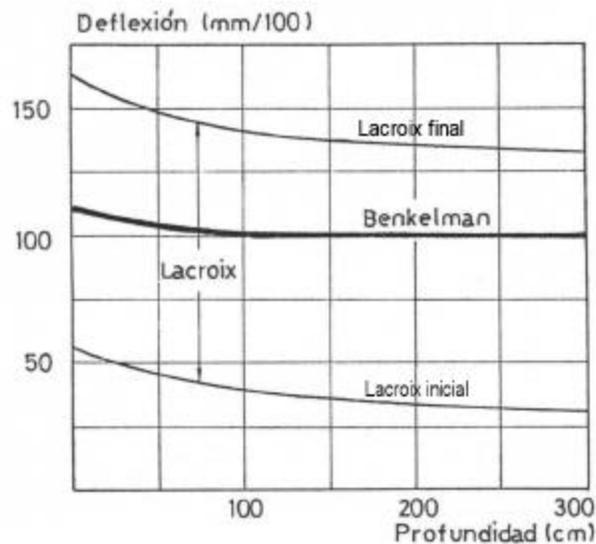


Fig. 6 Variación en las deflexiones estimadas de acuerdo a la profundidad de análisis.

## 5. MODELIZACION DE LAS MEDICIONES DE DEFLEXION

Al realizar la simulación de una medición es importante reproducir en el modelo lo mas fielmente posible las condiciones de ensayo. A menos que se demuestre que la relativa importancia de un aspecto frente al nivel de precisión del resto de los parámetros no justifica su inclusión.

Las mediciones pueden plantearse sin una referencia absoluta por lo cual es correcto valorar en el modelo las mismas mediciones relativas, es decir utilizando la misma base de referencia. En el deflectógrafo Lacroix (figura 7)(9) el plano de referencia queda definido por los puntos de apoyo

del patín de medición; además como en este caso pueden existir valores iniciales del parámetro a medir que no son relevados en el ensayo, el valor a comparar-ajustar es la diferencia entre los valores relativos finales e iniciales, como se indica:

$$d = \left( D_{bf} - \frac{D_{af}}{4} - \frac{3D_{cf}}{4} \right) - \left( D_{bi} - \frac{D_{ai}}{4} - \frac{3D_{ci}}{4} \right)$$

donde:

- d deflexión medida
- f,i subíndices que indican condición final e inicial respectivamente
- D<sub>j</sub> deflexión absoluta del punto j

Para analizar la importancia de cada rueda del vehículo de medición y del sistema de referencia dentro de la modelización Lacroix se confeccionó para cada caso considerado una tabla que permite individualizar la contribución porcentual de cada uno de ellos en el valor final de deflexión medido.

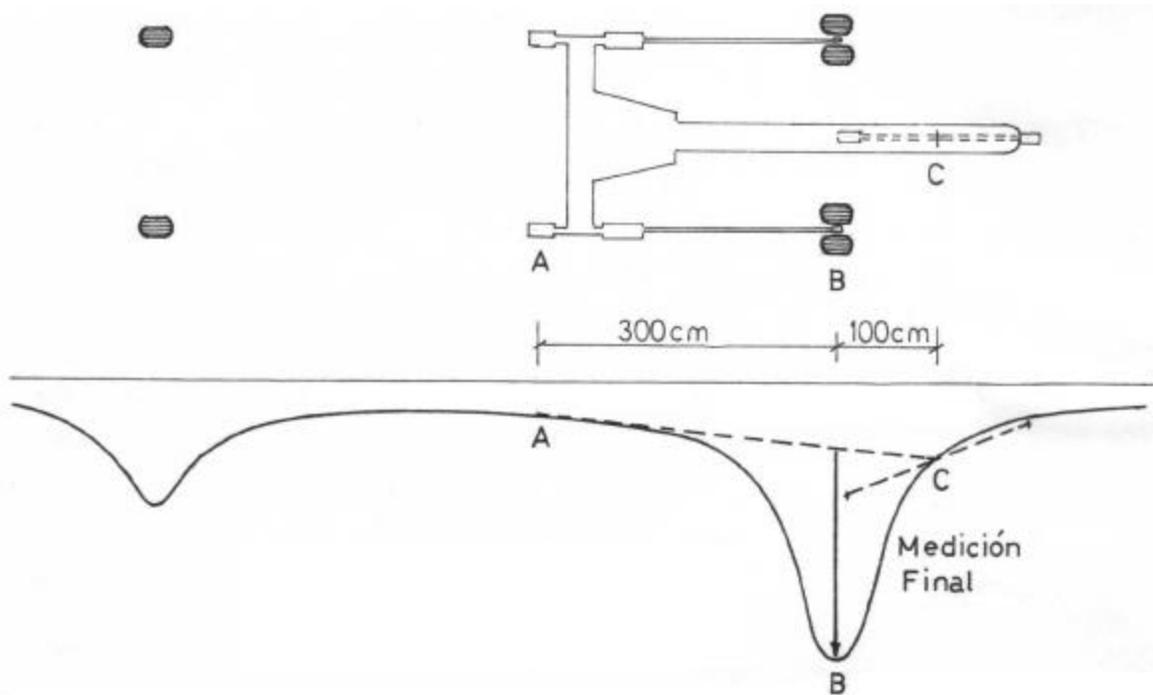


Fig. 7 Esquematación del deflectógrafo Lacroix

En las Tablas 1 y 2 se indican las contribuciones para una estructura con 2 cm de espesor asfáltico (tratamiento superficial) y con 35 cm de concreto asfáltico respectivamente.

	SEMI EJE DE CARGA		SEMI EJE OPUESTO		EJE DELANTERO		TOTAL	
	inicial	final	inicial	final	inicial	final		
<b>PALPADOR</b>	140	-45	32	-26	9	-11	99	
<b>SIST. DE REFER.</b>	A	-5	3	-4	3	-4	6	-1
	C	-35	37	-35	37	-7	5	2
<b>TOTAL</b>	95		7		-2		100	

Tabla 1 Contribución porcentual de cada carga al valor de la medición Lacroix (Tramo con tratamiento superficial)

	SEMI EJE DE CARGA		SEMI EJE OPUESTO		EJE DELANTERO		TOTAL	
	inicial	final	inicial	final	inicial	final		
PALPADOR	115	-17	12	-10	3	-4	99	
SIST. DE REFER.	A	-2	1	-2	1	-1	2	-1
	C	-14	15	-14	15	-2	2	2
TOTAL	98		2		0		100	

Tabla 2 Contribución porcentual de cada carga al valor de la medición Lacroix (Tramo con concreto asfáltico)

A partir del análisis del conjunto de casos resueltos puede concluirse que en general es una buena aproximación la modelización teniendo en cuenta solo el semi-eje de carga, que tiene gran influencia la existencia de valores iniciales no nulos y que el buen diseño del sistema de referencia da como resultado una baja influencia del conjunto pudiendo simplificarse considerablemente la modelización y plantear solo la diferencia entre las mediciones absolutas del semieje de carga.

En las mediciones con regla Benkelman las patas de la misma se encuentran también dentro del cuenco de la deformada lo que motiva diferencias entre el valor de la deflexión absoluta y el valor efectivamente medido. Esta diferencia subsiste aún si se efectúan las correcciones por descenso de patas por estar las lecturas intermedias que permiten la corrección de la medición afectadas por el mismo efecto.

De todas formas aunque no sea necesaria la corrección por descenso de patas, el valor de las lecturas intermedias es siempre un dato adicional sobre la deformabilidad de la estructura. En la tabla 3 se muestra para distintos casos la importancia de la no existencia de una base de referencia absoluta en la medición, acotándose en la misma datos generales como el espesor de las capas asfálticas y el radio de curvatura que ponen de manifiesto la dependencia de esta diferencia con respecto a la forma de la deformada.

Tramo	Radio de curvatura (m)	Espesor asfált. (cm)	Deflexión Absoluta (mm/100)	Deflexión Medida ** (mm/100)	Diferencia (%)
R7S15	517	8 *	64	41	36
R9S6	357	34	25	21	16
R9S2	330	34	30	26	13
R9S3	280	31	52	38	27
R7S6	252	35	72	49	32
R7S13	224	20	77	60	22
R34S5	189	20	63	52	17
RP33A	133	2	66	57	14
RP33B	94	2	132	109	17
RP33C	80	2	173	138	20

\* tramo con base de suelo cemento

\*\* mediciones sin corrección por descenso de patas

Tabla 3 Influencia del sistema de referencia en la medición Benkelman para distintos tramos.

Así mismo la simulación de la medición del radio de curvatura tiene que respetar las condiciones de realización in situ. En la medición regla Benkelman valorando la deformación a 25 cm del centro de ruedas y con el deflectógrafo Lacroix en una zona más próxima (adoptamos 5cm) que tiene en cuenta la mejor discretización de esta forma de medición.

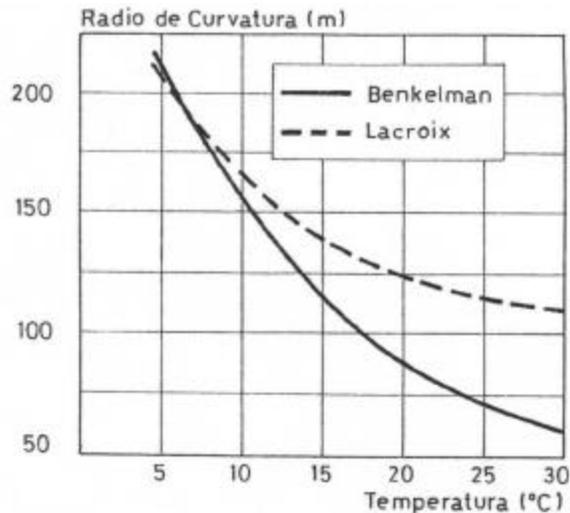


Fig. 8 Variación teórica de los radios de curvatura Benkelman y Lacroix

A modo de ejemplo en la figura 8 se indican los valores teóricos del radio de curvatura según ambos métodos de medición para distintos módulos en la capa asfáltica para la estructura de la figura 5, donde puede corroborarse la tendencia a obtener menores valores del radio de curvatura cuando es valorado por el deflectógrafo Lacroix.

## 6. VALIDACIÓN DEL MODELO

Para confirmar la metodología propuesta de retro-ajuste de módulos se planteó la realización teórica de las correlaciones Benkelman y Lacroix para distintos tipos estructurales y poder así compararlas con las correlaciones obtenidas experimentalmente (10).

Se calcularon teóricamente las deflexiones Benkelman y Lacroix para cada tipo estructural y diferentes calidades de la subrasante, adoptando ecuaciones constitutivas típicas para los distintos materiales no ligados y para la subrasante, de manera de reproducir el amplio rango de las variación de las mediciones in situ.

En la figura 9 se muestra uno de los casos analizados donde se indican la recta de correlación obtenida teóricamente mediante la modelización de ambas mediciones y también los puntos experimentales logrados realizando ambas mediciones en un mismo punto. Es notoria la buena correspondencia obtenida entre los valores experimentales y teóricos, lo que confirma la metodología planteada.

Otra posibilidad de validación de la metodología de retro-ajuste consiste en realizar en un mismo sitio la medición de espesores, caracterización de materiales en laboratorio (mediante ensayos que posibiliten la determinación de sus ecuaciones constitutivas) y la valoración in situ de la deflexión para luego comparar los valores medidos y calculados teóricamente sin realizar ningún ajuste de los módulos tarea que fue realizada sobre un tramo de la autopista Rosario-Buenos Aires, obteniéndose una adecuada igualdad de deflexiones y radios de curvatura (11).

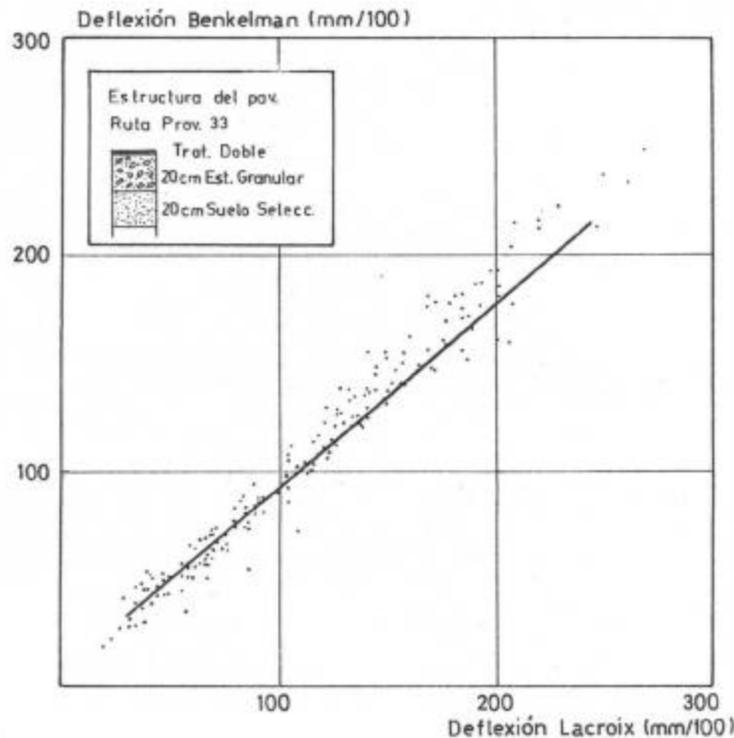


Fig.9 Correlación teórica y experimental entre las mediciones de deflexiones Benkelman y Lacroix.

## 7. CONCLUSIONES

Los resultados de deflexiones Benkelman y Lacroix pueden ser usados para estimar los módulos de una estructura vial a partir del conocimiento de sus materiales, espesores y condiciones de medición.

Con respecto a la modelización de la deflexión Lacroix: en general se logra una buena aproximación teniendo en cuenta solo el semi-eje de carga, tiene gran influencia la existencia de valores iniciales no nulos y el buen diseño de I sistema de referencia da como resultado una baja influencia del conjunto pudiendo simplificarse considerablemente la modelización y plantear solo la diferencia entre las mediciones absolutas.

En la modelización de las mediciones con regla Benkelman se recomienda la corrección por descenso de patas en el modelo pues las mismas se encuentran dentro del cuenco de la deformada lo que motiva diferencias entre el valor de la deflexión absoluta y el valor efectivamente medido.

Así mismo la simulación de la medición del radio de curvatura tiene que respetar las condiciones de realización in situ. Se recomienda para la modelización correspondiente a regla Benkelman valorar la diferencia de deformaciones entre 0 y 25 cm del centro de las ruedas, y para el deflectógrafo Lacroix entre 0 y 5 cm.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

1. Barker, W., Brabston, W. y Chou, Y., "A general system for the structural design of flexible pavements" 4th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Vol. 1, Ann Arbor, 1977.
2. Chua, K., "Determination of CBR and elastic modulus of soils using a portable cone penetrometer", 1st International Symposium on Penetration Testing, Orlando, FL, marzo 1988.
3. Angelone, S., Tosticarelli, J. y Martinez, F., "El penetrómetro dinámico de cono. Su aplicación al control y diseño estructural de pavimentos", 6º Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Santiago de Chile, noviembre 1991.
4. Tosticarelli, J., Poncino, H., Angelone, S., Giovanon, O., Martinez, F. y Pagola, M., "Contribución del Grupo de Investigación de Rosario al Diseño Estructural de pavimentos en Argentina", V Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Punta del Este, Uruguay, noviembre 1989.
5. Lytton, R.L., "Backcalculation of pavement layer properties", 1st International Symposium on Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli, Maryland, junio 1988.
6. Giovanon, O., "Predicción de la temperatura de la mezcla a partir del clima de una región", XXIV Reunión del Asfalto, Mar del Plata, Argentina, noviembre 1986.
7. Martinez, F. y Angelone, S., "Determinación del módulo dinámico (Stiffness) de mezclas asfálticas utilizadas en pavimentos de la región litoral", III Congreso Ibero-Latinoamericana del Asfalto, Colombia, octubre 1985.
8. De Beer, M., Horak, E. y Visser, A.T., "The multidepth Deflectometer (MDD) system for determining the effective elastic moduli of pavement layers", 1st International Symposium on Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli, Maryland, junio 1988.
9. Hoyinck, W., Van Den Ban, R. y Gerritsen, W., "Lacroix overlay design by three layer analysis", 5th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, The Netherlands, agosto 1982.
10. Tagle, A., Tosticarelli, J., Petroni, E. y Grupos de Trabajo, "Primeras experiencias de utilización de deflectógrafos Lacroix en Argentina", 1er Congreso Latino-Americano del Asfalto, Río de Janeiro, Brasil, diciembre 1981.
11. Martinez, F., Angelone, S. y Giovanon, O., "Validación in-situ de modelos de comportamiento de diferentes materiales viales", XXVI Reunión del Asfalto, Buenos Aires, noviembre 1990.