

Comparación entre las deflexiones medidas con el curviámetro MT-15 y con la viga Benkelman

Por **BARTOLOMÉ SÁNCHEZ LÓPEZ**
Ingeniero de Caminos,
Canales y Puertos

y **FRANCISCO ACHÚTEGUI VIADA**
Dr. Ingeniero de Caminos,
Canales y Puertos



Vista general del curviámetro MT-15.

1. Introducción

LA gran experiencia acumulada en España en la medida de deflexiones, primero con la viga Benkelman y después con deflectógrafos automáticos tipo Lacroix, motivó que se incluyera como método de cálculo del refuerzo de los firmes flexibles el estudio de las deflexiones medidas con dichos equipos¹.

La capacidad estructural de un tramo homogéneo viene determinada en la norma española de re-

fuerzo, 6.3-IC, por una deflexión de cálculo, basada en las medidas hechas por el método de recuperación elástica con viga Benkelman². Cuando se utiliza otro equipo de medida, la deflexión característica de cada tramo debe determinarse por correlación con la anterior.

Uno de los equipos actualmente disponibles en España es el curviámetro, cuyo modelo actual (MT-15) es una versión bastante modificada del modelo anterior de 1977³.

El curviámetro MT-15⁴ está montado sobre un camión de dos ejes, cuando el eje gemelo trasero

está lastrado con una carga que se puede ajustar a voluntad entre 80

1. MOPU. Dirección General de Carreteras. Refuerzo de firmes. Instrucción de Carreteras. Norma 6.3 IC. 1979.
2. Norma NLT-356/68. Medida de las deflexiones de un firme mediante el ensayo con viga Benkelman.
3. J. Paquet. Un nouvel appareil d'auscultation des chaussées: le Curviamètre. Revue Générale des Routes et des Aéroports n° 530. Abril 1977.
4. Lichtmajer, Edgardo; de Clerq, Koen y Sánchez Salinero, Ignacio. Medidas en continuo de la capacidad estructural de firmes con el curviámetro MT-15. Carreteras. 4ª época. Núm. 62. Noviembre-diciembre 1992.

“**E**ⁿ comparación con el deflectógrafo Lacroix, la mayor velocidad de trabajo del curviámetro se traduce en un mayor rendimiento, menor tiempo de interferencia con la circulación y, como consecuencia, menor peligro de accidente y menor coste por kilómetro auscultado.”

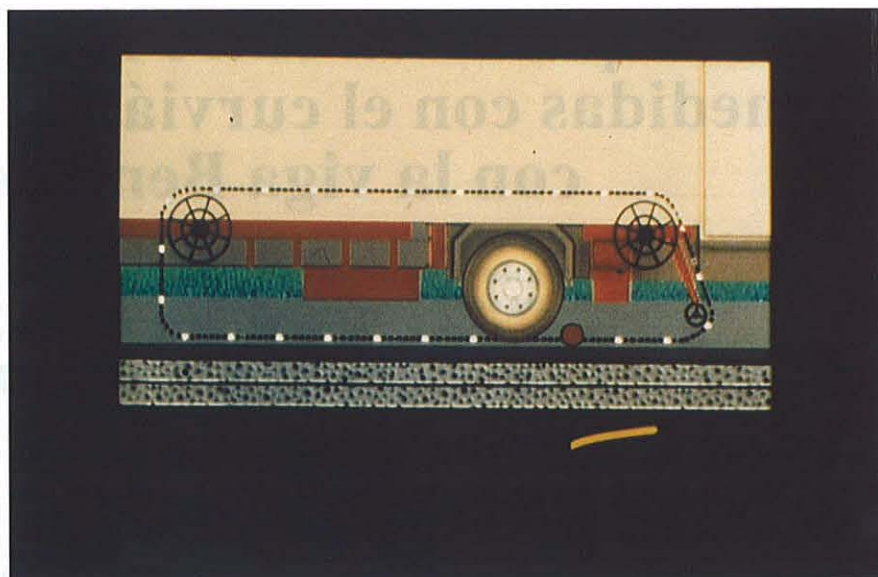
y 130 kN. En España se utiliza con una carga de 130 kN, y la distancia entre ejes es de cinco metros.

Las medidas se realizan a una velocidad de 5 m/s (18 km/h) y se repiten cada cinco metros. En cada punto se determina la deformada del firme sobre una longitud de cuatro metros. De éstos, tres corresponden a la parte posterior del camión, por detrás del eje trasero, en donde apenas hay influencia de la rueda delantera.

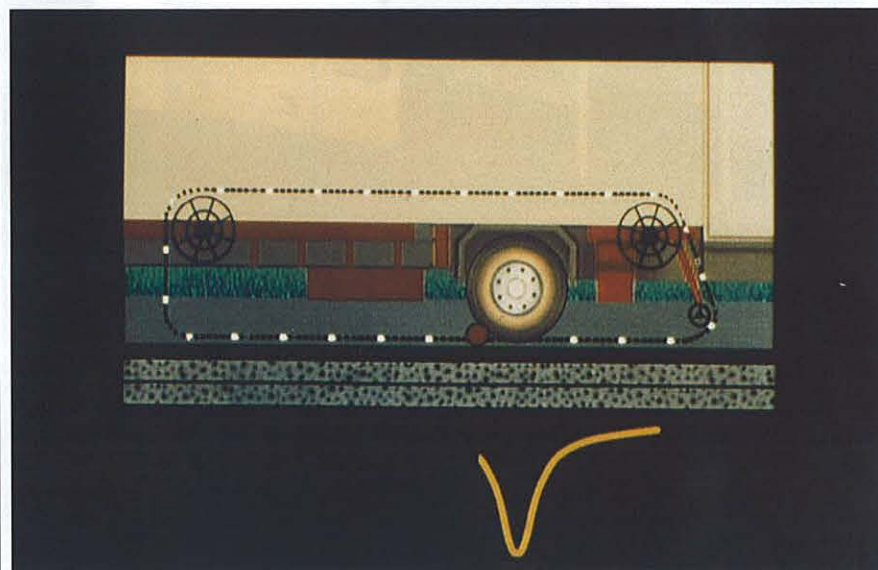
Como parámetros principales se obtienen la deflexión en el punto de mayor deformada, el radio de curvatura en dicho punto y la anchura de la deformada. Las medidas obtenidas se visualizan en tiempo real, y se almacenan en soporte magnético para tratarlas estadísticamente o analizarlas individualmente.

El curviámetro reúne, en principio, una serie de características que lo hacen apropiado para su utilización en el Sistema de Gestión de Conservación de Firmes de la red de carreteras estatal. En comparación con el deflectógrafo Lacroix, su mayor velocidad de trabajo se traduce en un mayor rendimiento, menor tiempo de interferencia con la circulación y, como consecuencia, menor peligro de accidente y menor coste por kilómetro auscultado. Tiene la desventaja, respecto del Lacroix, de que no mide más que la rodada derecha.

No obstante, el mayor inconveniente



Secuencia de medidas. Posición 1.



Secuencia de medidas. Posición 2.

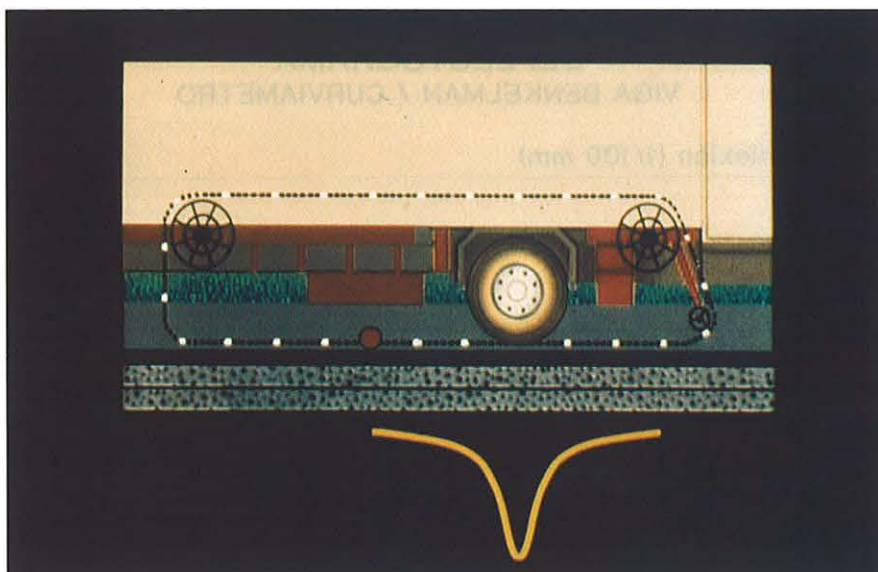
que se veía en principio para la utilización del curviámetro era que la documentación disponible sobre su funcionamiento y sobre ensayos de comparación con otros equipos de medida de deflexiones, resultaba insuficiente para enjuiciar su comportamiento en los firmes de la red.

Por una parte, la mayoría de la información se refería al modelo anterior del curviámetro, sin que pudiera conocerse hasta qué punto hubieran podido mejorarse en el modelo actual las características de sensibilidad y precisión de las medidas.

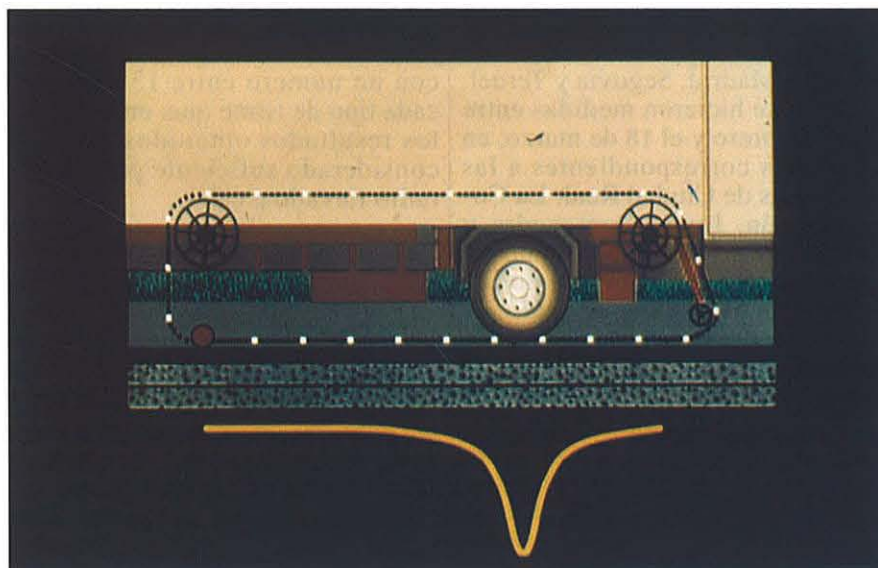
Por otra parte, los ensayos de correlación realizados hasta ahora, o bien lo habían sido en firmes que

pudieran no ser representativos de las condiciones españolas, o bien no proporcionaban una información suficiente para deducir unas conclusiones claras en nuestro caso.

Por ello, antes de establecer una opinión fundada sobre la conveniencia de la utilización del curviámetro en los firmes de nuestra red estatal, bien en estudios concretos de refuerzo, bien para obtener índices utilizables en el sistema de gestión de la conservación; y sea en la totalidad de los firmes como sólo en determinados tipos de ellos, resultaba necesario realizar estudios comparativos con otros equipos de medida suficientemente conocidos y utilizados en España.



Secuencia de medidas. Posición 3.



Secuencia de medidas. Posición 4.

Para satisfacer esta necesidad, el Servicio de Tecnología de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente puso en marcha, en colaboración con el Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX, un estudio de correlación de las medidas obtenidas con el curviómetro MT-15 y con los equipos de auscultación que se indican en la norma de refuerzo de firme, 6.3-IC.

La idea fundamental de este estudio era, más que hacer caso a consideraciones más o menos teóricas o a experimentaciones anteriores en que basaban sus opiniones contradictorias tanto los partidarios como los detractores

del curviómetro, considerar a éste como un equipo nuevo en el que, partiendo de cero, se analizaran exclusivamente los resultados que se obtuvieran, prescindiendo de cualquier otro tipo de razonamiento.

Efectuados los ensayos pertinentes según la metodología que se expone a continuación, en este artículo se recogen las principales conclusiones del importante estudio realizado de comparación exclusivamente entre las deflexiones medidas con el curviómetro MT-15 y con la viga Benkelman. Las comparaciones con el deflectógrafo automático Lacroix serán objeto de un análisis posterior.

2. Metodología de los ensayos

Para realizar los ensayos, se seleccionaron tramos homogéneos de firme, en cuanto a su composición y su estado aparente dentro de los tipos que se indican más adelante.

La longitud de cada tramo medido con el curviómetro y el deflectógrafo fue de 2 km (lo que permitía medir el tramo con el deflectógrafo en 1 hora y en la décima parte del tiempo con el curviómetro). Se disponía así, en la rodada derecha del carril ensayado, de una muestra de 400 medidas cada 5 metros, tanto con el curviómetro como con el deflectógrafo.

Ya que, desde el punto de vista operativo, no convenía hacer un número de medidas con la viga Benkelman tan grande por tramo (que llevaría a un tiempo de ensayo tan dilatado que podría modificar apreciablemente las condiciones de temperatura del firme), las medidas con este equipo se redujeron a un subtramo de 200 m. Con ello, además, se tenía mayor garantía de homogeneidad, ya que la experiencia indica que casi nunca un tramo de 2 km resulta ser homogéneo.

Las medidas con la viga Benkelman se realizaron cada 10 metros, según el método de recuperación de la norma NLT 356/88, sin aplicar ninguna corrección a la deflexión elástica por la influencia de la deformada en los apoyos de la viga.

El subtramo en el que se hicieron las medidas fue el de los 200 metros iniciales del tramo correspondiente, excepto si la medida de las deflexiones realizadas previamente con el curviómetro detectara una falta de homogeneidad, en cuyo caso se trasladaron a los 200 primeros metros homogéneos.

El orden de los ensayos fue, en primer lugar, el curviómetro, que va más rápido; inmediatamente, entró el deflectógrafo y, a continuación, la viga Benkelman, sin tener que esperar cada equipo a que terminase el anterior de medir todo el tramo. Durante la realización del ensayo se determinaron las temperaturas ambiente y del pavimento, para no tener en cuenta medidas que difirieran demasiado entre el paso de un equipo a otro.

3. Tipos de firme considerados

En el inventario de los firmes a cargo de la Dirección General de Carreteras, se han clasificado éstos, sin tener en cuenta casos especiales de poca importancia en el conjunto de la red, en siete categorías distintas:

- Firmes flexibles sin mezclas bituminosas (con tratamiento superficial de riegos con gravilla o lechada bituminosa)
- Firmes flexibles con 4-6 cm de MB
- Firmes flexibles con 7-11 cm de MB
- Firmes flexibles con 12-15 cm de MB
- Firmes semiflexibles, con más de 15 cm de MB sobre material granular
- Firmes semirrígidos, con base o subbase tratada con conglomerantes hidráulicos
- Firmes rígidos.

Prescindiendo de los firmes rígidos, en los que no se considera apropiada la medida de deflexiones con los equipos empleados en el estudio, quedan 6 tipos de firmes distintos, de los que se seleccionaron tramos con los espesores de mezclas bituminosas más característicos y abundantes, y suficientemente escalonados para cubrir una gama representativa del conjunto de los firmes, a saber:

Tipo 1. Firme flexible sin mezclas bituminosas

Tipo 2. Firme flexible con 5 cm de MB

Tipo 3. Firme flexible con 10 cm de MB

Tipo 4. Firme con 15 cm de MB sobre material granular

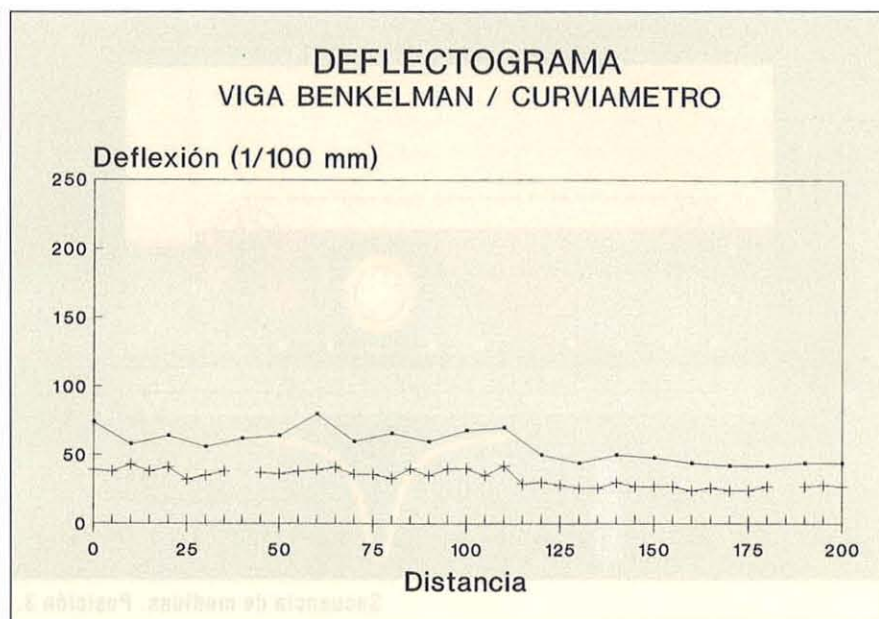
Tipo 5. Firme con 20 ó 25 cm de MB sobre material granular

Tipo 6. Firme semirrígido, con base o subbase tratada con conglomerantes hidráulicos.

4. Tramos ensayados

Al objeto de tener un buen número de datos sobre los que basar las conclusiones del estudio, se previó, en principio, ensayar 15 tramos de cada uno de los tipos de firme indicados en el apartado anterior.

Los primeros ensayos, realizados entre el 8 de junio y el 9 de ju-



lio de 1992, lo fueron en 43 tramos situados en las provincias de Guadalajara, Madrid, Segovia y Teruel. En 1993 se hicieron medidas entre el 2 de febrero y el 18 de marzo, en 62 tramos correspondientes a las provincias de Ciudad Real, La Coruña, León, Lugo, Pontevedra y Zamora. A pesar de las precauciones tomadas, se vio que algunos de los tramos ensayados, al analizarlos, no podían considerarse suficientemente homogéneos; por lo que se procedió a eliminarlos en su conjunto, para un mayor rigor del análisis, basado no en las medidas individuales, sino en valores estadísticos de tramos homogéneos, como se indica más adelante. También existen tramos en los que se ha eliminado alguna zona heterogénea, de extensión muy limitada.

Como resumen, se indican a continuación el número de tramos ensayados, eliminados y definitivamente considerados en cada uno de los tipos de firme: ▼

Ha quedado, por tanto, un conjunto de 85 tramos para el análisis, con un número entre 13 y 15 por cada tipo de firme que, en razón de los resultados obtenidos, ha sido considerado suficiente para el estudio llevado a cabo.

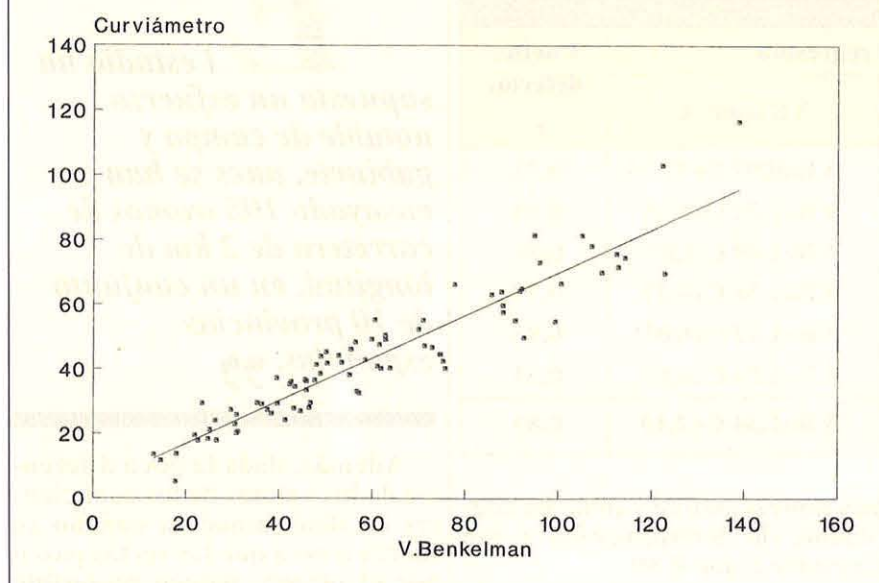
5. Análisis de los resultados

5.1. Consideraciones generales

Dada la dificultad de realizar las medidas de deflexiones con el curviámetro y la viga Benkelman en el mismo sitio exactamente, se ha prescindido en lo que sigue de hacer el análisis punto por punto, y se examinan las correlaciones entre los valores medios de las deflexiones halladas en cada tramo homogéneo de 200 m, tanto con el curviámetro como con la viga Benkelman, por considerar estos valores como los más representativos del tramo.

Tipo de firme	Número de tramos		
	Ensayados	Eliminados	Considerados
1	19	5	14
2	19	6	13
3	15	0	15
4	19	6	13
5	15	0	15
6	18	3	15
Total	105	20	85

CORRELACION CURVIÁMETRO-VIGA BENKELMAN TODOS TRAMOS



Se han hecho estudios de correlación lineal en cada tipo de firme, que han dado resultados a primera vista sorprendentemente parecidos; por lo que se ha determinado también la correlación lineal del conjunto de las medidas sin diferenciar tipos de firme.

Igualmente se han considerado las deflexiones características de cada tramo, en las que se basan las deflexiones de cálculo empleadas en la norma 6.3-IC de refuerzo de firmes, estableciendo análogamente correlaciones lineales entre los valores obtenidos con ambos equipos.

Todos estos estudios se han realizado después de eliminar, como se ha dicho, los tramos no homogéneos y algunas zonas heterogéneas de extensión muy limitada de los restantes tramos. No se consideran tampoco, lógicamente, los puntos que elimina el curviámetro automáticamente por anomalía en las medidas.

5.2. Valores medios de las deflexiones

Observando simplemente las gráficas de deflexiones, se ha apreciado una correspondencia aceptable a simple vista entre el conjunto de medidas realizadas con el curviámetro y con la viga Benkelman; con valores del primer equipo, en general, más bajos.

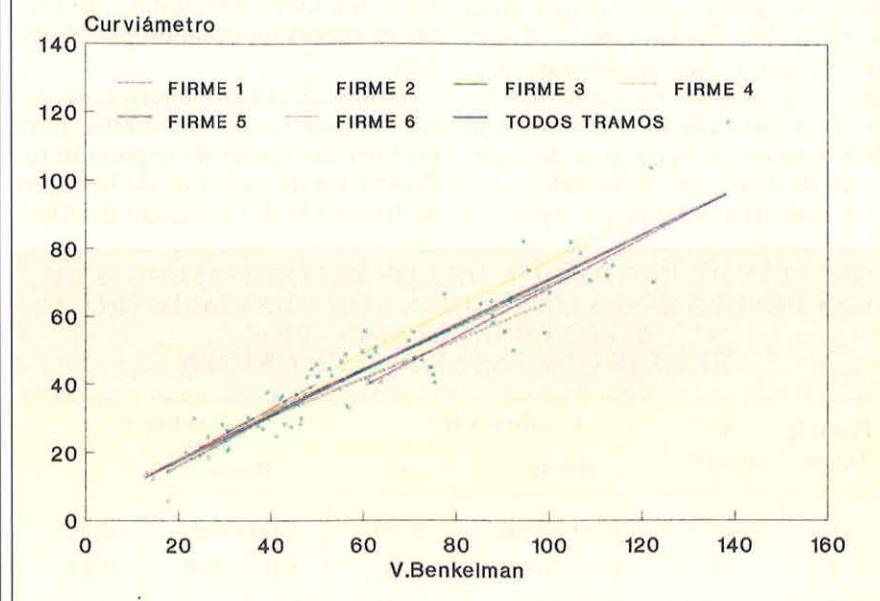
Por la dificultad ya comentada de realizar las medidas de la viga Benkelman en los mismos sitios exactamente que lo hizo el curviámetro, que mide a 18 km/h, se ha prescindido de estudiar correlaciones punto a punto, pues, a las diferencias propias de las mediciones efectuadas por distintos

“**S**e han hecho análisis de correlación lineal en cada tipo de firmes considerado, con resultados aceptables que no aconsejan establecer relaciones de otro tipo. Las rectas de regresión son, en contra de lo que pudiera haberse esperado, relativamente parecidas.”

temente representativos para establecer correlaciones entre las medidas de ambos equipos, aun sabiendo que la estimación de dichos valores por las medias muestrales entraña un pequeño margen de error, inevitable cuando se procede a cualquier estudio de deflexiones.

Se han hecho análisis de correlación lineal en cada tipo de firmes

RECTAS DE REGRESION CURVIÁMETRO-VIGA BENKELMAN



equipos, se sumarían las debidas al comportamiento del firme en puntos diferentes.

En cambio, los valores medios de las deflexiones de cada tramo homogéneo se consideran suficien-

considerado, con resultados aceptables que no aconsejan establecer relaciones de otro tipo. Las rectas de regresión son, en contra de lo que pudiera haberse esperado, relativamente parecidas, como pue-

RECTAS DE REGRESION DE LOS VALORES MEDIOS DE LAS DEFLEXIONES OBTENIDAS CON CURVIAMETRO (C) Y VIGA BENKELMAN (VB)

Tipo de firme	Nº tramos	Rectas de regresión		Coef. determ. r^2
		C sobre VB	VB sobre C	
1	14	$C=0,72 VB-5,15$	$VB=0,98 C+32,73$	0,71
2	13	$C=0,68 VB+7,23$	$VB=1,22 C+5,78$	0,83
3	15	$C=0,62 VB+6,50$	$VB=1,40 C-1,62$	0,87
4	13	$C=0,56 VB+7,25$	$VB=1,38 C+4,37$	0,77
5	15	$C=0,73 VB+0,42$	$VB=1,13 C+6,01$	0,83
6	15	$C=0,74 VB+1,81$	$VB=1,00 C+6,63$	0,74
Conjunto	85	$C=0,66 VB+3,57$	$VB=1,34 C+2,10$	0,89

de observarse en la figura que se acompaña; por lo que se ha determinado también la correlación lineal del conjunto de las medias, sin diferenciar tipos de firmes.

En el cuadro que figura en la parte superior, se indican dichas rectas de regresión.

Puede observarse bastante parecido en las ecuaciones de las rectas de regresión, con independencia del tipo de firme. Es más, los coeficientes de firmes de comportamiento tan opuesto como los tipos 1, 5 y 6 han resultado incluso más semejantes entre sí que en el resto de los firmes tipo 2, 3 y 4; por lo que no hay razón para preferir ninguna de las rectas de regresión individuales de cada uno de los tipos de firme a la del conjunto de ellos que, habiéndose hecho con una muestra mayor, es

más representativa y tiene un coeficiente de determinación r^2 tan aceptable como 0,89.

Los puntos en que las rectas de regresión cortan al eje de ordenadas están tan próximos al origen que parece conveniente forzar a que las rectas pasen por dicho punto, como cabría esperar; ya que, teóricamente, a un valor de deflexión nulo medido con la viga Benkelman debe corresponderle otro valor nulo medido con el curviámetro.

En el cuadro inferior, se indican las ecuaciones obtenidas con rectas de regresión pasando por el origen.

Como en el caso anterior, no parece haber razón suficiente para preferir las rectas de regresión individuales de cada uno de los tipos de firme a la del conjunto de ellos.

RECTAS DE REGRESION DE LOS VALORES MEDIOS DE LAS DEFLEXIONES OBTENIDAS CON CURVIAMETRO (C) Y VIGA BENKELMAN (VB). RECTAS QUE PASAN POR EL ORIGEN

Tipo de firme	Nº tramos	C sobre VB		VB sobre C	
		Recta	r^2	Recta	r^2
1	14	$C=0,67VB$	0,70	$VB=1,46C$	0,52
2	13	$C=0,76VB$	0,82	$VB=1,31C$	0,83
3	15	$C=0,72VB$	0,84	$VB=1,36C$	0,87
4	13	$C=0,67VB$	0,74	$VB=1,47C$	0,77
5	15	$C=0,74VB$	0,83	$VB=1,33C$	0,80
6	15	$C=0,79VB$	0,74	$VB=1,21C$	0,70
Conjunto	85	$C=0,71VB$	0,88	$VB=1,38C$	0,89

“

El estudio ha supuesto un esfuerzo notable de campo y gabinete, pues se han ensayado 105 tramos de carretera de 2 km de longitud, en un conjunto de 10 provincias españolas.”

Además, dada la poca diferencia de los valores de los coeficientes de determinación cuando se fuerza o no a que las rectas pasen por el origen, parece preferible por mayor simplicidad adoptar las ecuaciones $C=0,71VB$ y $VB=1,38C$ (o redondeando, $C=0,7VB$ y $VB=1,4C$) para relacionar los valores medios de las deflexiones halladas con el curviámetro MT-15 y con la viga Benkelman.

5.3. Deflexiones características

La norma 6.3-IC de refuerzo define como deflexión característica de un tramo la que viene determinada por la expresión:

$$d_k = m + 2s$$

en la que:

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i$$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (d_i - m)^2$$

siendo d_i la deflexión del punto i , medida con viga Benkelman según el método de recuperación y, $n \geq 10$.

Aplicando las mismas fórmulas anteriores a las deflexiones medidas con el curviámetro, se hallan las deflexiones características de los tramos estudiados, obtenidas con el curviámetro. Relacionando estos valores con los de las deflexiones características correspon-

RECTAS DE REGRESION DE LAS DEFLEXIONES CARACTERISTICAS DETERMINADAS CON CURVIAMETRO (C) Y VIGA BENKELMAN (VB) EN EL CONJUNTO DE LOS TRAMOS

Recta de regresión	Sin condiciones		Recta que pasa por (0,0)	
	Recta	r ²	Recta	r ²
C sobre VB	C=0,70 VB+3,76	0,88	C=0,74VB	0,88
VB sobre C	VB=1,26 C+5,14	0,88	VB=1,33C	0,88

dientes a la viga Benkelman, resultan las rectas de regresión que figuran en el cuadro superior para el conjunto de los tramos; ya que, como en el caso de los valores medios de deflexión, no se ve razón suficiente para preferir la utilización de ecuaciones individuales para cada uno de los tipos de firme.

Los puntos en que las rectas de regresión determinadas sin imponer condiciones especiales cortan al eje de coordenadas están tan próximos al origen que, al forzar que pasen por dicho punto, los coeficientes de determinación (r²) no experimentan modificaciones que afecten a las centésimas: por lo que, también en este caso, parece preferible adoptar las rectas de regresión que pasan por el punto (0,0), es decir, C=0,74 VB y VB=1,33 C.

Estas ecuaciones son prácticamente las mismas obtenidas con los valores medios de deflexiones, por lo que no hay inconveniente en adoptar dichas rectas de regresión para cualquier caso.

Además, adoptando la ecuación VB=1,4 C para determinar la deflexión característica de las medidas con la viga Benkelman, que servirá de base para los cálculos de refuerzo, la pequeña diferencia que se tiene sobre el valor VB=1,33 C está del lado de la seguridad.

5.4. Análisis efectuados eliminando en gabinete las medidas con señales anómalas

En el proceso de toma de datos con el curviámetro MT-15 se realiza un análisis automático de la calidad de las señales, y se eliminan las que se consideran erróneas (por exceso de ruido eléctrico u otras causas). Sin embargo, hay ocasiones en que la señal seleccionada como anómala no lo es, como

en el caso de algunas medidas tomadas en las proximidades de grietas, o algunas consideradas como buenas presentan anomalías que recomiendan su eliminación. Por este motivo, en el análisis de las medidas se realiza normalmente una comprobación "a posteriori" de la calidad de las señales.

Siguiendo esta pauta, se ha procedido en gabinete a eliminar las medidas que presentaban señales anómalas por dos conceptos principales: pérdida de señal (generalmente, al final de la medida) y deformaciones positivas. Aunque esta segunda causa en algún caso podría justificarse físicamente, se ha preferido en el análisis prescindir de las medidas correspondientes. Finalmente, se han eliminado otras por presentar irregularidades difíciles de justificar en la señal del geófono y que afectaban al cuenco de deformación o al de curvatura.

Después de prescindir así de un total de 25 puntos de medida con señales anómalas, se ha repetido todo el análisis efectuado anteriormente. Las nuevas rectas de regresión —que no reproducimos, en aras de la brevedad— son muy parecidas a las obtenidas anteriormente.

Por otra parte, las mejoras de correlación introducidas con la eliminación de dichas medidas apenas si son apreciables, por lo que no se comete gran error si dejan de eliminarse los puntos con señales anómalas que han escapado al control automático del equipo.

6. Resumen y conclusiones

Con objeto de establecer una opinión sólidamente fundada sobre la conveniencia de la utilización del curviámetro en los firmes de la red de carreteras estatal, bien en

estudios concretos de refuerzo, bien para obtener índices utilizables en el sistema de gestión de conservación, el Servicio de Tecnología de la Dirección General de Carreteras ha realizado, en colaboración con el Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX, un estudio de correlación de las medidas obtenidas con el curviámetro MT-15 y con los equipos de auscultación que se indican en la norma de refuerzo de firmes (6-3 IC).

El estudio ha supuesto un esfuerzo notable de campo y gabinete, pues se han ensayado 105 tramos de carretera de 2 km de longitud, en un conjunto de 10 provincias españolas, con firmes de 6 diversos tipos, que van desde flexibles sin mezclas bituminosas (con tratamiento superficial con riegos con gravilla o con lechada asfáltica) hasta semirrígidos, pasando por una gama de firmes con mezclas bituminosas de 5, 10, 15 y 20 ó 25 cm de espesor sobre material granular.

Para establecer correlaciones entre las deflexiones medidas con el curviámetro y con la viga Benkelman, en que se basa el método de cálculo de la norma de refuerzos, se han seleccionado tramos homogéneos de 200 metros de longitud en un total de 85, con números comprendidos entre 13 y 15 por cada tipo de firme, y empleando la metodología anteriormente descrita.

Los estudios realizados han mostrado que existe, entre las medidas efectuadas con el curviámetro MT-15 y con el método de recuperación con la viga Benkelman, una fuerte correlación, prácticamente la misma en todos los firmes estudiados, desde los más flexibles hasta los semiflexibles y semirrígidos.

Por esta razón, y en virtud del estudio realizado, puede adoptarse la siguiente expresión para relacionar las deflexiones medidas con curviámetro y viga Benkelman:

$$VB = 1,4 C$$

donde:

VB = deflexiones medidas con viga Benkelman

C = deflexiones medidas con curviámetro MT-15

La expresión anterior ha resultado válida tanto para deflexiones medias de los tramos homogéneos como para deflexiones características. También lo sería para valores individuales, si hubiera garantía de que las medidas con ambos equipos se realizaran exactamente en el mismo punto.

La eliminación en gabinete de las medidas de los puntos con señales anómalas, que no hayan sido suprimidas automáticamente por la propia programación del curviámetro, no mejora notablemente las correlaciones obtenidas; por lo que —aunque conviene hacer dicha eliminación— su supresión no entraña grandes errores en el cálculo de las deflexiones medias o características, en los casos normales en que no haya un número excesivo de señales anómalas. Dicho de otro modo, en estos casos normales, la eliminación que automáticamente proporciona el curviámetro podría ser suficiente para el cálculo de las deflexiones medias y característi-

cas de un tramo homogéneo, aunque no para el estudio de puntos singulares.

Las conclusiones anteriores —y, especialmente, las rectas de regresión indicadas— no deben extrapolarse a condiciones fuera de las estudiadas. Concretamente, por lo que se refiere a los valores medios de las deflexiones, éstas se encuentran comprendidas entre 13 y 139 centésimas de milímetro con la viga Benkelman (que corresponden a valores estimados con el curviámetro entre 9 y 97), fuera de cuyo rango no deberían extenderse las correlaciones encontradas.

Finalmente, cabe señalar que el curviámetro MT-15 puede considerarse como un equipo apropiado para la auscultación de la red de carreteras con vistas a un sistema de gestión de firmes (salvo en el caso de los firmes rígidos y tramos con curvas de pequeño radio). También puede utilizarse en proyectos de rehabilitación para el cálculo de esfuerzos, con la limitación de que no

es apropiado para los tramos en que el firme tenga menos capacidad de soporte en su zona central, ya que no determina la deflexión más que en la rodada exterior; a menos que se repita la auscultación en la rodada interior, con los inconvenientes para el tráfico que normalmente esto conllevaría.

De todas formas, la secuencia de sus medidas (cada 5 m) supone una ventaja sobre la que normalmente se haría con la viga Benkelman, para determinar tramos de comportamiento homogéneo y calcular las deflexiones medias y características, así como para localizar puntos singulares de baja capacidad de soporte. ■

Bartolomé Sánchez López. Jefe del Servicio de Tecnología de Carreteras de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente.

Francisco Achútegui Viada. Jefe del Sector de Evaluación a Escala Real del Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX.