

# REFUERZO DE FIRMES FLEXIBLES

Por OLEGARIO LLAMAZARES GOMEZ

Ingeniero de Caminos

*Presenta el autor un interesante estudio sobre el refuerzo de firmes de carretera, problema de palpante actualidad en la red española, cuyos pavimentos han acusado su insuficiencia para el intenso y pesado tráfico de hoy. Se ordena en este trabajo el procedimiento a seguir para calcular el espesor en que debe recrecerse un determinado firme flexible, partiendo de ensayos, datos empíricos y fórmulas de la nueva técnica de carreteras.*

En nuestro país, como en el resto del mundo civilizado, se plantea con inaplazable solución, el problema de refuerzo de firmes en una gran parte de la red de carreteras.

Más urgente que el ensanche de las calzadas en servicio y las variantes de trazado, que pueden reducirse a varios casos concretos y de bien conocida necesidad, es el acondicionamiento de los afirmados, pero no atendiendo sólo a un revestimiento protector, lo que hasta ahora ha sido la idea general, con los riegos superficiales de conservación y en contados tramos con revestimientos de aglomerado asfáltico de pequeño espesor. Es preciso aumentar la resistencia de los firmes, adaptándolos a las cargas y frecuencias del tráfico de hoy, evitando las deformaciones que producen a la larga la ruina de los pavimentos.

Considérese lo que para el buen rendimiento de una carretera, tanto por lo que se refiere a capacidad de tráfico como a la economía de su explotación y conservación, supone un buen afirmado; y las inversiones para conseguirlo son mucho más rentables que las destinadas a otras modificaciones en planta, alzado o sección, las cuales, salvo algunas excepciones, podrán esperar hasta una coyuntura económica más favorable y un mayor desarrollo de nuestro aún reducido parque de vehículos. Evidentemente que así se conservarán puntos de estrangulación en la red, pero aislados entre tramos de pavimento perfecto, apenas supondrán retraso ni peligro de accidentes con esa prudencia en la circulación a la que, con educación cívica y policía, debemos tender.

En los últimos años hemos sido testigos del agrietamiento en algunos pavimentos muy bien ejecutados por el Circuito Nacional de Firmes Especiales que se habían conservado en perfecto estado durante veinticinco años. Asimismo se han producido fisuraciones en revestimientos de reciente aplicación para los que se esperaba una vida mucho más larga.

Estas fisuraciones de los revestimientos asfálticos han coincidido con el aumento de tráfico pesado, y aunque en ellas pudiera jugar el envejecimiento del ligante y los efectos de las bajas temperaturas, está lejos de toda duda que fundamentalmente se deben a un fenómeno de fatiga mecánica producido por la repetición de las grandes cargas por rueda de los camiones que hoy circulan por nuestras carreteras.

Nuestro Código de la Circulación admite un peso máximo por eje de 12 toneladas, que no parece prudente deba ser aumentado, teniendo en cuenta los límites autorizados por otros países:

Alemania .....	8	Tn. (antes, 10).
Argentina .....	10	»
Estados Unidos... 8 a	10	»
Francia .....	13	»
Inglaterra .....	9	»
Suecia .....	6,5	»

Fijada definitivamente la carga máxima en 10 toneladas-eje, para ella deberán acondicionarse los firmes existentes, y para hacer que este dato de partida sea real, debe llevarse a cabo un riguroso control en la carretera, impidiendo que se sobrepase esta carga en los transportes ordinarios y reduciendo los extraordinarios que autoriza el artículo 222, que son cada día más frecuentes y gigantescos; urge se exija a éstos un mayor reparto de su carga por el peligro que así constituyen, no sólo para el afirmado, sino para las obras de fábrica.

En este acondicionamiento de firme para las cargas máximas, que ya es de urgente necesidad en muchos tramos de nuestra red de carreteras, bastará en general un refuerzo de no mucho espesor, pues una capa relativamente débil aumenta considerablemente la capacidad resistente del afirmado y por tanto su vida, según ha quedado bien demostrado en las pistas de experimentación de la W.A.S.H.O.

El problema que hoy se plantea al Ingeniero de carreteras español es la elección de los tramos que necesitan refuerzo, estimando un orden de prelación que sirva de base a un programa nacional, adaptado a las consignaciones anuales que puedan destinarse a tan primordial atención. Elegidos los tramos es preciso determinar el espesor a aumentar en cada caso.

La elección es clarísima cuando ya han aparecido los síntomas externos, generalmente con ese reticulado de grietas que por su aspecto se llama *piel de codrilo*; pero hay que anticiparse a esto pensando en un tráfico futuro en el que aunque pueda limitarse la magnitud de las cargas, su frecuencia tan decisiva para el fenómeno de fatiga aumentará considerablemente.

a)



b)

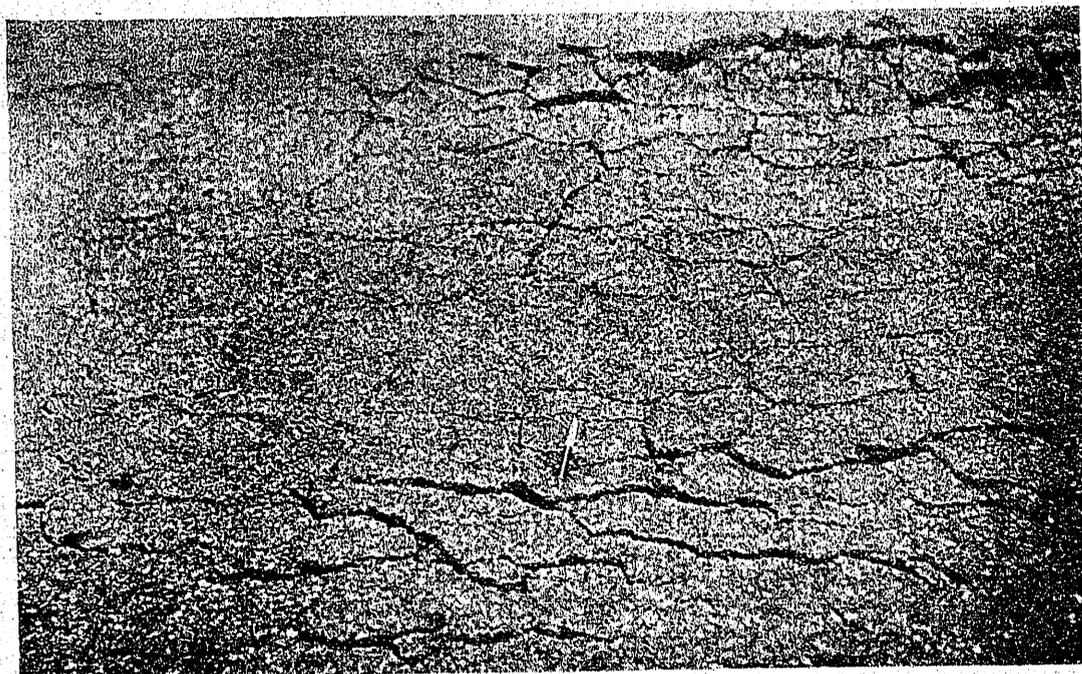


Fig. 1.ª — Típico agrietado del pavimento por insuficiencia de espesor de firme: a) Carretera N-VI de Madrid a La Coruña, kilómetro 359, hectómetro 5. b) Carretera N-630 de Adanero a Gijón, kilómetro 332, hectómetro 1.

## Las deflexiones (\*) como índice de resistencia.

Para la determinación del espesor a recrecer puede emplearse uno cualquiera de los métodos empíricos, de los que nos ocupamos en nuestro artículo publicado en el número de esta REVISTA de agosto de 1958. Operando como para el dimensionamiento de un nuevo firme, se obtiene el espesor total, del que deberá deducirse el del existente, pudiéndose tomar para éste el real u otro virtual mayor, cuando conste de

nes, ahorrando gran cantidad de ensayos más delicados y definitivos, tiene un considerable valor el estudio de las deflexiones del pavimento.

El agrietado y rotura de los revestimientos se produce por las deformaciones de la base y especialmente por las deflexiones que produce el tráfico, con una compresión cuando pasa la rueda cargada, seguida de un movimiento de recuperación hacia arriba después de que ha pasado.

Las largas campañas de medición de flexiones que



Fig. 1.<sup>a</sup> — Carretera N-630 de Adanero a Gijón, kilómetro 334, hectómetro 8.

alguna capa (aglomerado, base tratada) en que por su mayor cohesión pueda computarse con un coeficiente amplificador.

El método más indicado para nuestras posibilidades de equipo es la obtención del CBR *in situ* en las condiciones de humedad más desfavorables a que pueda estar sometida la subrasante.

Pero la aplicación de este método es pesada y costosa, exige taladrar el firme para extraer muestras del terreno de asiento, lo cual deberá hacerse con gran profusión, dada la falta de homogeneidad de una subrasante para la que en la lejana época de la construcción no se mantuvo ningún criterio de selección ni compactación; y así, en un corto tramo pueden existir grandes variaciones de su capacidad resistente.

Por esto, tanto para tantear la resistencia de los firmes en servicio, como para establecer correlacio-

nes han llevado a cabo en los Estados Unidos, han puesto de manifiesto su relación con la rotura de los pavimentos, quedando bien demostrado, como es lógico, que su estado de conservación es mucho mejor en los tramos donde se registraron pequeñas deflexiones. Claro que también es preciso considerar, además del valor absoluto de la deflexión, el espesor y la plasticidad de los revestimientos, pues si éstos son delgados y muy flexibles, pueden adaptarse sin romperse a mayores deformaciones de la base.

También tiene importancia la zona deformada bajo la carga, o sea, la curvatura de la capa flectada, lo que se define por el índice de curvatura (*bending index*,  $\frac{f}{a}$ ), o sea el cociente entre la deflexión y la semilongitud del área afectada según se acota en la figura 2.<sup>a</sup>, que muestra la deformación bajo una rueda. En Suecia se considera como máxima curvatura para que el pavimento no llegue a agrietarse, la de un círculo de 30 metros de radio, valor que los ingenieros

(\*) Empleamos el término *deflexión* en la acepción del Diccionario de la Lengua, o sea de *desviación*, en este caso *desviación*, *flecha* o *deformación por flexión*.

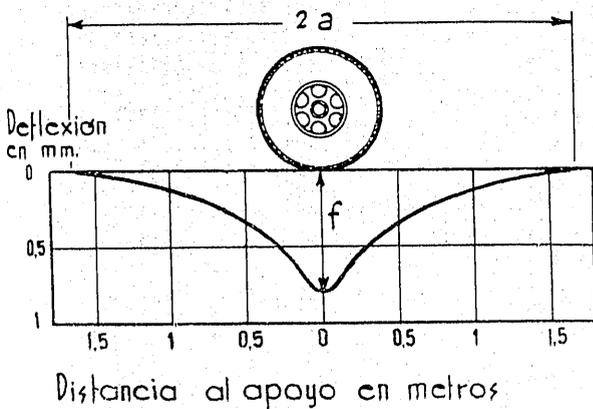


Fig. 2.—Esquema de la deformación del firme bajo una rueda cargada.

americanos consideran excesivo, lo que quizá se deba a que los suecos consiguen revestimientos de mayor flexibilidad.

### Medida de las deflexiones.

El interés que tiene la magnitud de la deformación accidental que produce el tráfico sobre una carretera para conocer su estado y sus posibilidades de resistencia, ha conducido al desarrollo de varios métodos para la medición directa de las flexiones con ayuda de aparatos que pueden dividirse en dos grupos: flexímetros internos y flexímetros de superficie.

Los flexímetros internos consisten en esencia en una varilla metálica que se hincan en el cimiento y con referencia a la cual se miden por medio de dispositivos eléctricos de mucha precisión, las deflexiones que se producen a distintas profundidades del afirmado cuando éste se somete al paso de una rueda cargada. Es el método más completo, porque permite conocer la influencia que cada una de las capas tiene en la deformación; pero exige la perforación en cada punto de estudio y la aplicación es lenta y delicada, ya que requiere una complicada instalación del registrador eléctrico.

De uso mucho más sencillo son los flexímetros superficiales, regiones que se aplican sobre la superficie del pavimento, con longitud suficiente para que un extremo apoye en zona no deformada, y respecto a éste se refiere la deformación que se produce en el otro al paso de la rueda.

Además de estos métodos que hemos llamado directos se ha intentado el estudio de las deflexiones de pavimentos con aparatos vibratorios. Aplicados éstos sobre el firme, registran la magnitud de las deflexiones que produce la vibración y la velocidad de propagación de la onda. Con estos experimentos, llevados a cabo principalmente en Holanda por la Shell Oil Company, se ha pretendido establecer una correla-

ción con los resultados de la medición directa bajo cargas rodantes. Hasta ahora no se ha tenido demasiado éxito, quizá por la influencia del peso del propio vibrador.

### La regla de Bekelman.

Entre los flexímetros de superficie, el más perfeccionado y de mayor utilización es la llamada regla de Bekelman (1), proyectada por el Ingeniero mister Bekelman, especialista de pavimentos flexibles del Bureau of Public Roads, para su aplicación en los tramos experimentales de la W.A.S.H.O., en Mañad (Idaho).

Por tratarse de un aparato de muy poco coste y empleo sencillo, se está prodigando mucho su uso tanto en los Estados Unidos como en los países de Hispanoamérica para tantear la necesidad de refuerzo de los firmes en servicio.

Las deflexiones del pavimento se miden por el movimiento de un brazo de palanca que tiene su punto de apoyo en un bastidor de madera, apoyado a su vez sobre la calzada. Se dispone este bastidor sobre tres apoyos: uno, en el sentido longitudinal, y dos, en el sentido transversal, a suficiente distancia todos para que queden fuera de la zona de deformación que produce la rueda cargada en su posición inicial.

El brazo de palanca lleva en su extremo libre un perno que se apoya sobre el pavimento; al paso de la carga, el movimiento del otro extremo del brazo se registra en un cuadrante micrométrico montado sobre el bastidor. La lectura registrada, que será máxima cuando la carga pase sobre el perno, debe corregirse en la relación del brazo, que es de 2 a 1. La magnitud que se lee en el cuadrante será la mitad de la deflexión del pavimento.

También el perno debe apoyarse fuera de la zona afectada por la rueda cargada antes de que ésta empiece a rodar, para que no haya una deflexión inicial. Cuando pasa la rueda y queda a suficiente distancia del perno para que tampoco le afecte, se hace una última lectura para registrar la deformación residual.

Se emplea para el ensayo un camión con la carga necesaria para conseguir el peso máximo por rueda que corresponde al tráfico del tramo a estudiar. El camión se moverá a una velocidad de 3,2 Km./hora, que es la llamada *velocidad de arrastre*, y el eje trasero será de ruedas gemelas para disponer la regla entre ellas.

Como consecuencia de estas observaciones, el ensayo se realiza del siguiente modo:

Se coloca la regla entre las ruedas gemelas, paralela a la dirección de la marcha y de modo que el perno de su extremo quede apoyado sobre el pavimento y a una distancia de 1,50 m. del apoyo de las ruedas.

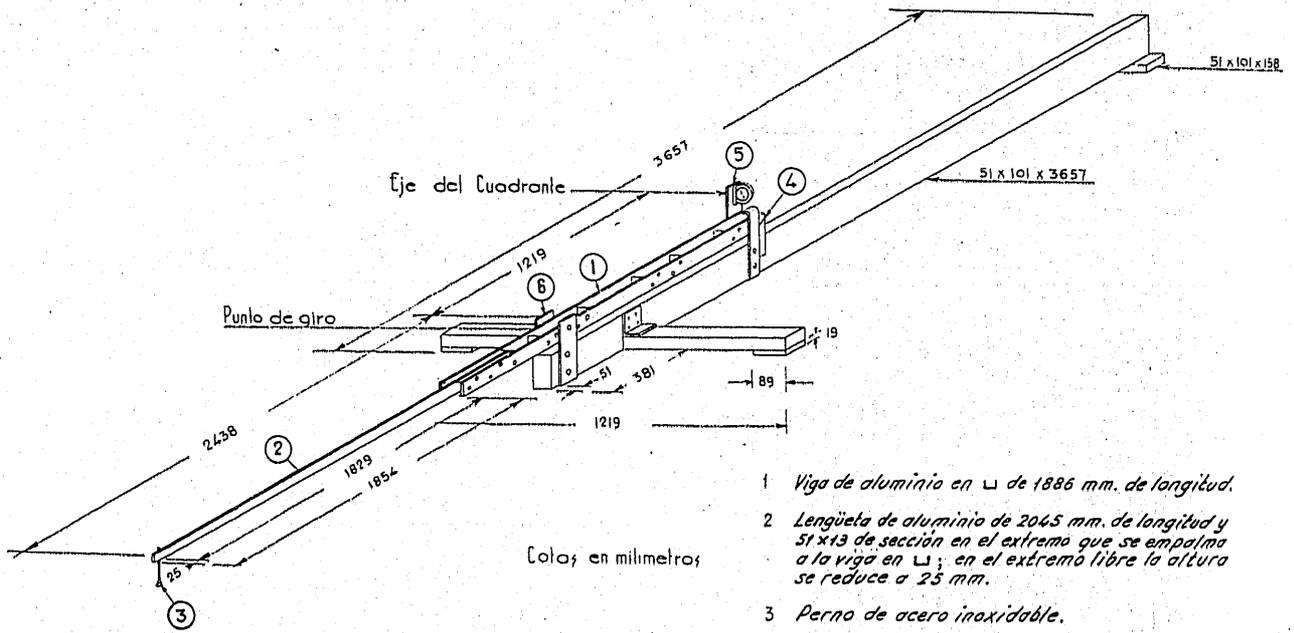


Fig. 3.<sup>a</sup> — Perspectiva de conjunto de la regla de Benkelman.

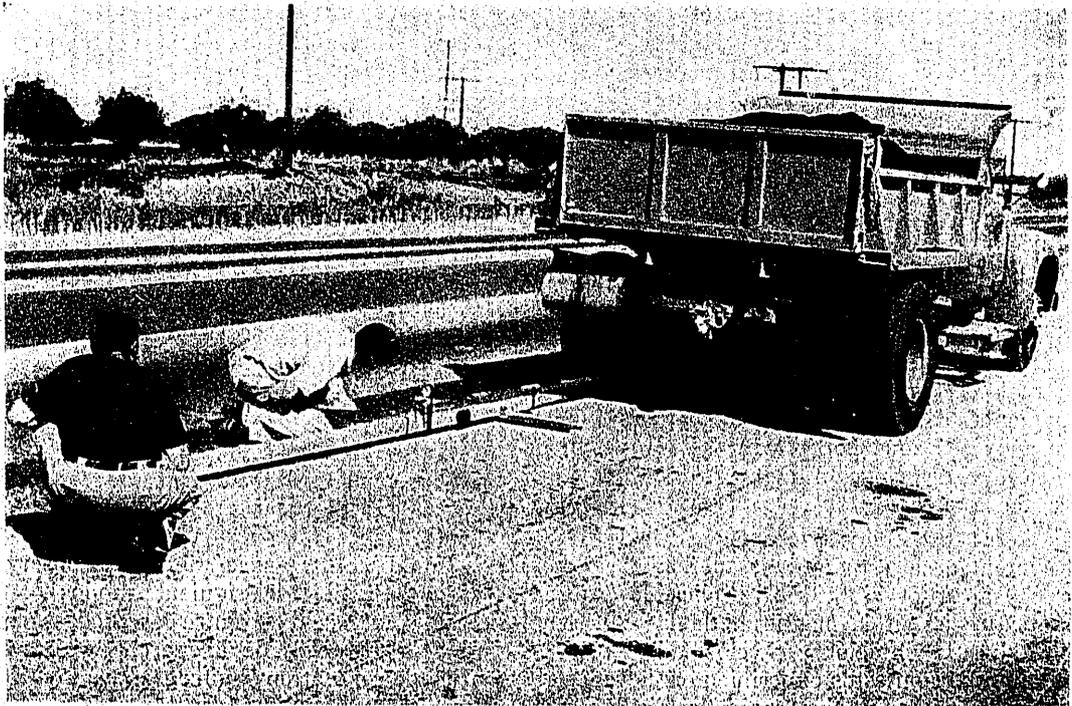


Fig. 4.<sup>a</sup> — Disposición de la regla de Benkelman al iniciarse el ensayo.

Colocada la regla en esta posición, se anota la lectura del cuadrante.

Se hace avanzar el camión hacia adelante a la velocidad citada, y se anota la máxima lectura del cuadrante, que corresponderá al paso de las ruedas por el perno.

Se registra asimismo la lectura del cuadrante cuando el camión se ha detenido, con las ruedas apoyadas a suficiente distancia para que no produzcan deformación en el punto donde apoya el perno, lo que se ve porque queda inmóvil la aguja del cuadrante.

Este ensayo permite medir la deflexión máxima instantánea y la flexión residual.

En la figura 3.<sup>a</sup> se dibuja la regla, indicando las principales piezas que la componen y acotando sus dimensiones fundamentales. La longitud se ha fijado teniendo en cuenta que sea superior a la de la zona de pavimento deformado. En la fotografía de la figura 4.<sup>a</sup> puede verse la colocación de la regla al iniciarse el ensayo.

Es interesante la separación entre las ruedas gemelas. Esta separación está fijada por dos límites: *a*, un límite mínimo para que no tropiecen con la regla al marchar; *b*, un límite máximo para evitar que, con una separación excesiva, no se aprecie la deformación en el centro, que es donde apoya el perno, ya que pudiera haber un movimiento hacia arriba como resultado de las compresiones que producen ambas ruedas. El ancho del brazo es de 2,5 centímetros y la separación óptima entre ruedas se fija en 10 ó 12 cm. Durante el ensayo se debe impedir el acercamiento de otros vehículos, para evitar que se produzcan en el pavimento deformaciones extrañas que falseen el resultado.

La organización del ensayo es tan sencilla como el aparato. Se fijan previamente por el ingeniero los puntos del tramo en que interesa medir la deflexión. Para esto, bastará con un equipo compuesto por un capataz, que lea y anote; dos peones, que manejen la regla; otros dos peones con bandera, para evitar que se acerque el tráfico, y un conductor de camión.

Se puede trabajar con dos reglas simultáneamente para medir las deflexiones en la rodada interna y externa. El personal puede adiestrarse en un día, y lo más interesante es crear en ellos conciencia de la responsabilidad y la precisión de su trabajo (\*).

### Deflexiones admisibles.

Después de llevar a cabo los ensayos sobre un pavimento con la regla de Benkelman, es preciso interpretar los valores de las flexiones obtenidas.

(\*) En el gran ensayo de la A.A.S.H.O., en el Estado de Illinois (2), que se está desarrollando actualmente, se emplean reglas de Benkelman automáticas. Montadas bajo un remolque, se aplican a intervalos regulares sobre el pavimento midiendo las deflexiones, que son registradas automáticamente.

Como consecuencia de una larga serie de datos recogidos en ensayos de flexión y rotura de revestimientos asfálticos, Mr. Hveem, de la División de Carreteras de California (3), ha fijado una escala de máximas flexiones admisibles, que recogemos en la siguiente tabla:

TABLA I. — Deflexiones críticas para diversos tipos de pavimento.

Espesor del pavimento — cm.	TIPO DE PAVIMENTO	Deflexiones máximas — mm.
15	Base de suelo-cemento con revestimiento de aglomerado asfáltico .....	0,30
10	Hormigón asfáltico de alta calidad .....	0,42
7,50	Hormigón asfáltico medio...	0,50
5	Hormigón asfáltico medio...	0,62
2,50	Mezcla asfáltica <i>in situ</i> .....	0,90
1,25	Riego superficial .....	1,25

La manera de operar para el tanteo de resistencia de un firme será aplicar la máxima carga tolerada por eje (con un incremento del 20 por 100, como se ha hecho en los ensayos de la W.A.S.H.O. para tener en cuenta el efecto de los ejes tandem (\*)) y medir con la regla la deflexión producida. Como se conoce el espesor y tipo de pavimento, la deflexión registrada nos dirá si éste es apto o hay que proceder a su refuerzo.

Recientemente se han dado a conocer los resultados de un amplio programa de ensayos de flexión sobre varios tipos de firmes flexibles del Estado de Maryland (4), llevado a cabo con el fin de complementar los conocimientos existentes sobre la relación ya comentada entre las deflexiones de un pavimento y su resistencia.

Se aplicó, naturalmente, la regla de Benkelman, y los ensayos se orientaron para obtener las diferencias que corresponden: a la humedad de la subrasante, variable a lo largo del año; a la temperatura ambiente y al efecto de las ruedas exterior e interior.

Los valores que se obtuvieron para las máximas flexiones admisibles son superiores, aproximadamente en un 50 por 100, a las que figuran en la Tabla I. Se ha buscado para esto la justificación de que los pavimentos ensayados en Maryland son más modernos que los de California (de uno a diez años en servicio), y por tanto de mayor flexibilidad, debido

(\*) En nuestro Código de Circulación ya se prevé este efecto, y las 12 toneladas de máxima carga por eje se reducen a 10 en los vehículos de más de dos ejes.

a que el betún no ha llegado a la dureza que da el envejecimiento.

Se midieron las deflexiones en primavera y otoño (meses de abril y noviembre) en los mismos puntos, resultando superiores en todos los casos los valores obtenidos en primavera, tanto para las deflexiones

Deflexión  
en mm.

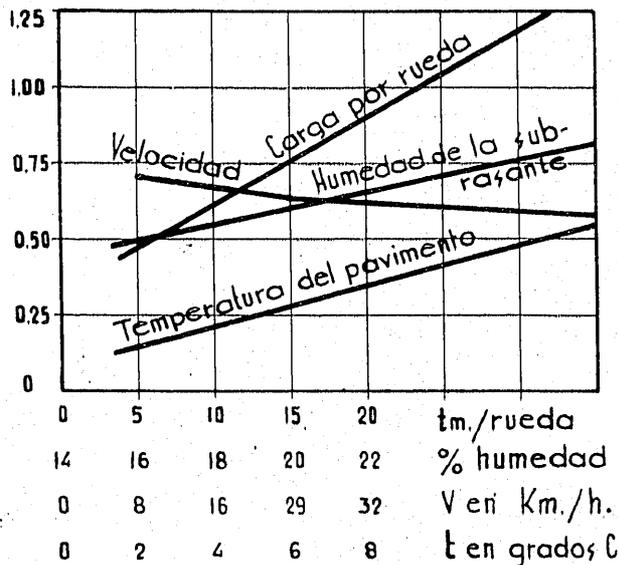


Fig. 5.ª — Diagramas de influencia en la deflexión: de la carga, velocidad, humedad y temperatura.

instantáneas como para las residuales que también se registraron.

Aunque se registró la temperatura tres veces durante todos los días de ensayo, con ayuda de un termómetro introducido en un orificio practicado en el pavimento y lleno de aceite, no se consiguieron resultados satisfactorios para fijar una relación temperatura-deflexión.

Sin embargo, quedó bien puesta de manifiesto la diferencia del efecto de una rueda a otra. Las deflexiones producidas por la rueda exterior (la más próxima al paseo) son del 25 al 40 por 100 superiores a las que produce la interior. Se debe esto a una falta de soporte lateral, y por ello, una de las conclusiones a que se llegó en el ensayo de la W.A.S.H.O. fué la de pavimentar el paseo (5), con lo que se evita el agrietado en la zona de borde, que es la más expuesta a ello.

En cuanto a las deflexiones residuales, en la experiencia de Maryland se demostró que su magnitud varía con la de las instantáneas y suponen de un 15 a un 25 por 100 de éstas, aunque se cree que la mayor parte de esta deformación remanente se recupera por una acción elástica lenta y el efecto del tráfico.

Los resultados obtenidos ratifican los del ensayo W.A.S.H.O., aunque en éste también se apreciaron los efectos de la temperatura del revestimiento, magnitud y velocidad de las cargas (6). La influencia de todas estas variables sobre las flexiones, se aprecian en el gráfico de la figura 5.ª. En él puede verse que la deflexión es máxima para una carga estática y decrece con la velocidad muy ligeramente a partir de 25 kilómetros por hora. Las deflexiones pueden considerarse sensiblemente proporcionales a las cargas y crecen también con la temperatura del pavimento y con la humedad de la subrasante.

### Estimación del refuerzo.

Conocidas las deflexiones que produce la carga máxima en el tramo de estudio, para lo cual deben determinarse en muchos puntos al efecto de evitar que anomalías locales den lugar a valores medios erráticos, se procederá a determinar el espesor y tipo de refuerzo necesario para asegurar la vida del pavimento.

Naturalmente, las deflexiones deberán medirse en primavera, que es como vimos la época del año más desfavorable, y por tanto, si se hiciera en otro tiempo se llegaría a valores inferiores a los máximos que pudieran no acusar el peligro de rotura del afirmado.

Realizado el ensayo, la magnitud de las flexiones nos dirá si el firme es apto para soportar las cargas a que está sometido, considerando la suficiente previsión para el plazo de vida que se le asigne, lo que tiene especial interés por el fenómeno de la repetición de cargas. Además, el ensayo pondrá, posiblemente, de manifiesto cierta homogeneidad entre trozos incluidos en el tramo, que harán posible una fragmentación de éste; dentro de estos trozos, se procederá a determinar las características resistentes de la subrasante, y, como consecuencia, el espesor de firme que le corresponde.

La determinación de las deflexiones es de gran utilidad como tanteo previo: en primer lugar, denuncia la necesidad de refuerzo, y después de conocida ésta, reduce considerablemente el número de ensayos a realizar, apoyándose en una correlación de resistencia-deflexión.

En la primera parte de este artículo hablamos de la aplicación del método CBR *in situ*. Para ello será necesario, en primer lugar, conocer la subrasante o base de asiento del afirmado, lo cual no es fácil en los firmes antiguos, donde, con el paso de los años, ha habido una mutua penetración; por ello será preciso proceder con cuidado tratando de fijar una clara delimitación de ambas capas.

Conocido el índice CBR de la subrasante, el espesor de firme necesario viene dado por la fórmula

$$e = \frac{100 + 150 \sqrt{120 P}}{5 + \text{CBR}} \quad (1)$$

en la que la carga máxima por rueda,  $P$  (expresada en toneladas), se ha afectado de un coeficiente amplificador, correspondiente al 20 por 100 de aumento para eje tandem.

Se obtiene así una magnitud en centímetros, que es el espesor llamado *equivalente de grava*, o sea, el espesor necesario para una capa de cohesión nula, esto es, sin ninguna resistencia a la tracción.

La consideración de la cohesión es muy interesante en el estudio de refuerzo de firmes, pues centra el problema entre unos límites económicos a los que nunca debe estar ajeno el ingeniero.

El recrecimiento de un firme con bases de macadam o zahorra exige siempre un gran espesor y, por tanto, gran volumen de materiales, con lo que, en muchos casos y dependiendo de la disponibilidad de áridos, podrá llegarse a soluciones más baratas por la adición de un ligante bituminoso o hidráulico.

El ligante bituminoso sólo tiene interés para un mayor o menor espesor de la capa de rodadura, pues tratar con él la capa de base sería muy caro, ya que con ello tampoco se consigue una cohesión grande y, por tanto, se reduce poco el espesor. Sin embargo, las bases de suelo-cemento, con una proporción del orden del 7 por 100 en peso, están especialmente indicadas para el refuerzo de firmes.

La cohesión de las bases y pavimentos de diversos tipos se considera en el método del estabilómetro de Hveem representada por un coeficiente  $C$ , que se determina con ayuda del cohesímetro. Es éste un aparato sencillo, que somete la probeta a rotura, aplicando una carga que aumenta gradualmente. Puede ser fabricado por cualquier taller de aparatos de precisión, pero si no se dispone de él, puede estimarse este coeficiente de acuerdo con los valores medios que figuran en la adjunta tabla:

TABLA II. — Valores de la cohesión para diferentes tipos de bases y pavimentos.

CAPAS DE AFIRMADO	Cohesión C
Bases de suelo-cemento, con resistencia de 45 Kg./cm. <sup>2</sup> a los siete días .....	3 000
Bases de suelo-cemento, con resistencia de 20 Kg./cm. <sup>2</sup> a los siete días .....	1 500
Hormigón asfáltico .....	600
Aglomerados cerrados, con betún de penetración .....	400
Aglomerados abiertos, con betún fluido.	200
Bases de macadam o zahorra, con o sin riego superficial .....	100

Los espesores necesarios para dos capas de distintos materiales están en razón inversa de las raíces quintas de su coeficiente de cohesión, lo que es preciso tener en cuenta para obtener el recrecimiento real a partir del equivalente de grava.

El coeficiente de cohesión interviene en la fórmula del método de Hveem para la determinación de espesor de firmes flexibles; es ésta mucho más completa que la [I], que además se limita a considerar la máxima carga por rueda, sin tener en cuenta su posible repetición en el período de vida que se asigna al pavimento.

La expresión de la fórmula de Hveem es:

$$e = \frac{K I (90 - R)}{\sqrt[5]{C}}, \quad [II]$$

con la siguiente notación:

- $e$ , espesor del firme, en centímetros.
- $K$ , parámetro que varía con la presión de inflado de las ruedas ( $K = 0,241$  para  $p = 5$  Kg./cm.<sup>2</sup>).
- $I$ , índice de tráfico.
- $R$ , valor de resistencia de la subrasante.
- $C$ , cohesión del material.

El índice de tráfico es un valor representativo del que deberá soportar el firme en el plazo de servicio previsto.

Se determina a partir de los datos de tráfico medio diario, teniendo en cuenta, naturalmente, su probable incremento durante el período considerado. Estimado el número de ejes (\*) que circularán en un sentido, y clasificados éstos por su peso en grupos, se les afectará de un coeficiente amplificador dependiente de la carga por rueda, de acuerdo con la siguiente tabla:

TABLA III. — Coeficientes de equivalencia para ruedas pesadas.

CARGAS POR RUEDA	Coefficientes
De 2 a 2,5 toneladas .....	1
De 2,5 a 3 » .....	2
De 3 a 3,5 » .....	4
De 3,5 a 4 » .....	8
De 4 a 4,5 » .....	16
Más de 4,5 » .....	32

(\*) Se consideran sólo los vehículos pesados, o sea ómnibus y camiones de carga, excluyendo los coches de turismo.

Se tendrá así un número virtual de ejes circulantes en el período de servicio del firme, suma de los productos del número de ejes de cada peso, por los respectivos coeficientes de equivalencia. El logaritmo decimal de esta suma es el *índice de tráfico*.

La característica del suelo en la fórmula [II] es el factor  $R$  o *valor de resistencia*, que se determina con ayuda del estabilómetro. Los aparatos para preparación y ensayo de las muestras son muy caros y, por tanto, es difícil disponer de ellos. En España aún no se cuenta con este equipo, y en Francia sólo tienen

la Argentina para un tramo de tráfico muy intenso, que, al poco tiempo de ser abierto al tránsito, su pavimento empezó a sufrir el agrietamiento clásico, seguido de rotura y total degradación en muchos trozos. En el informe del Sr. García Balado (7), eminente ingeniero, Director del Instituto del Cemento Portland argentino, figura con detalle el análisis de las soluciones propuestas.

Se trata de un caso típico de insuficiencia de proyecto, especialmente por falta de previsión para la magnitud y frecuencia de las cargas.

## CORRELACIÓN ENTRE INDICES RESISTENTES

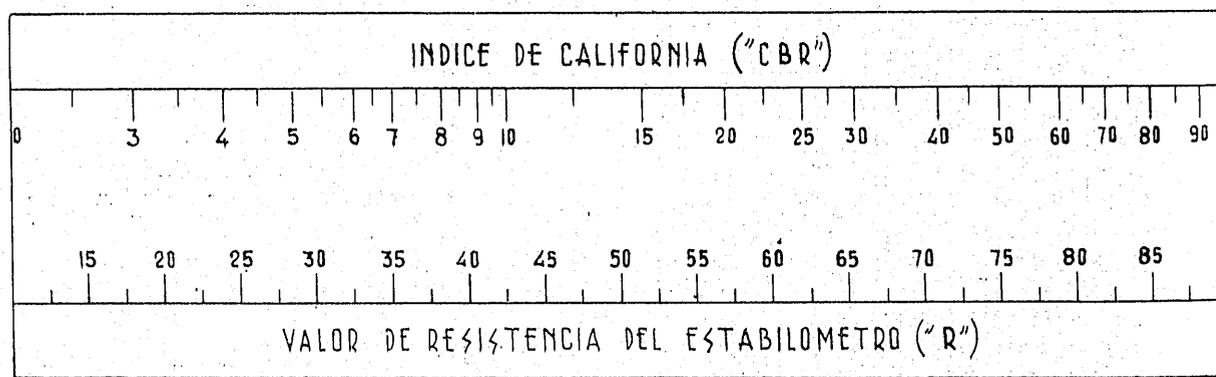


Fig. 6.ª — Escala aproximada para la determinación del valor  $R$  a partir del índice de California.

uno, en el Laboratorio Central de Ponts et Chaussées de París.

En la imposibilidad de obtener el valor  $R$  directamente, hay que deducirle por equivalencia con los valores característicos de otros métodos.

Como en el caso que nos ocupa de refuerzo de firmes en servicio el más aplicado será el CBR, obtenido *in situ*, deberá emplearse la escala de correlación que acompañamos en la figura 6.ª, con la que se obtendrán equivalencias aproximadas.

Conocidas todas las variables, se determina el espesor total del firme con la fórmula [II], o utilizando el ábaco del estabilómetro que figura en todos los manuales americanos; bastará llegar en este ábaco a la escala central, que da el espesor del equivalente de grava. Una vez determinado éste, se deducirá de él el del firme existente, considerando sobre su espesor geométrico el aumento que corresponde a cada una de las capas por la cohesión que se le asigne. La diferencia resultante habrá que completarla con otras nuevas capas de base y pavimento, cuyos espesores también dependerán de las cohesiones respectivas.

Es interesante, como caso concreto de refuerzo de firme, el estudio llevado a cabo recientemente en

Se construyó el firme con un espesor total de 36 centímetros, integrado por las siguientes capas:

- 5 cm. de mortero asfáltico.
- 19 cm. de base granular de toba caliza.
- 12 cm. de sub-base de toba caliza-suelo.

Este firme se apoyaba sobre una subrasante mejorada en sus 25 cm. superiores.

La aplicación de la regla de Benkelman para ruedas de 5 toneladas (carga repartida entre las dos ruedas gemelas del ensayo) registró, en más del 75 por 100 de los puntos ensayados, deflexiones superiores a las que se fijan como admisibles en la tabla I para el tipo y espesor del revestimiento asfáltico adoptado. Pero, además, hay que tener en cuenta que en el tráfico actual de ese tramo hay un predominio de ejes pesados con 6,5 toneladas por rueda.

Para la determinación del refuerzo necesario se empleó el citado método de Hveem, calculándose el índice de tráfico con todo el interés que el caso requería. Los aforos practicados dieron un tráfico diario de 1 500 camiones pesados, de ellos, un 15 por 100 con ejes de 16 toneladas. Se previó un plazo de diez años, con un crecimiento gradual que llega al 50 por

100 al final de este plazo. Corresponde a esta hipótesis un índice *ri*, que es el que se fija en California para el tráfico pesado de las zonas muy industrializadas.

El valor *R* se obtuvo aproximadamente, deducido del CBR (3 en promedio para la subrasante), con ayuda de la escala de correlación.

Particularizando la fórmula [II] para estos datos, se llegó a un espesor de 74 cm. para el *equivalente de grava*.

Dada la constitución del firme existente y la influencia de las cohesiones que da la tabla II, se contaba con un espesor virtual de:

$$5 \sqrt[5]{\frac{400}{100}} + 31 \sqrt[5]{\frac{100}{100}} = 6,6 + 31 = 37,6 \text{ centímetros.}$$

Es preciso, por tanto, un recrecimiento de 39,4 centímetros. Considerando el intenso y pesado tráfico que circula por el tramo, se ha propuesto para capa de rodadura un aglomerado cerrado con suficiente espesor (7,5 cm.), para que pueda colaborar en la resistencia por efecto-losa.

Teniendo en cuenta la cohesión de este revestimiento asfáltico, se necesitará para la base un espesor:

$$37,6 - \sqrt[5]{\frac{400}{100}} \times 7,5 = 27,6 \text{ centímetros.}$$

Este sería el espesor estricto, que se elevó a 35 centímetros con criterio conservador, lógico después del fracaso anterior. El material más barato en la zona es la toba caliza, y contando con su empleo, se propusieron las siguientes soluciones para la base, con espesor dependiente de las cohesiones que se indican:

20 cm. de toba-cemento .....	<i>C</i> = 1 500
30 cm. de toba-arena-betún .....	<i>C</i> = 200
35 cm. de toba-arena .....	<i>C</i> = 100

La segunda solución, que en realidad es un *binder* de aglomerado abierto, resulta mucho más cara que la primera.

A efectos comparativos, damos los precios unitarios de refuerzo que corresponden a ambas soluciones y que deben tomarse con la reserva que en toda traducción de costes imponen los diferentes *standard* de vida y las circunstancias especiales de cada país. Para el cambio se ha utilizado la cotización actual aproximada:

Una peseta < > 1,43 pesos argentinos.	
Base de 20 cm. de toba-cemento, con 7,5 centímetros de aglomerado asfáltico ...	127 ptas./m. <sup>2</sup>
Base de 30 cm. de toba-arena-betún, con 7,5 cm. de aglomerado asfáltico .....	193 ptas./m. <sup>2</sup>

La tercera solución, que iguala casi en coste a la primera, pues exige, respecto de ésta, un recrecimiento general de 15 cm. en paseos y taludes por la elevación de rasante a que obliga su mayor espesor, tiene la desventaja de ser mucho menos estable a la acción del agua, por lo que fué descartada. Queda, pues, como solución óptima la base de suelo-cemento con pavimento de aglomerado.

Considerando el tráfico tan pesado de este tramo de carretera, se ha propuesto también una solución de pavimento rígido: 20 cm. de hormigón con el firme actual como base y, por tanto, sin peligro de *pumping* ni inestabilidad de volumen. Su vida mucho más larga (puede estimarse en cuarenta años si se cuida la ejecución), compensa el mayor coste de primer establecimiento, que se estima en 188 pesetas por metro cuadrado, inferior a la solución de base estabilizada con betún. Este pavimento rígido tiene, además, a su favor, que exigirá menos gastos de conservación. El único inconveniente que presenta es la dificultad de suministro en las circunstancias actuales del país, de los áridos de buena calidad que necesita el hormigón del firme.

### Revestimientos hiperflexibles.

Registremos, finalmente, como una solución económica para el refuerzo de firmes, que podrá tener aplicación en muchos casos, los revestimientos asfálticos de gran flexibilidad capaces de adaptarse sin fisuración a deformaciones muy superiores a las que fija la tabla I. Así podrá evitarse el recrecimiento.

La capacidad de flexión de un revestimiento asfáltico depende de los áridos y del ligante, aunque en mucho menor escala de los primeros, en los que la influencia de su granulometría y su forma es evidente pero muy limitada.

Sin embargo, en el ligante, algunas de sus características (penetración, ductibilidad) son decisivas, y por su modificación se han preparado betunes especiales (\*), con los que se han obtenido en Francia revestimientos hiperflexibles de aglomerados densos en caliente.

Estos betunes especiales son poco susceptibles a las variaciones de temperatura, y aun por debajo de -10° C., su penetración es suficientemente alta para dar a los revestimientos bastante plasticidad y, por tanto, resistencia a la flexión bajo las cargas. Con los betunes normales, estas temperaturas bajas eran las más peligrosas para el agrietado. En temperaturas altas, las penetraciones son inferiores, y por encima de los 40° C. los revestimientos de aglomerado fabricado con ellos son más estables que los de betún 80/100.

En Francia se han aplicado con éxito en tramos experimentales (8) sobre los que se habían registrado

(\*) Betunes E.S.S.O. B.200 y E.S.S.O. D.300.

deflexiones superiores a 2 mm. Para una observación comparativa de resultados, un semiancho de la calzada se revistió con aglomerado de betún normal y el otro de betún especial. Al cabo del primer año, el primero estaba completamente agrietado, mientras que en el segundo no aparecieron síntomas de fisuración. El tramo está emplazado en una comarca muy

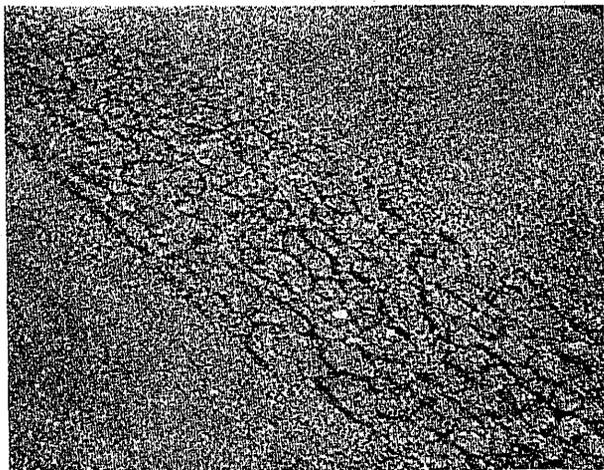


Fig. 7.ª — En la fotografía se aprecia la diferencia de comportamiento de dos tipos de revestimiento asfáltico en el tramo experimental de una carretera francesa. En el semiancho agrietado se empleó betún normal y, en el otro, betún especial B.200.

fría. En la figura 7.ª puede apreciarse el diferente comportamiento de ambos revestimientos.

Por ahora, el resultado es positivo y es de esperar que los años vayan confirmando el éxito de estos nuevos ligantes y de su aplicación en revestimientos de refuerzo de firmes.

### Conclusión.

El refuerzo de firmes es un problema fundamental en muchos tramos de nuestras carreteras, que conviene atender antes de que sea tarde y se produzca su ruina total.

En el presente trabajo hemos pretendido fijar las bases para un estudio racional del refuerzo de firmes flexibles, de acuerdo con la moderna técnica de carreteras que ya ha empezado a aplicarse en nuestro país.

En este momento en que comienzan a funcionar los laboratorios de las Jefaturas de Obras Públicas, estimamos que con su valiosa ayuda debe dedicarse una atención preferente al refuerzo de los firmes en servicio, en la seguridad de que responde a una de las más rentables inversiones que hoy puede hacerse en la red nacional de carreteras.

### Referencias.

1. "Road deflection under load measured by portable device". *Engineering News-Record*, octubre 1953, página 29.
2. W. B. McKendrick, Jr.: "The AASHO Road-Test. A Progress Report". Abstracts, abril 1959. *Highway Research Board*, págs. 22 a 29.
3. F. N. Hveem "Pavement deflections and fatigue failures". Boletín 114 del *Highway Research Board*, 1955, págs. 43 a 87.
4. S. Williams y A. Lee "Load-deflection study of selected hightype flexible pavement in Maryland". Boletín 177 del *Highway Research Board*, 1958, páginas 1 a 25.
5. A. C. Benkelman: "Analysis of flexible pavement deflection and behavior data". Boletín 210 del *Highway Research Board*, 1959, págs. 39 a 48.
6. F. Burgraff: "Review of WASHO and AASHO road tests". *Papers of Road Seminar*. International Road Federation. I.V Convention, Chicago, 1957, páginas 175 a 185.
7. J. F. García Balado: "Informe sobre el comportamiento y fraccionamiento de la Ruta 9, en el tramo Campana-San Nicolás". *Caminos*, revista técnica, número 190. Buenos Aires, diciembre, 1958, páginas 15 a 28.
8. E. Prevost: "Amélioration de la résistance aux déflexions des revêtements souples. Recherche de nouveaux bitumes routiers". *Revue Général des Routes et des Aerodromes*, núm. 322, noviembre 1958, págs. 89 a 92.