

## **dimensionado del refuerzo de pavimentos flexibles a partir de las deflexiones determinadas con la viga de Benkelman**

**OLEGARIO LLAMAZARES GOMEZ,**  
*Dr. Ingeniero de Caminos*

### **sinopsis**

La adaptación de los pavimentos en servicio al tráfico actual y futuro, que en frecuencia y cargas supera las previsiones de proyecto, exige métodos rápidos de dimensionado. El expuesto en este trabajo, basado principalmente, en la experiencia del Departamento de Carreteras de California, adelantado de la técnica vial, ofrece soluciones rápidas y de ahí su utilidad.

514-53

Expuestos con detalle y claridad los fundamentos y aplicación del método, que se ilustra con ejemplos de experiencia del autor, no dudamos será muy interesante como guía para el cálculo de refuerzo de firmes flexibles.

## **1**

### **NECESIDAD Y POSIBILIDAD DEL REFUERZO DE FIRMES DE CARRETERA**

Uno de los problemas fundamentales en la conservación de la red de carreteras es mantener los firmes con la resistencia suficiente para que puedan soportar el tráfico creciente.

Muchos firmes no corresponden por espesor y calidad de sus capas a la intensidad media diaria y a la composición del tráfico que por ellos circula. La técnica del cálculo de pavimentos es reciente y, concretamente, en nuestro país la mayor parte de las carreteras ofrecen un firme, dimensionado de acuerdo con normas exclusivamente geométricas, ampliadas en el mejor de los casos con un arbitrario margen de seguridad a cargo del Ingeniero encargado, pero sin tener en cuenta de modo concreto la resistencia y la plasticidad de la explanada.

Quizá durante años no hubo que poner reparos a aquel firme; pero con el tiempo, el incremento de frecuencias y cargas detectó la presencia de un firme ya insuficiente, con la aparición del agrietado en «piel de cocodrilo», «blandones», o roderas.

En definitiva, con el firme, y salvo la función de protección superficial y comodidad al tráfico rodado que ofrece el revestimiento asfáltico, de lo que se trata es de interponer una capa de espesor suficiente para conseguir el reparto de las cargas más pesadas, de modo que las que llegan a la explanada puedan ser soportadas por ésta. Se trata del problema de reparto de tensiones en un macizo elástico semi-indefinido, resuelto por Boussinesq, cuyos estudios han sido la base teórica de los ábacos de dimensionado de firmes flexibles a partir del índice resistente CBR.

El problema de refuerzo de un firme en servicio, y salvo en aquellos casos que por la naturaleza muy arcillosa del terreno subyacente y la inevitable contaminación de las capas que sobre él se apoyan sea preciso el levantado y reconstrucción, puede resolverse con una o varias capas de diferente estructura, que completen, geométrica o virtualmente, el espesor

que corresponde a la capacidad portante de la explanada y tráfico circulante, sin olvidar la comprobación al efecto-helada si por la altitud del emplazamiento pudiera temerse.

La estimación del espesor necesario puede hacerse con ayuda de cualquiera de los métodos de cálculo de firmes flexibles, basados generalmente sobre el «índice de grupo» o el CBR, tomando las suficientes muestras de la explanada para determinar con garantía su capacidad portante, que no será uniforme a lo largo del tramo que se pretende reforzar; pero para ello habría que abrir calicatas a distancias de 100 m como máximo y, además, siempre que se aprecie cambio en el terreno o en el aspecto más o menos deteriorado del pavimento.

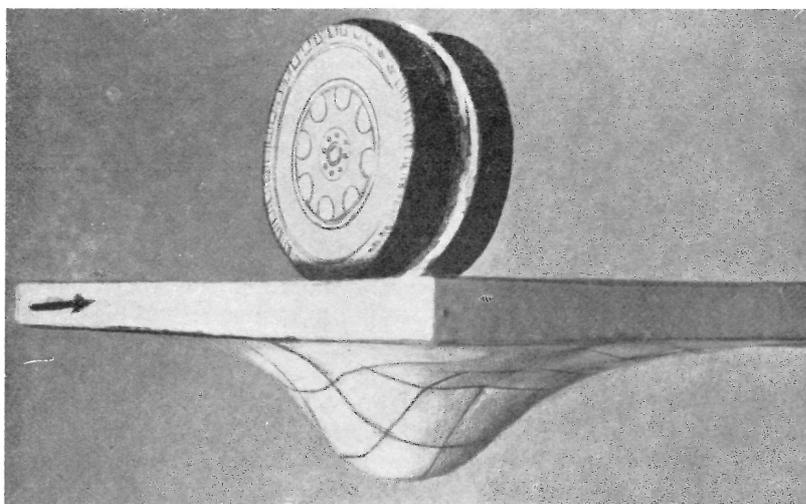
Para cada punto señalado será preciso hacer una larga serie de determinaciones en el suelo de la explanada—límites de Atterberg, granulometría, índice de grupo, CBR de laboratorio o «in situ» e incluso densidad «in situ»—para deducir, de su comparación con la del Proctor modificado, el grado de compactación que en muchos casos será insuficiente, lo que invalida las características portantes.

Conocidos los resultados de estos ensayos, debe hacerse una agrupación de las muestras afines que permita fragmentar el tramo en diversos subtramos de parecidas características en lo que se refiere a capacidad portante del terreno de asiento, y establecer diversos tipos de refuerzo según las necesidades de cada caso. Otro dato fundamental es el espesor del firme existente, que quizá no sea uniforme, lo que puede verse en la calicata, aunque a veces no de manera clara por la contaminación de la capa inferior.

El proceso descrito es lento y caro, precisa muchos y laboriosos ensayos de laboratorio, y exige, además, la apertura de calicatas en el firme.

Por todo ello se usan cada vez más los métodos de dimensionado del refuerzo a partir de las deflexiones del pavimento, medidas con la conocida viga de Benkelman (1) o con el llamado deflectómetro rodante empleado por la División de Carreteras de California (2), que permite operar con mayor rapidez.

La disposición de la viga y el proceso operativo se describen en la publicación de referencia. El deflectómetro es, en esencia, un camión «trailer» con una carga en el eje posterior igual a la normalizada del ensayo y que lleva un dispositivo para medir la deflexión del pavimento bajo cada par de ruedas gemelas de este eje. La medida se hace aproximadamente cada 4 m, mientras el vehículo avanza a una velocidad de 1 km/hora.



Modelo de deformación del pavimento bajo una carga pesada. La deflexión es del orden de 50 (0,5 milímetros). La escala vertical está muy exagerada en el modelo.

En los últimos años se han perfeccionado estos aparatos de medida y sus métodos de aplicación. Además de las deflexiones elásticas bajo la carga, se miden las deflexiones residuales para apreciar la recuperación del pavimento y las deflexiones en otros puntos de la zona deformada para determinar el radio de curvatura de la deformación, que es un índice del reparto de las cargas en las capas integrantes del firme.

En realidad, este radio de curvatura es más representativo del estado de un firme que la propia deflexión.

También se ha propuesto como índice representativo de la estructura resistente de un pavimento flexible, el llamado «índice de curvatura»:

$$I_c = \frac{\text{deflexión máxima}}{\text{longitud de la zona deformada}},$$

pero la determinación de este valor entraña la dificultad de delimitar con exactitud la zona deformada.

En consecuencia, suele tomarse como base para el cálculo de refuerzos de firmes la deflexión máxima por la sencillez de su determinación, con las salvedades que en ésta influyen, tales como: la carga por rueda, humedad de la explanada, velocidad y temperatura ambiente. Estos factores deben considerarse en los ensayos de medida a efectos de normalización.

En la publicación de referencia (1) definimos con todo detalle la viga Benkelman y su proceso operativo, y completamos ahora el anterior trabajo con un método específico (3) de cálculo de refuerzo basado en las deflexiones características deducidas del ensayo.

## EL METODO DE CALIFORNIA

La División de Carreteras de California ha perfeccionado un método de dimensionado a partir de las deflexiones y del «índice de tráfico», valor representativo del efecto destructor de éste en la calzada. El método, fruto de una gran experiencia en la interpretación de las deflexiones, magnitudes máximas admisibles para diversos tipos de pavimento y correlación de su cuantía con el espesor de las capas de refuerzo, estimamos que es el más práctico y sencillo de los que se brindan hoy al proyectista, circunstancia por la cual lo hemos empleado en diversos casos.

Para la prospección del tramo de carretera a reforzar con la viga Benkelman se recomienda determinar las deflexiones elásticas por grupos de cinco puntos distanciados 15 m para cubrir longitudes de 60 m. La separación normal entre grupos es de 200 m, que deben reducirse si por inspección visual se aprecia falta de uniformidad en el estado del pavimento.

### 2.1. Deflexiones críticas

Con objeto de fijar un criterio de proyecto se considera que un firme necesita refuerzo cuando las deflexiones que en él se producen al paso de un eje-tipo son superiores a ciertos valores que, por la experiencia, se han adoptado para diversos tipos de pavimento.

Las deflexiones se miden en centésimas de milímetro y con carácter general, según los estudios experimentales sobre 53 tramos de carretera del Estado de Virginia (4), llegándose a la conclusión de que los pavimentos en que se registran deflexiones superiores a 90 y que están

sometidas a un tráfico medio o pesado presentan pronto el típico agrietado en «piel de codrilo» o deformaciones en las huellas de rodadura.

Con el fin de homologar los resultados con las experiencias americanas se debe emplear para la determinación de las deflexiones un eje de 15.000 libras, aproximadamente 7 toneladas.

Las deflexiones críticas se definen con mayor concreción en la adjunta tabla del Departamento de Carreteras de California (5).

TIPO DE PAVIMENTO	Espesor (cm)	Deflexión máxima (0,01 mm)
Mezcla asfáltica sobre base de suelo-cemento ... ..	15	30
Mezcla asfáltica de alta calidad ... ..	10	42
Mezcla asfáltica sobre base granular ... ..	7,5	50
Mezcla asfáltica ... ..	5	65
Tratamiento superficial ... ..	1,6	125

El paso de la viga Benkelman por un tramo de carretera y la comparación de las deflexiones registradas con los valores críticos que se consignan en la tabla nos dirán si la calzada precisa refuerzo.

Puesta de manifiesto la necesidad del refuerzo hay que pasar a la estimación cuantitativa de éste, definiendo el espesor, geométrico o virtual, de la capa o capas precisas para conseguir un reparto de las cargas del tráfico que pueda ser soportado por las capas inferiores del firme y, en especial, por el terreno subyacente.

Para el dimensionado del refuerzo en el Método de California se parte de dos datos: la «deflexión característica» y el «índice de tráfico».

## 2.2. Deflexión característica

La deflexión característica es la que se toma como representativa de un tramo de carretera, o sea, un valor medio que define su estado estructural por la deformación bajo las cargas. Debe tenderse a que no haya dispersión entre los valores a promediar. Una vez conocidos los resultados del ensayo deben agruparse los valores más aproximados y, de acuerdo con éstos fragmentar el tramo en subtramos que puedan definirse por la misma deflexión característica.

Anotemos que el ensayo está normalizado, y que la deflexión debe medirse bajo la carga por eje, antes citada, con presión de inflado en las ruedas de 5,6 kg/cm y una velocidad en el camión de 3,2 km/hora.

Hay varios criterios para determinar la deflexión característica de cada grupo de medidas que corresponde a los distintos subtramos. Es práctica bastante usada la preconizada por los ingenieros canadienses \*, que para un grupo de deflexiones,  $d_1, d_2, d_3, \dots, d_m$ , toman la media aritmética  $m$  más el doble de la desviación típica de esas deflexiones, o sea:

$$d_c = \frac{\sum_1^m d_i}{m} + 2\sigma ,$$

siendo:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_1^m (d_i - m)^2}{m - 1}} .$$

\* Método de la Canadian Road Good Association.

### DIAGRAMA DE DEFLEXIONES

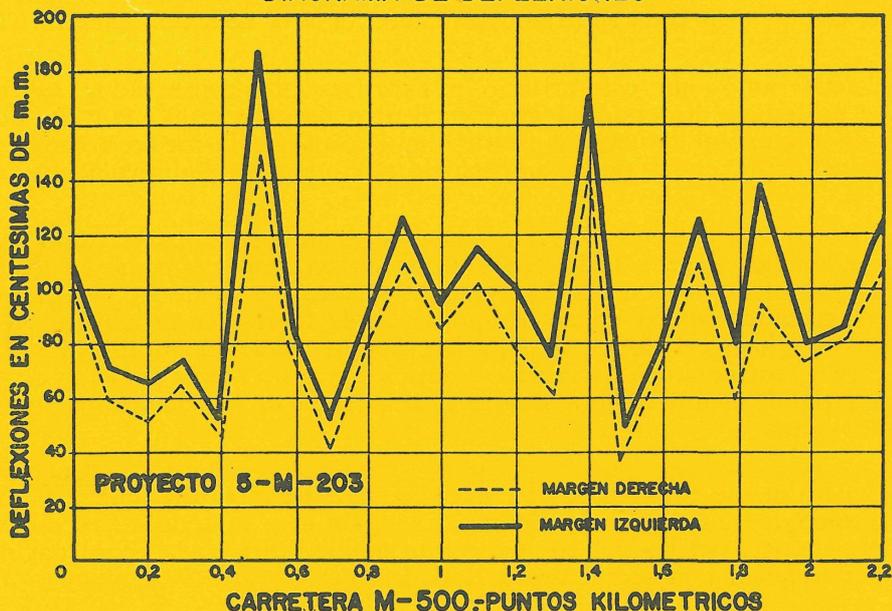
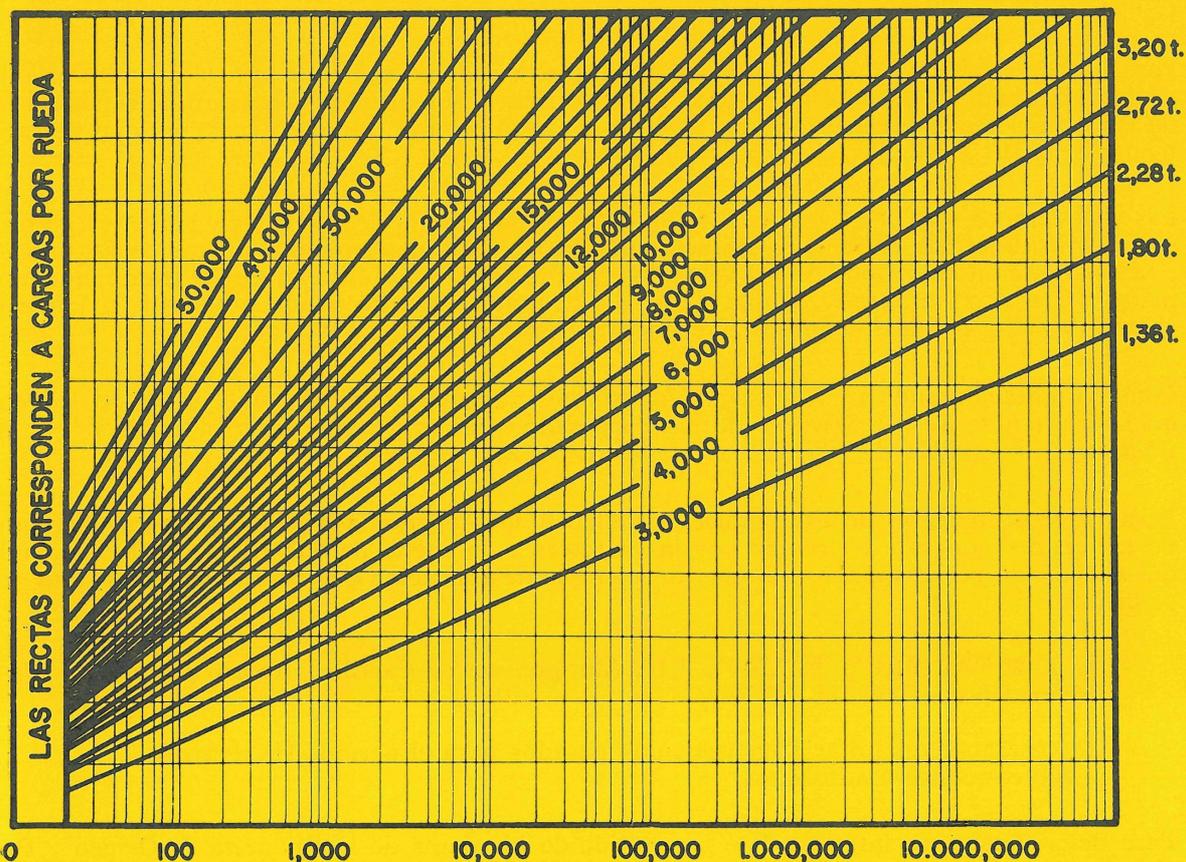


Diagrama de deflexiones elásticas empleado en el cálculo de refuerzo de firme de la carretera local M-500 (antigua Vía de Castilla).



Abaco para la reducción de las cargas circulantes a la rueda-tipo de 5.000 libras.

De este modo se tiene una certeza probabilística de que el 95 por 100 de las medidas que se efectúen en cada subtramo será inferior a la deflexión característica adoptada.

Consideramos que este criterio es excesivamente conservador, sobre todo en los casos que se presenten dispersiones grandes dentro de cada grupo. Por ello puede estimarse suficiente dimensionar el refuerzo a partir simplemente de la media aritmética, que es como se hace actualmente en el Departamento de Carreteras de California, precursor del método.

Conocida la deflexión característica para un determinado tramo es preciso considerar las condiciones en que se ha realizado el ensayo, especialmente en lo que se refiere a la humedad ambiente, ya que la deformación elástica del firme es superior en tiempo húmedo; se recomienda, por lo tanto, la aplicación de la viga en primavera. Si se hace en período seco del año, hay que afectar la deflexión de un coeficiente amplificador. En los estudios de flexión-carga para pavimentos flexibles, llevados a cabo por la División de Carreteras del Estado de Maryland, se fijó como aumento el 25 por 100 si las determinaciones se hicieran en época de sequía.

Generalmente no se hace la corrección por temperatura que, no obstante, está prevista en el método canadiense de dimensionado. En este método se recomienda reducir los valores obtenidos para las deflexiones a una temperatura dada en el pavimento, a los que corresponderían a una temperatura tipo de 33°C.

### 2.3. *Determinación del índice de tráfico*

Para caracterizar la influencia del tráfico en los métodos de cálculo de firmes, se ha pasado de la carga por rueda a la intensidad media diaria y, por último, al número de repeticiones de las cargas durante el período de servicio previsto para el tramo en cuestión, que normalmente es de 15 a 20 años.

Las repeticiones, tan decisivas para la vida de un pavimento debido a los fenómenos de fatiga, se consideran en el llamado «índice de tráfico». Para determinar este índice se precisa una clasificación en grupos de los vehículos pesados que van a circular por el tramo, que normalmente es preciso hacer a estima y con la dificultad inherente a una prognosis, máxime si quiere llegarse a una descomposición en cargas por eje.

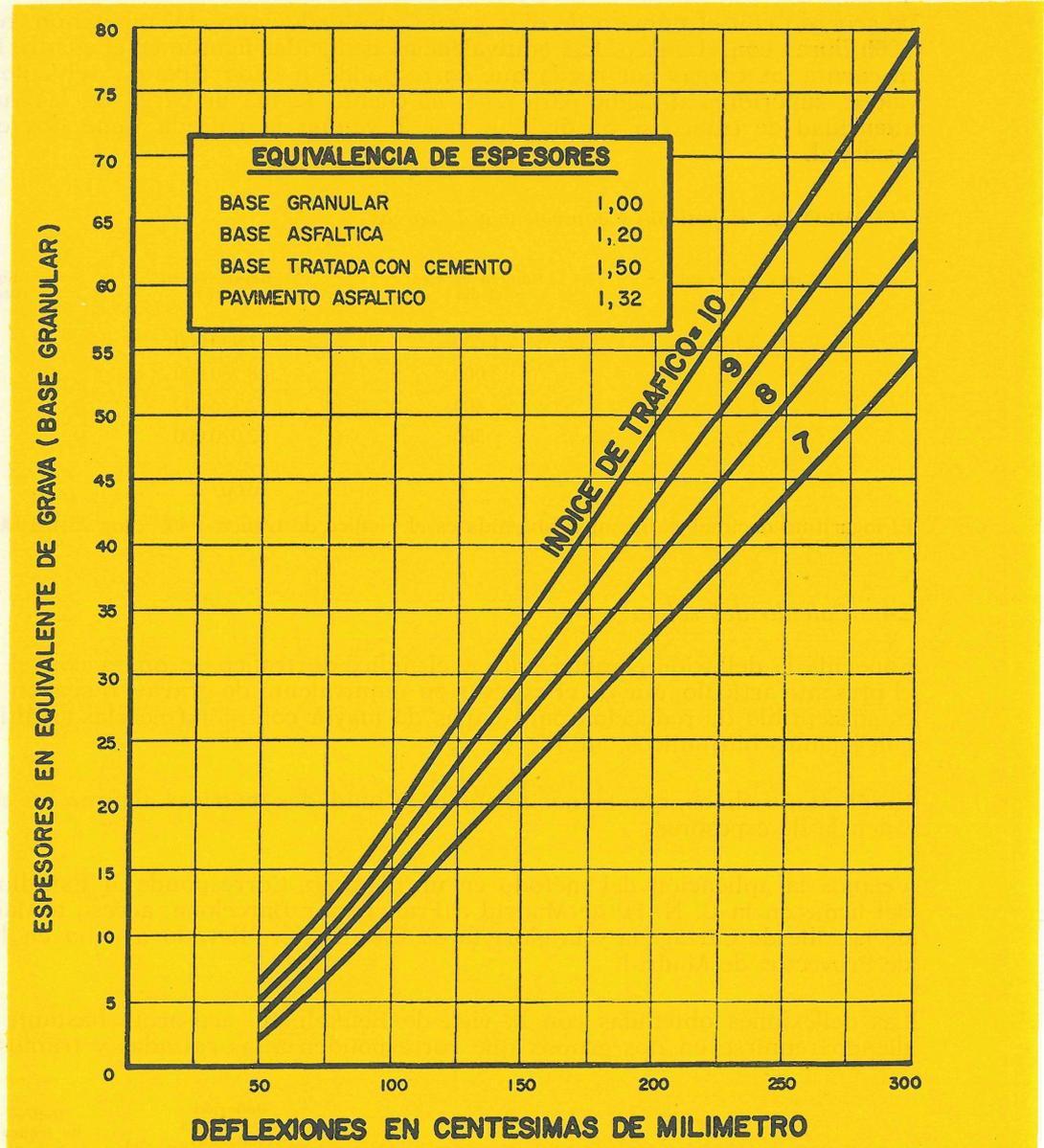
Como orientación indicaremos, según la experiencia americana, que el «índice de tráfico» que corresponde a una carretera de tráfico pesado, que es generalmente el caso en que se presenta la necesidad de refuerzo, oscila entre 6 y 8.

Para la determinación de este índice se reducen las repeticiones previstas para cada una de las cargas que van a circular por la carretera a la rueda de 5.000 libras (3) con ayuda del ábaco que se acompaña. Veamos un ejemplo de aplicación que corresponde al tramo que se define:

- C. L. M-500, entre p. k. 2,500 y 4,440 (antigua vía de Castilla). Acceso de la C. N. VI a Madrid por el Puente del Rey;
- intensidad media diaria en vehículos pesados para el período de servicio:  
1.700 camiones y autobuses.

Para determinar esta intensidad se ha partido de los datos de la Encuesta de Origen y Destino llevada a cabo por la Jefatura de Obras Públicas de Madrid, y del coeficiente de prognosis fijado en el Plan General de Carreteras que se extrapola fuera del período de vigencia de éste hasta el año horizonte adoptado (1981).

Espesores de refuerzo de firmes flexibles en función de las deflexiones registradas.



La clasificación del tráfico pesado en cargas, frecuencia, media diaria y número de ejes figura en el siguiente cuadro:

CUADRO I. Distribución del tráfico pesado

Peso total (t)	Número de ejes	Vehículos/día
7	2	500
12	3	1.000
16	4	100
20	5	100

De acuerdo con el número de ejes y vehículos deducimos la repetición reducida a ruedas 5.000 libras con el ábaco. Las equivalencias deducidas figuran en el cuadro II, donde se tienen en cuenta las cargas por rueda que corresponde a cada tipo de vehículo. Se han tomado valores superiores al medio para tener en cuenta la mayor carga de las ruedas traseras. La intensidad de tráfico se ha dividido por 2, ya que la calzada tiene dos carriles y es bidireccional.

CUADRO II. Repetición y equivalencia de cargas

Carga por rueda (E)	Número de ejes al día	Repetición en 16 años	Equivalencia en ruedas de 5.000 £
2,28	1.000	2.920.000	2.920.000
2,72	3.000	8.760.000	12.000.000
2,72	400	2.336.000	4.500.000
2,72	500	2.920.000	6.000.000
TOTAL ... ..			25.420.000

El logaritmo decimal de la suma obtenida es el «índice de tráfico»:  $IT = \log 25.420.000 = 7,39 \approx 7$ .

#### 2.4. Cálculo del refuerzo

Conocida la deflexión característica y el índice de tráfico se opera con el ábaco incluido en el presente artículo, que da el espesor en «equivalente de grava», o sea, en base granular, que es susceptible de reducción para capas de mayor cohesión (mezclas asfálticas, bases tratadas con ligantes hidráulicos, etc.)\*.

En el citado ábaco, que hemos adaptado a unidades métricas, figuran los coeficientes de equivalencia de espesores.

Veamos la aplicación del método en un ejemplo. Corresponde al Estudio Previo de Mejora del firme en la C. N. II, de Madrid a Francia por Barcelona, acceso a Madrid entre el cruce de la calle de Cartagena y la glorieta de Eisenhower, llevado a cabo en la Oficina Regional de Proyectos de Madrid.

Las deflexiones obtenidas con la viga de Benkelman acusaron bastante uniformidad, pudiendo reunirse en dos grupos que corresponden a las calzadas y tramos que se indican:

T R A M O	Deflexión característica (0,01 mm)	Índice de tráfico	Espesor del refuerzo en «equivalente de grava» (cm)
A) Entre p. k. 3,000 y 3,800 de la calzada derecha y p. k. 2,700 y 4,200 de la calzada izquierda ... ..	200	7	33
B) Resto de ambas calzadas ... ..	150	7	22,5

Teniendo en cuenta los coeficientes de equivalencia de las distintas capas se proponen las siguientes soluciones para cada caso:

$$A_1 = \text{Refuerzo con 10 cm de pavimento asfáltico y 20 cm de base asfáltica; espesor virtual: } 10 \times 1,32 + 20 \times 1,20 = 37,2 \text{ cm.}$$

$$A_2 = \text{Refuerzo con 7,5 cm de pavimento asfáltico y 20 cm de grava-cemento; espesor virtual: } 7,5 \times 1,32 + 20 \times 1,50 = 39,9 \text{ cm.}$$

\* Las equivalencias para bases y pavimentos asfálticos son diferentes a las recomendadas en las Normas españolas (6), pero hay que tener en cuenta que el dimensionado basado en las deflexiones es sustancialmente diferente del que parte de los índices resistentes de la explanada.

$B_1$  = Refuerzo con 7,5 cm de pavimento asfáltico y 15 cm de base asfáltica;  
espesor virtual:  $7,5 \times 1,32 + 15 \times 1,20 = 27,9$  cm.

$B_2$  = Refuerzo con 7,5 cm de pavimento asfáltico y 15 cm de grava-cemento;  
espesor virtual:  $7,5 \times 1,32 + 15 \times 1,50 = 32,4$  cm.

Las soluciones definidas superan al espesor necesario en «equivalente de grava». El análisis económico recomendó adoptar las soluciones  $A_2$  y  $B_2$  con base de grava-cemento, que suponen un ahorro del 30 por 100 en el primer caso y del 20 por 100 en el segundo.

La experiencia americana ya ha demostrado la eficacia para el refuerzo de las bases de suelo-cemento o grava-cemento que, por su mayor rigidez que la de capas asfálticas, pueden reducir notablemente las deflexiones del pavimento. Además, los costes unitarios de las bases estabilizadas con los ligantes hidráulicos son del orden del 50 por 100 de los de las bases asfálticas.

### 3

### CONSIDERACION FINAL

En el presente trabajo hemos tratado de exponer con suficiente detalle, para su aplicación, un método de cálculo de refuerzo de firmes flexibles que, por su rapidez y economía, estimamos es el más apropiado.

Una gran parte de nuestras carreteras, especialmente las de la Red Azul, necesitan ser reforzadas sus calzadas, por lo que el método podrá emplearse con profusión en los próximos años. Esto permitirá ir creando un criterio formado en la experiencia que perfeccionará la estimación de datos críticos, coeficientes de equivalencia y ábacos de proyecto.

El intercambio de información sobre el tema contribuirá a una mejora del método que nos acerque a la seguridad y a la economía en el dimensionado; y de ahí la importancia de la colaboración de los compañeros de la Administración y de la Contrata, a quienes cabe la importante misión de acondicionar y conservar nuestra red de carreteras.

---

### Referencias

- (1) O. LLAMAZARES: *Refuerzo de firmes flexibles*. «Revista de Obras Públicas», abril 1960.
- (2) F. N. HVEEM: *Deflectometer semiautomatic unit speeds surface deflection measurement*. «California Highways and Public Works», septiembre-octubre 1960.
- (3) ZUBE Y DRJGES: *The use of pavement deflections in asphalt pavement overlay design*. «Comunicación presentada en la Conferencia sobre cálculo de pavimentos flexibles». Ann Arbor. Michigan, 1962.
- (4) F. P. NICHOLS, Jr.: *Deflections as an indicator of flexible pavement performance*. Record núm. 13 de «Highway Research Board», 1963.
- (5) F. N. HVEEM: *Pavement deflections and fatigue failure*. Boletín 114 del «Highway Research Board».
- (6) Instrucción de Carreteras. *Firmes y pavimentos flexibles*. Norma 6.1.-IC., de la Dirección General de Carreteras.

**Dimensionnement du renforcement des revêtements souples à partir des déflexions déterminées avec la poutre de Benkelman**

Olegario Llamazares Gómez, Dr. Ingénieur des Ponts et Chaussées

L'adaptation des revêtements en service au trafic actuel et futur, qui dépasse, en fréquence et en charges, les prévisions des projets, exige des méthodes rapides de dimensionnement. Le revêtement dont traite cet article basé principalement sur l'expérience du Département des Routes de la Californie, très avancé dans la technique routière, offre des solutions rapides qui en font la grande utilité.

Cette méthode, illustrée avec des exemples d'expériences de l'auteur, dont les fondements et l'application sont exposés avec détail et clarté, sera sans aucun doute très intéressante en tant que guide de calcul de renforcement de revêtements souples.

---

**Design of reinforcement of flexible pavements; based on deflections obtained by the Benkelman beam method**

Olegario Llamazares Gómez, Dr. civil engineer

The adaption of pavements to modern traffic requirements, and to anticipated future needs, calls for the development of rapid methods of strength control, especially as the growth in the intensity and weight of modern traffic is continuously surpassing previous expectations. This article is mainly based on the experience of the Road Department of California, where progress in this technology is highly advanced, and quick methods of calculation are offered which should prove highly useful.

The fundamentals and details of the method are presented simply and clearly, and examples drawn from the experience of the author are also mentioned; hence it is hoped that this paper should be an effective aid in the calculation of reinforcements for flexible pavements.

---

**Bemessung der Aussteifung von biegsamer Pflasterung auf Grund von Durchbiegungen, die mit dem Träger von Benkelman berechnet wurden**

Olegario Llamazares Gómez, Dr. Strassenbauingenieur

Der Umbau der Strassendecke in Dienst dem gegenwärtigen und zukünftigen Verkehr, der in Häufigkeit und Belastungen die Berechnungen von Entwurf übertreffen, verlangt schnellere Methoden von Bemessung. Die dargelegte Methode in dieser Arbeit nach der Erfahrung der Strassenbauabteilung von Kalifornien bietet schnellere und nützliche Lösungen dar.

Die dargelegte ausführliche deutliche Grundlage und die Anwendung der Methode, die mit Beispiele vom Verfasser aufgeklärt wird, wurden sehr interessant für die Berechnung von Aussteifung von biegsamer Pflasterung.