

# TENDENCIAS MODERNAS EN EL DIMENSIONAMIENTO DE FIRMES FLEXIBLES

Por K. KUCERA

Dr. Ingeniero-Jefe de la Sección de Pavimentos del Instituto de Investigaciones de Ingeniería Civil de Brno (Checoslovaquia)

*El profesor checoslovaco Kucera, autoridad bien conocida en el cálculo de pavimentos flexibles, ha estudiado a fondo el tema, tanto en el aspecto teórico como en el experimental, estableciendo correlaciones entre los diversos métodos. Los resultados del ensayo AASHO y la teoría de la viscoelasticidad han servido de base al método que lleva su nombre. Su contribución es importante en la búsqueda de un nuevo método más perfeccionado de dimensionamiento, ajustado a las solicitudes de cada caso, que permita obtener soluciones óptimas de la sección del firme en el doble aspecto económico y funcional. Considerando su gran valor documental, por lo que tiene de puesta al día de los problemas de dimensionamiento de pavimentos, publicamos in extenso la conferencia pronunciada por el autor en el Ministerio de Obras Públicas dentro del programa de formación permanente de la Dirección General de Carreteras. Se trata de un trabajo de síntesis en el que se describen ocho métodos de dimensionamiento actualmente en uso. No obstante las diferentes concepciones de partida y los distintos índices de tráfico y capacidad portante empleados en estos métodos, los valores que resultan de su aplicación son comparables y esto es una conclusión esperanzadora respecto a la definitiva solución.*

## 1. CONSIDERACIONES PREVIAS

El estudio de métodos de cálculo de pavimentos que permitan llegar a un dimensionamiento de las secciones estructurales de la calzada que nos acerque lo más posible a la seguridad y a la economía, constituye una preocupación dominante de los Departamentos de Carreteras y de sus Centros de investigación.

En los últimos años se ha avanzado notablemente en el campo del dimensionamiento, en lo que ha influido de manera esencial tanto la explotación de las largas series de resultados de los tramos experimentales —principalmente el Ensayo AASHO— como el estudio racional de los sistemas multicapas a partir de las teorías de Boussinesq y Burmister.

Prosigue la investigación considerando, cada vez con mayor precisión, el conjunto tráfico-calzada-ambiente y estimando las concausas que en él actúan para definir sus efectos sobre el comportamiento de la calzada, de modo que pueda conservarse en buen estado durante el período de servicio que se le asigne.

La preponderancia del transporte por carretera, que se ha impuesto frente a los otros medios por razones de flexibilidad, ha motivado un gran crecimiento del tráfico pesado con la consiguiente destrucción de los pavimentos que no fueron dimensionados para tal frecuencia y magnitud de las cargas. En consecuencia, han sido precisos refuerzos y sustituciones de las antiguas calzadas que nunca se han podido llevar a cabo con el ritmo necesario por razones de insuficiencia crediticia.

Se produce con ello una pérdida de rentabilidad en la explotación del transporte por carretera debida principalmente al aumento de tiempo de recorrido y deterioro del material móvil. La degradación y ruina de la calzada se produce por una prognosis insuficiente del tráfico o por el empleo de un método inadecuado para el dimensionamiento de espesores.

No debe olvidarse que la relación entre las cargas por eje y su efecto destructivo del pavimento está muy lejos de seguir una ley lineal. Basta para comprobarlo observar los ábacos de reducción de peso por eje al eje-patrón, de los nuevos métodos de cálculo de pavimentos. Respecto al efecto de un eje de 8 Tm. el de 10 toneladas es 2,2 veces mayor, y el de 13 Tm. 7 veces mayor, e incluso hasta 8,5 veces mayor en firmes de sección estructural de *standard* inferior.

Estos no son los únicos problemas que afectan a la construcción y conservación de carreteras. Al proyectar el refuerzo de una carretera existente o la construcción de una nueva, nos encontramos con una serie de problemas referentes tanto a la elección y a la calidad de los materiales de las distintas capas del firme y control de dicha calidad, como a la capacidad portante de la explanada, a sus variaciones estacionales a lo largo del año, a las condiciones climáticas, etc.

Decimos todo esto para dar a entender que el problema de elección, dimensionamiento y cálculo del firme es muy complicado, e incluso en ciertos aspectos no estudiado a fondo aún, y exige conocimientos muy amplios.

Debido a correlaciones complejas y a causa de otros motivos no es posible aplicar los métodos de cálculo sin una previa adaptación. El empleo de métodos puestos a punto en otros países exige, generalmente, su modificación para tráfico, materiales, etc. Es decir, toda la información de la que se parte en el método en cuestión.

Actualmente se conocen una centena de métodos de cálculo con sus respectivas modificaciones, y para el Ingeniero resulta difícil, y a menudo imposible, saber elegir.

En primer lugar, los especialistas en cálculo de firmes se plantean el problema de elegir entre *un método racional*, es decir, un método basado en teorías matemáticas, deducidas con todo rigor o *un método experimental* o empírico respaldado por experiencias y ensayos, o bien una combinación de las dos clases de métodos.

No vamos a resolver aquí estos problemas. Lo único que pretendo es examinar algunos de los nuevos métodos de cálculo de firmes flexibles, comentando sus ventajas e inconvenientes, y resumir el estado de la investigación en este campo, indicando las posibles tendencias de su desarrollo.

## 2. ESTADO ACTUAL DE LA TECNICA DE DIMENSIONAMIENTO

Antes de describir, en pocas palabras, tres métodos racionales y cinco experimentales de cálculo de firmes flexibles es preciso hacer mención de los progresos de la investigación de los últimos años. La mejor información nos la ofrecen las comunicaciones de las Conferencias Internacionales de 1962 y 1967 de Ann Arbor [1], [2] y el informe del ensayo AASHO.

Con motivo de las dos Conferencias de Ann Arbor, dedicadas especialmente a los problemas del cálculo de pavimentos asfálticos, es decir, flexibles, se recopilaron los resultados de las investigaciones llevadas a cabo, desde poco después de 1960, en casi todo el mundo.

Otro extremo importante en la historia del cálculo de firmes, anterior a las dos Conferencias mencionadas, es el ensayo AASHO. Casi todos los métodos modernos de dimensionamiento aprovechan los resultados de este ensayo, sobre todo en el campo de las relaciones entre el comportamiento del firme y el tráfico.

Aunque los resultados del ensayo AASHO, por responder a un caso especial, no sean completamente aptos para su generalización y empleo en otras condiciones de la estructura del firme, para otras características del suelo, del tráfico, del clima, etcétera, se parte a menudo de ellos a falta de otros de mayor garantía.

Este ensayo, puramente experimental, fue objeto de crítica en casi todo el mundo, como puede verse en una serie de publicaciones monográficas, [4], [5], [6], [7], lo que no disminuye la importancia de este trabajo gigantesco. Volveremos a los resultados de gran valor del ensayo AASHO, para utilizarlos después de su análisis o bien después de su adaptación al lugar, etc.

Respecto a la primera Conferencia Internacional de Ann Arbor, en 1962, se puede decir que fue la que señaló los graves problemas del dimensionamiento de firmes, inició la discusión sobre el tema, primer empleo de los resultados del ensayo AASHO [8], [9]. La gran divulgación del ensayo y el gran número de análisis y correlaciones realizadas tenían al mundo a la espera de que en la segunda Conferencia de Ann Arbor, sobre el cálculo de firmes flexibles en 1967, se lograría dar una respuesta final al problema.

Las esperanzas no se cumplieron. A pesar de que más de 600 delegados de 40 países participaron en la Segunda Conferencia, en la que se presentaron 75 informes, el problema del cálculo de firmes flexibles no fue resuelto completamente. Sin embargo, se llegó a conclusiones muy importantes en cuanto a la definición matemática de las tensiones y deformaciones en los sistemas multicapas, y se descubrieron lagunas importantes en el conocimiento de los valores característicos de los materiales integrantes de las capas del firme.

No obstante es preciso, por tanto, proseguir con el mayor esfuerzo el estudio de la teoría y métodos de ensayo de los materiales viscoelásticos. Incluso los estudios relativos a la fatiga de los materiales y capas del firme se encuentran todavía en estado inicial.

Entre los métodos de cálculo presentados en la segunda Conferencia de Ann Arbor, el método de Dormon y Edwards, basado en las tensiones en el sistema tricapa atrajo la atención general, ya que presenta una estrecha correlación con los resultados obtenidos en el tramo experimental de Alconbury Hill y en el ensayo AASHO.

Otro método, el del Instituto de Tecnología del Transporte de Berkeley expuesto en la comunicación de Monismith, Seed, Mitry y Chan, deducido teóricamente a partir de las deflexiones admisibles del firme, con una larga serie de resultados de ensayos en obras terminadas, corresponde, sobre todo, al clima seco de California y su aplicación en condiciones diferentes sería, por tanto, problemática y poco segura.

Procedemos ahora a una breve definición de algunos métodos importantes del cálculo de firmes flexibles y a la descripción de algunas soluciones recientes.

Dentro del grupo de los métodos racionales, basados en la teoría de la elasticidad del sistema multicapa, hay que mencionar *el método Shell*, basado en las tensiones en el sistema tricapa [10], *el método provisional del Laboratorio Central de Ponts et Chaussées de Paris*, fundado en la equivalencia de espesores y en los ensayos de carga del sistema multicapa [11] y *el método provisional checoslovaco*, basado en la deflexión admisible en el sistema de cuatro capas [12]. En cada uno de estos tres métodos se hace el cálculo estático de manera diferente, pero los tres parten de los resultados del ensayo AASHO para la determinación del período de servicio, es decir, las relaciones entre el firme y el tráfico. Así mismo, los tres uti-

lizan los valores deducidos de este ensayo para convertir los efectos de los diferentes ejes a los del eje-patrón de cálculo. Aquí haremos solamente algunas observaciones en lo que concierne a estos tres métodos en particular, y para un estudio más profundo, nos remitimos a la bibliografía.

### 3. EL METODO SHELL

Está basado en el criterio de la deformación admisible para la flexión en la superficie inferior del revestimiento asfáltico (ver el esquema de la figura 1), que se fija en:

$$\varepsilon_r \leq 1,45 \cdot 10^{-4}$$

y en el criterio de la deformación vertical admisible en la explanada para la que se toma el valor:

$$\varepsilon_z \leq 6,5 \cdot 10^{-4}$$

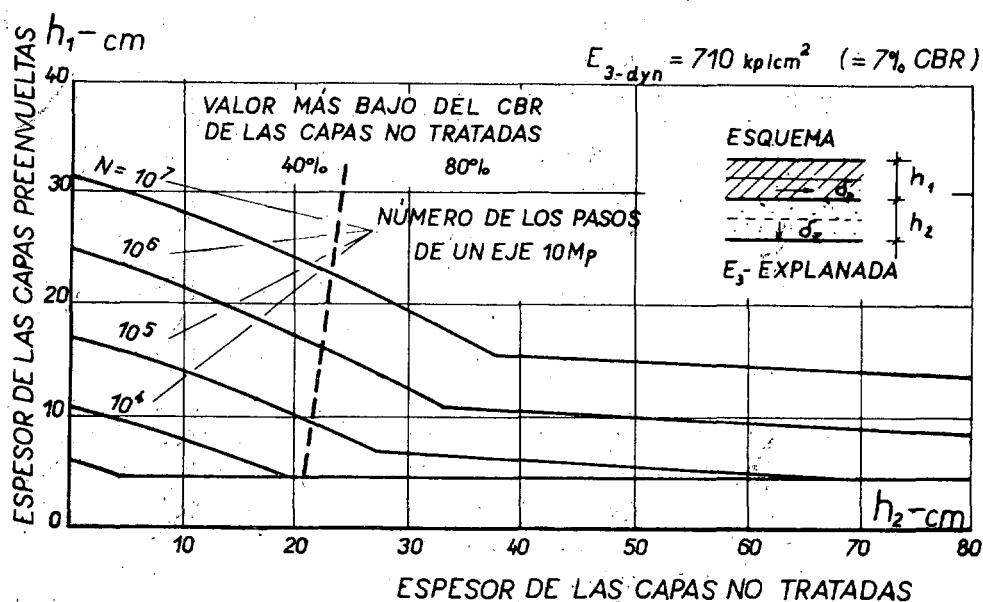


Fig. 1. — Diagrama de dimensionamiento del método Shell. Es uno de los cinco que corresponden a diferentes capacidades portantes de la explanada.

Este método utiliza cinco diagramas de dimensionamiento, que corresponden a un módulo dinámico de elasticidad en la explanada de 320, 530, 710, 1 060 y 1 770 kp./cm.<sup>2</sup>. La figura 1 muestra, como ejemplo, uno de estos diagramas, es decir, el diagrama de dimensionamiento para el caso de una explanada de módulo  $E_3 = 710$  kp./cm.<sup>2</sup>, lo que equivale a un CBR de 7. Estos diagramas de dimensionamiento se han obtenido con un vehículo de cálculo de un peso por eje de 10 Tm. La calidad de las capas bituminosas, es decir, del revestimiento y de la capa de base superior se supone de un valor medio de módulo dinámico de elasticidad.

$$E_1 = 60\,000 \text{ kp./cm.}^2$$

Es preciso recordar que para este método, el módulo dinámico de elasticidad está medido por el método vibratorio, lo que significa que es de 2 a 3,5 veces mayor que el módulo de elasticidad estático (ya sea el módulo de elasticidad instantáneo para un vehículo circulando lentamente, o el módulo de elasticidad estático para una carga instantánea de uno a dos segundos de duración). Si vamos a comparar los valores de los módulos de elasticidad del método Shell con los módulos de elasticidad para un segundo, tenemos en la figura 1:

- un módulo de elasticidad de la explanada de aproximadamente 250 kp./cm.<sup>2</sup>;
- un módulo de elasticidad del revestimiento bituminoso de 20 000 kp./cm.<sup>2</sup>.

Los esfuerzos admisibles resultantes son:

$$\sigma_r = 0,000145 \cdot 20\,000 = 2,9 \text{ kp./cm.}^2$$

$$\sigma_z = 0,000650 \cdot 250 = 0,16 \text{ kp./cm.}^2$$

Suponiendo una carga dinámica sería preciso contar con valores triples.

La calidad de la capa inferior de la capa de base no tratada se fija por el valor del CBR mínimo admisible y está representada por dos zonas separadas en la figura 1 por una línea discontinua, siendo el valor del CBR mínimo para la parte izquierda de 40, y para la parte derecha, de 80. Estos valores equivalen a los módulos de elasticidad para un segundo, de aproximadamente 700 y 1 000 kp./cm.<sup>2</sup>, y a los módulos dinámicos de elasticidad de aproximadamente 2 000 y 3 000 kp./cm.<sup>2</sup>.

Vemos que este método es sencillo y que toma valores bastante bajos de los módulos de elasticidad y de las tensiones admisibles, para obtener mayor seguridad.

#### 4. METODO DEL LABORATORIO CENTRAL DE PONTS ET CHAUSSEES DE PARIS

Dimensiona el firme con un solo diagrama (fig. 2) a partir de la capacidad portante de la explanada, expresada por el valor CBR, y del tráfico equivalente, expresado por el número total de pasadas del vehículo de cálculo con una carga por eje de 13 Tm. La conversión de los distintos ejes al eje de cálculo se realiza con la ayuda de una tabla de equivalencia deducida del ensayo AASHO.

TABLA I. — Coeficientes de equivalencia.

| TIPO DE LA CAPA                                                                            | COEFICIENTE |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Mezcla asfáltica cerrada .....                                                             | 2           |
| Grava-cemento o grava-escoria granulada .....                                              | 1,5         |
| Suelo-cemento con árido de machaqueo .....                                                 | 1 a 1,2     |
| Base granular con árido de machaqueo (módulo a la placa, 3 500 kp./cm. <sup>2</sup> ) .... | 1           |
| Base granular con árido natural (módulo a la placa, 1 500 kp./cm. <sup>2</sup> ) .....     | 0,75        |
| Arena o escoria inerte (módulo a la placa, 700 kp./cm. <sup>2</sup> ) .....                | 0,50        |

La capa de base granular no tratada tiene un módulo de elasticidad en el ensayo de carga de unos 3 500 a 7 000 kp./cm.<sup>2</sup>. Para otros materiales de módulos de elasticidad  $E_i$  podemos obtener el coeficiente de equivalencia por la fórmula:

$$\alpha = \sqrt[3]{\frac{E_i}{5\,000 \text{ kp./cm.}^2}} \quad (1)$$

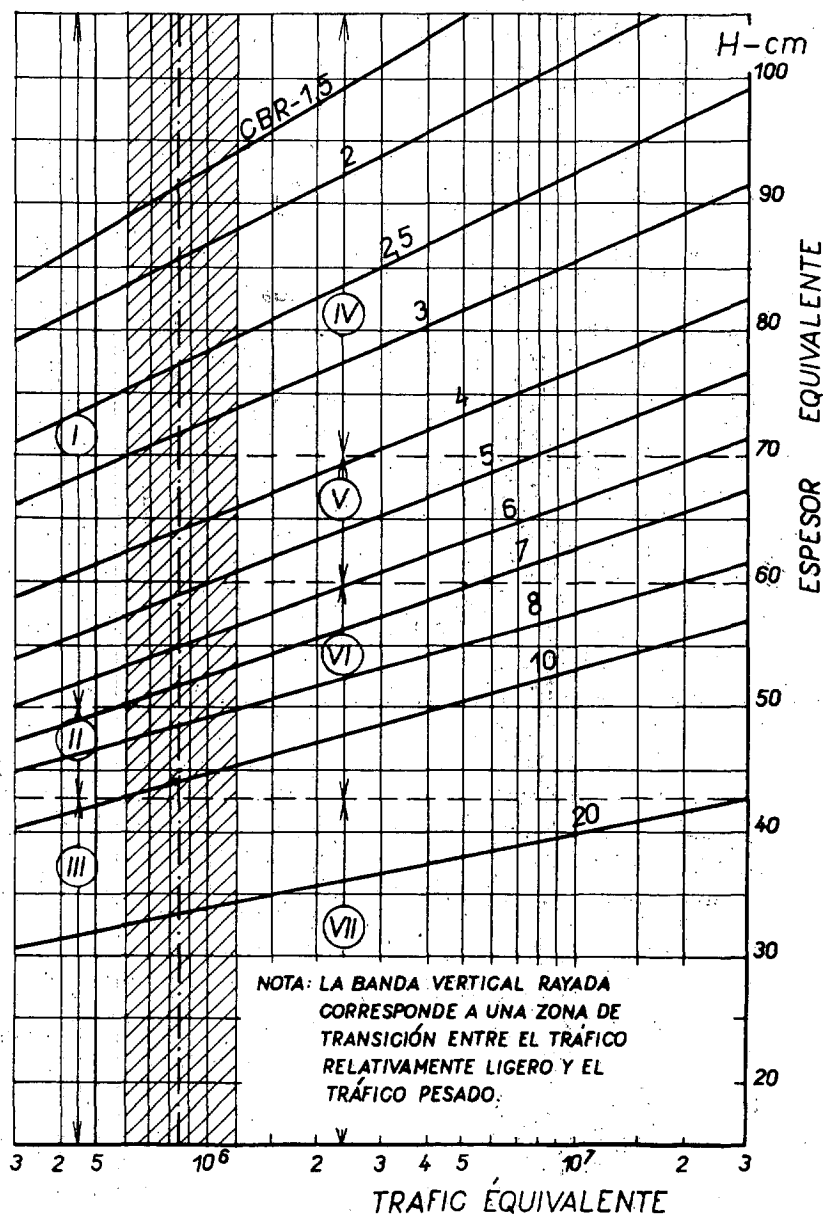


Fig. 2. — Diagrama del método francés, que dimensiona el firme a través del índice CBR de la explanada y del tráfico equivalente, expresado en número de pesadas del eje-patrón de 13 toneladas.

El resultado obtenido en el diagrama de cálculo de la figura 1 se denomina *espesor equivalente* del firme y es necesario aún convertirlo o bien dividirlo en varias capas, según los coeficientes de equivalencia (tabla I).

Para la selección de cada una de las capas individuales tenemos en el diagrama de la figura 1 las zonas designadas de I a VII y las tablas correspondientes con los espesores mínimos deseables. Este método se ha estudiado con detalle, incluso en cuanto a los ensayos de laboratorio del CBR del suelo de la explanada, con reducción de los valores al valor de cálculo —por ejemplo, para una compactación 95 por 100 Proctor—, y determina eventualmente el módulo de elasticidad de las capas con la ayuda de los ensayos de placa de carga, etc.

## 5. METODO PROVISIONAL CHECOSLOVACO

Gracias al Dr. Ingeniero O. Llamazares y a la prensa técnica española, los Ingenieros de este país están bien informados del método checoslovaco del cálculo de firmes flexibles [13], [14]. Yo mismo he contribuido a ello con un trabajo complementario [15]. Después de la publicación de estos artículos monográficos el método checoslovaco ha sido objeto de perfeccionamiento, pero los principios siguen siendo los mismos. Se ha conseguido una notable mejora con la deducción de cinco diagramas de dimensionamiento, con lo que no es necesario el empleo de la tabla de coeficientes de deflexión. Además, se ha considerado la relación entre el firme y el tráfico con un criterio de mayor economía en el dimensionamiento, como se deduce de la figura 3.

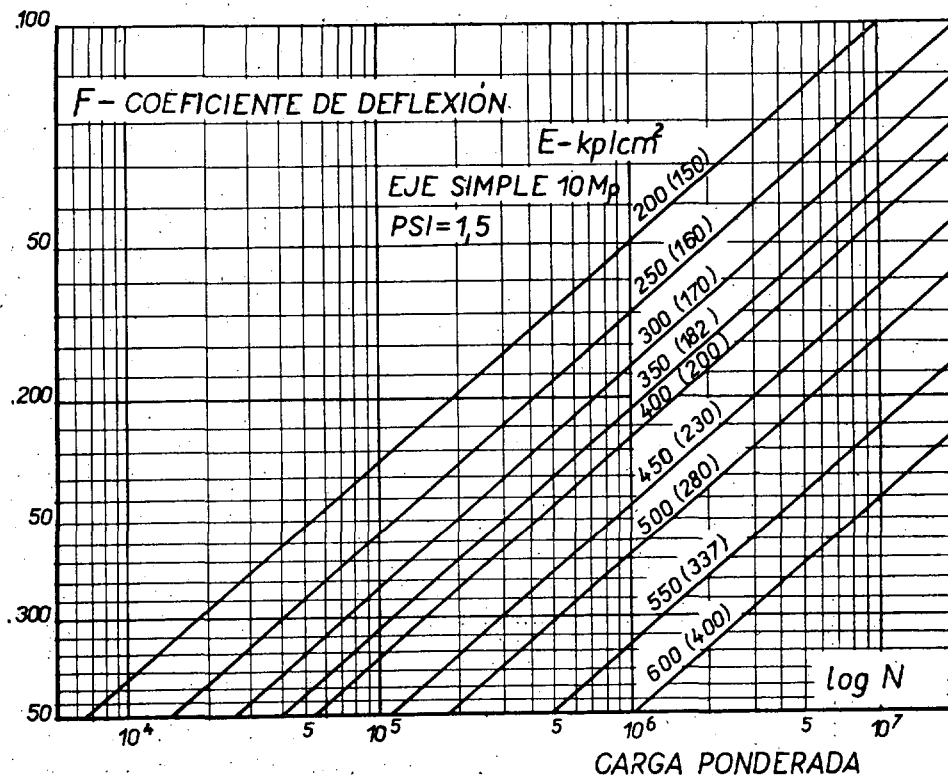


Fig. 3. — Dimensionamiento de espesores por el método checoslovaco. Diagrama de correlación del tráfico, deflexiones y módulo de la explanada.

Comparando con el diagrama anterior (ver, por ejemplo, la referencia [15] figura 2) resulta un desplazamiento descendente de las curvas a partir de 300 kp. por centímetro cuadrado en adelante, es decir, hacia los coeficientes de deflexión más elevados, así como la intersección de las curvas 250, 250, para leer más fácilmente.

Las figuras 4 y 5 representan los diagramas "A" y "C" de la serie de cinco diagramas mencionados. Para facilitar su estudio repetiremos brevemente los principios de este método checoslovaco:

1. La deflexión provocada por las cargas sobre una, dos o varias capas y también sobre la explanada, o suelo de apoyo del firme, se determina por la teoría de los sistemas multicapas debida a Odemark, Kirk, Jones y otros, y eventualmente, según la medición sobre el modelo del Instituto de Investigaciones de Ingeniería Civil de Bratislava.

2. Las características resistentes de la explanada y de las capas del firme están definidas por el módulo de elasticidad, para cargas de una duración de un segundo, en condiciones estacionales medias que corresponden a las condiciones de los meses de julio y agosto y para una temperatura media de  $+15^{\circ}\text{C}$ . Se ha escogido una duración de carga de un segundo porque ésta puede obtenerse con el ensayo de la viga Benkelman y porque así la deflexión puede también considerarse como una deflexión elástica.

3. El período de servicio, es decir, la relación entre la capacidad portante del firme, y el efecto acumulativo del tráfico durante éste, se define de acuerdo con los resultados del ensayo AASHO. El período de servicio se considera terminado cuando se alcanza el valor 1,5 para el llamado "Índice de servicio" o *present serviceability index* (PSI) en la terminología inglesa. Los ejes de peso superior a 4 toneladas son convertidos al equivalente de eje-patrón de 10 Tm. El tráfico se define por el número total de pasadas del eje-patrón durante el período de servicio; en la ta-

TABLA II. — Número total de pasadas del eje de 10 Tm. y deflexión admisible del firme.

| Tipo de carretera          | Volumen del tráfico "N" en millones de pasadas del eje de 10 Tm. y deflexión elástica admisible " $\Delta_z$ " en mm., para un período de servicio de |            |         |            |         |            |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|---------|------------|---------|------------|
|                            | 10 años                                                                                                                                               |            | 15 años |            | 20 años |            |
|                            | N                                                                                                                                                     | $\Delta_z$ | N       | $\Delta_z$ | N       | $\Delta_z$ |
| Autopista .....            | 7,00                                                                                                                                                  | 0,70       | 9,00    | 0,65       | 11,0    | 0,60       |
| <i>Carretera nacional.</i> |                                                                                                                                                       |            |         |            |         |            |
| Con tráfico pesado .....   | 3,50                                                                                                                                                  | 0,75       | 5,30    | 0,70       | 7,0     | 0,65       |
| Con tráfico medio .....    | 0,90                                                                                                                                                  | 0,95       | 1,30    | 0,90       | 1,8     | 0,85       |
| Con tráfico ligero .....   | 0,44                                                                                                                                                  | 1,10       | 0,68    | 1,00       | 0,9     | 0,95       |
| <i>Otras carreteras.</i>   |                                                                                                                                                       |            |         |            |         |            |
| Con tráfico pesado .....   | 2,80                                                                                                                                                  | 0,80       | 4,30    | 0,75       | 5,5     | 0,70       |
| Con tráfico medio .....    | 0,70                                                                                                                                                  | 1,00       | 1,10    | 0,95       | 1,4     | 0,90       |
| Con tráfico ligero .....   | 0,35                                                                                                                                                  | 1,15       | 0,55    | 1,05       | 0,7     | 1,00       |

# DIAGRAMA PARA EL CALCULO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

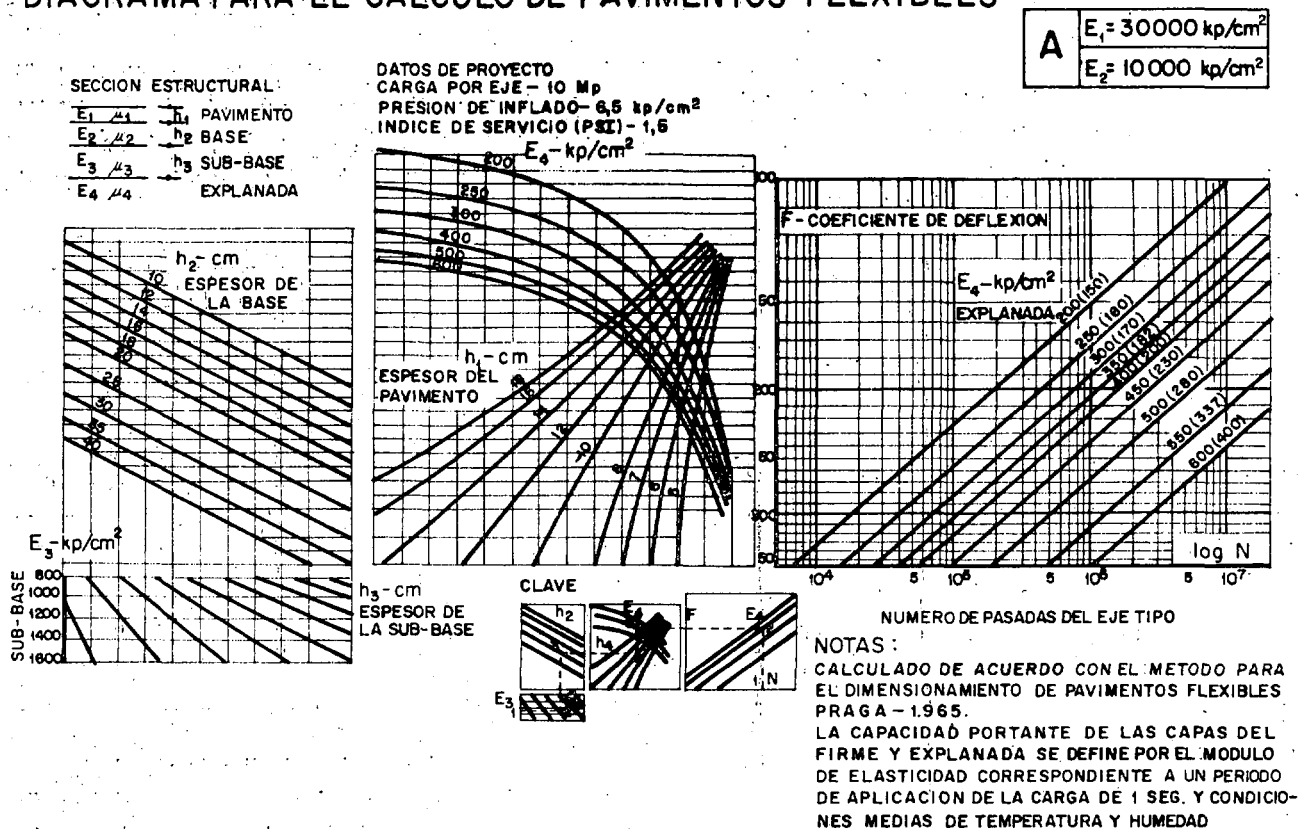


Fig. 4. — Esta figura y la siguiente representan dos de los tres diagramas de cálculo del método checoslovaco.

# DIAGRAMA PARA EL CALCULO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

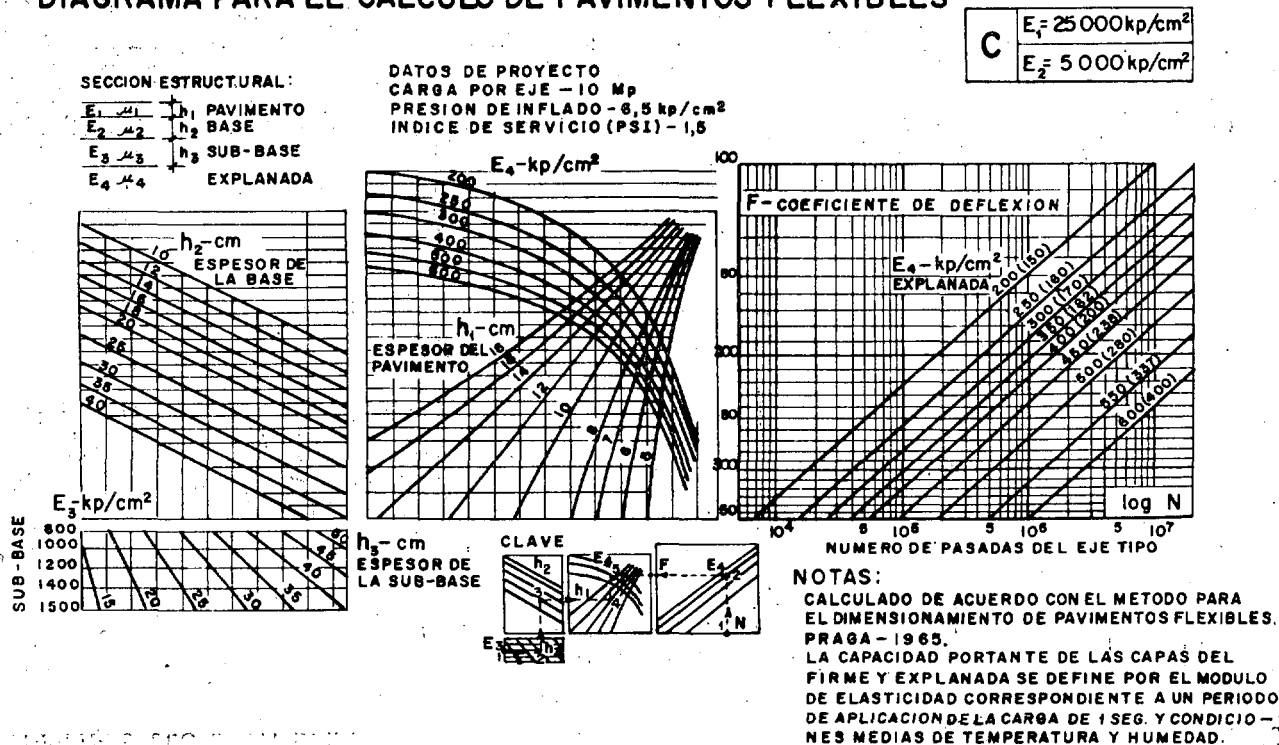


Figura 5.

bla II figura juntamente con la deflexión admisible para las condiciones checoslovascas.

Es preciso indicar que la deflexión admisible se ha calculado a partir de la relación entre el número de pasadas y el espesor del firme según el ensayo AASHO y la teoría de los sistemas multicapa (ver referencia [14]) para la más baja capacidad portante admisible de una explanada con módulo de elasticidad anual medio de 200 kp./cm.<sup>2</sup>.

4. El dimensionamiento de las tres capas del firme se realiza según los cinco diagramas de cálculo, cuyos parámetros figuran en la tabla III:

TABLA III. — *Tipos de firme según las curvas de dimensionamiento del método checoslovaco.*

| Módulo de elasticidad del pavimento y de la base | Módulo de elasticidad de las capas en kp./cm. <sup>2</sup> para los tipos de firme: |        |        |        |        |        |
|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                                  | A                                                                                   | B      | C      | D      | E      | F      |
| $E_1$                                            | 30 000                                                                              | 25 000 | 25 000 | 20 000 | 20 000 | 15 000 |
| $E_2$                                            | 10 000                                                                              | 10 000 | 5 000  | 10 000 | 5 000  | 8 000  |

La capacidad portante de los tipos de firme de la tabla III disminuye de izquierda a derecha, de forma que empleamos el tipo "A" para las carreteras del tráfico más pesado, y el tipo "F", para las carreteras secundarias de tráfico ligero. Los módulos de elasticidad de las capas corresponden a una duración de la carga de un segundo, con las condiciones de temperatura anual media de las capas asfálticas de +15° C., y en las condiciones de humedad media anual de la explanada.

Los datos numéricos entre paréntesis, de la parte derecha del diagrama (figuras 4 y 5), expresan la capacidad portante más baja, de primavera, para las condiciones de los suelos en Checoslovaquia.

Los módulos indicados para el pavimento ( $E_1$ ) corresponden a los siguientes tipos:

- 30 000 kp./cm.<sup>2</sup>, mezcla asfáltica de alta calidad.
- 25 000 kp./cm.<sup>2</sup>, mezcla asfáltica de calidad media.
- 20 000 kp./cm.<sup>2</sup>, mezcla asfáltica de calidad inferior.
- 15 000 kp./cm.<sup>2</sup>, mezcla asfáltica abierta en frío.

Los módulos de las capas de base ( $E_2$ ) corresponden a los siguientes tipos:

- 10 000 kp./cm.<sup>2</sup>, grava-cemento de calidad media, hormigón pobre o base asfáltica en caliente.
- 5 000 kp./cm.<sup>2</sup>, grava-cemento de calidad inferior, suelo estabilizado con betón, base granular de muy buena calidad.
- 8 000 kp./cm.<sup>2</sup>, macadam asfáltico por penetración.

5. El coeficiente de deflexión por el que se define la calidad y capacidad portante del firme se determina en el estudio del proyecto con la ayuda de los diagramas de dimensionamiento (fig. 4):

$$F = \frac{\Delta_{zv}}{\Delta_{z'}} = \frac{\Delta_{zv} \cdot E_p}{1,5 \cdot p \cdot a} \quad (2)$$

donde:

$\Delta_{zv}$  = deflexión en centímetros del firme bajo la carga de una rueda de 5 Tm.

$E_p$  = módulo de elasticidad de la explanada en kp./cm.<sup>2</sup>.

$p$  = presión de inflado de la rueda (para el eje de 10 Tm.,  $p = 5,7$  kp./cm.<sup>2</sup>).

$a$  = radio del círculo equivalente de contacto ( $a = 16,7$  cm.).

Para la aplicación de las curvas de dimensionamiento (ver figs. 4 y 5) es necesario advertir que la parte derecha del diagrama que determina las relaciones entre el tráfico y la capacidad portante del firme se ha deducido de los resultados del ensayo AASHO, sustituyendo el *índice del espesor del firme D* por el *índice de deflexión F* (ver referencia [14]), según la ecuación (2).

El índice de deflexión necesario se obtiene rápidamente en la parte derecha del diagrama al dimensionar el espesor de las capas. En sentido inverso podemos, para una estructura de firme dada, del que se conocen la calidad de las capas y de la explanada, determinar el índice de deflexión, es decir, evaluar el firme con respecto a su capacidad portante y a su período de servicio (parte derecha del diagrama). Las curvas de dimensionamiento definen claramente las relaciones entre nueve variables ( $E_1, E_2, E_3, E_4, h_1, h_2, h_3, N, F$ ) y su empleo no presenta dificultad.

Un capítulo aparte se abre en cuanto a la determinación de la calidad de las capas y de la capacidad portante en el laboratorio e *in situ*, de la consideración de las variaciones estacionales, propiedades de los materiales y suelo de la explanada, intensidad y composición del tráfico, conversión de ejes al eje-patrón. Baste decir que todos estos problemas y otros complementarios han sido resueltos felizmente en este método de cálculo, ya que rebasan los límites de este trabajo.

Podríamos extender nuestra disertación a otros métodos racionales, pero nos limitaremos a estos tres que resuelven de forma completa los problemas del cálculo de firmes flexibles. Con ello hemos demostrado que es posible resolver el problema por modos diferentes, si bien en el dimensionamiento se llega a resultados finales muy próximos.

Respecto a los métodos experimentales, citaremos algunos por orden cronológico de su aparición.

## 6. LA SOLUCION DE FINN Y SHOOK

No es un método de cálculo completo, pero define, basándose en el ensayo AASHO, las relaciones generales entre el tráfico, el firme y la capacidad portante de la explanada.

Ya en la primera conferencia de Ann Arbor se presentó una comunicación sobre el tema [1], y hemos reproducido el diagrama de dimensionamiento en la figu-

ra 6. Corresponde a una carga por eje de 8,2 Tm., y la ecuación fundamental del espesor equivalente del firme es:

$$T = 2 h_1 + 1 h_2 + 0,75 h_3$$

donde:

$h_i$  = espesor de una de las capas ( $h_1$  del pavimento,  $h_2$  de la capa de base,  $h_3$  de la explanada mejorada).

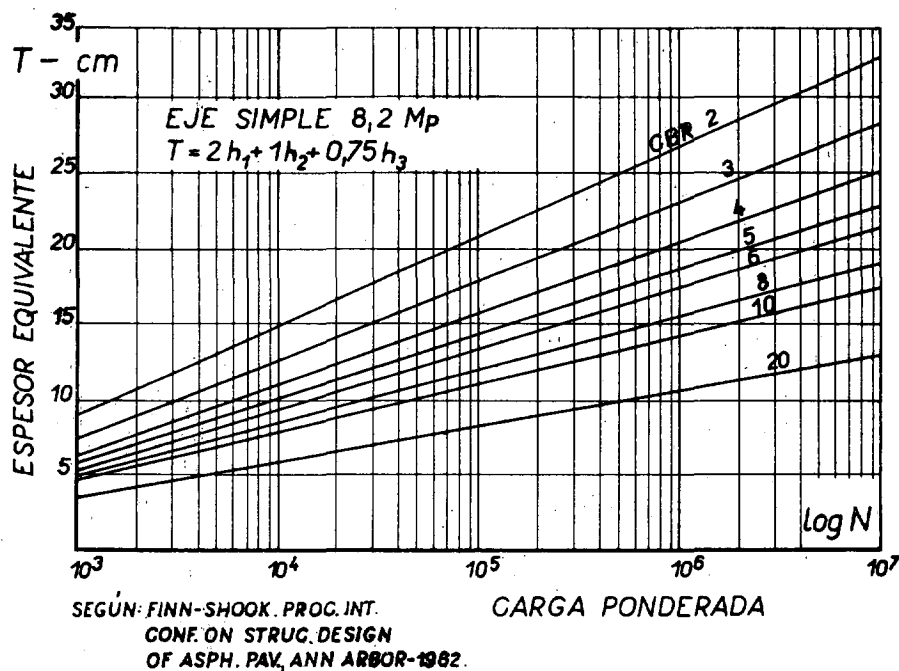


Fig. 6. — Diagrama para el dimensionamiento de espesores según la solución Finn y Shock, basada en los resultados del ensayo AASHO.

Los coeficientes de equivalencia (2, 1, 0,75) son los del ensayo AASHO (0,44, 0,14, 0,11), pero un poco modificados por los resultados del análisis de los autores.

## 7. EL METODO DE CALCULO AASHO

Este método es el resultado de los trabajos de la Comisión para el Proyecto de Firmes Flexibles, en la que están representados la Administración de Carreteras de los Estados Unidos, la AASHO, el *Bureau of Public Roads* y el *Highway Research Board*.

Los ingenieros y técnicos españoles han sido informados con detalle de este método por una monografía del Dr. Ingeniero D. O. Llamazares [16]. Para recordarlo, se reproduce el diagrama de dimensionamiento de este método en la figura 7. Este diagrama es válido para una carga por eje de 8,2 Tm., un índice de servicio,  $PSI=2,5$  y un período de servicio de veinte años.

La ecuación del espesor de las capas es la original del ensayo AASHO:

$$D = 0,44 h_1 + 0,14 h_2 + 0,11 h_3$$

en la que se particularizará para los espesores de las capas en centímetros.

El ejemplo de la figura 7 es válido para una capacidad portante de la expla-

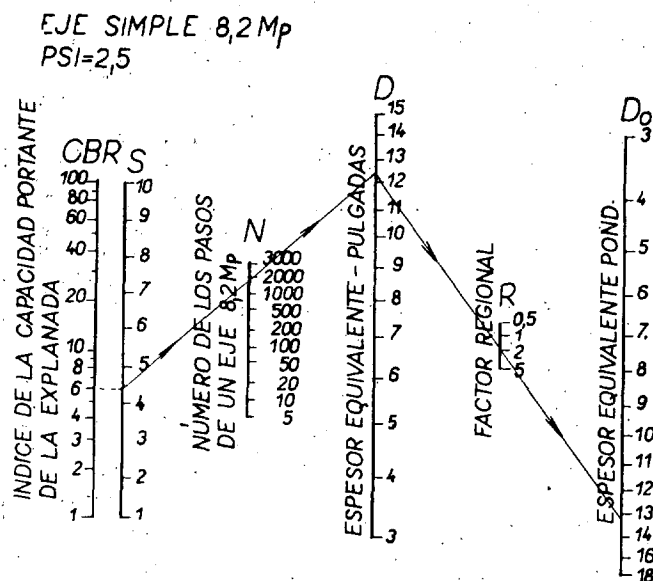


Fig. 7. — Abaco de cálculo según el método AASHO para un período de servicio de veinte años.

nada de CBR=6, un volumen de tráfico de 1 900 vehículos diarios con una carga por eje de 8,2 Tm. y un factor regional de 1,5. El espesor equivalente resultante  $D=13$  centímetros podría ser repartido, por ejemplo, como sigue:

|                                      |               |              |
|--------------------------------------|---------------|--------------|
| Pavimento de mezcla asfáltica .....  | 12 cm.        | 0,44 = 5,28  |
| Base de zahorra artificial .....     | 30 cm.        | 0,14 = 4,20  |
| Capa inferior de grava natural ..... | 35 cm.        | 0,11 = 3,85  |
| <b>Total .....</b>                   | <b>77 cm.</b> | <b>13,33</b> |

Es evidente que este método es muy rápido, y puede decirse que en España se tiene ya cierta experiencia en su utilización.

## 8. EL METODO DEL INSTITUTO DEL ASFALTO

Este método se dedujo del análisis de resultados de una serie de tramos experimentales [17]. Está estudiado con detalle y resuelve todas las relaciones entre el firme, el tráfico, el clima, la explanada, las condiciones regionales, el drenaje, etc.

Está referido a una carga por eje-patrón de 8,2 Tm., un período de servicio de veinte años y un índice de servicio, PSI=2,5 al final de este período. La capaci-

dad portante de la explanada se introduce en el cálculo mediante el índice CBR, el módulo del ensayo de carga con placa de 30 cm., o bien por el llamado *valor R* del estabilómetro de Hveem; para convertir el tráfico mixto, expresado por el número total de vehículos por día, este método emplea un diagrama especial por el que se llega al llamado *índice de tráfico*. Se determina el espesor del firme con la ayuda del diagrama de dimensionamiento (fig. 8), según la capacidad portante y el número o índice de tráfico. Después se divide el espesor total del firme, referido a una capa de mezcla asfáltica, con ayuda de las curvas I y II (ver fig. 8) y de los

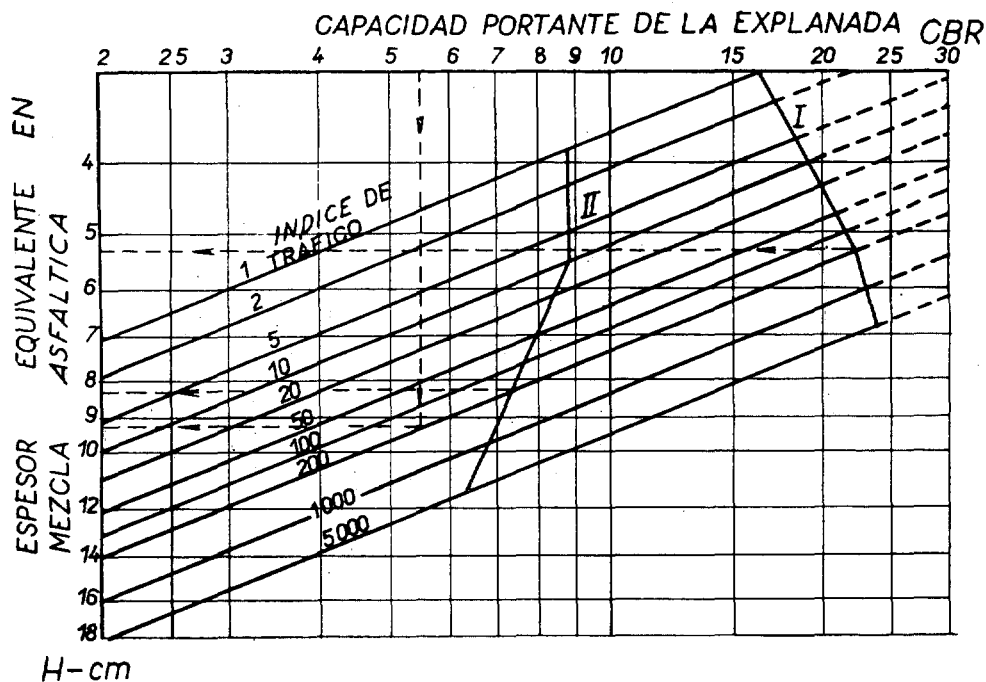


Fig. 8. — Abaco de dimensionamiento del Instituto del Asfalto a partir del *índice de tráfico* y el CBR de la explanada. Para definir la sección estructural del firme se tienen en cuenta los espesores equivalentes de las distintas capas.

coeficientes de equivalencia de las distintas capas que integran la sección estructural del firme.

Los coeficientes de equivalencia son:

- Para la capa de base superior tratada, 1 : 2.
- Para la capa de base inferior no tratada, 1 : 2,7.

Es evidente que esta división y determinación de capas exige una normalización de éstas, de acuerdo con las prescripciones técnicas que forman parte de este método de dimensionamiento.

## 9. EL METODO RUMANO

Se trata de un método semiempírico, pues el cálculo de la deflexión del sistema multicapa se basa en la equivalencia del trabajo realizado por el paso de la

rueda del vehículo (trabajo exterior) y el necesario para la deflexión de las capas del firme y de la explanada (trabajo interior) [18].

La ecuación de la deflexión del firme que se expresa seguidamente se obtiene a partir de ciertas hipótesis relativas a la deflexión de las capas (fig. 9), se supone, por ejemplo, que la deflexión de borde de una superficie cargada es igual a

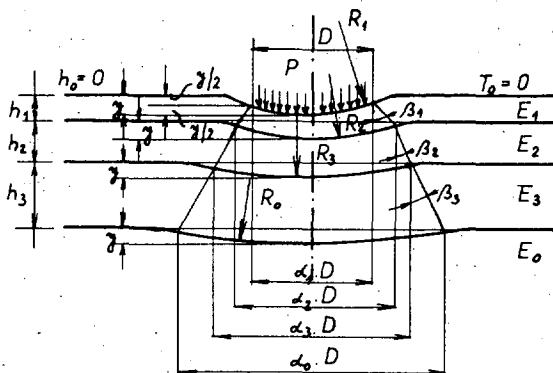


Fig. 9. — Esquema básico del método rumano.

la mitad de la deflexión bajo el eje de la carga, así como el supuesto de un cierto ángulo de distribución de la presión, etc.

$$y = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1 - \mu_0^2}{E_0} \frac{P^2 \cdot D}{\Sigma}}$$

con la siguiente notación:

$P$  = carga por eje en kp.

$D$  = diámetro del círculo de apoyo en centímetros.

$E$  = módulo de elasticidad de la explanada

$\mu_0$  = coeficiente de Poisson.

$$\Sigma = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{E h_i^3}{1 - \mu_i}$$

donde:

$n$  = número de capas.

$h_i$  = espesor de las distintas capas.

De forma empírica se ha tomado para la deflexión admisible del firme el valor medio de los otros métodos, el método Shell, el de la AASHO y el método checoslovaco, y se ha expresado por la ecuación:

$$y_{adm} = \frac{P}{10} (0,248 - 0,0275 \log N) \quad (6)$$

donde:

$P$  = carga por eje en toneladas.

$N$  = número total de pasadas reducidas al eje patrón durante el período de servicio.

En este método no se aplica diagrama de cálculo y el procedimiento de dimensionamiento es el siguiente:

1. La circulación se convierte, según los coeficientes del ensayo AASHO, en número total  $N$  de pasadas del eje-patrón.
2. Se determina  $y_{adm}$  con ayuda de la ecuación (6).
3. Se calcula el espesor de las capas con la ayuda de las fórmulas aproximadas:

$$h_{min} = \frac{\alpha_i^2 \cdot D^2}{4\,000 y}$$

$$h_{máx} = \frac{\alpha^2 \cdot D^2}{2\,000 y}$$

4. Se comprueban después los espesores elegidos con la ayuda de la ecuación siguiente, y se debe cumplir que:

$$\sum \frac{1}{\alpha_i^2} \cdot \frac{E_i \cdot h_i^3}{1 - \mu_i} \geq \frac{1}{\alpha_m} \cdot \frac{(1 - \mu_0) \cdot P^2 \cdot D}{E_0 \cdot y} \quad (7)$$

Se obtienen los coeficientes  $\alpha$  para el cálculo a partir de los ángulos  $\beta$  (ver figura 9) con la tabla IV:

TABLA IV. — Coeficientes  $\beta$  de distribución de presiones.

| Módulo de elasticidad<br>$E$ (kp./cm. <sup>2</sup> ) | (En grados)<br>$\beta$ |
|------------------------------------------------------|------------------------|
| 1 000                                                | 23                     |
| 2 000                                                | 28                     |
| 3 000                                                | 32                     |
| 4 000                                                | 34                     |
| 5 000                                                | 36                     |
| 10 000                                               | 44                     |
| 15 000                                               | 49                     |
| 20 000                                               | 54                     |
| 30 000                                               | 60                     |
| 40 000                                               | 67                     |
| 60 000                                               | 80                     |

Este método de cálculo es sencillo y da valores medios de las deflexiones admisibles, a partir del módulo de elasticidad, de la temperatura, etc. Falta solamente la elaboración en forma de diagrama, que prestaría a este método más claridad.

## 10. TABLA DE DIMENSIONAMIENTO DE LA REPUBLICA FEDERAL ALEMANA

Un buen ejemplo de dimensionamiento simplificado es la normalización de firmes en la República Federal Alemana, recogida en la Norma Federal núm. 3 de mayo de 1966 [19]. Esta norma sirve a su vez de base a las prescripciones de los Departamentos de Carreteras de los distintos Estados.

Aunque esta clasificación es simple, es evidente que para su definición fueron necesarios estudios laboriosos, con una amplia base experimental y un análisis comparativo muy completo.

La tabla V corresponde a la norma del Estado de Baden-Württemberg que fue el primero en definir la normalización [20].

La tabla V es sólo un resumen de la norma de dimensionamiento de capas. La norma completa considera el sistema bicapa, los efectos de borde, la composición del tráfico desde el punto de vista de las cargas por eje, estimación de la capacidad portante según los coeficientes de equivalencia, etc.

Las secciones definidas en la tabla se complementan con una capa de 30 centímetros como mínimo, exigida por el efecto-helada, y que, además, deberá tener una capacidad portante mínima, definida por el ensayo de carga, de 1 200 kp./cm.<sup>2</sup>

Después, con la descripción de estos cinco métodos experimentales de cálculo, procederemos a su juicio.

Ante todo, reparemos en el empleo de diferentes valores o magnitudes físicas adoptadas para definir un mismo concepto, por ejemplo, la capacidad portante de la explanada, o la calidad de las capas del firme. Es esta una cuestión básica que es preciso conocer a fondo para establecer las correspondientes correlaciones.

Para expresar la capacidad portante de la explanada algunos métodos emplean el índice CBR, como, por ejemplo, el método AASHO, el método francés, el método del Instituto del Asfalto, etc. Alguno no indica las condiciones del ensayo, como, por ejemplo, el método del Instituto del Asfalto, lo que quiere decir que son las normales de aplicación en el país. Otros, como por ejemplo, el método AASHO, definen la determinación del CBR empleada en Kentucky, o el método francés que explica minuciosamente su modo especial de determinar este índice.

Otros métodos emplean el *módulo de elasticidad* para definir la capacidad portante de la explanada y las capas del firme, pero son módulos muy distintos. El método Shell emplea módulos dinámicos, que para las capas asfálticas tendrán una frecuencia superior a un kilohercio (que quiere decir que la duración de la carga es más breve que 0,0005 segundos), mientras que el método checoslovaco emplea una duración de carga de un segundo, lo que puede considerarse como carga estática.

Sin embargo, según la teoría de la viscoelasticidad no se debería —para ser precisos— considerar un módulo de un segundo como módulo estático, sino más bien como *módulo de deformación*, que es el nombre que se le da en el método francés.

TABLA V. — Dimensionamiento según la Norma del Estado Federal de Baden-Würtemberg, StF/68.

| Tipo de las capas                                       | Composición            | Espesor de la capa en cm. para tráfico |        |       |        |            |
|---------------------------------------------------------|------------------------|----------------------------------------|--------|-------|--------|------------|
|                                                         |                        | Muy ligero                             | Ligero | Medio | Pesado | Muy pesado |
| A) Asfálticas (**) .....                                | Capa de rodadura ..... | 2,5                                    | 2,5    | 3,5   | 3,5    | 3,5        |
|                                                         | Capa intermedia .....  | —                                      | —      | —     | 5,0    | 5,0        |
|                                                         | Base asfáltica .....   | 9,5                                    | 13,5   | 15,5  | 15,5   | 21,5       |
|                                                         | Total en cm. (*) ..... | 12,0                                   | 16,0   | 19,0  | 24,0   | 30,0       |
| B) Asfálticas y tratadas con cemento o betún (**) ..... | Capa de rodadura ..... | 2,5                                    | 2,5    | 3,5   | 3,5    | 3,5        |
|                                                         | Capa intermedia .....  | —                                      | —      | —     | 5,0    | 5,0        |
|                                                         | Base asfáltica .....   | 6,0                                    | 10,0   | 12,0  | 13,5   | 20,0       |
|                                                         | Base tratada .....     | 15,0                                   | 15,0   | 15,0  | 15,0   | 15,0       |
|                                                         | Total en cm. (*) ..... | 23,5                                   | 27,5   | 30,5  | 37,0   | 43,5       |
| C) Con base granular de machaqueo (**) .....            | Capa de rodadura ..... | 2,5                                    | 2,5    | 3,5   | 3,5    | 3,5        |
|                                                         | Capa intermedia .....  | 3,5                                    | 3,5    | —     | 5,0    | 5,0        |
|                                                         | Base asfáltica .....   | —                                      | —      | 6,0   | 6,0    | 6,0        |
|                                                         | Base granular .....    | 15,0                                   | 18,0   | 18,0  | 18,0   | 20,0       |
|                                                         | Total en cm. (*) ..... | 21,0                                   | 24,0   | 27,5  | 32,5   | 38,5       |
| D) Con base granular de árido natural (**) .....        | Capa de rodadura ..... | 2,5                                    | 2,5    | 3,5   | 3,5    | 3,5        |
|                                                         | Capa intermedia .....  | —                                      | —      | —     | 5,0    | 5,0        |
|                                                         | Base asfáltica .....   | 5,0                                    | 7,5    | 10,0  | 10,0   | 15,0       |
|                                                         | Base granular .....    | 15,0                                   | 18,0   | 18,0  | 20,0   | 20,0       |
|                                                         | Total en cm. (*) ..... | 22,5                                   | 28,0   | 31,5  | 38,5   | 43,5       |

(\*) A este espesor hay que sumar el de una capa antihielo, determinado para cada caso, con un mínimo de 30 cm.

(\*\*) Estas capas se apoyarán en una base o explanada mejorada con un módulo de deformación de 1 200 kp./cm.<sup>2</sup> como mínimo.

Hasta aquí no hemos hablado más que de la duración de la carga. Sin embargo, sabemos bien que los módulos de elasticidad —si conservamos ese nombre— de los materiales viscoelásticos como los suelos y las mezclas asfálticas, dependen de la magnitud y duración de carga, de la temperatura y de la humedad.

Algunos métodos definen una temperatura para la determinación del módulo, como por ejemplo, el método checoslovaco, que la fija en  $+15^{\circ}\text{C}$ .; otros no la indican y únicamente podemos suponer que parten de valores medios.

Para aportar un poco de luz a estas complicadas correlaciones indicamos en tres diagramas las relaciones de algunas magnitudes determinadas en parte por cálculo y en parte por vías experimentales.

En el diagrama de la figura 10 se relaciona el módulo de elasticidad de una mezcla asfáltica de alta calidad con la temperatura y la duración de la carga, según Huet [21]. En la superficie rayada están comprendidos los valores de los módulos

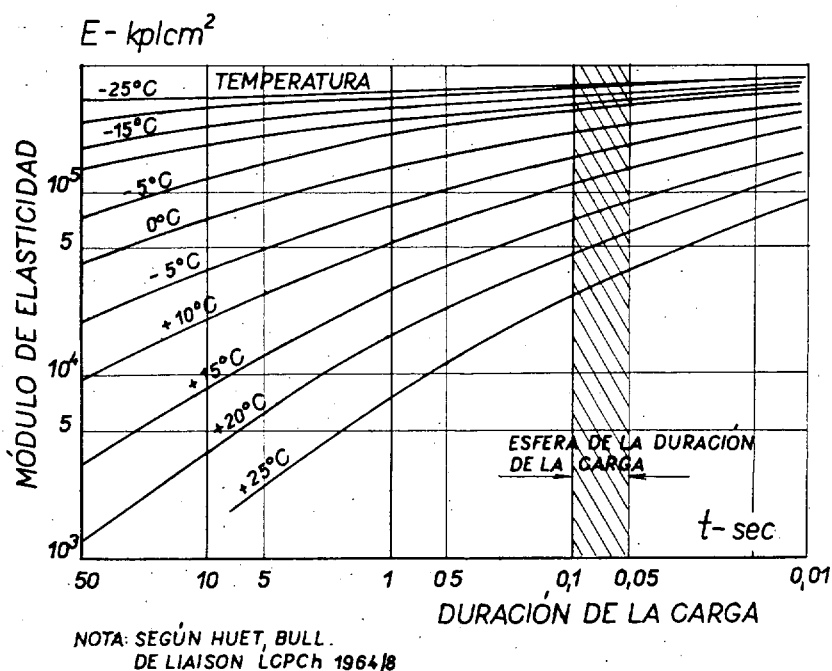


Fig. 10. — Relaciona este diagrama el módulo de elasticidad de una mezcla asfáltica con la temperatura y el período de aplicación de la carga.

de elasticidad que se obtienen en el momento del paso del vehículo; corresponden a duraciones de la carga de 0,05 a 0,1 segundos. Se advierte que en esta zona el módulo varía para las temperaturas indicadas, entre 30 000 y 350 000 kp./cm.<sup>2</sup>

Este diagrama ofrece un buen medio para comparar diversos tipos de mezclas a temperatura y duración de carga diferentes.

En la figura 11 se representa el resultado de la medida de deflexiones de la explanada bajo cargas de duración diferente según los ensayos del Instituto M.A.D.I. [22]. Se distinguen aquí dos métodos de medida, a saber, el empleo clásico de la placa —en la parte derecha del tráfico—, para una duración de carga de treinta a quinientos segundos y el ensayo por deflectómetro de bola, con el que se provoca un impacto sobre la placa, con una duración de carga de 0,015 a 0,08 segundos

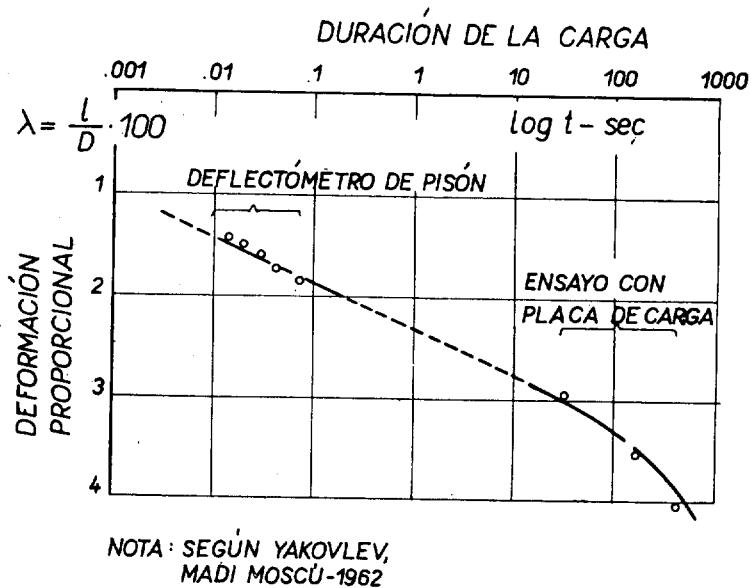


Fig. 11. — Diagrama de correlación entre la deformación y el tiempo de aplicación de la carga para dos tipos de ensayo.

en la parte izquierda. La deflexión en el centro de la carga está expresada en el eje de ordenadas por el parámetro sin dimensión “deflexión  $L/\text{diámetro } D$  de la placa”; es decir, por la deformación proporcional.

Se ve que las deflexiones obtenidas por el ensayo clásico de la placa son poco más o menos el doble de las deflexiones provocadas por el impacto de corta duración, comparable al paso de un vehículo a gran velocidad.

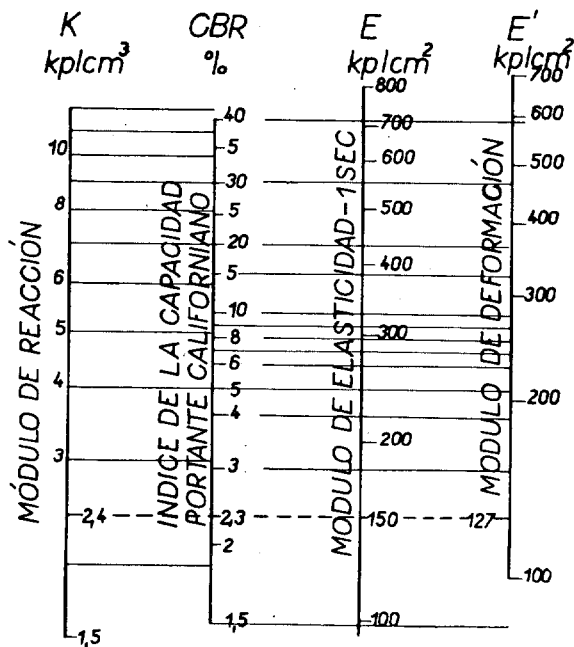


Fig. 12. — Correlación entre los índices portantes de los diferentes métodos de dimensionamiento que actualmente se emplean.

En la figura 12 se establece la correlación entre cuatro índices de la capacidad portante de la explanada. Este diagrama es válido para los suelos homogéneos de aproximadamente las características de Europa Central. La relación entre el módulo de reacción "k" y el valor "CBR" es experimental (basado en los resultados de tres laboratorios de los Estados Unidos), la relación entre el módulo de reacción "k", el módulo de elasticidad "E" y el módulo de deformación "E" está calculada a partir de unas características de deformación del suelo que se obtuvieron experimentalmente.

Es preciso señalar que el módulo de deformación "E" de la figura 12 es el módulo empleado en la U.R.S.S. y que define la fórmula:

$$E' = \frac{p \cdot D}{z}$$

con una deformación de la placa de 1/100 de su diámetro. La notación es la siguiente:

$p$  = presión sobre la placa en el momento en que la deformación es 1/100 del diámetro expresada en  $\text{kp./cm.}^2$ .

$D$  = diámetro de la placa en cm.

$z$  = deflexión en cm.

Las correlaciones de la figura 12 son el resultado de una serie de mediciones realizadas en Checoslovaquia [23] y brindan un medio práctico para los trabajos de comparación.

Hasta ahora no hemos tratado más que de algunos problemas fundamentales para el cálculo de firmes. Sin embargo, no nos hemos ocupado, por ejemplo, de qué capacidad portante de la explanada es preciso tomar para el cálculo. Hay métodos que resuelven esta cuestión claramente y otros que lo hacen de una manera vaga e incierta.

En lo que concierne al cálculo del espesor de una sola capa bajo carga estática, el problema es bastante claro y se obtienen poco más o menos los mismos resultados con el empleo de métodos diferentes que coinciden a su vez con el obtenido por la teoría de la elasticidad. Sin embargo, la situación es muy distinta para los problemas en relación con la carga dinámica y con la dependencia entre la estructura del firme y el tráfico, donde hay todavía muchos problemas pendientes de solución.

Generalmente, los métodos de cálculo resuelven estas cuestiones mediante correlaciones experimentales de mayor o menor fortuna. Por ello, la investigación del comportamiento de los firmes bajo el paso del tráfico, bien sea sobre carreteras en servicio, tramos experimentales o pistas de ensayo circulares debe ampliarse lo más posible.

## 11. CONCLUSION

Esta recapitulación breve de los extremos más importantes de la investigación en el campo del cálculo de firmes flexibles, a partir del ensayo AASHO y de las dos Conferencias Internacionales de Ann Arbor, nos ha permitido entrar en los complicados problemas de su dimensionamiento. Con la ayuda de ocho ejemplos de métodos de cálculo, tanto racionales como experimentales, se ha investigado no sola-

mente las distintas aproximaciones de la solución, sino también sus relaciones mutuas.

A pesar de la diferencia en la propia concepción del método y en los índices de partida, todos los métodos resultan comparables. Queda por ver en qué medida cada método responderá en la práctica, sobre todo en cuanto a la apreciación del período de servicio del firme.

Al mismo tiempo hemos desvelado algunas lagunas conocidas y confirmado la necesidad de una progresiva investigación coordinada. Como ya dijimos, la Conferencia Internacional de Ann Arbor no ha resuelto completamente el problema. En consecuencia debe proseguirse la investigación y tratar de llegar a una solución final del dimensionamiento de pavimentos flexibles. Para ello estimamos que el proceso de actuación debe ser en líneas generales el siguiente:

1. Llevar a cabo una información lo más amplia posible sobre el comportamiento de los firmes flexibles, considerando:
  - El control de la capacidad portante del firme y sus variaciones estacionales en tramos de gran longitud. Para ello se recomienda el empleo del deflectómetro Lacroix y el método canadiense.
  - La realización de aforos completos de tráfico con clasificación de carga por eje.
  - Definir de modo normalizado y a efectos comparativos el estado del pavimento; para ello puede adoptarse el *índice de servicio* (PSI) u otro sistema más conveniente.
2. Adoptar para el cálculo un método estático basado, bien en las tensiones o en las deformaciones admisibles.
3. Determinar, de modo empírico, los efectos del tráfico sobre la calzada; para ello se partirá de los datos obtenidos en los tramos de ensayo y en las pistas circulares de laboratorio. Se perfeccionará lo más posible la definición de estos efectos, que se deberán comprobar también en las carreteras en servicio.

El trabajo es largo y complejo, y para llegar a coronar el fin propuesto será precisa la colaboración de entidades investigadoras y centros de experimentación de los países de mayor avance tecnológico. Para resolver los problemas planteados se necesitará como mínimo un período de cinco años.

Dentro de éste se deberán clasificar e interpretar los datos más recientes, por ejemplo, los obtenidos en los llamados *tramos satélites* del Ensayo AASHO y otros ensayos americanos [26] y checoslovacos [27] realizados en pistas de laboratorio.

Es de esperar que la *III Conferencia Internacional de Cálculo de Pavimentos Flexibles*, que se celebrará en Londres en 1972, favorecerá el intercambio de información y prestará un gran impulso al estudio del dimensionamiento de espesores.

# BIBLIOGRAFIA

1. "Proceedings of the I International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements". University of Michigan, *Ann. Arbor*, 1962.
2. "Proceedings of the II International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavement". University of Michigan, *Ann. Arbor*, 1967.
3. Highway Research Board: *The AASHO-Road-Test*, Special Report núm. 61. Wáshington, 1962.
4. H. SCHNABEL, E. NAKKEL: "Zum AASHO-Road-Test". *Strasse und Autobahn*, H. 11, 1962.
5. J. BONITZER: "L'essai AASHO et les chaussées souples". *Bulletin de liaison des Laboratoires Routiers*, Special n° "E", 1966.
6. H. MITTMAYER: "Der AASHO-Road-Test und die Bemessung von Fahrbahnbefestigungen". *Strassen und Tiefbau*, H.4 u., 5, 1966.
7. GRANZ und KOLL: *Der AASHO-Road-Test, Hauptergebnisse und Folgerungen zum Problem der Bemessung von Fahrbahnbefestigungen*, Kirchbaum Verlag. Godesberg, 1968.
8. J. F. SHOOK et F. N. FINN: "Relations d'étude des épaisseurs des chaussées bitumineuses. *Ann. Arbor*, 1962.
9. W. J. LIDDLE: "Application des résultats de l'essai routier AASHO au calcul des chaussées souples". *Ann. Arbor*, 1962.
10. *Shell 1963 Design charts for flexible pavements*, Shell Int. Petroleum Co. Ltd., London.
11. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, "Recommandation pour le dimensionnement des chaussées à trafic lourd". *Bulletin de Liaison*, Supplément au n° spécial B, 1965.
12. K. KUCERA: "Der gegenwärtige Stand der Entwicklung von Bemessungsmethoden flexibler Strassenbefestigungen". *Strasse und Autobahn*, n° 5, 1968.
13. O. LLAMAZARES: "La conferencia internacional de Bad Meinberg". *Carreteras*, mayo 1965.
14. — "Sobre el cálculo de pavimentos flexibles". *Revista de Obras Públicas*, enero 1966.
15. K. KUCERA: "Investigación sobre el dimensionado de firmes flexibles en Checoslovaquia". *Revista Informes de la Construcción*, núm. 192, julio 1967.
16. O. LLAMAZARES: "Proyecto de firmes flexibles por el método AASHO". *Revista de Obras Públicas*, julio 1966.
17. *Thickness design asphalt pavement structures for highways and streets*. The Asphalt Institut, 7th edition, 1963.
18. M. RAFIROIU: "Une nouvelle méthode pour le dimensionnement des chaussées souples". *Revue General des Routes*, n° 431, Avril 1968.
19. H. SCHNABEL: "Verinheitlichung und Rationalisierung im Fahrbahndeckenbau". *Strasse und Autobahn*, H. 10, 1965.
20. W. MAUCH: "Standardisierung der Fahrbahnkonstruktionen in Bade-Württemberg". *Strassen und Tiefbau*, n° 1, 1969.
21. C. HUET: "Une méthode d'étude en régime dynamique du comportement visco-élastique des matériaux enrobés". *Bulletin de Liaison*, LCPC, n° 8, París, 1964.
22. I. JAKOVLIEV: Institut du trafic routier de Moscou. (Información personal.)
23. K. KUCERA: "La capacité de portance du sous-sol et ses conversions". *Inzenyrské Stavby*, n°-2, 1968.
24. Canadian Good Road Association: "Pavement evaluation studies in Canada". Proceeding International Conference on struct. design of asphalt pav., *Ann. Arbor*, 1962.
25. Canadian Good Road Association: "Field performance studies of flexible pavement in Canada". Proceeding II. Int. conf. on strut. design of asph. pav., *Ann. Arbor*, 1967.
26. M. KRUKAR and J. C. COOK: *Experimental ring n° 2: A study of untreated, emulsion treated, and asphaltic-cement treated bases, project Y-651*. Volume II. Washington State University Pullman, July 1968.
27. K. KUCERA et M. L. VACHALEK: *La durée de service des chaussées lourdes et la charge répétée*. Rapport de Recherche I-5-31-4/4a, partie I et II, Institut de Recherches du Genie Civil. Bratislava, 1969.