

cálculo racional de firmes flexibles

KAREL KUCERA, Dr. Dipl. Ingeniero

Jefe del Departamento de Firmes del Instituto de Investigaciones
de Ingeniería Civil de BRNO (Checoslovaquia)

sinopsis Expone el autor la necesidad de llegar a un método de cálculo de firmes flexibles que nos acerque a soluciones óptimas en el aspecto económico-funcional. El trabajo es una puesta al día del problema del dimensionamiento, que se define en la breve descripción de ocho métodos actualmente en uso, ilustrada con los correspondientes ábacos o diagramas.

La conclusión del Prof. Kucera es que estos métodos, de base racional o empírica, a pesar de sus diferentes concepciones y datos de partida, ofrecen resultados comparables para el cálculo de espesores del firme.

514-60

presentación

por OLEGARIO LLAMAZARES GOMEZ, Dr. Ing. de Caminos, Canales y Puertos

Los métodos de dimensionamiento de firmes se han perfeccionado notablemente en la última década y se prosigue la investigación hacia una solución definitiva, que nos acerque a la seguridad y a la economía, tema doblemente importante, tanto por el nivel de servicio que las carreteras modernas exigen, como por el carácter de obra lineal que éstas tienen, en la que un ahorro justificado en la sección estructural de la calzada reduce notablemente las inversiones presupuestarias.

Dos escuelas o tendencias se han manifestado en el mundo en torno al problema de cálculo de firmes; entre ellas han surgido posteriormente posiciones intermedias en las que se llega a soluciones eclécticas que tratan de conciliar los resultados de estas dos tendencias: la racional o matemática, sustentada principalmente en la Unión Soviética y Francia —estudios de Ivanoff y de Jeuffroy-Bachelez—; y la experimental de los EE. UU., donde se han destinado cantidades ingentes a tramos experimentales para comparación de secciones resistentes, con variación factorial de sus características. Recordemos, como más importante, el ensayo AASHO, continuado ahora con sus pistas satélites.

Responden en el fondo estas dos tendencias a aptitudes mentales distintas que se reflejan en los procesos de desarrollo y sirven de argumento para el tema tan en boga de los desafíos. Por un lado, el cartesianismo europeo, con el lento proceso del pensamiento, y por el otro, el expeditivo practicismo americano, posible, también hay que decirlo, por los grandes recursos económicos del país.

Pero estas líneas se destinan a la presentación del Prof. KUCERA y su trabajo; sobre él podemos decir que, por su prominente cargo en un país de los más desarrollados de la Europa Oriental, conoce el avance de la técnicas de pavimentos en los países de allende del telón, al mismo tiempo que, por su función vocacional, ha seguido el desarrollo de los métodos occidentales de dimensionamiento.

Fruto de todo ello ha sido el método checoslovaco que lleva su nombre, en el que se coordinan criterios teóricos y resultados experimentales y cuyas líneas esenciales se dieron ya a conocer en estas páginas (núm. 192, de julio de 1967).

La Dirección General de Carreteras, ante la necesaria revisión de la Instrucción española para el dimensionamiento de pavimentos flexibles, ha querido conocer las opiniones de este ilustre especialista en el tema y tal ha sido el motivo de su venida a nuestro país.

Por su interés, y a petición de muchos de sus oyentes, se publica ahora la conferencia in extenso.

En ella se describen, breve y claramente, ocho métodos de dimensionamiento —empíricos y racionales—, llegando a la conclusión de que, pese a los diferentes conceptos de base y a los diferentes índices representativos de sollicitaciones y características, los resultados son comparables.

Falta comprobar la eficacia de los métodos a largo plazo, o sea, el comportamiento de las secciones por ellos definidas a través del periodo de servicio para que fueron proyectadas.

El Prof. Kucera puso también de manifiesto la necesidad de que siga la investigación, con una normalización de características y parámetros que permitan una homogénea comparación de resultados y una solución definitiva de los problemas de dimensionamiento.

La recopilación de datos y un fértil intercambio de información y experiencia, a nivel internacional, serán muy beneficiosos para el progreso de los métodos de cálculo de pavimentos, cuya necesidad es bien notoria, dado el auge de construcción de nuevas carreteras y autopistas.

Introducción

El incremento progresivo del tráfico, y en especial de las cargas por eje, crea grandes problemas de conservación para evitar el deterioro del pavimento y mantenerle con buen índice de servicio.

El problema se plantea actualmente en todos los países desarrollados, donde se llega a una situación crítica que depende del desarrollo industrial y agrícola, por un lado, y de la capacidad de gestión y disponibilidades crediticias de los Departamentos de Carreteras, por otro.

Generalmente, el tráfico, con su efecto destructivo, crece más rápidamente que el acondicionamiento y refuerzo de los pavimentos, y la red se descapitaliza, con las consiguientes pérdidas de rentabilidad en la explotación del transporte.

El deterioro de los vehículos que circulan por carreteras en mal estado, la reducción de velocidad y, por ello, el aumento de tiempos de recorrido, con el menor aprovechamiento del parque de vehículos, son las causas principales de las pérdidas e incrementos en los gastos de transporte.

Por lo que se refiere a la calzada, existen una serie de causas que pueden motivar su degradación y posterior ruina: una prognosis insuficiente de la intensidad del tráfico en el período de servicio asignado al tramo, un aumento, muchas veces abusivo e ilegal, de las cargas por eje o 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 método de cálculo de pavimentos. Respecto al efecto de un eje de 8 Mp, el de 10 Mp es 2,2 veces mayor, y el de 13 Mp, 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., 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 técnica 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, etc., 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, etcétera.

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 divulga-

ción 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 París*, 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. Asimismo, los tres utilizan 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.

El método Shell

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

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

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

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

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/cm². La figura 1 muestra, como ejemplo, uno de estos diagramas, es decir, el diagrama de dimensionamiento para el caso de una explanada de módulo $E_3 = 710 \text{ kp/cm}^2$, 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 Mp. 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 1 a 2 segundos de duración). Si vamos a comparar los valores de los módulos de elasticidad del método Shell con los módulos de elasticidad para 1 segundo, tenemos en la figura 1:

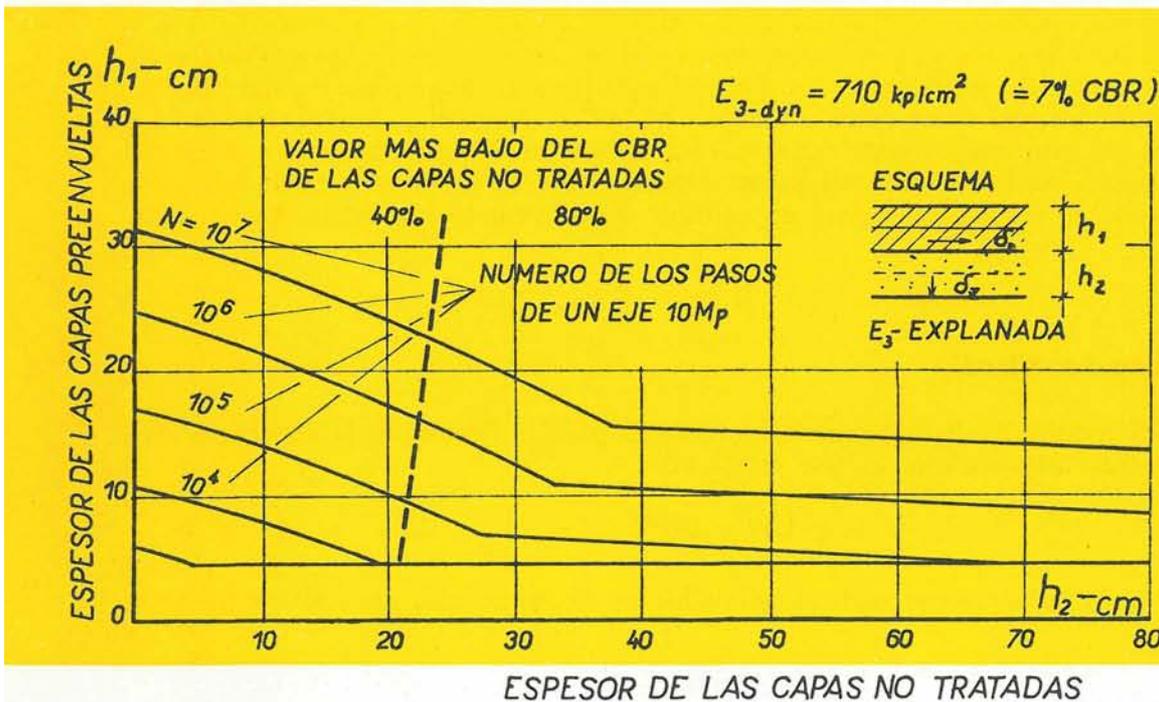
- un módulo de elasticidad de la explanada de aproximadamente 250 kp/cm²;
- un módulo de elasticidad del revestimiento bituminoso de 20.000 kp/cm².

Los esfuerzos admisibles resultantes son:

$$\sigma_r = 0,000145 \times 20.000 = 2,9 \text{ kp/cm}^2 ;$$

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

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 1 segundo, de, aproximadamente, 700 y 1.000 kilopondios/cm², y a los módulos dinámicos de elasticidad de, aproximadamente, 2.000 y 3.000 kilopondios/cm².

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 Método del Laboratorio Central de Ponts et Chaussées de París

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 Mp.

La conversión de los distintos ejes al eje de cálculo se realiza con la ayuda de una tabla de equivalencia deducida del ensayo AASHO.

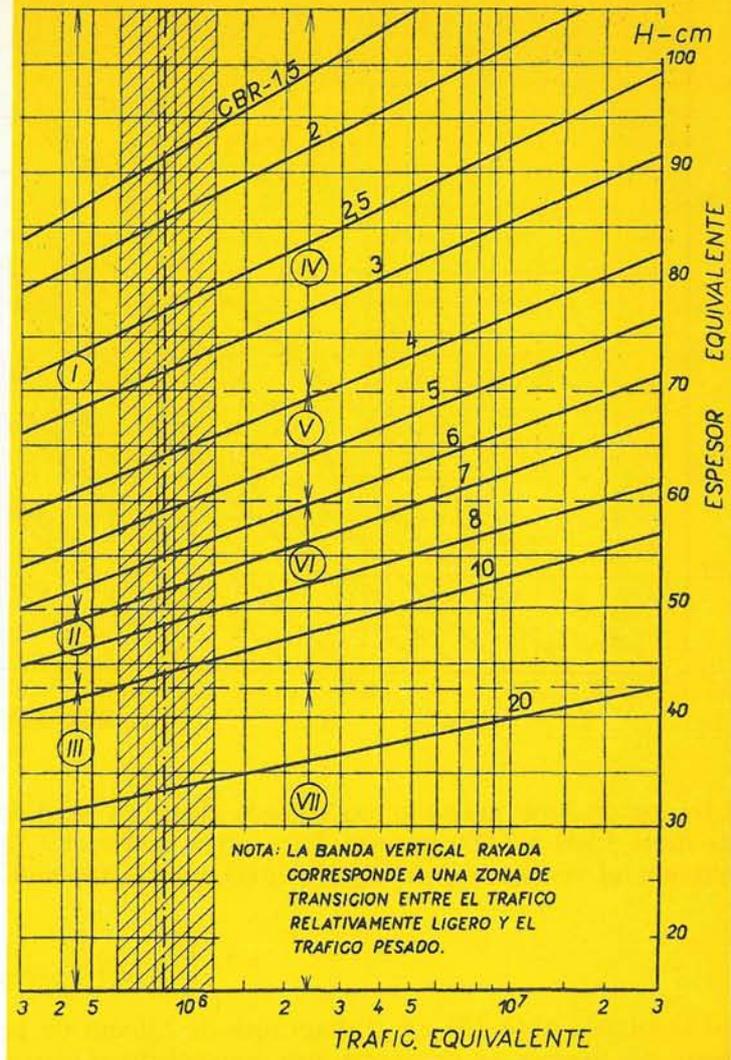


Fig. 2. Diagrama del método francés, que dimensiona el firme a través del índice CBR de la explanada y del tráfico equivalente, expresado en número de pasadas del eje-patrón de 13 megapondios.

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 ²)	1
Base granular con árido natural (módulo a la placa 1.500 kp/cm ²)	0,75
Arena o escoria inerte (módulo a la placa 700 kp/cm ²)	0,50

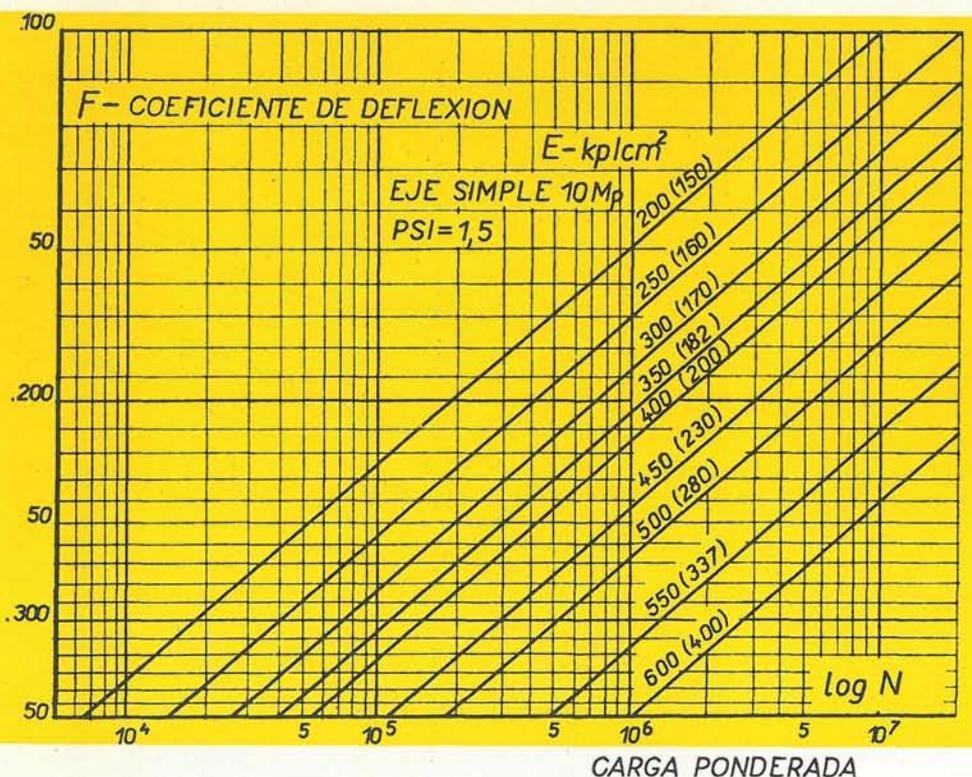


Fig. 3. Dimensionamiento de espesores por el método checoslovaco. Diagrama de correlación del tráfico, deflexiones y módulo de la explanada.

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/cm². Para otros materiales de módulos de elasticidad E_i , podemos obtener el coeficiente de equivalencia por la fórmula:

$$\alpha = \sqrt[3]{\frac{E_i}{5.000 \text{ kp/cm}^2}} \quad [1]$$

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 % Proctor— y determina eventualmente el módulo de elasticidad de las capas con la ayuda de los ensayos de placa de carga, etc.

5 Método 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⁾ y⁽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.

Comparando con el diagrama anterior ⁽¹⁵⁾ (fig. 2) resulta un desplazamiento descendente de las curvas a partir de 300 kp/cm² en adelante, es decir, hacia los coeficientes de deflexión más elevados, así como la intersección de las curvas 200, 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 1 segundo, en condiciones estacionales medias que corresponden a las condiciones de los meses de julio y agosto y para una temperatura media de + 15° C. Se ha escogido una duración de carga de 1 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, o sea, 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 Mp son convertidos al equivalente de eje-patrón de 10 Mp. El tráfico se define por el número total de pasadas del eje-patrón durante el período de servicio; en la tabla II figura juntamente con la deflexión admisible para las condiciones checoslovacas.

TABLA II. NUMERO TOTAL DE PASADAS DEL EJE DE 10 Mp Y DEFLEXION ADMISIBLE DEL FIRME

TIPO DE CARRETERA	Volumen del tráfico «N», en millones de pasadas del eje de 10 Mp, y deflexión elástica admisible «Δ _z », en mm, para un período de servicio de:					
	10 años		15 años		20 años	
	N	Δ _z	N	Δ _z	N	Δ _z
Autopista	7,0	0,70	9,0	0,65	11,0	0,60
Carretera nacional:						
— con tráfico pesado	3,5	0,75	5,3	0,70	7,0	0,65
— con tráfico medio	0,9	0,95	1,3	0,90	1,8	0,85
— con tráfico ligero	0,44	1,10	0,68	1,00	0,9	0,95
Otras carreteras:						
— con tráfico pesado	2,8	0,80	4,3	0,75	5,5	0,70
— con tráfico medio	0,7	1,00	1,1	0,95	1,4	0,90
— con tráfico ligero	0,35	1,15	0,55	1,05	0,7	1,00

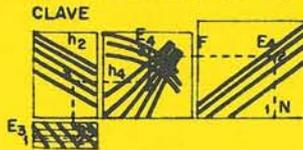
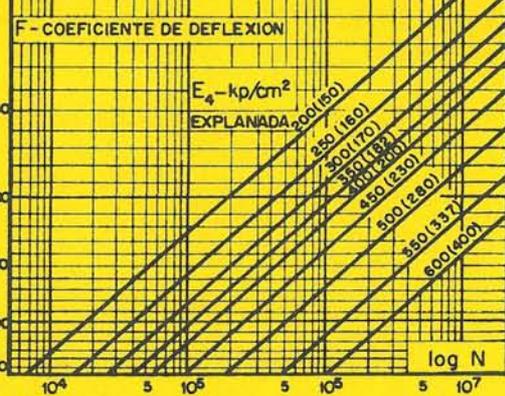
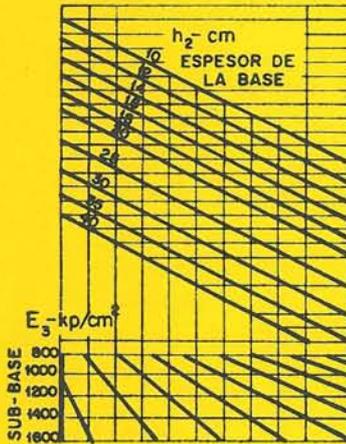
DIAGRAMA PARA EL CALCULO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

A	$E_1 = 30000 \text{ kp/cm}^2$
	$E_2 = 10000 \text{ kp/cm}^2$

SECCION ESTRUCTURAL:

$E_1 \mu_1$	h_1	PAVIMENTO
$E_2 \mu_2$	h_2	BASE
$E_3 \mu_3$	h_3	SUB-BASE
$E_4 \mu_4$		EXPLANADA

DATOS DE PROYECTO
 CARGA POR EJE - 10 Mp
 PRESION DE INFLADO - 6,5 kp/cm²
 INDICE DE SERVICIO (PSI) - 1,5



NUMERO DE PASADAS DEL EJE TIPO

NOTAS :

CALCULO DE ACUERDO CON EL METODO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES PRAGA - 1.965.
 LA CAPACIDAD PORTANTE DE LAS CAPAS DEL FIRME Y EXPLANADA SE DEFINE POR EL MODULO DE ELASTICIDAD CORRESPONDIENTE A UN PERIODO DE APLICACION DE LA CARGA DE 1 SEG. Y CONDICIONES MEDIAS DE TEMPERATURA Y HUMEDAD

Figs. 4 y 5. Representan dos de los cinco diagramas de cálculo del método checoslovaco.

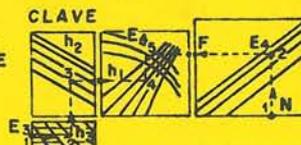
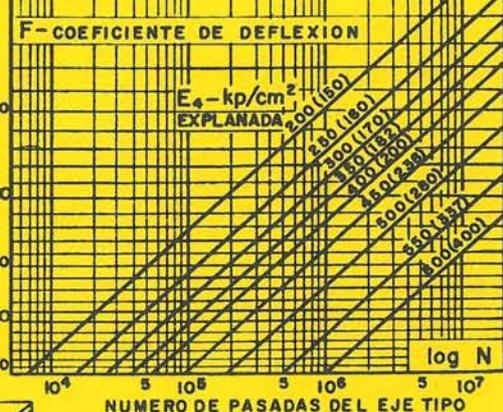
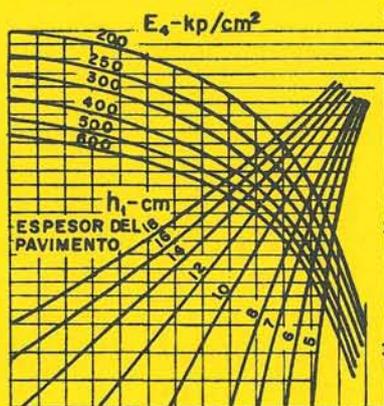
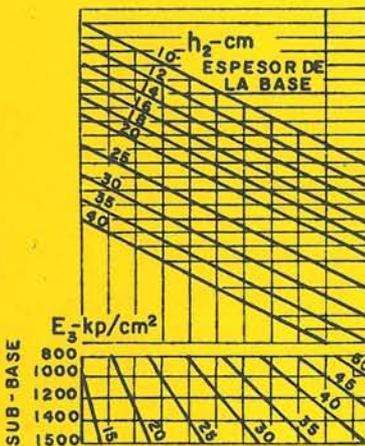
DIAGRAMA PARA EL CALCULO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

C	$E_1 = 25000 \text{ kp/cm}^2$
	$E_2 = 5000 \text{ kp/cm}^2$

SECCION ESTRUCTURAL:

$E_1 \mu_1$	h_1	PAVIMENTO
$E_2 \mu_2$	h_2	BASE
$E_3 \mu_3$	h_3	SUB-BASE
$E_4 \mu_4$		EXPLANADA

DATOS DE PROYECTO
 CARGA POR EJE - 10 Mp
 PRESION DE INFLADO - 6,5 kp/cm²
 INDICE DE SERVICIO (PSI) - 1,5



NUMERO DE PASADAS DEL EJE TIPO

NOTAS :

CALCULO DE ACUERDO CON EL METODO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES PRAGA - 1965.
 LA CAPACIDAD PORTANTE DE LAS CAPAS DEL FIRME Y EXPLANADA SE DEFINE POR EL MODULO DE ELASTICIDAD CORRESPONDIENTE A UN PERIODO DE APLICACION DE LA CARGA DE 1 SEG. Y CONDICIONES MEDIAS DE TEMPERATURA Y HUMEDAD.

Fig. 5

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 ⁽¹⁴⁾ para la más baja capacidad portante admisible de una explanada con módulo de elasticidad anual medio de 200 kp/cm².

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 SEGUN LAS CURVAS DE DIMENSIONAMIENTO DEL METODO CHECOSLOVACO

Módulo de elasticidad del pavimento y de la base	Módulo de elasticidad de las capas para los tipos de firme: (kp/cm ²)					
	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 1 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 (figs. 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/cm² ... mezcla asfáltica de alta calidad;
- 25.000 kp/cm² ... mezcla asfáltica de calidad media;
- 20.000 kp/cm² ... mezcla asfáltica de calidad inferior;
- 15.000 kp/cm² ... mezcla asfáltica abierta en frío.

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

- 10.000 kp/cm² ... grava-cemento de calidad media, hormigón pobre o base asfáltica en caliente;
- 5.000 kp/cm² ... grava-cemento de calidad inferior, suelo estabilizado con betún, base granular de muy buena calidad;
- 8.000 kp/cm² ... 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):

$$F = \frac{\Delta z_v}{\Delta z_c} = \frac{\Delta z_v \cdot E_p}{1,5 \cdot p \cdot a} \quad [2]$$

donde:

Δz_v = deflexión, en cm, del firme bajo la carga de una rueda de 5 Mp.

E_p = módulo de elasticidad de la explanada, en kp/cm².

p = presión de inflado de la rueda (para el eje de 10 Mp, $p = 5,7$ kp/cm²).

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

Para la aplicación de las curvas de dimensionamiento (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* ⁽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, o sea, 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.

La solución 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.

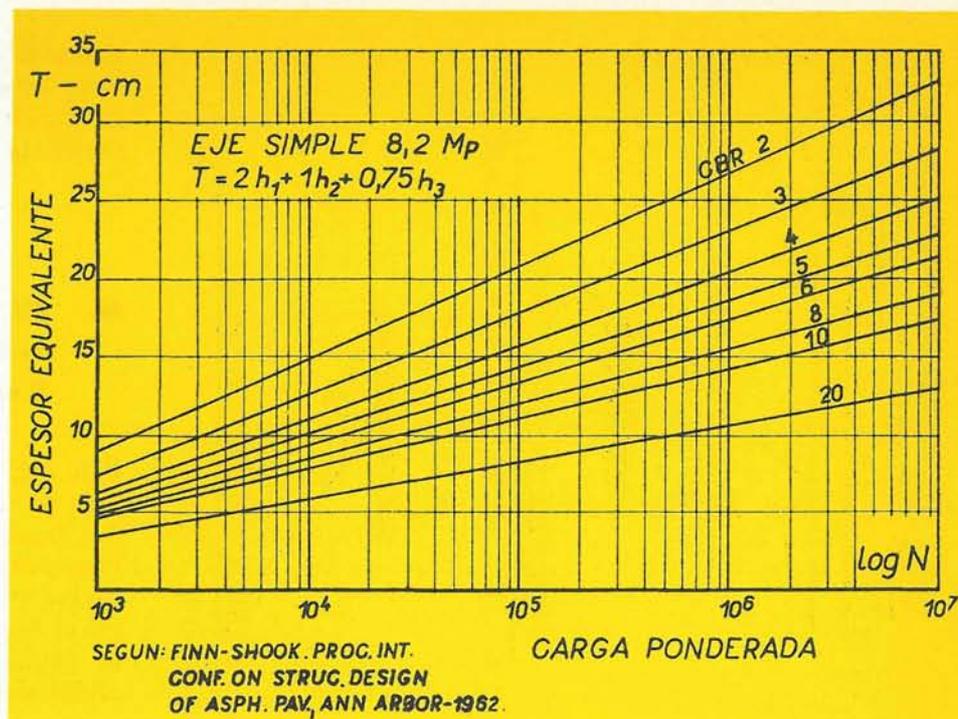
Ya en la primera conferencia de Ann Arbor se presentó una comunicación sobre el tema ⁽¹⁾ y hemos reproducido el diagrama de dimensionamiento en la figura 6. Corresponde a una carga por eje de 8,2 Mp y la ecuación fundamental del espesor equivalente del firme es:

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

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 de Finn y Shook, 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 método de cálculo 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 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 Mp, un índice de servicio, PSI = 2,5, y un período de servicio de 20 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 explanada de CBR = 6, un volumen de tráfico de 1.900 vehículos diarios con una carga por eje de 8,2 Mp y un factor regional de 1,5. El espesor equivalente resultante $D = 13$ cm 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
Total	77 cm		13,33

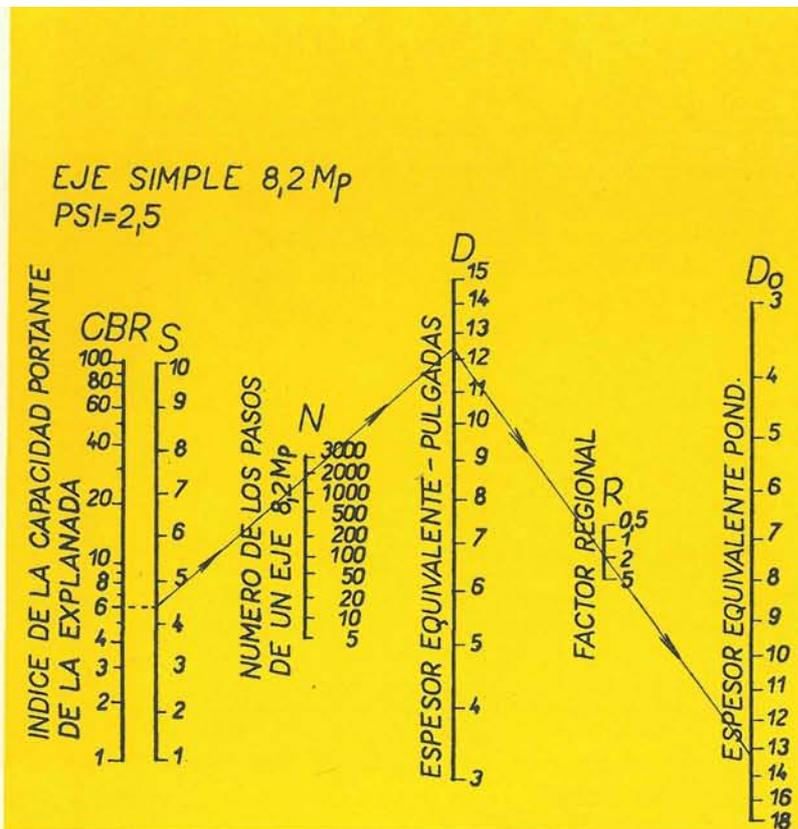


Fig. 7. Abaco de cálculo según el método AASHO para un periodo de servicio de veinte años.

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

8. El método 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.

índice de servicio, PSI = 2,5, al final de este período. La capacidad 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 (fig. 8) y de los coeficientes de equivalencia de las distintas capas que integran la sección estructural del firme.

Está referido a una carga por eje-patrón de 8,2 Mp, un período de servicio de 20 años y un

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.

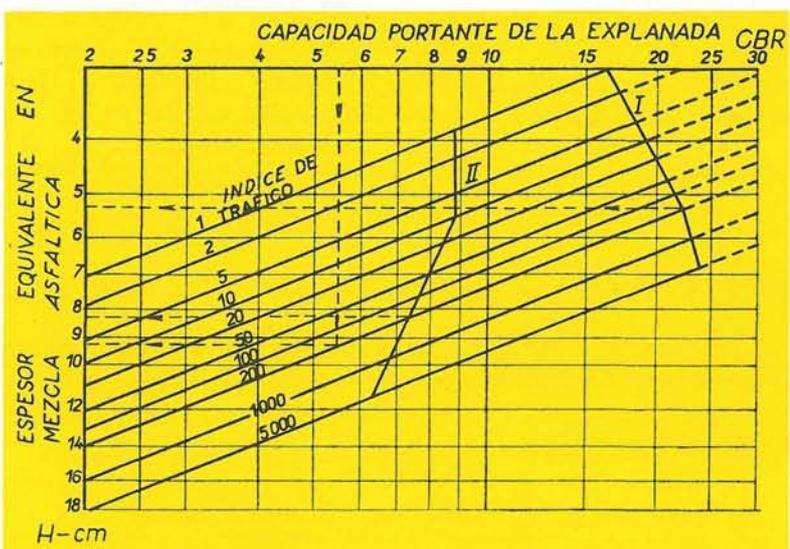


Fig. 8. Abaco de dimensionamiento del Instituto del Asfalto a partir del «Índice de Tráfico» y el CBR de la explanada. Para definir la sección estructural del firme se tienen en cuenta los espesores equivalentes de las distintas capas.

9

El método 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 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.:

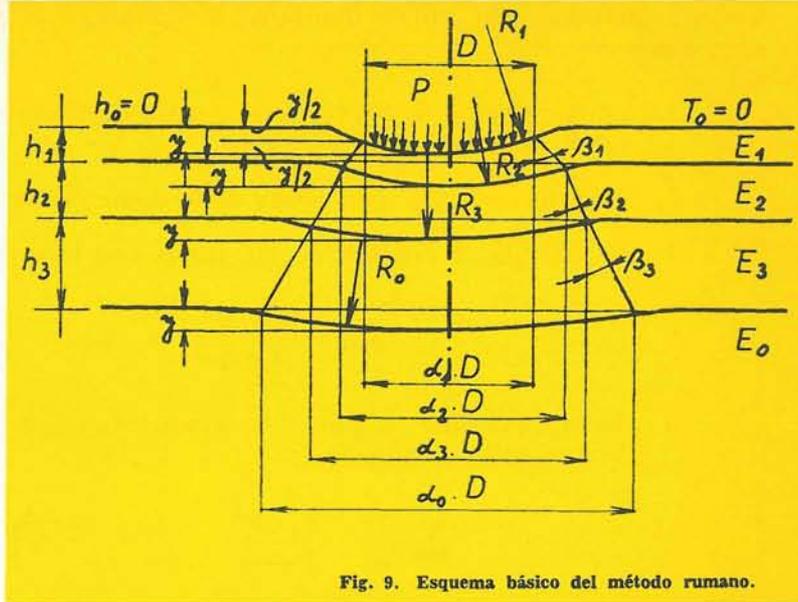


Fig. 9. Esquema básico del método rumano.

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

con la siguiente notación:

P = carga por eje, en kp.

D = diámetro del círculo de apoyo, en cm.

E = módulo de elasticidad de la explanada.

μ_0 = coeficiente de Poisson:

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

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 megapondios.

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:

$$h_{min} = \frac{\alpha_i^2 \cdot D_i^2}{4.000 y} \quad y \quad h_{max} = \frac{\alpha_i^2 \cdot D_i^2}{2.000 y}$$

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

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

Se obtienen los coeficientes α para el cálculo a partir de los ángulos β (fig. 9) con la tabla IV.

TABLA IV. COEFICIENTES β DE DISTRIBUCION DE PRESIONES

Módulo de elasticidad, E (kp/cm ²)	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000	10.000	15.000	20.000	30.000	40.000	60.000
β (en grados)	23	28	32	34	36	44	49	54	60	67	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 República Federal Alemana**

Un buen ejemplo de dimensionamiento simplificado es la normalización de firmes en la República Federal Alemana recogida en la Norma Federal número 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.

TABLA V. DIMENSIONAMIENTO SEGUN LA NORMA DEL ESTADO FEDERAL DE BADEN-WÜRTTEMBERG - StF/68

TIPO DE LAS CAPAS	COMPOSICION	ESPESOR DE LA CAPA EN cm PARA TRAFICO:				
		(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/cm², como mínimo.

Las secciones definidas en la tabla se complementan con una capa de 30 cm 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/cm².

Después de 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 ésta 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 Asphalt Institute, etcétera. 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 módu-

los dinámicos, que para las capas asfálticas tendrán una frecuencia superior a 1 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 1 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 1 segundo como módulo estático, sino más bien como *módulo de deformación*, que es el nombre que se le da en el método francés.

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° 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 de elasticidad que se obtienen en el momento del paso del vehículo; corresponden a duraciones de la carga de 0,05 a 0,1 segundo. Se advierte que en esta zona el módulo varía, para las temperaturas indicadas, entre 30.000 y 350.000 kp/cm².

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 30 a 500 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, 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 /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 cor-

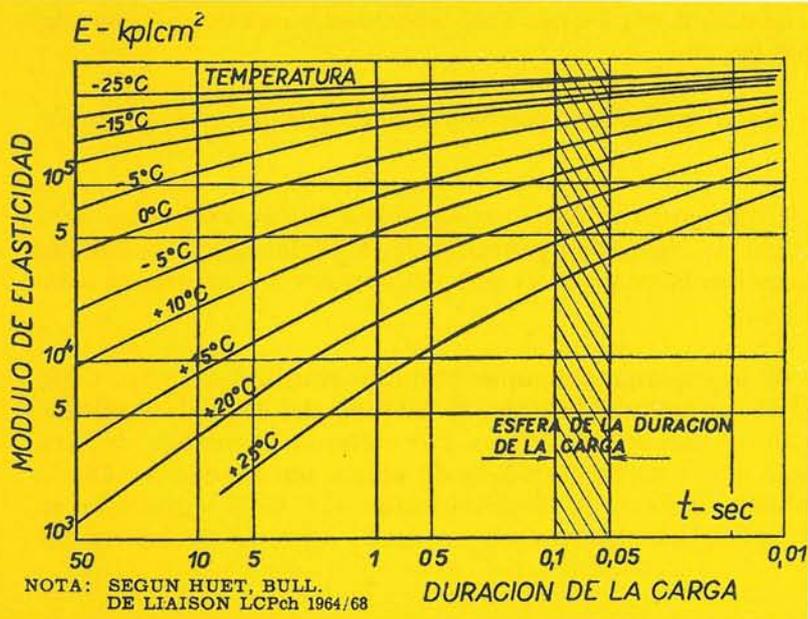


Fig. 10. Relaciona este diagrama el módulo de elasticidad de una mezcla asfáltica con la temperatura y el periodo de aplicación de la carga.

ta duración, comparable al paso de un vehículo a gran velocidad.

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, en 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 expla-

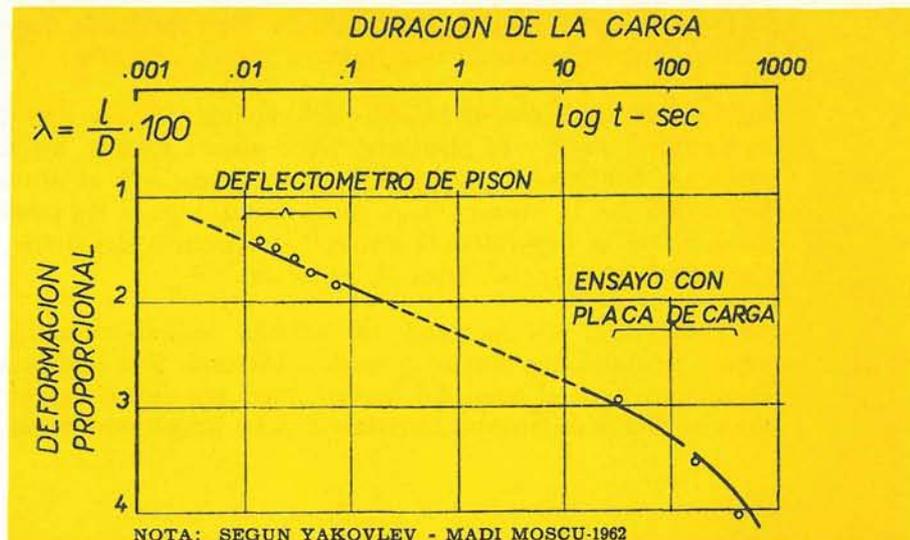


Fig. 11. Diagrama de correlación entre la deformación y el tiempo de aplicación de la carga para dos tipos de ensayo.

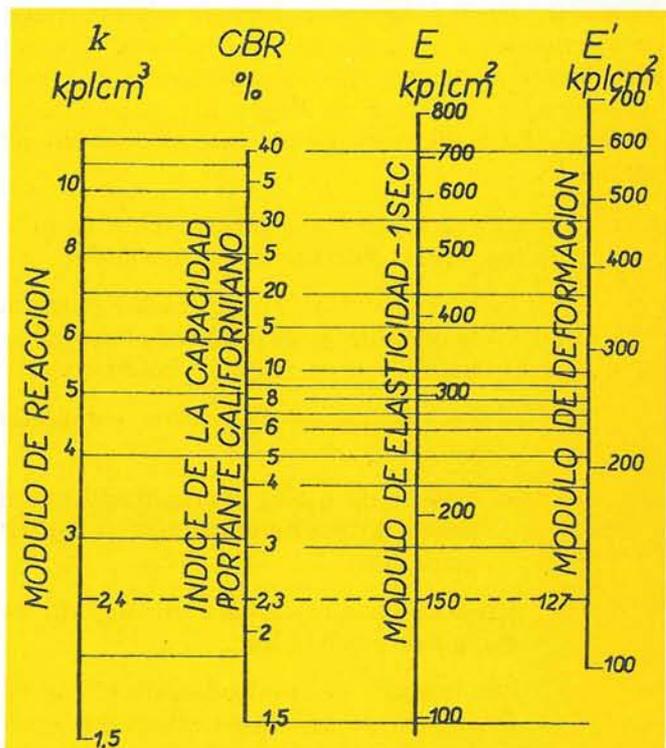


Fig. 12. Correlación entre los índices portantes de los diferentes métodos de dimensionamiento que actualmente se emplean.

nada 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

Conclusión

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 solamente 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 cargas 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 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 5 años.

Dentro de éste se deberán clasificar e interpretar los datos más recientes; por ejemplo, los obtenidos en los llamados *tramos satélites* del ensayo ASSHO 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.

Bibliografía

- (1) *Proceedings of the I International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*. University of Michigan, 1962, Ann Arbor.
- (2) *Proceedings of the II International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*. University of Michigan, 1967, Ann Arbor.
- (3) HIGHWAY RESEARCH BOARD: *The AASHO-Road-Test*, Special Report n.º 61. Washington, 1962.
- (4) H. SCHNABEL - E. NAKKEL: *Zum AASHO-Road-Test*. «Strasse und Autobahn», 1962, H. 11.
- (5) J. BONITZER: *L'essai AASHO et les chaussées souples*. Bulletin de Liaison des Laboratoires Routiers, Spécial n.º «E», 1966.
- (6) H. MITTMAYER: *Der AASHO-Road-Test und die Bemessung von Fahrbahnbefestigungen*. «Strassen und Tiefbau», 1966, H. 4u. 5.
- (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 Ins. Petroleum Co. Ltd., London.
- (11) LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES: *Recommandation pour le dimensionnement des chaussées à trafic lourd*. «Bulletin de Liaison», Supplément au n.º Spécial B. 1965.
- (12) K. KUCERA: *Der gegenwärtige Stand der Entwicklung von Bemessungsmethoden flexibler Strassenbefestigungen*. «Strasse und Autobahn», 1968, n.º 5.
- (13) O. LLAMAZARES: *La conferencia internacional de Bad Meinberg*. «Carreteras», 1965, Mayo.
- (14) O. LLAMAZARES: *Sobre el cálculo de pavimentos flexibles*. «Revista de Obras Públicas», 1966, Enero.
- (15) K. KUCERA: *Investigación sobre el dimensionado de firmes flexibles en Checoslovaquia*. Revista «Informes de la Construcción», 1967, n.º 192, Julio.
- (16) O. LLAMAZARES: *Proyecto de firmes flexibles por el método AASHO*. «Revista de Obras Públicas», 1966, Julio.
- (17) *Thickness design of asphalt pavement structures for highways and streets*. The Asphalt Institute, 7th edition, 1963.
- (18) M. RAFIROIU: *Une nouvelle méthode pour le dimensionnement des chaussées souples*. «Revue Générale des Routes», 1968, n.º 431, Avril.
- (19) H. SCHNABEL: *Verinheitlichung und Rationalisierung im Fahrbahndeckenbau*. «Strasse und Autobahn», 1965, H. 10.

- (20) W. MAUCH: *Standardisierung der Fahrbahnkonstruktionen in Baden-Württemberg*. «Strassen und Tiefbau», 1969, n.º 1.
- (21) C. HUET: *Une méthode d'étude en régime dynamique du comportement visco-élastique des matériaux enrobés*. «Bulletin de Liaison», LCPC, Paris, 1964, n.º 8.
- (22) I. JAKOVLEV: Institut du trafic routier de Moscou (Información personal).
- (23) K. KUCERA: *La capacité de portance du sous-sol et ses conversions*. «Inženýrské stavby», 1968, n.º 2.
- (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 struct. design of asph. pav., Ann Arbor, 1967.
- (26) M. KRUKAR and J. C. COOK: *Experimental ring n.º 2: A study of untreated, emulsion treated, and asphaltic-cement treated bases, project Y-651*. Volume II. Washington State University Pullman, 1968, July.
- (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 Génie Civil, Bratislava, 1969.

résumé ● summary ● zusammenfassung

Calcul rationnel des revêtements souples

Karel Kucera, Dr. Dipl. ingénieur. Chef du Département de Revêtements de l'Institut des Recherches du Génie Civil de Brno (Tchécoslovaquie)

L'auteur rend compte de la nécessité de parvenir à une méthode de calcul des revêtements souples qui nous rapproche de solutions optimales sous l'aspect économique-fonctionnel. Son travail est une mise à jour du problème du dimensionnement, défini dans la brève description de huit méthodes actuellement en usage, illustrée par les abaques ou diagrammes correspondants.

La conclusion du Prof. Kucera est que ces méthodes, à base rationnelle ou empirique, présentent, malgré leurs différentes conceptions et données d'origine, des résultats comparables pour le calcul des épaisseurs du revêtement.

Rational calculation of pavements

Karel Kucera, Dr. Dipl. Eng. Chief of Pavements Dept. of the Brno. Institute of Civil Engineering Research, Czechoslovakia.

The authors states the need to develop a method of designing flexible pavements which approach optimum functional and low cost solutions. This paper brings up to date the problem of calculating the various dimensions of a pavement, and it describes eight methods which are being currently used. Suitable charts and diagrams are also included.

Professor Kucera concludes that these methods, of rational or empirical basis, in spite of their varying initial concepts and data, finally give comparable results regarding the calculation of the pavement thickness.

Rationale Berechnung nichtstarrer Decken

Dr. Dipl. Ing. Karel Kucera. Leiter der Abteilung für Strassendecken im Forschungsinstitut für Ingenieurbau in Brno (Tschechoslowakei)

Der Autor legt die Notwendigkeit dar, zu einer Methode in der Berechnung nichtstarrer Decken zu gelangen, die uns optimalen Lösungen unter ökonomisch-funktionalem Gesichtspunkt näherbringt. Dieser Beitrag stellt eine Neubearbeitung des Problems der Dimensionierung dar, bestehend aus der kurzen Beschreibung von acht zur Zeit gebräuchlichen Methoden, und illustriert mit den entsprechenden Rechentafeln oder Schaubildern.

Prof. Kucera kommt dabei zu dem Schluss, dass diese Methoden auf rationaler oder empirischer Grundlage trotz der unterschiedlichen Konzeptionen und Ausgangsdaten Vergleichs-resultate bieten zur Berechnung der Deckenstärken.