

SOBRE EL CALCULO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

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

Presenta el autor una completa información sobre los métodos de cálculo de pavimentos flexibles, definiendo los de mayor utilidad práctica, perfeccionados de acuerdo con los resultados obtenidos en los tramos experimentales.

El cálculo racional de las escuelas europeas y los grandes ensayos americanos, especialmente el AASHO Test, han permitido la favorable evolución de los métodos clásicos y la puesta a punto de otros de mayor exactitud. Se cita por su facilidad de aplicación la fórmula logarítmica de Peltier en la que se estima de modo más concreto que en los ábacos americanos del CBR la frecuencia del tráfico, tan decisiva para el comportamiento del firme a causa de los fenómenos de fatiga.

El nuevo concepto estructural de la equivalencia de espesores y el análisis comparativo de éstos en casos concretos de firmes proyectados por el autor, figuran en este interesante trabajo de síntesis que, complementado por una amplia lista de referencias monográficas sobre el tema, puede servir de guía para el dimensionado óptimo en el aspecto económico-funcional de un elemento tan decisivo en las obras viales como es el afirmado.

I. Introducción.

Los métodos de cálculo de pavimentos flexibles están en continua evolución y hasta ahora se han considerado en fase provisional, susceptible de mejora a medida que se avanza en el estudio racional del problema y se sistematizan los resultados obtenidos en los tramos de ensayo y en la observación de las carreteras en servicio.

Una paciente investigación coordinada que se beneficia del intercambio de información entre los países de técnica vial más avanzada, ha permitido concretar cada vez más, las magnitudes y efectos de las sollicitaciones del firme, así como la capacidad portante de las distintas capas que lo integran.

El gran crecimiento del tráfico en frecuencia, velocidad y cargas, ha hecho cobrar capital importancia al problema del dimensionamiento de firmes y justifica la colaboración a escala internacional, así como las ingentes inversiones llevadas a cabo en los tramos experimentales, especialmente en los Estados Unidos de América.

Hace cuatro años, publicamos en estas páginas un trabajo sobre los métodos más usados para el cálculo de espesor de firmes flexibles ⁽¹⁾,

informando sobre el estudio racional (métodos de Jeuffroy-Bachelez e Ivanof) y los métodos empíricos y experimentales.

Desde entonces se han producido modificaciones en los métodos clásicos, debidas fundamentalmente a la información obtenida en el ensayo AASHO en el que se prosiguió la investigación iniciada con los tramos experimentales de Maryland y de la WASHO.

La finalidad del ensayo AASHO era obtener una información exhaustiva del comportamiento de varios tipos de firme bajo el efecto de unas cargas perfectamente determinadas en peso y número de pasadas. No se trató en él de obtener firmes resistentes en todos los casos al paso de las cargas, sino de llegar en muchos a deformaciones y roturas, de modo que pudiera conocerse tanto la evolución de los pavimentos de distinta composición, como el período de tiempo que pudieran permanecer en buenas condiciones funcionales, sin una conservación de coste prohibitivo. Se tendió al mismo tiempo a conocer las posibilidades de refuerzo de los tramos en servicio y su capacidad para soportar el tráfico creciente.

Las pistas de experimentación de la AASHO incluían 284 tipos de firme flexible, sobre una

explanada uniforme y soportaron en el período de fin de 1958 a 1961 al paso de 1 114 000 cargas correspondientes a una flota de 126 camiones que recorrieron 27 millones de kilómetros.

2. El cálculo racional de pavimentos.

Los métodos racionales de cálculo de pavimentos se basan en el comportamiento elástico o viscoelástico, siendo este último el que en verdad corresponde a las mezclas asfálticas de las capas superiores. Desde que en el año 1920 Westergaard expuso su método sobre el cálculo de losas de pavimento basado en la teoría de la elasticidad, se han adoptado varias hipótesis para el cálculo elástico de firmes rígidos y flexibles.

La teoría elástica, que es la más sencilla para el estudio matemático del reparto de tensiones en un sólido ideal, no es apropiada para los firmes de carretera integrados por capas de diferente composición y, por tanto, carentes de homogeneidad e isotropía. Influyen, además, en su comportamiento bajo las cargas, las condiciones meteorológicas, especialmente la temperatura en los revestimientos asfálticos.

Como consecuencia de tales circunstancias de imperfección en el citado esquema simplista de cálculo, se propuso el estudio de los firmes flexibles por métodos viscoelásticos que responden mejor a las características reológicas de los materiales y a su comportamiento real en obra sometidos a la acción del tráfico.

Se emplea para el cálculo la noción de viscoelasticidad lineal, que permite reducir el problema del sólido multicapa que es un firme de carretera a un problema de elasticidad, acercándonos a soluciones racionales de dimensionado, estudiados principalmente por las escuelas rusa y francesa.

No obstante y dada la complejidad del planteamiento matemático del problema, no se vislumbra, a corto plazo, una solución definitiva, por lo que es preciso seguir aplicando los métodos empíricos y semiempíricos de dimensionado, cuyo perfeccionamiento en la última década es bien notorio.

3. Aplicación de los resultados del ensayo AASHO.

Siempre que se habla de este perfeccionamiento de los métodos de cálculo de pavimen-

tos, hay que referirse al ensayo AASHO, lo que es prueba patente de su trascendencia en la técnica de carreteras que justifica el gran esfuerzo intelectual, la ejemplar coordinación y el gran desembolso que ha supuesto.

Los resultados de este ensayo se han analizado y valorado sistemáticamente con vistas a su aplicación al dimensionado de firmes en condiciones estructurales y ambientales diferentes a las del tramo experimental americano.

Se ha tratado, asimismo, de atribuir al ensayo algún fundamento teórico en orden a la generalización, al menos, en algunos aspectos parciales del problema. No se ha pretendido buscar una correlación estricta entre los datos obtenidos experimentalmente y los valores que se deducen por aplicación de los métodos racionales de cálculo de sistemas multicapas, sino de contrastar unos con otros a los efectos de interpretar, del modo más genérico posible, el cúmulo de resultados de las pruebas realizadas, especialmente en lo que se refiere a la influencia de la repetición de las cargas.

En este aspecto de generalización de resultados del ensayo con vistas a su aplicación en el dimensionado de pavimentos flexibles, confirmando los valores deducidos del cálculo racional, merecen citarse los trabajos del profesor checoslovaco Kucera ⁽²⁾, del Instituto de Investigaciones de Ingeniería Civil de Bratislava.

En el proceso operatorio de Kucera, el suelo de la explanada y las distintas capas que integran el firme, se definen por sus módulos de elasticidad. En la explanada se suponen las condiciones más desfavorables de capacidad portante, o sea, la que corresponde a la máxima humedad.

El tráfico se caracteriza por el número de ejes pesados que pasarán durante el período de servicio del tramo; por ejemplo, 10 millones en una autopista para un período de quince años.

El método se basa en la teoría de Burmister para un sólido bicapa, aplicando un factor de corrección, *coeficiente de deflexión*, para el sistema de cuatro capas que es el caso general de los firmes actuales con pavimento, base, subbase y explanada.

Se ha tabulado el *coeficiente de deflexión* en función de dos tipos de parámetros:

- los *parámetros de espesor* que son los cocientes entre el radio del círculo de contacto de la rueda y los espesores de las distintas capas, y

— los *parámetros de calidad* o cocientes de los módulos de elasticidad de las capas contiguas.

Un diagrama establece la relación del citado coeficiente con el tráfico y el módulo de elasticidad de la explanada ⁽³⁾, fijándose también las máximas deflexiones admisibles para las carreteras de tráfico pesado, medio o ligero. Conocido este coeficiente, se puede, con ayuda de una tabla de parámetros, determinar los espesores de las tres capas de firme que ofrecen una solución satisfactoria para la capacidad portante del terreno subyacente y la repetición de las cargas previstas hasta el año horizonte. La fórmula de Burmister que da la deflexión o desplazamiento vertical de la superficie del pavimento en un sistema bicapa, bajo el centro de aplicación de la carga, tiene la siguiente expresión:

$$\Delta_z = \frac{2 p a}{E_2} (1 - \mu^2) F_2 \quad [1]$$

con la siguiente notación:

- p , presión de inflado de la rueda;
- a , radio del círculo equivalente de contacto;
- E_2 , módulo de elasticidad de la capa inferior;
- μ , módulo de Poisson (se toma igual a 0,5).

Esta fórmula se ha extendido al sistema de cuatro capas, introduciendo un nuevo coeficiente de deflexión F_4 que se tabula a partir de los parámetros antes citados.

$$a = \frac{a}{h_1} \quad \beta = \frac{a}{h_2} \quad \gamma = \frac{a}{h_3},$$

$$K_1 = \frac{E_1}{E_2} \quad K_2 = \frac{E_2}{E_3} \quad K_3 = \frac{E_3}{E_4};$$

h_1, h_2 y h_3 son los espesores de pavimento, base y sub-base. Los valores de estos parámetros oscilan entre:

$$a \text{ de } 1 \text{ a } 3 \quad \beta \text{ de } 0,5 \text{ a } 1,5 \quad \gamma \text{ de } 0,5 \text{ a } 1;$$

$$K_1 \text{ de } 2 \text{ a } 14 \quad K_2 \text{ de } 2 \text{ a } 10 \quad K_3 \text{ de } 1 \text{ a } 10;$$

Los valores del coeficiente F_4 que figuran en la tabla varían entre 0,027 y 0,429.

El gráfico que se acompaña relaciona este *coeficiente de deflexión* con el *índice de espesor*, valor este último derivado del ensayo AASHO, que definiremos más adelante y que pone de manifiesto la calidad de las distintas capas inte-

grantes del firme. En este índice están implícitos los parámetros de espesor y calidad que definen el coeficiente.

En el cuadro figura también una correlación con el tráfico, definido por el número de ejes pesados que pasarán durante el período de servicio del tramo. Para aclarar lo expuesto, incluimos un ejemplo de dimensionado.

Datos.—Tramo de autopista para 10 millones de pasadas de ejes pesados.

Módulo de elasticidad de las distintas capas:

Pavimento de mezcla asfáltica ...	$E_1 = 40\ 000$	kp./cm. ²
Base asfáltica	$E_2 = 7\ 000$	»
Sub-base granular	$E_3 = 1\ 350$	»
Explanada	$E_4 = 450$	»

Se supone que el valor del módulo de la explanada puede reducirse a la mitad en primavera por la humedad.

La máxima deflexión admisible para una autopista de tráfico pesado es 0,65 cm.

Particularizando la fórmula análoga a la [1] para el sistema de cuatro capas tenemos:

$$0,65 = \frac{1,5 \times 5,7 \times 16,7}{225} 0,7 \cdot F_4;$$

$$F_4 = 0,150$$

Los módulos de calidad son:

$$K_1 = \frac{40\ 000}{7\ 000} = 6;$$

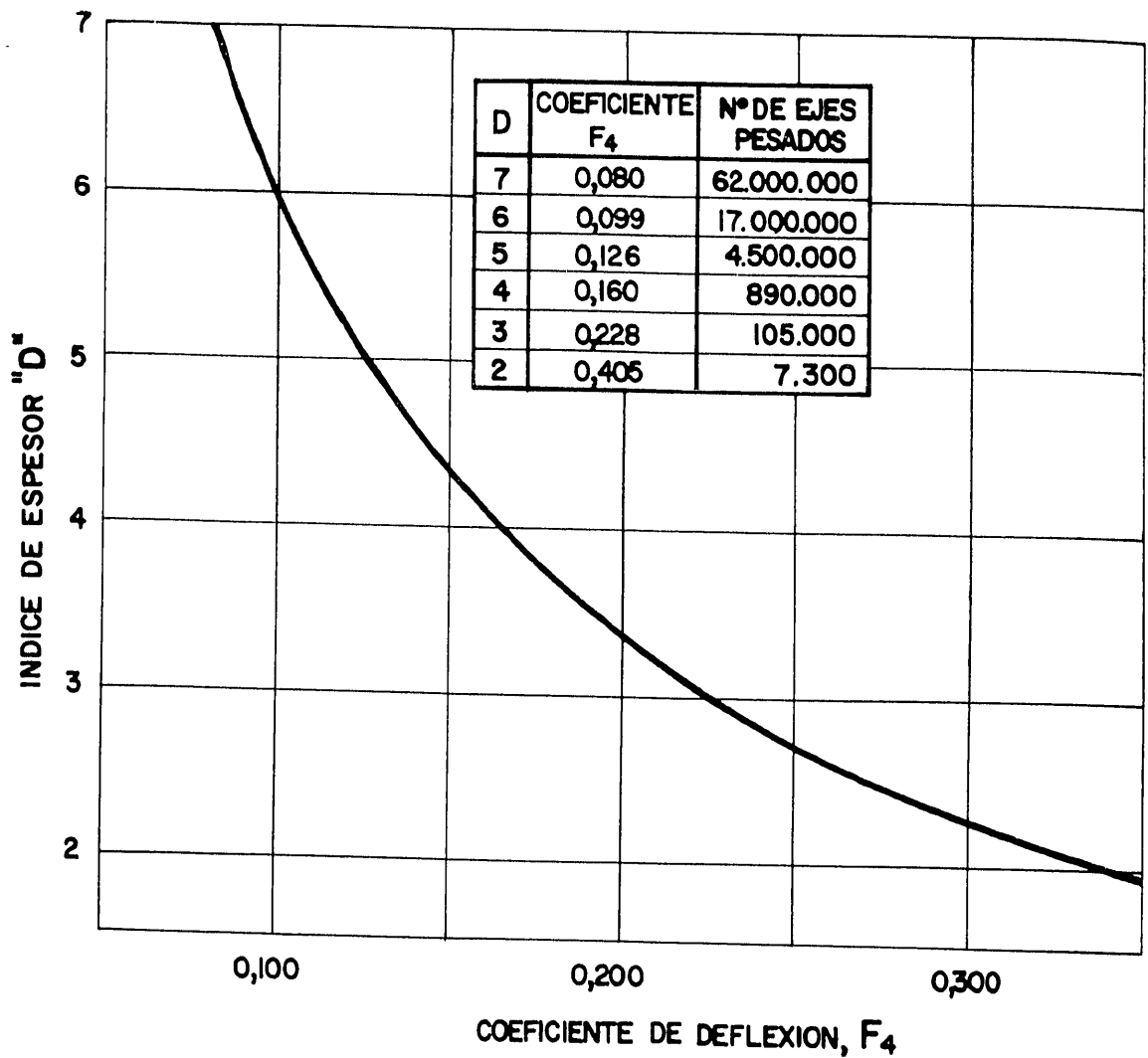
$$K_2 = \frac{7\ 000}{1\ 350} = 5;$$

$$K_3 = \frac{1\ 350}{450} = 3$$

El radio del círculo de contacto es 16,7 cm., y de acuerdo con este valor se fijan los parámetros de espesor: α de 1 a 2, β y γ igual a 0,5.

En la tabla que da el coeficiente de deflexión para el sistema de cuatro capas, entramos con estos datos y obtenemos los siguientes valores de F_4 , en los que se interpola para adaptarlos al antes obtenido (0,150).

	α	β	γ	F_4
	2	0,5	0,5	0,185
	1	0,5	0,5	0,131
Interpolando	1,35	0,5	0,5	0,150



Digrama que relaciona el coeficiente de deflexión para un sistema de cuatro capas con el índice de espesor expresado en pulgadas.

Conocidos los parámetros de espesor, queda resuelto el problema. El firme estará integrado por las siguientes capas:

Pavimento de mezcla asfáltica	$\frac{16,7}{1,35} = 12$	cm.
Base asfáltica	$\frac{16,7}{0,5} = 32$	»
Sub-base granular	$\frac{16,7}{0,5} = 32$	»
Espesor total	76	cm.

La exposición detallada del método, tabla mencionada y gráficos de correlación del ensayo AASHO figuran en las monografías de referencia, a las que remitimos al lector interesado.

4. Los métodos clásicos.

Los métodos de dimensionado más empleados hasta ahora en Europa, han sido sin duda los del *índice de grupo* y del CBR. El primero, puramente empírico, es más apropiado para el cálculo de espesores de vías de poca importancia o como complemento y correlación con los obtenidos a partir del CBR en las de tráfico pesado.

En la aplicación del método del *índice de grupo* es preferible emplear el gráfico de Steele ⁽⁴⁾, que da el espesor descompuesto en sub-base, base y pavimento a partir de este índice portante y de la intensidad de tráfico expresada en este caso por el número de camiones y autobuses. Para su aplicación en España hay que hacer una corrección, debida a que la carga má-

xima por eje autorizada en nuestro país es superior a la que corresponde a los Estados Unidos de 8,25 toneladas; el coeficiente amplificador es:

$$c = \sqrt{\frac{10}{8,25}} = 1,10,$$

Un perfeccionamiento de este método es la corrección por circunstancias climáticas referidas a la altitud del emplazamiento de la carretera y a la lluvia anual.

La corrección por altitud sólo exige incrementos sobre el espesor determinado a partir de 1 500 metros. Los aumentos que corresponden a la precipitación anual sobre el espesor que da el ábaco son:

Lluvia media	Incremento
Superior a 600 mm.	10 cm.
Entre 450 y 600 mm.	7,5 »
Entre 300 y 450 mm.	5 »

En la publicación de referencia ⁽¹⁾ se hizo alusión a las fundadas críticas de este método —que por otra parte es el más usado para el dimensionado de firmes flexibles— especialmente en lo que atañe a la dispersión del índice resistente empleado, para cuya determinación en el laboratorio se recurre a un proceso bastante arbitrario, en el que al menos debe concretarse con mucha precisión la humedad y densidad más convenientes.

Desde el punto de vista práctico, el proceso operatorio más adecuado será el que nos dé un índice y un espesor de él deducido, cuyo buen comportamiento puede comprobarse a lo largo del período de servicio del tramo de carretera en cuestión. El estudio de la correlación entre el dimensionado de cálculo y su suficiencia en obra es muy interesante para el perfeccionamiento del método, y a este respecto debemos citar el loable empeño del Laboratorio de Argel ⁽²⁾, del que se dedujeron resultados sobre la humedad y grado de compactación de las probetas en los que se obtuvo un índice CBR óptimo para el dimensionado.

Se estudió la correlación en cincuenta tramos de carretera, obteniendo con muestras sacadas de la explanada índices CBR, con diferentes humedades y compactaciones referidas al Proctor modificado. La aplicación del método para los índices obtenidos en cada caso, dio diferentes espesores de firme y se comprobó con carác-

ter dominante que cuando el firme tenía el espesor que correspondía al CBR obtenido sobre una muestra con las siguientes condiciones:

- humedad óptima del proctor modificado;
- densidad del 95 por 100 de éste;

el comportamiento había sido muy bueno, sin fisuraciones en la capa de rodadura ni deformaciones.

Las condiciones indicadas han sido adoptadas en Francia y otros países y M. Peltier las recomienda como insustituibles en la aplicación del método que nos ocupa.

5. La fórmula logarítmica.

Las normas del Road Research Laboratory, publicadas en la conocida Road Note No. 29 ⁽³⁾, han sido objeto de revisión y se publicarán en versión modificada, de acuerdo con las experiencias de correlación en tramos de la red inglesa, a principios de 1966.

La meticulosidad y precisión con que el referido Laboratorio lleva a cabo sus investigaciones, hace de la precitada Nota un documento muy valioso para la estimación de los efectos que las cargas del tráfico y, especialmente su repetición, producen en los firmes flexibles.

Esto indujo al profesor Peltier a modificar su fórmula empírica —deducida de los ábacos americanos del método CBR— introduciendo de manera concreta la influencia del tráfico estimado por el número de pasadas ⁽⁴⁾. Considera que el número representativo de la repetición de las cargas debe intervenir afectado a un logaritmo, ya que la deformación total para un tipo de carga dada, crece en función del número de ciclos de carga según una ley logarítmica.

La expresión de la fórmula es:

$$c = \frac{100 + I^P \left(75 + 50 \log \frac{N}{10} \right)}{I + 5};$$

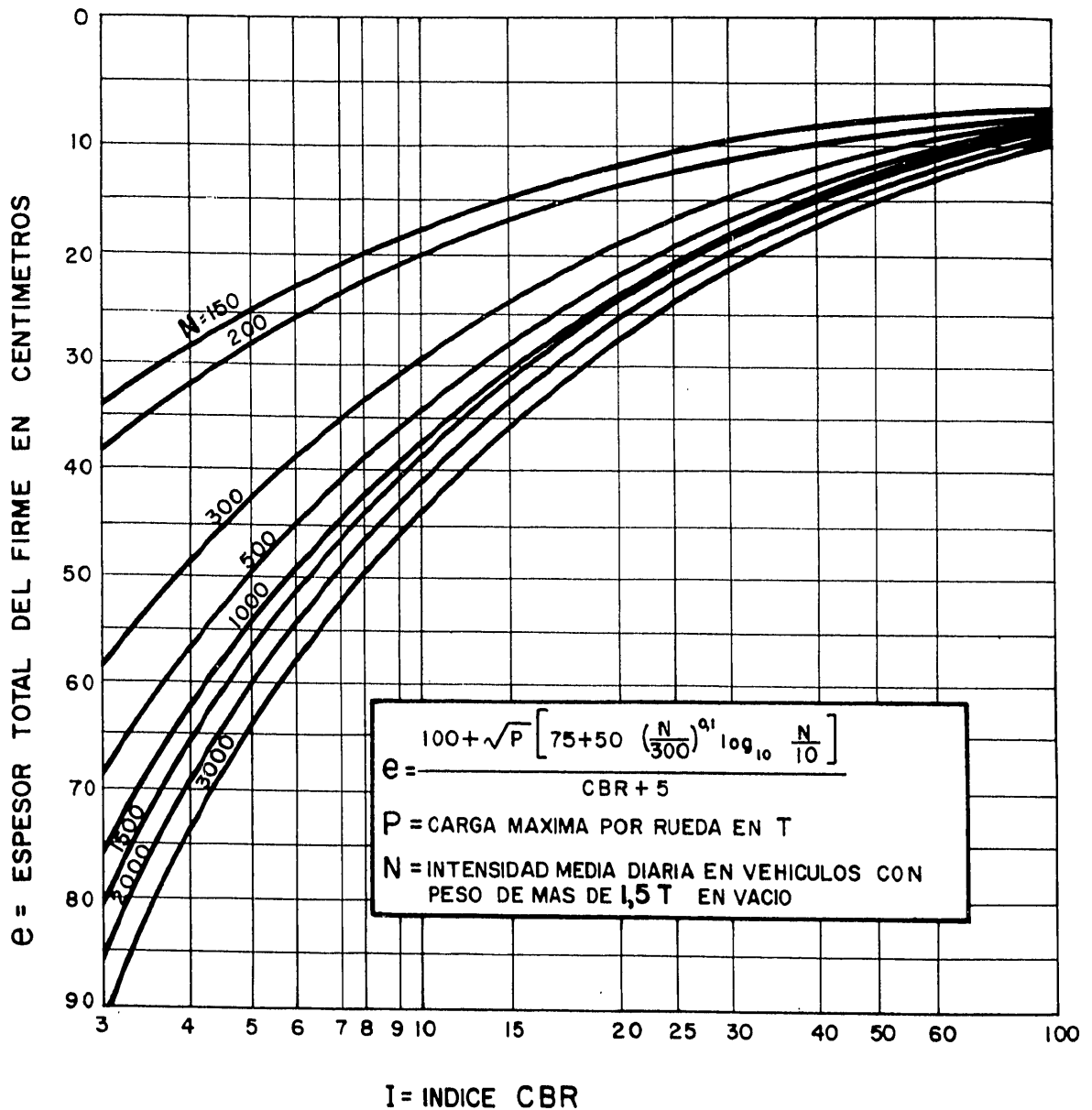
con la siguiente notación:

- c*, espesor total del firme en centímetros;
- P*, carga máxima por rueda en toneladas;
- N*, intensidad media diaria en la que se computan sólo los vehículos con peso superior a 1,5 toneladas en vacío;
- I*, índice CBR;

En el caso de una autopista de dos calzadas la intensidad N es la total, o sea, la que corresponde a los vehículos computables que circulan por ambas.

será el que corresponde al año horizonte del proyecto en cuestión.

La fórmula logarítmica se ha empleado con profusión en los últimos años, principalmente



Curvas de proyecto para aplicación de la fórmula logarítmica (modificada) de Peltier.

Parecerá quizá más lógico tomar el tráfico por calzada, es decir, el que se estime corresponde al carril lento, pero esto también es discutible y, de todos modos, la diferencia entre uno y otro supuesto es pequeña, ya que la frecuencia de las cargas interviene en la fórmula a través de su logaritmo.

El valor de N que se toma para el cálculo

por su mayor concreción en la estimación del tráfico que los antiguos ábacos de The Asphalt Institute, que lo clasificaban de modo simplista en ligero, medio y pesado, considerándose en este último grupo a partir de una IMD de 2 000 vehículos, con lo que como puede verse hay diferencias hasta la de 8 000 que puede canalizar una calzada de dos vías.

Recientemente y como consecuencia de sistemáticos análisis de correlación con los resultados obtenidos en el ensayo AASHO para pavimentos flexibles, se ha comprobado que la fórmula expresada da espesores insuficientes para valores grandes de N , concretamente, cuando el número de pasadas anuales de los vehículos considerados para el cálculo es superior a 300. A la vista de ello se ha propuesto un factor de corrección aplicado al término logarítmico ⁽⁸⁾, con lo que la fórmula se transforma en:

$$e = \frac{100 + \sqrt{P} \left(75 + 50 \left(\frac{N}{300} \right)^{0.1} \log \frac{N}{10} \right)}{1 + 5}$$

Para facilitar la aplicación de la fórmula, hemos preparado el ábaco de la página anterior, en el que figuran varias curvas correspondientes a distintos valores de N .

6. Análisis comparativos.

Los espesores obtenidos con la fórmula logarítmica son superiores a los que se deducen del mismo índice resistente por aplicación de los ábacos de The Asphalt Institute, que son los adoptados para el dimensionado de firmes flexibles en las vigentes normas españolas ⁽⁹⁾.

La razón es la ya apuntada de una estimación más exacta de la frecuencia de las cargas de tráfico.

A continuación figura un cuadro comparativo de espesores dimensionados por tres procedimientos diferentes que corresponden a proyectos de firmes flexibles estudiados por la Oficina Regional de Proyectos de Madrid.

Comprobamos en el cuadro que la fórmula logarítmica da mayor valor que los ábacos y salvo en el primer caso, también los espesores que con ellos se obtienen son superiores a los deducidos por la aplicación del método del índice de grupo. La idea es, sin embargo, que este método es más conservador que los que dimensionan a partir del CBR, parece que tal criterio no es válido cuando se aplica la fórmula logarítmica, aunque quizá también en ello influya el que se ha partido de una carga por rueda de 7,5 toneladas, o sea, con un 50 por 100 como margen de seguridad respecto a la máxima carga autorizada, según prescriben las normas españolas ⁽⁹⁾.

TRAMO	Método del índice de grupo cm.	Método CBR	
		Ábacos de The Asphalt Institute cm.	Fórmula logarítmica cm.
CN-II de Madrid a Francia por Barcelona, p.k. 10,100 al 11,300. Enlace parcial con el Aeropuerto de Barajas. Rampas.	47	41	45
CN-II de Madrid a Francia por Barcelona, p.k. 16,800 al 23,900. Rampas de los enlaces de la Variante de Torrejón de Ardoz	37	30	42
CN-V de Madrid a Portugal por Badajoz. Acondicionamiento entre p.k. 3,600 y 9,500	39	30	41
CN-VI de Madrid a La Coruña, p.k. 38,400 a 40,200. Desdoblamiento y enlace de Villalba:			
Vía principal	36	33	42
Resto de las calzadas ...	36	33	38

7. Equivalencia de espesores.

Los métodos clásicos a que nos hemos referido en el apartado anterior dan un espesor total del firme que es lo que se han llamado *equivalente de grava* y que es susceptible de reducción si se tiene en cuenta la calidad de las capas que lo integran, que por razones de cohesión presentan características resistentes diferenciales. Ya en el método del estabilómetro de Hveem, empleado desde 1948 por la División de Carreteras de California ⁽¹⁰⁾, se consideró el concepto cualitativo apuntado, reduciendo el espesor absoluto de cálculo en función de una escala de valores de cohesión con lo que se tenía en cuenta la resistencia a las deformaciones plásticas de las mezclas asfálticas y bases estabilizadas con ligantes hidráulicos.

El concepto de espesor virtual por el que puede amplificarse a efectos resistentes el geométrico de pavimentos y bases tratadas se ha considerado en las normas españolas de dimensionado de firmes flexibles ⁽⁹⁾, estimándose el coeficiente de equivalencia de las capas asfálticas en 1,5. También se considera su aplica-

ción para las bases de suelo-cemento, aunque se establece una limitación para la reducción del espesor total.

El ensayo AASHO, con su exhaustiva investigación sobre el comportamiento de los firmes de distinta composición, ha aportado una larga serie de resultados que ha permitido concretar en el aspecto cuantitativo el concepto de *equivalencia de espesores*. Se ha introducido la noción del *índice de espesor* dependiente de los espesores parciales e_1 , e_2 y e_3 que definen geoméricamente el sistema tricapa (pavimento, base y sub-base) que es un firme de carretera.

El índice de espesor viene dado por la expresión:

$$D = \sum a_i e_i h_i$$

siendo los coeficientes a parámetros de valor determinado. Estos valores pueden tomarse de datos empíricos correspondientes a la naturaleza, estructura y resistencia de la capa u obtenerse por medio de una fórmula matemática.

En las condiciones que corresponden a los firmes del ensayo AASHO, para espesores en centímetros, la expresión del índice de espesor es:

$$D = 3,14 e_1 + e_2 + 0,75 e_3$$

que suele tomarse en la forma simplificada de suficiente aproximación:

$$D = 3 e_1 + e_2 + 0,75 e_3$$

lo que muestra que un centímetro de revestimiento de mezcla asfáltica equivale a 3 cm. de base granular y a 4 cm. de sub-base.

Estos coeficientes que definen la equivalencia en el aspecto resistente de las capas de distinta calidad que integran un firme, no pueden tener un carácter general, ya que corresponden a las condiciones concretísimas del ensayo en que se obtuvieron. En el concepto de equivalencia de espesores juegan factores climáticos del ambiente, materiales y estructura de las capas y características de la explanada. No debe olvidarse tampoco que los resultados obtenidos en el ensayo corresponden a un período de sólo dos años de duración, además, los vehículos han circulado a velocidad uniforme y sin detenciones, lo que, como veremos, también tiene importancia.

Como consecuencia de estas observaciones, The Asphalt Institute, con criterio conservador, ha adoptado la siguiente fórmula:

$$D = 2 e_1 + e_2 + 0,75 e_3$$

En el método provisional de dimensionado del Laboratorio Central de Ponts et Chaussées de París ⁽¹⁾, se recomiendan los coeficientes de equivalencia que figuran en la tabla adjunta.

TIPO DE LA CAPA	Coefficiente de equivalencia
Mezclas asfálticas en caliente	2
Bases de grava-cemento	1,5
Bases de suelo-cemento	1 a 1,2
Base granular, con módulo en el ensayo de placa de carga > 3 500 barios (*)	1
Zahorra natural con módulo en el ensayo de placa de carga > 1 500 barios	0,75
Arena o escorias con módulo en el ensayo de placa de carga > 700 barios	0,50

(*) Bario o bar, unidad de presión que equivale a la de 750,07 mm. de mercurio, o sea, 1,06 kilopondios por cm².

La fórmula matemática a la que antes se aludió tiene la siguiente expresión:

$$a_1 = \sqrt[3]{\frac{E_1}{5000}}$$

Se recomienda aplicar los valores obtenidos con cierta prudencia, o sea, afectándoles de un coeficiente reductor para mayor seguridad. No obstante, vemos que para una mezcla asfáltica en la tabla se da para el coeficiente de equivalencia el valor 2 del que se deduce un módulo de elasticidad:

$$E_1 = 5\ 000 \times 2^3 = 40\ 000 \text{ Kp/cm}^2.$$

El módulo de elasticidad de los aglomerados densos es bastante superior normalmente al valor obtenido, pero no hay que olvidar que se trata de un material viscoelástico en el que el citado módulo varía notablemente con la velocidad de aplicación de las cargas y con la temperatura ambiente. Esta variación es pequeña para velocidades superiores a 10 Km. por hora; sin embargo, el valor E_1 se reduce considerablemente para el caso de un vehículo parado, sobre todo en tiempo cálido, por esto el coeficiente 2 es prudente.

Lo anteriormente expuesto parece indicar la conveniencia de calcular el espesor, considerando la doble hipótesis de vehículo en marcha y vehículo parado, obteniendo los correspondientes coeficientes de equivalencia para ambos casos en las capas viscoelásticas y dimensionar el firme de acuerdo con el mayor espesor resultante.

8. Consideración final.

No sería justo concluir el presente trabajo sin mencionar los métodos modernos con los que se ha llegado a una mayor aproximación en los cálculos de espesores de firmes flexibles, basándose principalmente en el análisis estadístico de los ensayos en verdadera magnitud y en el concepto fundamental, de ellos deducido de la equivalencia de espesores; citaremos entre estos métodos los más perfeccionados:

- Método de la AASHO.
- Método de the Asphalt Institute ⁽¹²⁾.
- Método provisional del Laboratoire Central de Pont et Chaussées de París ⁽¹¹⁾.
- Método de la compañía Shell.

Pero es preciso hacer constar que la eficacia y el valor práctico de los métodos reseñados se ve notablemente disminuida en nuestro país por la dificultad de estimar una de las variables del cálculo: el índice de tráfico. Para la obtención de este índice es preciso conocer la distribución de los vehículos pesados que circularán en el periodo del servicio del tramo — normalmente veinte años — y su número de ejes divididos en nueve grupos desde los inferiores a 2 toneladas hasta los comprendidos entre 14 y 16 toneladas de los transportes especiales. No existiendo aún básculas de control en muchas carreteras es imposible disponer de los datos necesarios para estimar ese índice, máxime con las dificultades que introduce una prognosis referida a la clasificación de las cargas circulantes.

Es preciso, por ello, en general, recurrir a los métodos clásicos citados, pero buscando siempre la mayor aproximación a la realidad en las bases de partida.

Afinar en el dimensionado de firmes de un tramo de carretera con la discriminación posible en las secciones resistentes que exijan las variaciones de la intensidad del tráfico o de la naturaleza del terreno subyacente, es un deber de todo proyectista que debe siempre huir de una generalización rutinaria en los espesores

cuya infra o supervaloración se traduce, en suma, en una pérdida económica.

Es preciso, por tanto, seguir la evolución de los métodos de cálculo para beneficiarse de su perfeccionamiento y aplicarlos con la mayor propiedad y rigor para lo que es fundamental aproximar los datos de partida con las encuestas y prospecciones necesarias, al mismo tiempo que el ingeniero con un criterio, fruto de la experiencia, ponderará las circunstancias singulares que en cada caso concurren, siempre con vistas a la seguridad y a la economía de la obra.

Referencias.

1. O. Llamazares, "El dimensionado de firmes flexibles en la moderna técnica de carreteras". *Revista de Obras Públicas*. Enero de 1962.
2. K. Kucera, "Die theoretischen Grundlagen des AASHO Road-Testes". *Strasse und Autobahn*. Julio de 1964.
3. K. Kucera, "Die praktische Ausnutzung des allgemeinen AASHO-Memessungsdiagrammes zur Bemessung flexibler Strassenbefestigungen". *Strasse und Autobahn*. Febrero de 1965.
4. O. Llamazares, "Los métodos empíricos para la determinación del espesor de firmes flexibles". *Revista de Obras Públicas*. Agosto de 1958.
5. E. Fenzy, "Etude des méthodes classiques de détermination des épaisseurs a donner aux chaussés et des normes des matériaux des chaussées sous le climat d'Alger". *Revue Général des Routes et des Aerodromes*. París, enero de 1962.
6. "A guide to the structural design of flexible and rigid pavements for new roads". *Road Note Number 29*. Road Research Laboratory. Londres, septiembre de 1960.
7. R. Peltier, "Evolution des méthodes de calcul des chaussées souples". *Revue Général des Routes et des Aerodromes*. París, enero de 1962.
8. J. C. Doubrere, "Application de la theorie de Jeufroy-Bachelez au calcul des chaussées tricouches". *Revue Général des Routes et des Aerodromes*. París, abril de 1965.
9. "Instrucción de Carreteras. Firmes y pavimentos flexibles". Norma 6.1. *IC de la Dirección General de Carreteras*.
10. F. N. Hveem, "Ideas an current problems in pavement design". *Seminar in Asphalt Paving Technology*. Universidad de Berkeley, California, 1957.
11. R. Peltier, "Nouvelles méthodes de dimensionnement des chaussées". *Revue Général des Routes et des Aerodromes*. París, junio de 1965.
12. M. Velázquez, "Un nuevo método para la determinación de espesores de firmes asfálticos". *Revista de Obras Públicas*. Mayo de 1964.