

UN NUEVO METODO PARA LA DETERMINACION DE ESPESORES DE PAVIMENTOS ASFALTICOS

Por MANUEL VELAZQUEZ VELAZQUEZ
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

El autor de este trabajo nos presenta en él, primeramente una breve revision de la historia de los métodos de cálculo de espesores de los pavimentos flexibles, limitada a los antecedentes inmediatos del nuevo método propuesto por el Instituto del Asfalto. Describe después este nuevo método, notablemente diferente de todos los anteriormente utilizados, y termina adaptando los ábacos de proyecto originales a las condiciones españolas.

El Instituto del Asfalto de los Estados Unidos acaba de publicar (septiembre de 1963) un nuevo método para el cálculo de espesores de pavimentos asfálticos.

Hasta ahora, el método que el Instituto proponía se basaba en el empleo de las curvas de proyecto del ábaco de la figura 1.^a.

La clasificación del tráfico utilizada, extremadamente simplista, era la indicada en el cuadro núm. 1.

es función del número y peso de los ejes que circularán sobre el pavimento en proyecto a lo largo de toda su vida útil. Su obtención exige un estudio del tráfico bastante detallado y el establecimiento de hipótesis respecto a su evolución futura.

• • •

El método CBR original no recogía, en modo alguno, la influencia del tráfico, fijando el espesor de la estructura del pavimento exclusivamente en función de la carga máxima previsible mediante curvas como las de la figura 2.^a.

En los últimos años, se ha producido un gran progreso en los métodos de proyecto de pavimentos, debido a la gran cantidad de datos obtenidos de los grandes tramos experimentales de carretera construídos y sometidos a la acción de un tráfico artificial en condiciones perfectamente controladas. Los dos tramos de ensayo fundamentales en este aspecto han sido el WASHO y el AASHO.

El ensayo WASHO costó 900 000 dólares y duró año y medio aproximadamente a partir de noviembre de 1952, tiempo durante el que los vehículos estuvieron circulando sobre las dos pistas de ensayo, dieciocho horas al día y seis días por semana. El suelo era un A4, con un límite líquido de 35 y un índice de plasticidad de 10.

En el ensayo AASHO, que tuvo lugar desde octubre de 1958 hasta diciembre de 1960, los vehículos circularon sobre las seis pistas de ensayo, quince horas al día y seis días por semana. El suelo era un A6. El costo total del ensayo fué de doce millones de dólares, aproximadamente.

CUADRO NÚM. 1.

Clasificación del tráfico	Número diario de automóviles de turismo y camiones ligeros	Número diario de camiones y autobuses
Ligero	25	5
Medio	500	25
Pesado	Ilimitado.	250
Muy pesado	Ilimitado.	Ilimitado.

Como puede observarse, en este ábaco se usaba la utilización del método CBR, ampliamente usado, la del ensayo de placa y la del CBR obtenido con el estabilómetro de Hveem, que el método Hveem-Carmany se aplica a la vez en más estados de los Estados Unidos para la determinación de los espesores de los pavimentos.

Hveem fué de los primeros en introducir sistemáticamente en el proyecto de pavimentos el concepto de fatiga, o sea, de la propiedad acumulativa de los efectos destructivos de las cargas de tráfico, utilizando un índice de tráfico que

La ingente masa de datos recogida en el ensayo AASHO ha permitido un estudio completísimo de la correlación entre la estructura del pavimento y su comportamiento bajo el tráfico.

• • •

de fatiga, es decir, abandonando el procedimiento original en que era la magnitud de la carga máxima el único factor determinante del espesor. Como es sabido, el método CBR se desarrolló originalmente para el proyecto de firmas-pistas de aeropuertos, en los que el efecto

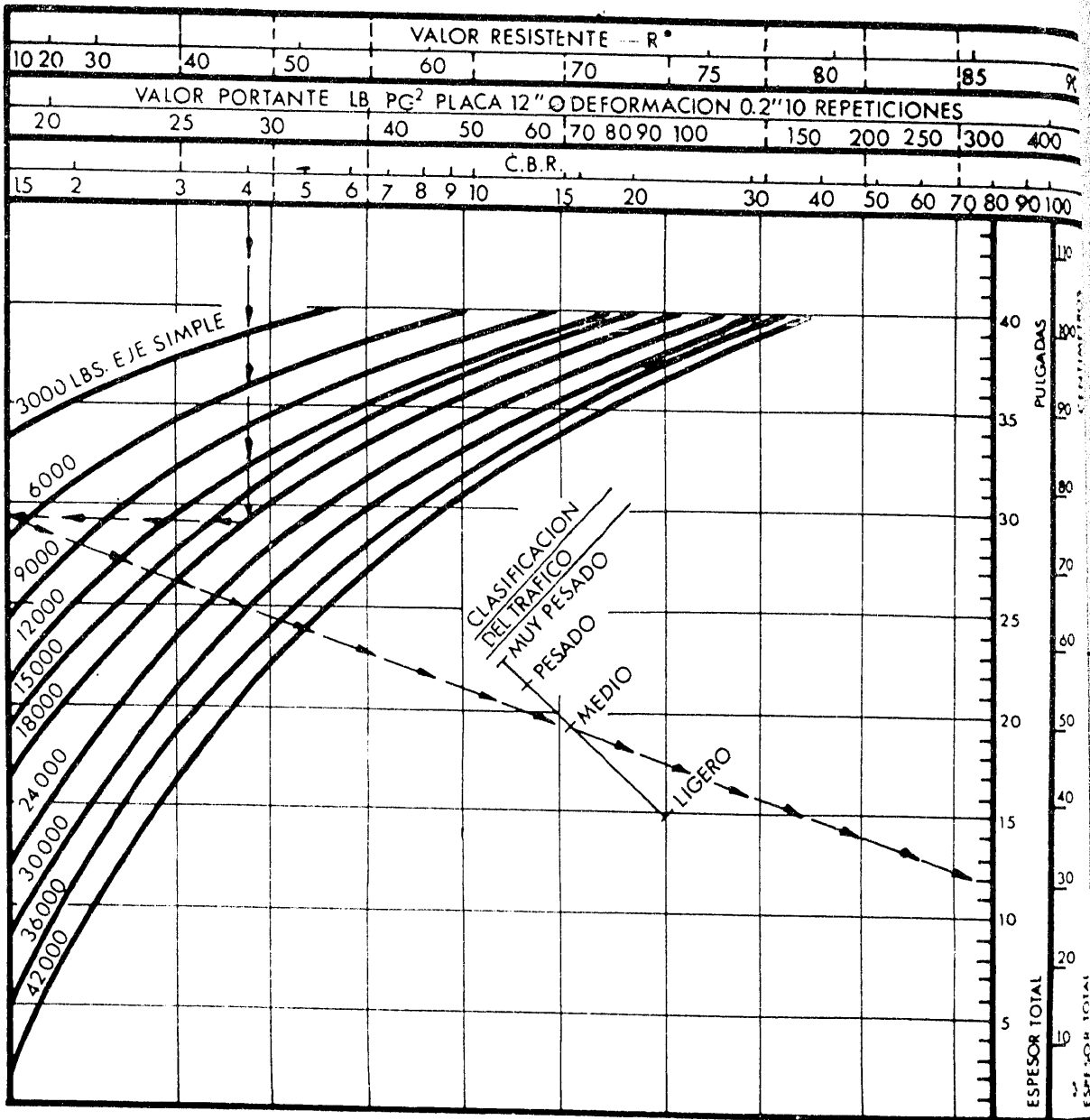
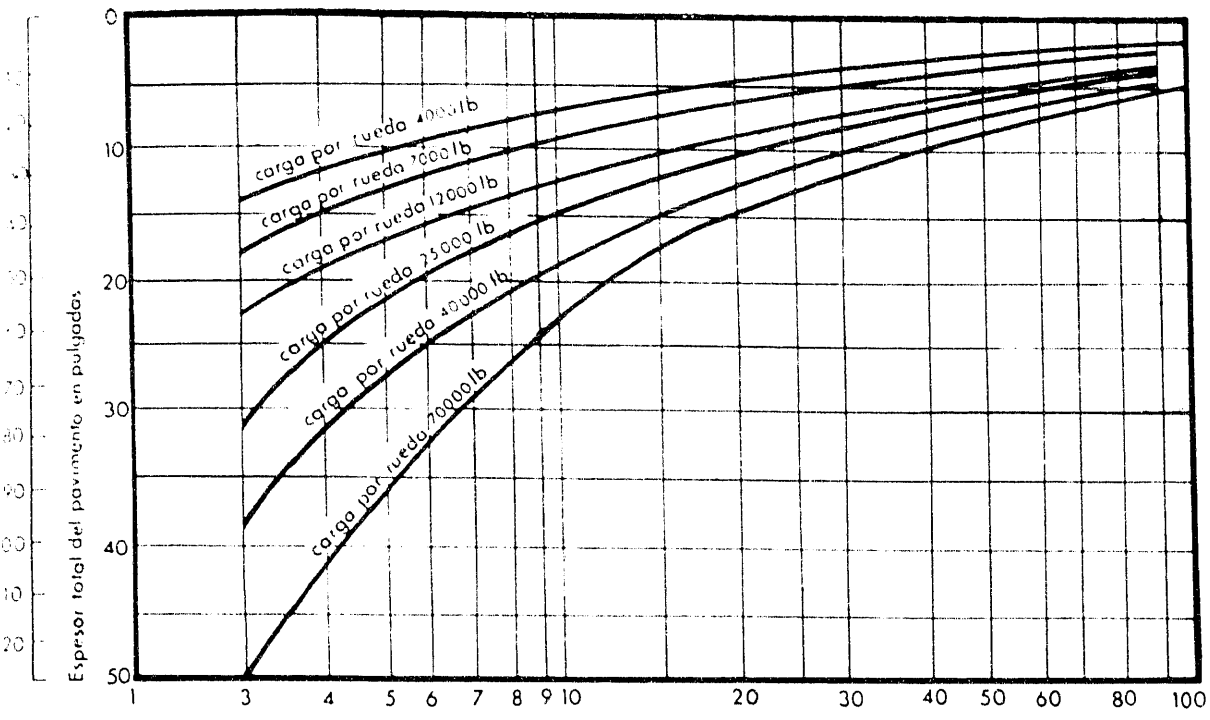


Figura 1.ª

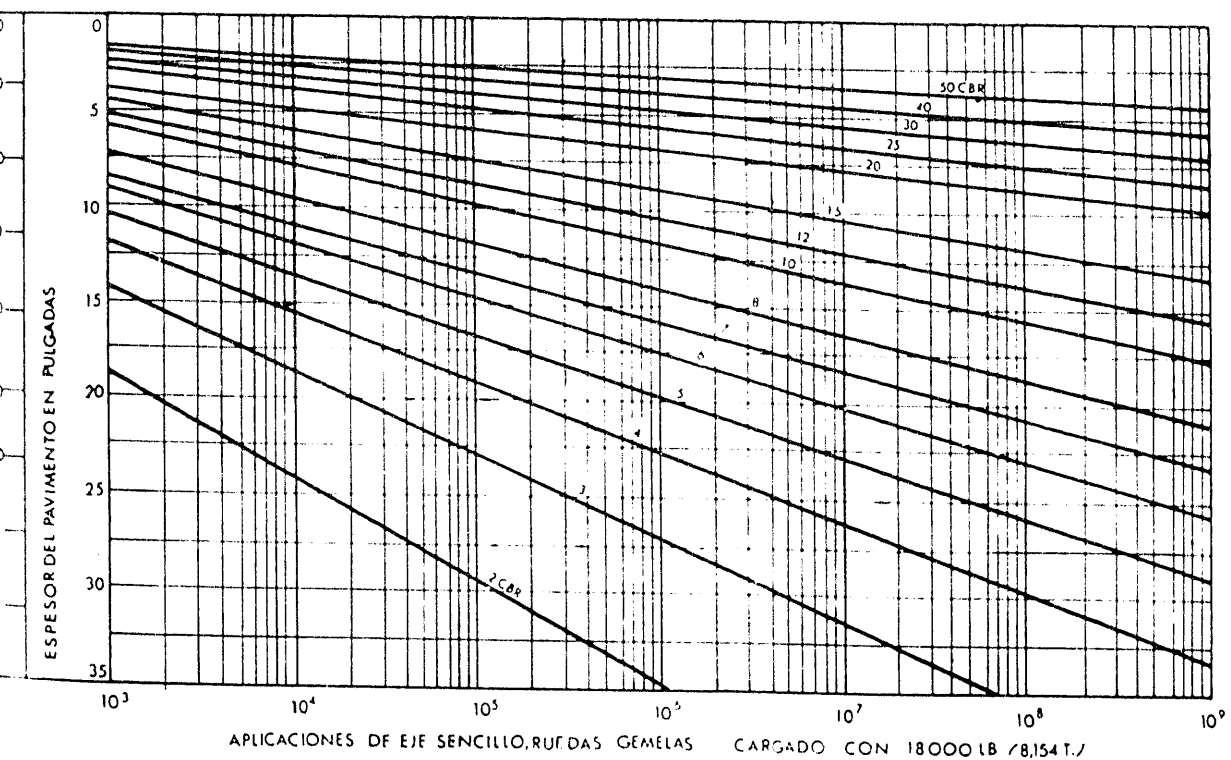
En agosto de 1961, el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos publicó un "Método revisado para determinación de espesores de pavimentos flexibles para carreteras" que esencialmente no es más que el método CBR clásico con la introducción del concepto

de fatiga no presentaba, cuando el método fue estudiado, una importancia que justificara un estudio especial.

El nuevo método para la determinación de espesores de firmas flexibles de carreteras está en el abáco de la figura 3.ª, que da el espesor



C.B.R.
Figura 2.^a



APLICACIONES DE EJE SENCILLO, RUEDAS GÉMELAS CARGADO CON 18000 LB (8,154 T.)

Figura 3.^a

del pavimento en función del número de aplicaciones de un eje simple de 18 000 libras con ruedas gemelas, lo que exige para entrar en el ábaco transformar el tráfico real previsto en un número equivalente de pasadas de un eje de

El estudio WASHO demostró categóricamente algo que ya estaba en la mente de cuantos ocupaban del estudio de los pavimentos: que la flexibilidad de éstos sólo es relativa cuando se componen de aglomerados asfálticos.

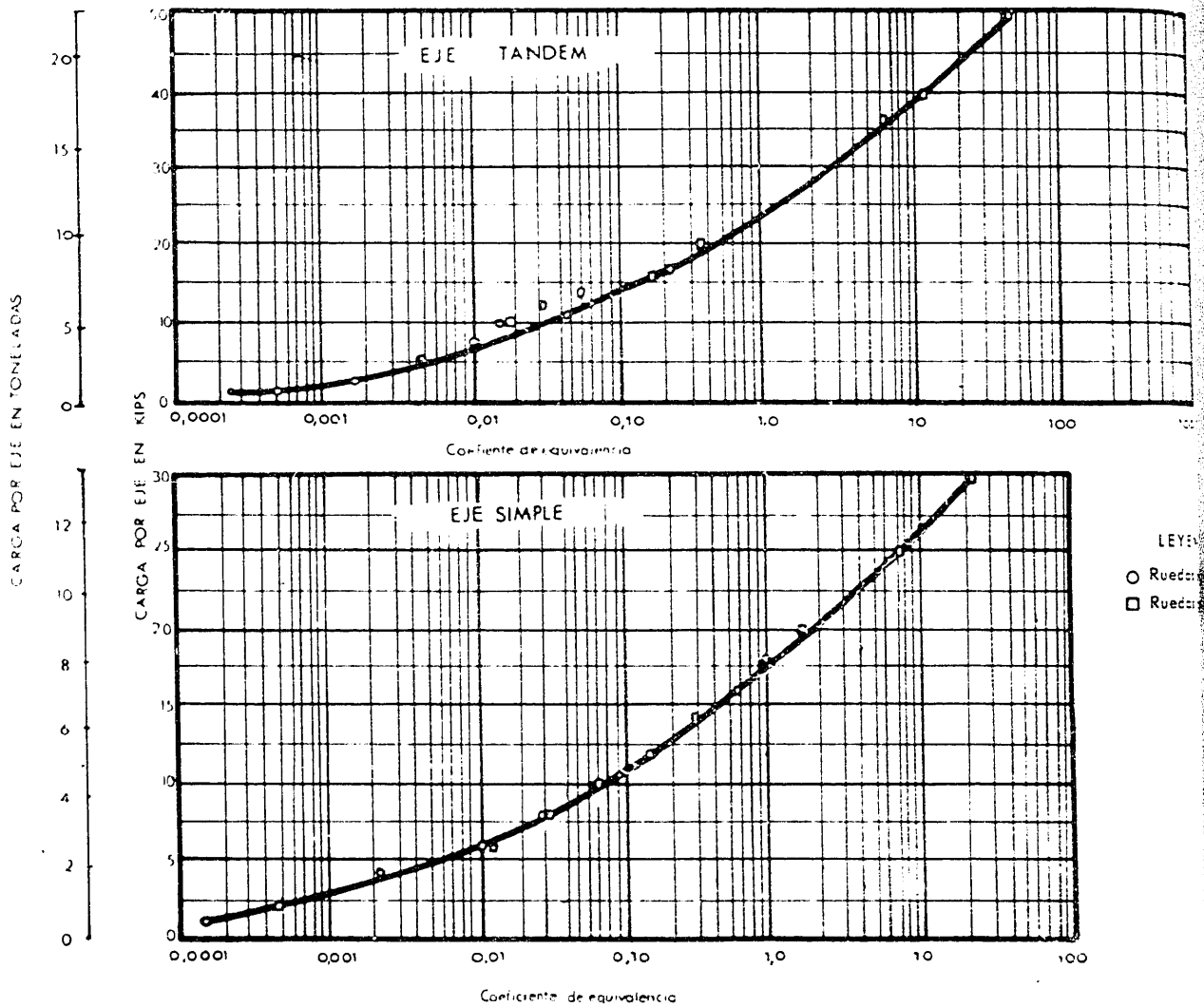


Figura 4.ª

estas características. Para ello, se utilizan las curvas representadas en la figura 4.ª, con cuyo auxilio y con el de una previsión del número de ejes de diversos pesos que circularán sobre el firme a lo largo de toda su vida, puede determinarse el número total equivalente de pasadas de un eje simple de 18 000 libras con ruedas gemelas.

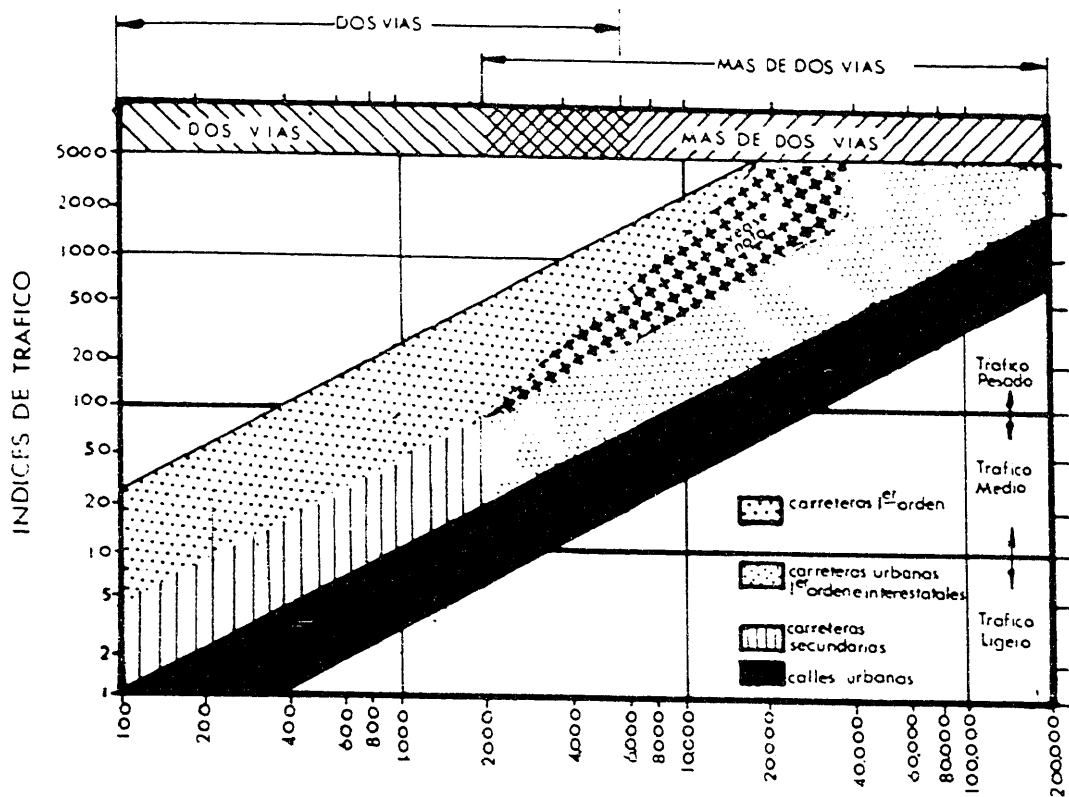
• • •

en caliente de alta calidad, ya que la apreciada resistencia a flexión de este material da lugar a un "efecto losa" que hace que su valor real sea muy superior al que podría deducirse de las teorías clásicas de los firmes de este tipo.

A raíz de la terminación de este ensayo el Instituto del Asfalto y otros Organismos introdujeron un coeficiente de equivalencia entre bases asfálticas y no asfálticas, que inicialmente tenía un valor de 1,50. El ensayo AASHO permit

...mar y ampliar las conclusiones del WASHO
 ...z de su terminación, aquel coeficiente se
 ...ormó en 2,00, es decir, se considera que
 ...centímetro de espesor de una base asfál-
 ...de alta calidad equivale a dos centímetros
 ...espesor de una base no asfáltica.
 ... análisis completo de los resultados obte-

versiones del "Thickness Design" del Instituto,
 el concepto de "fatiga" del pavimento bajo las
 cargas reiteradas, para lo que se introduce un
 "índice de tráfico" en función del cual se deter-
 minan los espesores siguiendo un proceso esen-
 cialmente idéntico al método CBR del Cuerpo
 de Ingenieros.



TRAFICO INICIAL DIARIO (IMD) EN AMBAS DIRECCIONES

Figura 3.^a

...os en el ensayo AASHO ha requerido un
 ...mpo considerable, lo que explica que aun
 ...ra sigan apareciendo en la tecnología de los
 ...mentos novedades que tienen su origen
 ...el.

En la última edición del "Thickness Design"
 Instituto del Asfalto (septiembre 1963) se
 establecen las siguientes equivalencias entre los
 diversos tipos de bases:

...n. de hormigón asfáltico de alta calidad equivale a:
 2 cm. de base granular.
 2,7 cm. de subbase granular.

Definiéndose los materiales de la base y sub-
 base granulares como se indica en el cuadro nú-
 mero 2.

En este nuevo método se recoge también,
 en forma más completa que en las anteriores

CUADRO NÚM. 2.

	Tráfico ligero	Tráfico medio y pesado
<i>Base granular:</i>		
CBR, mínimo	80	100
Límite líquido, máximo.....	25	25
Índice de plasticidad, máximo.....	6	3
Equivalente de arena, mínimo.....	30	50
<i>Subbase granular:</i>		
CBR, mínimo	20	
Límite líquido, máximo.....	25	
Índice de plasticidad, máximo.....	6	
Equivalente de arena, mínimo.....	25	

Este índice de tráfico se define como: "Número medio diario de ejes de 18.000 libras, equivalente a las cargas reales que circularán sobre la *vía de proyecto* durante el *período de proyecto*". Puede determinarse mediante el ábaco de la figura 5.^a, en el que se establece también la nueva definición de "tráfico pesado", "tráfico medio" y "tráfico ligero".

El tráfico diario inicial es el número medio de vehículos de cualquier tipo que circulan en ambas direcciones.

c) El tráfico de las carreteras principales compone usualmente de un 75 por 100 de automóviles y camiones ligeros. Debe utilizarse la parte superior de la franja en las regiones industriales o en las que, por cualquier motivo, sea previsible un número relativamente elevado de camiones pesados.

Naturalmente, estas hipótesis se refieren únicamente a la situación existente en los Estados Unidos, siendo necesaria una modificación para su adaptación a nuestras carreteras.

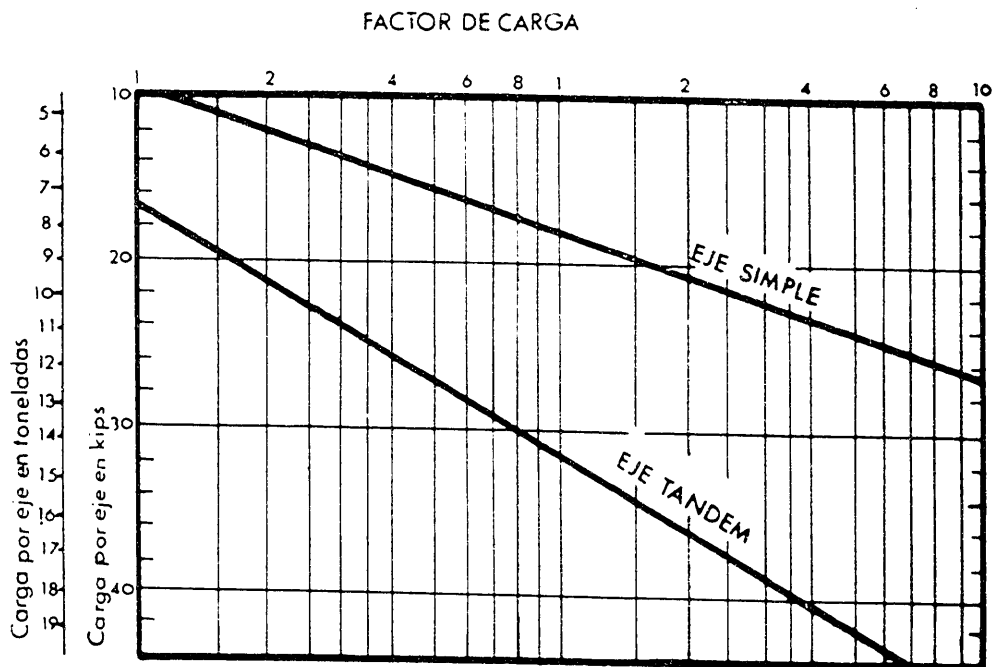


Figura 6.ª

Este ábaco se basa en un *período de proyecto* de veinte años, durante el que se prevé un crecimiento del tráfico equivalente al 80 por 100 del inicial, y está dividido en zonas correspondientes a los distintos tipos de carreteras.

Se hacen las hipótesis siguientes:

a) El tráfico en las calles se compone del 95 por 100 o más de automóviles y camiones ligeros. Debe utilizarse la parte superior de la franja correspondiente a vías urbanas para las zonas de industria ligera y de negocios, y la parte inferior, en las zonas residenciales.

b) El tráfico de las carreteras secundarias se compone usualmente de un 85 por 100 de automóviles y camiones ligeros. Debe utilizarse la parte superior de esta zona cuando se espere que el volumen de camiones con carga pesada sea relativamente grande.

Las diferencias más importantes son las siguientes:

1.ª En nuestro tráfico actual, la proporción de camiones es muy elevada (cerca del 50 por 100 en algunas carreteras).

2.ª El ritmo previsible de crecimiento es superior al 80 por 100 en veinte años. En el Plan General de Carreteras se preveía, para carreteras de tráfico muy intenso, la multiplicación del tráfico por un factor 4 en dieciséis años, lo que en veinte años supone un crecimiento del orden del 325 por 100 en el número total de circulaciones. Los recuentos del tráfico realizados en los últimos años dan un crecimiento medio del 13 por 100 anual, mucho más elevado.

3.ª También se prevé en el Plan que para el año 1977 el tráfico pesado se haya reducido al 10 por 100 del total.

• • •

El índice de tráfico se obtiene mediante la ecuación:

$$I = N C E P$$

de.
 N. Número total de camiones que circulan por la carretera en ambas direcciones en la época del estudio.

C. Coeficiente medio de crecimiento del tráfico en un periodo de veinte años.

E. Coeficiente de equivalencia de cargas que permite reducir el número real de vehículos a un número equivalente de ejes de 18 000 libras.

P. Coeficiente que indica el tanto por uno del número total de vehículos que circulan por la vía más cargada.

El valor N se deduce de los recuentos de tráfico. El valor de C utilizado para la construcción del ábaco de la figura 5.^a fué de 1,40, basándose en que la experiencia americana indica un crecimiento del tráfico en veinte años comprendido entre el 50 por 100 y el 100 por 100. Lo que el coeficiente *medio* de crecimiento de estar comprendido entre 1,25 y 1,50. Se tomó el valor 1,40 como cifra media ligeramente conservadora.

El valor E es determinación más complicada que exige un censo del tráfico y utilizar coeficientes de equivalencia que pueden deducirse de la figura 6.^a.

El método de cálculo es el que se indica en el cuadro que se inserta en esta página, en un ejemplo.

Si el índice de tráfico obtenido considerando solo los camiones es inferior a 10 (tráfico ligero), puede obtenerse un valor corregido utilizando las curvas de la figura 7.^a, para lo que se sigue la curva correspondiente al índice de tráfico obtenido inicialmente hasta cortar a la vertical correspondiente al volumen diario de automóviles de la vía de proyecto, correspondiendo la ordenada obtenida al valor corregido del índice de tráfico.

Los ábacos de las figuras 8.^a y 9.^a dan el espesor total de aglomerado asfáltico necesario, de la forma siguiente:

Se traza la vertical correspondiente al CBR, o al valor portante en placa o al valor resistente R, hasta cortar en P a la línea inclinada, r, correspondiente al valor obtenido para el índice de tráfico. La ordenada del punto de intersección da el espesor total necesario, suponiendo que el

pavimento se compone únicamente, en todo su espesor, de aglomerado asfáltico.

Carga por eje (1 000 lb)	Coefficiente de equivalencia	Ejes por 1,000 camiones	Núm. equivalente de pasadas de un eje simple de 18,000 libras por 1 000 camiones
<i>Ejes simples</i>			
Menos de 8	—	1,135,4	—
8-12	0,11	487,3	53,6
12-16	0,34	282,7	96,1
16-18	0,76	118,6	90,1
18-20	1,31	31,9	41,8
20-22	2,26	2,6	5,9
22-24	3,91	6,5	25,4
24-26	6,74	—	—
<i>Suma parcial</i>			312,9
<i>Ejes tándem</i>			
Menos de 14	—	189,3	—
14-20	0,11	141,6	15,6
20-26	0,27	168,4	45,5
26-30	0,57	99,4	56,7
30-32	0,92	2,6	2,4
32-34	1,25	—	—
34-36	1,70	—	—
36-38	2,33	—	—
38-40	3,15	—	—
40-42	4,36	—	—
42-44	5,88	—	—
44-46	8,15	—	—
<i>Suma parcial</i>			120,2
<i>Total</i>			433,1
<i>Coefficiente E</i>			0,43

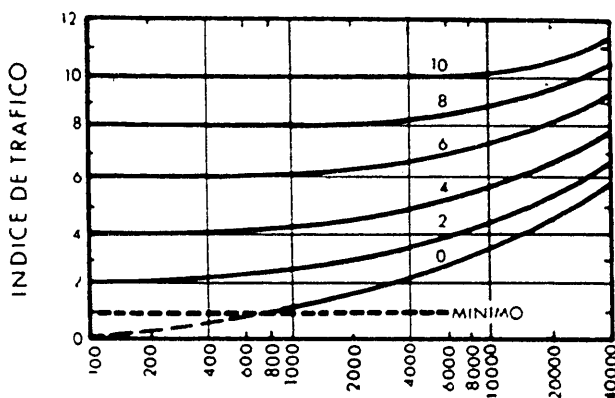


Figura 7.^a

VALOR PORTANTE Kg cm². PLACA DE 12" O DEFLEXION 0.2". 10 REPETICIONES

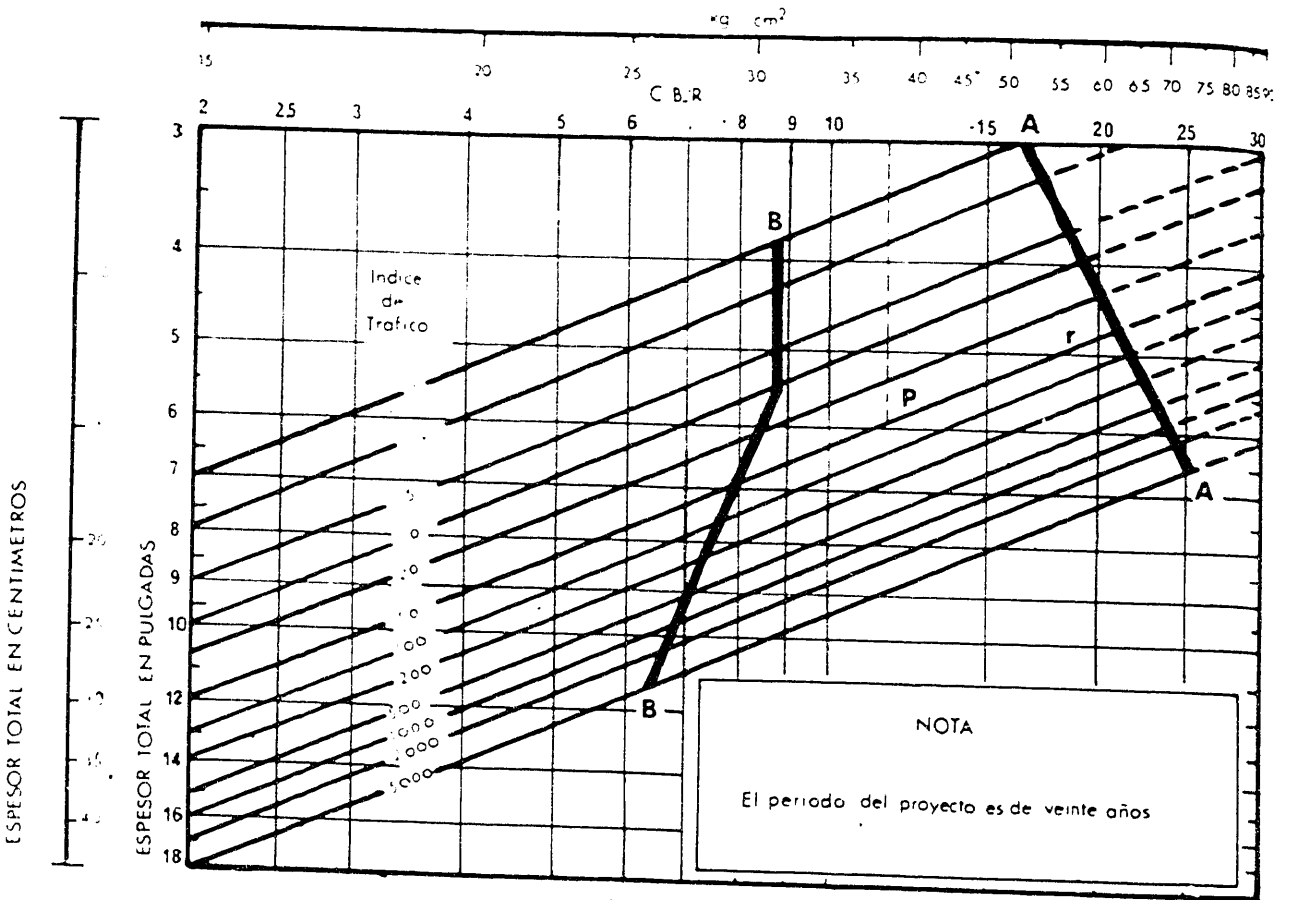


Figura 8.

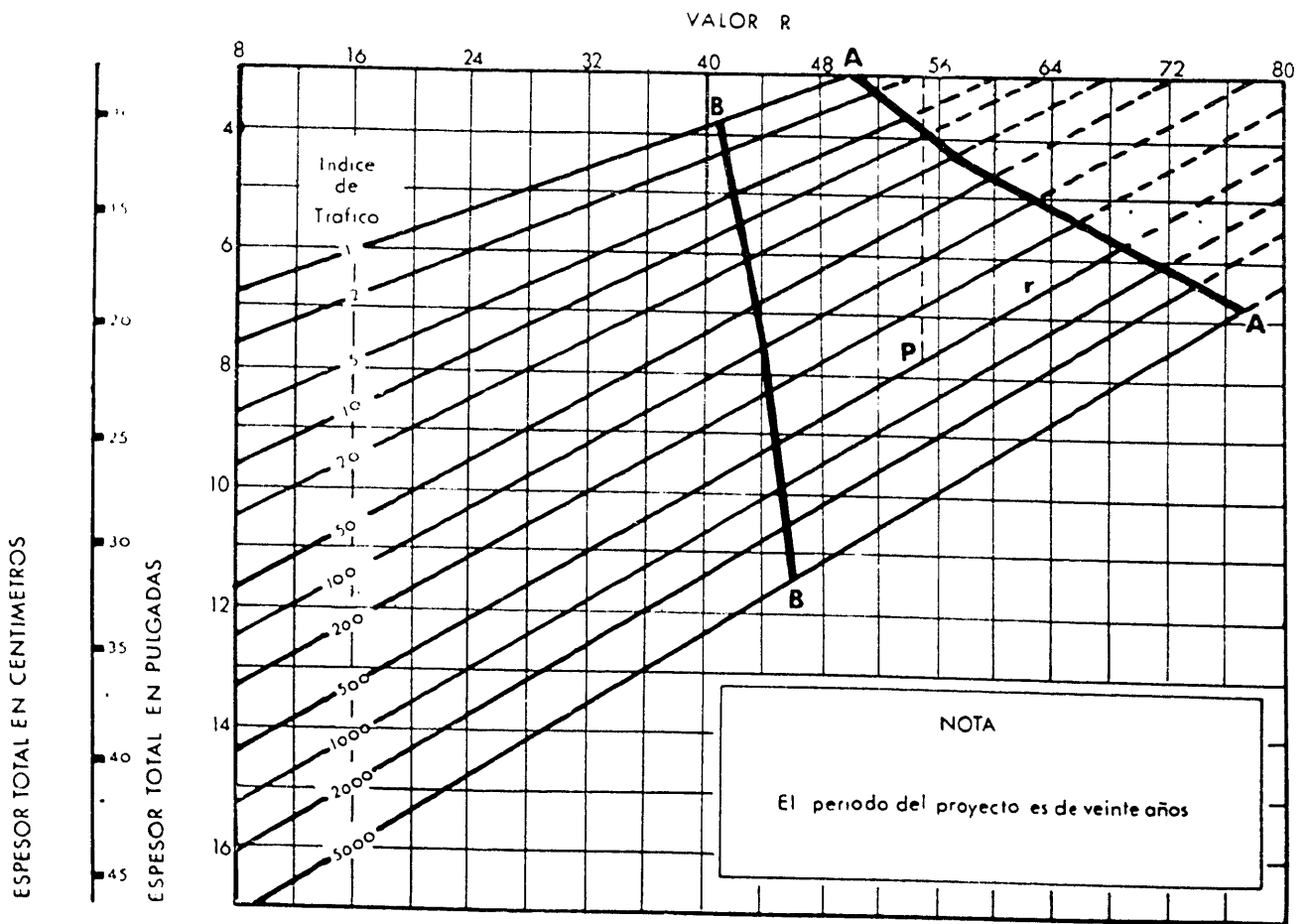


Figura 9.

Si el punto P está a la derecha de la línea AA , el espesor indicado por el ábaco es inferior a los mínimos recomendados, que son los indicados en el cuadro número 3.

CUADRO NÚM. 3

ÍNDICE DE TRÁFICO	ESPESOR MÍNIMO	
	Pulgadas	Centímetros
10 (Tráfico ligero)	1	2,54
10-100 (Tráfico medio)	1,5	3,81
100 (Tráfico pesado)	2	5,08

En este caso se sigue la línea r hasta su intersección con la línea AA , cuya ordenada es el espesor mínimo necesario de hormigón asfáltico.

Si el punto P está comprendido entre las líneas AA y BB (fig. 10), caben las siguientes soluciones:

- 1.º b , cm. de aglomerado asfáltico.
- 2.º a , cm. de aglomerado asfáltico y $2(b-a)$ cm. de base granular.

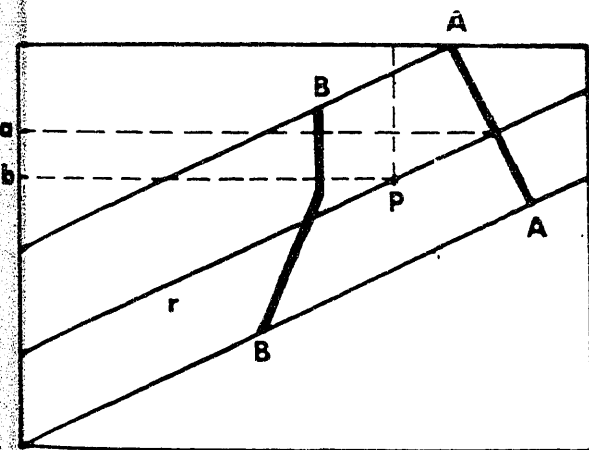


Figura 10.

Si el punto P está a la izquierda de la línea BB (fig. 11), caben las siguientes soluciones:

- 1.º c , cm. de aglomerado asfáltico.
- 2.º b , cm. de aglomerado asfáltico y $2,7(c-b)$ cm. de subbase granular.
- 3.º a , cm. de aglomerado asfáltico, $2(b-a)$ cm. de base granular y $2,7(c-b)$ cm. de subbase granular.

ADAPTACIÓN DEL ÁBACO DE LA FIGURA 5.ª (ÍNDICE DE TRÁFICO) A LAS CONDICIONES ESPAÑOLAS.

Evidentemente, este ábaco sólo debe usarse como medio auxiliar o en estudios preliminares. En los demás casos, y siempre que se estudie una carretera importante, es conveniente proceder a un estudio detallado de las condiciones

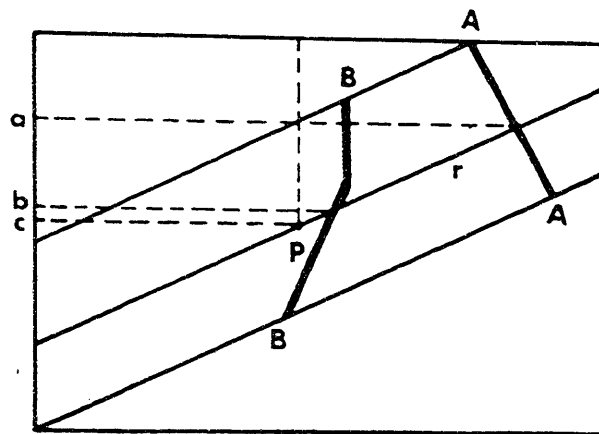


Figura 11.

existentes y de su evolución futura previsible para determinar el valor del índice de tráfico, I , mediante el cálculo. El cálculo que damos a continuación debe considerarse más bien como un ejemplo del procedimiento a seguir que como determinación de una solución general.

DETERMINACIÓN DE C .

De los datos existentes, correspondientes a los años 1960, 1961 y 1962, se deduce un valor medio del crecimiento del tráfico del orden del 13 por 100, con un máximo del 30 por 100 (tramo Málaga-Estepona) y un mínimo del 8,20 por 100 (provincia de Lugo). El incremento se aproxima mucho al valor medio en la mayor parte de las provincias, por lo que en lo que sigue partiremos de un crecimiento anual del tráfico del 13 por 100.

Supondremos que a lo largo de los veinte años del período de proyecto el coeficiente de crecimiento disminuye gradualmente en progresión aritmética, de forma que en el año 20 tiene un valor del 8 por 100, es decir, adoptando sucesivamente los valores 12,75-12,50-12-25-...-8,25-8,00.

En estas condiciones, a lo largo de los veinte años el tráfico se multiplica por un factor 7,22, lo que da para C un valor 4,11.

DETERMINACIÓN DE *E*.

Como ya hemos visto, el valor de *E* se deduce del número y peso de los *ejes* que circulan sobre la carretera en estudio. Con los datos de que ahora disponemos resulta difícil establecer un valor medio aceptable.

Hemos resuelto el problema en la hipótesis siguiente:

Por cada 1 000 vehículos pesados que circulan por el tramo en estudio, pasan 75 camiones Pegaso 1060 (eje trasero, 12 000 Kg.; eje delantero, 6 400 Kg.), 75 camiones Pegaso 1090 (eje

CUADRO NÚM. 4.

Cargas por eje (Kg.)	Coefficiente de equivalencia*	Ejes por cada 1 000 camiones	Ejes de 18.000 Kg. equivalentes
12 000	10.0	75	750
11 500	8.0	30	240
8 450	1.3	75	97.5
6 500	0.4	105	42.0
4 550	0.11	75	8.25
Menos de 4.550		—	—
<i>Total</i>			1 137.75
<i>E</i> = 1.14			

* Obtenido de los gráficos de la figura 6.^a.

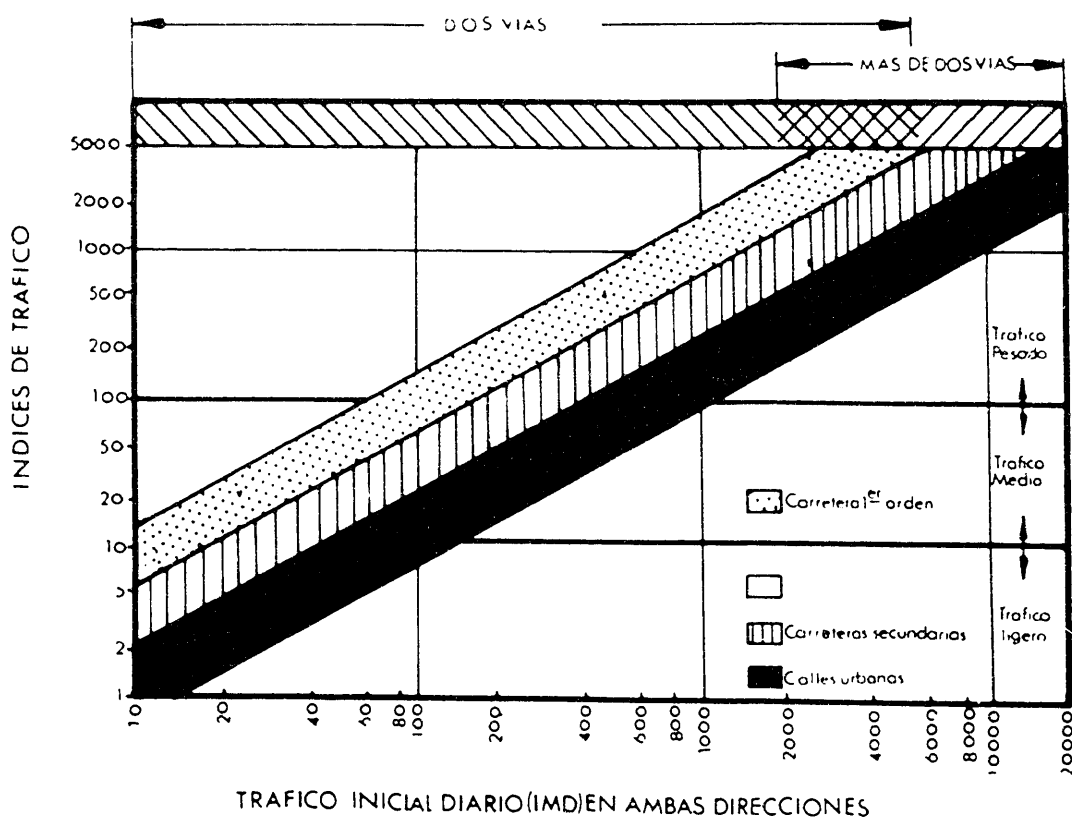


Figura 12.

trasero, 8 450 Kg.; eje delantero, 4 550 Kg.) y 30 autobuses Pegaso 5022 (eje trasero, 11 500 Kg.; eje delantero, 6 500 Kg.), todos ellos cargados al máximo, condiciones en que dan sobre el firme las cargas indicadas, y todos los demás vehículos dan cargas máximas por eje inferiores a 4 550 Kg.

A partir de estos datos se deduce el valor de *E* (truck factor) en el cuadro número 4.

Por otro lado, como en abscisas del ábaco que deseamos obtener se toma el tráfico inicial y no sólo el de vehículos pesados, aunque este último sea el único que influye realmente en el espesor del firme, hay que multiplicar el valor obtenido de *E* por un factor menor que la unidad, *F*, que exprese el tanto por uno de vehículos pesados en el tráfico total, para el que tomamos los valores siguientes:

TIPO DE PAVIMENTO	VALOR DE F	
	Mínimo	Máximo
Pavimento urbano	0,03	0,10
Carreteras locales	0,10	0,25
Carreteras nacionales y comarcales.	0,25	0,60

VALOR DE P.

Supondremos que el tráfico se reparte por igual entre ambas direcciones, y, por lo tanto, tomaremos $P = 0,5$.

Por lo tanto, cumpliéndose las hipótesis establecidas, el índice de tráfico, I , tiene los valores siguientes:

$$I = CPEF \times (IMD) = (4,11 \times 0,5 \times 1,14) \times F \times (IMD) = 2,34 \times F \times (IMD)$$

O sea, para los valores de F ya fijados:

TIPO DE PAVIMENTO	VALOR DE I	
	Mínimo	Máximo
Pavimento urbano	0,07 (IMD)	0,23 (IMD)
Carreteras locales	0,23 (IMD)	0,58 (IMD)
Carreteras nacionales y comarcales	0,58 (IMD)	1,40 (IMD)

Con estos valores hemos construido el ábaco de la figura 12.

Como puede observarse comparándolo con el de la figura 5.^a, correspondiente a las condiciones existentes en los Estados Unidos, a igualdad de IMD hay que prever espesores mucho mayores en las carreteras españolas que en las americanas, lo que es una consecuencia lógica del gran coeficiente de crecimiento del tráfico en nuestras carreteras.

Una interesante aplicación de este método de cálculo es el planeamiento de la construcción por etapas de los pavimentos, aumentando su espesor gradualmente según lo vayan haciendo necesario las exigencias del tráfico.

Por otra parte, para aplicarlo con eficacia es imprescindible disponer de datos muy completos sobre el tráfico y su probable evolución, lo que exigirá en muchos casos una estrecha colaboración entre el proyectista del pavimento y el especialista en ingeniería del tráfico.