

Fisuración de capas de mezclas bituminosas en firmes flexibles

JULIAN GARCIA CARRETERO (*)
M.ª DE LAS NIEVES MARTIN GONZALEZ (**)

RESUMEN. En el presente trabajo se estudia el comportamiento de las mezclas bituminosas en un firme flexible en lo que se refiere a su fisuración por efecto del paso de vehículos. Para ello se realizan dos tipos de ensayo de laboratorio que pretenden reproducir el proceso en sus diferentes fases. De los resultados obtenidos en los ensayos se deducen unas orientaciones sobre la dosificación de mezclas bituminosas más resistentes al desarrollo y propagación de fisuras.

CRACKING OF LAYERS OF BITUMINOUS MIXTURES IN FLEXIBLE PAVEMENTS

ABSTRACT. An analysis is made of the behaviour of bituminous mixtures in flexible pavements as regards cracking due to traffic. Two types of laboratory tests try to reproduce the different stages involved. The results shed light on proportions of bituminous mixtures which prove to be most resistant to the formation and development of cracks.

1. INTRODUCCION

Por encargo de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Obras Públicas y Transportes, el Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX ha realizado el trabajo denominado «Optimización del comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas del nuevo PG-4/88».

En el trabajo se ha estudiado el comportamiento de las mezclas bituminosas en un firme flexible, en lo que se refiere a su fisuración por efecto del paso de vehículos.

Este artículo describe uno de los estudios realizados y las conclusiones obtenidas.

La aparición de fisuras en una capa de mezcla bituminosa se ve afectada por muchos factores. Uno de los más importantes y sobre el que puede actuar el proyectista de un firme es la dosificación y propiedades de los constituyentes de las mezclas bituminosas. El objetivo del presente trabajo es suministrar a los proyectistas algunas orientaciones sobre la dosificación de mezclas bituminosas más resistentes al desarrollo y propagación de fisuras.

2. DESCRIPCION ESTRUCTURAL Y FUNCIONAL DE UN FIRME FLEXIBLE

En este trabajo se ha considerado que un firme flexible de carretera está constituido (figura 1) por una explanada de suelo adecuado con espesor mayor de 50 cm, unas capas de zahorra con espesor de 40 a 50 cm, y unas capas de mezcla bituminosa de espesor comprendido entre 6 y 30 cm.

Las capas de zahorra suelen ser dos, la inferior de zahorra natural, y la superior de zahorra artificial (PG-4/88 Art. 500 y 501).

Las capas de mezcla bituminosa pueden ser una, dos o ninguna con un espesor de 9 a 12 cm en cada capa. Sobre ellas se coloca una o ninguna capa de mezcla bituminosa intermedia con espesor de 5 a 9 cm. Sobre la anterior se sitúa una capa de rodadura de 4 a 6 cm (PG-4/88 Art. 542).

La función de un firme flexible es doble: garantizar una superficie regular, estable y no deslizante, y transmitir los estados tensionales concentrados y con grandes tensiones desviadoras a la explanada, transformándolos en estados tensionales homogéneos, no concentrados, con pequeñas tensiones desviadoras en comparación con las tensiones hidrostáticas.

Las capas de mezcla bituminosa proporcionan una superficie de rodadura estable, regular y no deslizante. Amortiguan las tensiones transmitidas por los neumáticos de los vehículos pesados a las capas de zahorra y garantizan una superficie continua e impermeable que

(*) Ingeniero de Caminos, División de Firmes y Pavimentos del Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX IMOPTI.

(**) Dra. en Ciencias Físicas, División de Firmes y Pavimentos del Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX IMOPTI.



FIGURA 1. Composición de un firme flexible.

Impide el acceso del agua a las capas granulares y cohesivas. Más específicamente, la función de rodadura estable y no deslizante corresponde a la capa de rodadura, la función de regularidad de la superficie y la de ausencia de rodaduras a la capa intermedia fundamentalmente, y a la de rodadura, que resisten las fuertes tensiones desviadoras sin deformaciones plásticas. La función de amortiguación de tensiones le corresponde a todas las capas del firme, pero preferentemente a las capas de base bituminosa. Finalmente la función de impermeabilización se confía al menos a una de las capas.

Las capas de zahorra reciben las tensiones de la mezcla bituminosa y las transmiten a la explanada, atenuándolas y reduciendo las tensiones desviadoras en mayor proporción que las hidrostáticas. La capa de zahorra artificial experimenta unas tensiones desviadoras mayores que la de zahorra natural, por lo que se le dota de un ángulo de rozamiento interno mayor por machaqueo.

3. COMPORTAMIENTO DE UN FIRME FLEXIBLE. TEORÍA DE DAÑO

Un firme flexible sometido al paso repetido de vehículos pesados experimenta deformaciones pulsatorias de extensión en las capas de mezcla bituminosa. Estas deformaciones dan origen a la formación de fisuras que con el tiempo fracturan todo el espesor de las capas de mezcla bituminosa, debilitando la estructura y permitiendo el acceso del agua de lluvia a las capas de zahorra y explanada, perdiendo éstas su capacidad de soporte. Las tensiones desviadoras que aparecen entonces en las zahorras y explanada aumentan y la capacidad de estas capas de resistirlas sin deformaciones permanentes se

reduce, pues desaparece la cohesión y se reduce el rozamiento interno en los materiales granulares. El firme deja por tanto de cumplir su función.

El proceso mecánico que da origen a la formación de fracturas se puede representar con la «teoría de daños» propuesta por L. M. Kachonov y Robotnov (Ref. 1). Se basa en la introducción de una variable de estado D que representa el estado de deterioro (microfisuración) del material. D varía de forma irreversible desde 0, cuando el material es virgen, a un valor crítico D_c inferior a 1. A medida que aumenta la densidad de microfisuras, el valor de D va aumentando. Cuando en una zona del material D alcanza el valor D_c , se considera en general que la degradación del material prosigue según otro mecanismo del tipo macrofisuración, con propagación de una fisura. Se contemplan, por tanto, tres fases: en la primera fase, bajo solicitaciones repetidas, se desarrollan microfisuras, que crecen en número y aumentan por tanto el valor de D ; en la segunda se forma una zona con valor de D próximo a D_c y se produce la unión de varias microfisuras y cavidades dando origen a una macrofisura; en la tercera se propaga la macrofisura por rotura y avance del fondo de fisura con las solicitaciones repetidas.

La aplicación de esta teoría a un firme flexible (figura 2) explica la formación de una zona dañada en la capa de mezcla situada en contacto con la zahorra, que es la más traccionada. Posteriormente, cuando se alcanza un nivel de daño suficiente, se forma una fisura en esa capa que se propaga en sentido ascendente atravesando el resto de las capas superiores.

Por tanto, el comportamiento de la capa de base bituminosa y de las capas superiores es conceptualmente distinto. En las capas de base bituminosa o capas en

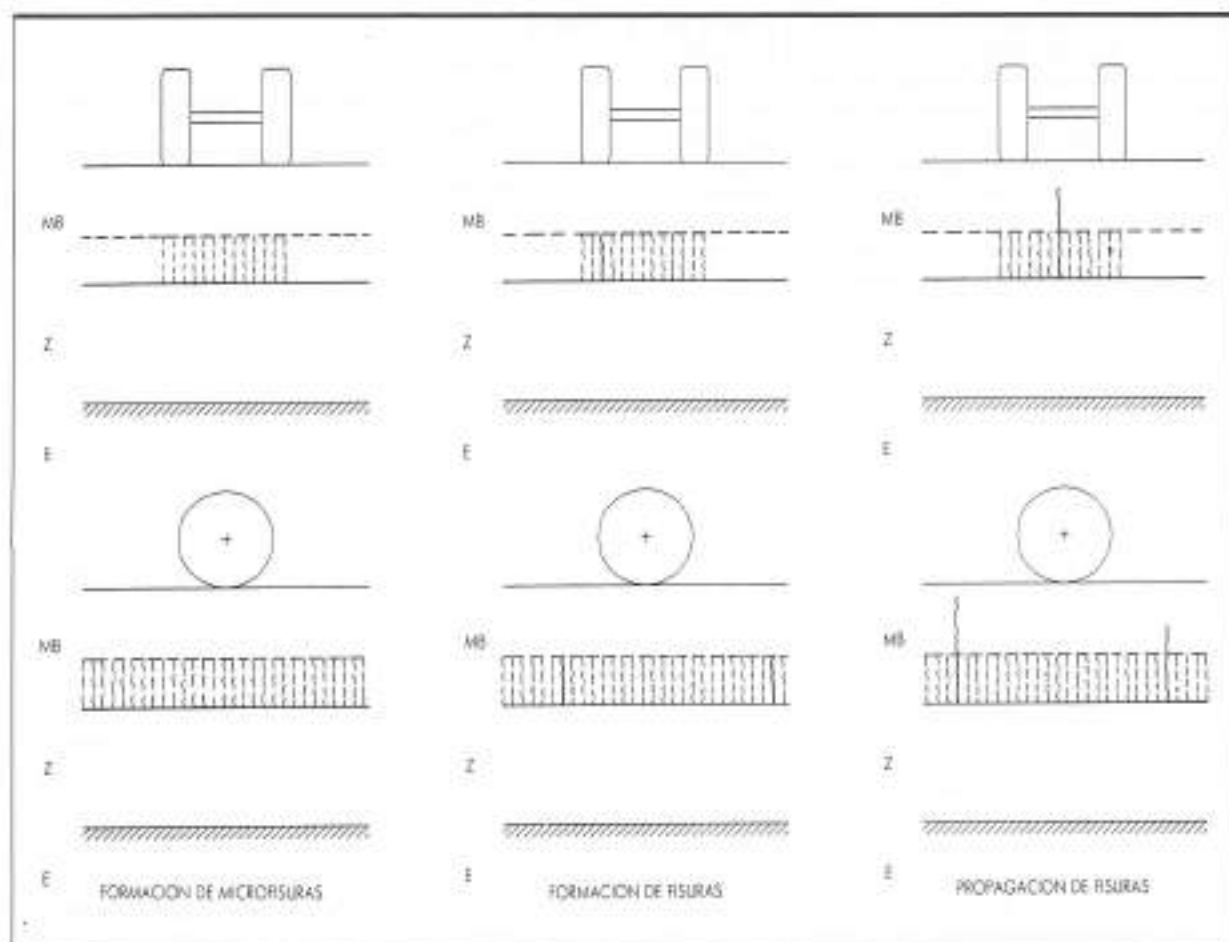


FIGURA 2.

contacto con la zahorra deberá estudiarse su velocidad de microfisuración o de aumento de daño con la aplicación de sollicitaciones. En el resto de capas superiores resultará más interesante estudiar la velocidad de propagación de una fisura ya existente con la aplicación de sollicitaciones.

4. ENSAYOS DE LABORATORIO. LEYES DE FATIGA

Los ensayos de laboratorio intentan reproducir el comportamiento de las mezclas bituminosas presentes en un firme flexible. Para ello se someten una o varias probetas a una serie de sollicitaciones repetidas y se observa su comportamiento. Existen tres grupos de ensayos.

En el primer grupo (Ref. 2) se somete la probeta a una sucesión de pulsaciones de carga hasta que se alcanza en una zona un nivel de microfisuración determinado. El ensayo se realiza sobre varias probetas modificando la intensidad de la sollicitación y obteniendo el número de pulsaciones de carga necesario para alcanzar el estado de microfisuración estándar. La relación exis-

tente entre la intensidad de la sollicitación y el número de pulsaciones se puede aproximar por una función llamada «ley de fatiga». Este tipo de ensayos es adecuado para el estudio de las mezclas situadas en la capa que está en contacto con la zahorra.

En el segundo grupo (Ref. 3) se somete una probeta entallada a una sucesión de pulsaciones de carga, propagando una fisura desde el fondo de la entalla hasta fracturar en dos partes la probeta. En cada ensayo se determina la velocidad de propagación de la fisura, pudiendo relacionarse la velocidad de propagación de la fisura con la intensidad de la sollicitación. Este tipo de ensayos es adecuado para el estudio de mezclas situadas en las capas superiores.

En el tercer grupo se pretende reproducir el proceso completo de fracturación, incluyendo las tres fases mencionadas en la teoría de daño. Se somete una probeta a pulsaciones de carga hasta que una zona de ella alcanza el valor de daño crítico D_c y aparece una fisura. Se continúan aplicando pulsaciones de carga para propa-

gar la fisura creada hasta que se fractura la probeta en dos trozos. Se puede relacionar la intensidad de la sollicitación con el número de pulsaciones necesarias para fracturar la probeta obteniendo así una relación también llamada «ley de fatiga», pero conceptualmente distinta a la referida en los ensayos del primer grupo.

Los ensayos del primer grupo se suelen realizar sometiendo una probeta alargada a flexión, con desplazamientos pulsatorios de amplitud constante. Se considera que se ha alcanzado el estado de microfisuración estándar cuando la rigidez global de la probeta se ha reducido a la mitad. Se supone por tanto, que el causante de la reducción de la rigidez es únicamente el aumento del grado de microfisuración D , prescindiendo del efecto termomecánico (Ref. 1) del aumento de temperatura de la mezcla producido por la transformación de la energía visco-elástica disipada en cada pulsación en calor.

La norma NLT-350/90 (Ref. 4) describe el ensayo perteneciente a este primer tipo que se ha empleado en este trabajo. La probeta empleada es prismática de $(50 \times 50 \times 300 \text{ mm})$ y se apoya en los extremos con luz libre de 270 mm (figura 3). El centro de la probeta se somete a un desplazamiento que varía con el tiempo según una función senoidal de 10 Hz de frecuencia y cuya amplitud se mantiene constante en todo el ensayo. La intensidad de la sollicitación se cuantifica a través de la amplitud de la deformación elástica que se produce en los primeros ciclos y en las fibras más extendidas de las probetas. Para medirla se emplea un extensómetro. La utilización de este parámetro para caracterizar la intensidad de la sollicitación no es arbitraria y, como luego se verá, es la base que permite la medida del módulo complejo inicial de la mezcla. Finaliza cuando la amplitud de la carga necesaria para provocar el desplazamiento central (de amplitud constante) de la probeta se reduce a la mitad.

Con los resultados de varios ensayos se aproxima una ley de fatiga con la siguiente función:

$$\varepsilon = a \cdot N^b \quad [1]$$

siendo:

- ε = la intensidad de la sollicitación representada a través de la amplitud de la deformación elástica inicial.
- N = número de ciclos de desplazamiento aplicados.
- a, b = parámetros característicos a 20 °C de la mezcla estudiada.

Los ensayos del segundo grupo se realizan sometiendo una probeta alargada entallada a flexión con desplazamientos pulsatorios de amplitud constante. Se determina la velocidad con que se propaga la fisura que surge en el fondo de la entalla.

No existe norma NLT donde se describa el ensayo utilizado en este trabajo. La probeta empleada es prismática de $(90 \times 50 \times 300 \text{ mm})$, se apoya en sus extremos con luz libre de 270 mm y canto de 90 mm (figura 4). La probeta tiene una entalla en el centro de la cara inferior de 20 mm de profundidad y 3 mm de abertura. En su cara superior lleva pegada una chapa de 0,2 mm de hojalata. Se somete el centro de la probeta a un desplazamiento que varía con el tiempo según una función senoidal de frecuencia 1 Hz y con amplitud constante de 400 μm en todo el ensayo. Periódicamente se registra la longitud de fisura propaga y la cantidad de ciclos aplicados. Tomando los valores correspondientes a la longitud de fisura entre 15 y 55 mm se determina la velocidad de propagación de la fisura a una temperatura de 20 °C.

Los ensayos del tercer grupo también se han empleado en el trabajo encargado por la Dirección General de Carreteras, pero sus aplicaciones no se comentan en este artículo.

5. METODO DEL INDICE DE CALIDAD

La estructura de un firme flexible puede ser representada por un modelo físico-matemático elástico multicapa. Se supone con ello que las capas de los distintos materiales se comportan de forma elástico-lineal, sin defor-

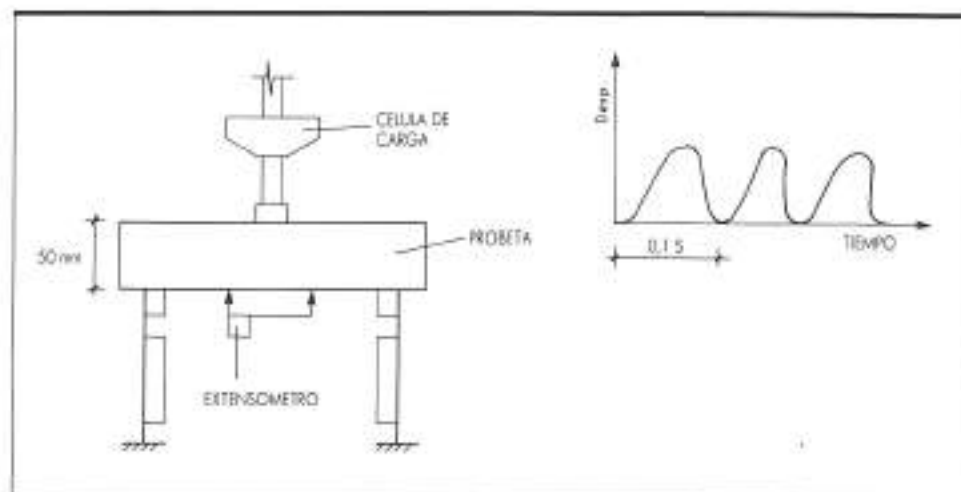


FIGURA 3. Ensayo de fatiga por microfisuración.

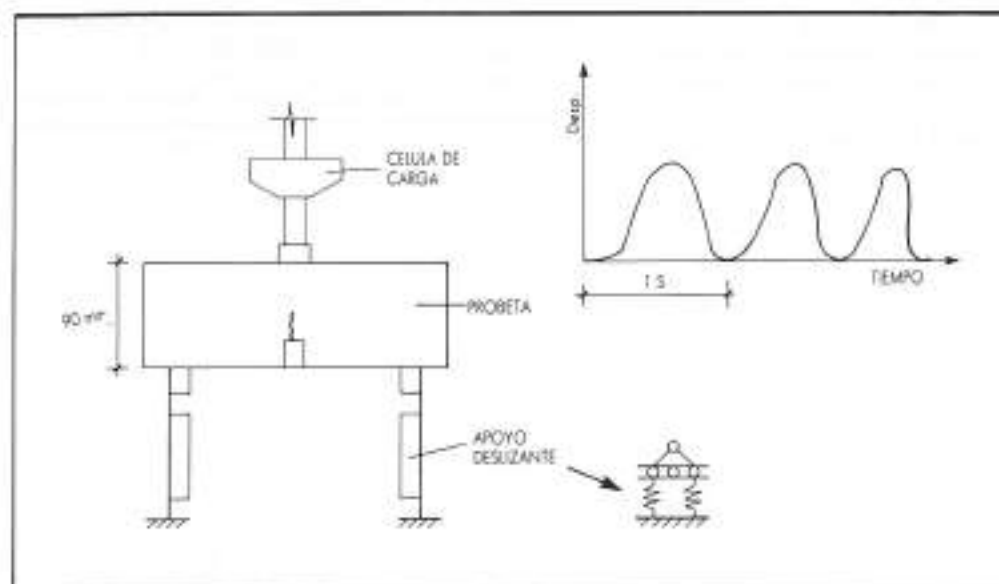


FIGURA 4. Ensayo de propagación de fisura.

maciones plásticas. La estructura se supone continua, sin bordes, por lo que el modelo representa bien sólo las cargas que actúan lejos de los bordes del firme real.

La figura 5 representa el modelo de un firme con parámetros elásticos típicos de un firme bien construido, compactado y drenado.

La carga transmitida por la rueda de un vehículo pesado se puede representar por una carga circular de 65 kN con una presión de contacto de 0,9 MPa.

El modelo permite calcular la deformación de extensión, radial o tangencial ϵ (coordenadas cilíndricas) que aparece en el fondo de la capa de mezcla bituminosa y

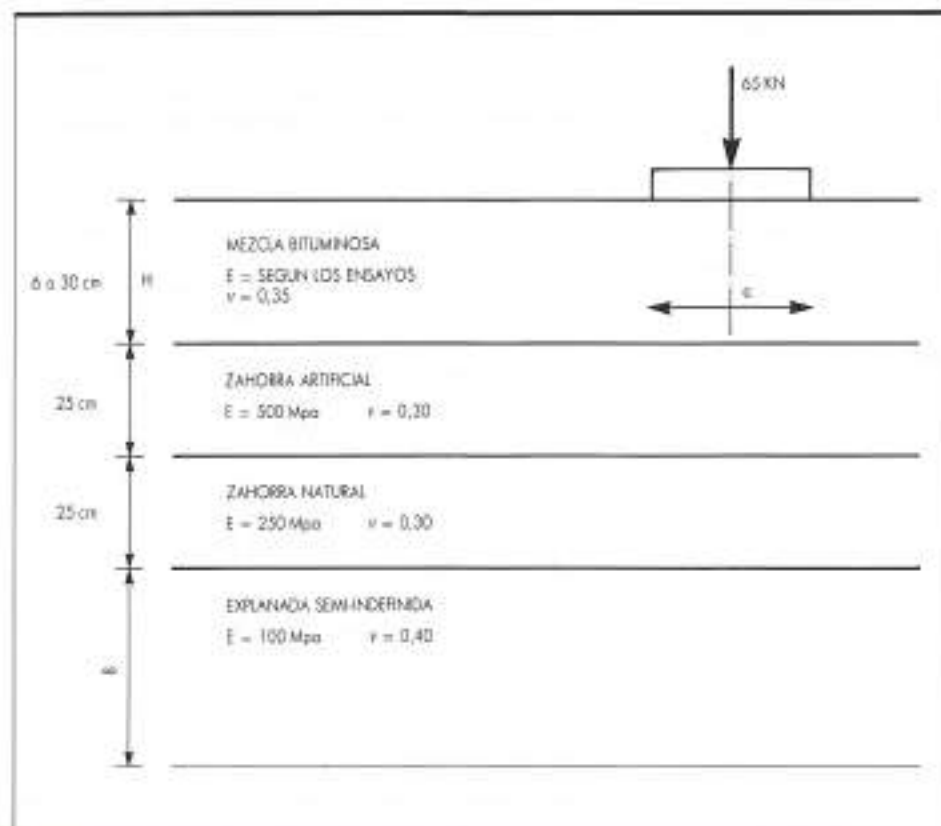


FIGURA 5. Modelo multicapa elástico lineal de un firme flexible.

en el eje de la carga. Este valor dependerá del módulo E y del espesor H de la mezcla bituminosa. Para unos valores dados de E y H , el valor de ϵ crece al aumentar la carga; por tanto, se puede considerar como un parámetro que mide la intensidad de la sollicitación percibida por la capa de mezcla bituminosa.

La aplicación repetida de cargas produce, según la teoría de daño, una zona microfisurada en el fondo de la capa de mezcla bituminosa. Se plantea el problema de determinar el número de aplicaciones de la carga necesarias para producir un estado de microfisuración determinado en una zona del fondo de la capa de mezcla. En general, para valores de la intensidad de sollicitación ϵ pequeños el número de aplicaciones N necesarias será grande, para ϵ grande el número N será pequeño.

Una forma de estimar el valor de N consiste en emplear la ley de fatiga (1) y el módulo E determinados con el ensayo NLT-350/90. Para cada firme definido por H y mezcla bituminosa definida por a , b y E , se obtiene un solo número N que indica la calidad de la estructura para resistir la formación de microfisuras en la mezcla bituminosa. Se puede obtener un índice de calidad empírico referido a una cantidad fija de mezcla bituminosa aplicando a los valores de N y H la siguiente expresión:

$$I.C. = \log_{10} (N/H) \quad [2]$$

siendo:

- $I.C.$ = Índice de calidad de la mezcla con espesor H .
- N = Número de aplicaciones de carga determinado con el modelo matemático y la ecuación (1).
- E = Módulo elástico de la mezcla determinado en el ensayo de fatiga.

Si se determina el valor de $I.C.$ para varios valores de H se pueden representar las curvas $I.C.-H$. Estas curvas permiten comparar directamente mezclas bituminosas y relacionar aquellas con mejores índices de calidad en los espesores que se vayan a emplear.

6. RESULTADOS OBTENIDOS

Se han ensayado a fatiga diez dosificaciones distintas de mezclas bituminosas. Las tablas 1, 2 y 3 describen su composición.

La rigidez y parámetros de las leyes de fatiga obtenidas se recogen en la tabla 4. Las curvas $I.C.-H$ correspondientes a estas mezclas se representan en la figura 6.

Se han sometido al ensayo de propagación de fisuras cuatro dosificaciones de mezclas bituminosas. La tabla 5 describe su composición. La figura 7 indica la relación entre la velocidad de propagación de la fisura y el contenido de ligante.

El análisis de las curvas de la figura 6 muestra dos tipos de curvas, unas crecientes con el valor de H (1, 5, 6) y otras que poseen un mínimo. Comparando las mezclas 5 y 6 se observa que con espesores grandes la mez-

TAMIZ UNE	MEZCLAS % PASA			
	M1 (S20)	M2 (A20)	M3 (GB)	M4 (BS)
25 mm	100	100	100	100
20 mm	87,5	85,0	100	100
12,5 mm	72,5	62,0	80,0	87,0
10 mm	67,5	50,0	72,5	63,0
5 mm	50,5	28,0	50,0	45,5
2,5 mm	37,5	15,0	35,0	44,5
630 μ m	20,0	10,5	22,0	22,5
320 μ m	14,0	8,5	16,0	15,5
160 μ m	9,0	6,0	11,0	9,5
80 μ m	6,0	4,0	7,0	5,5
CONTENIDO DE LIGANTE % S. A.	4,75	4,00	4,00	5,60
TIPO DE LIGANTE	B 60/70	B 60/70	B 60/70	B 60/70
RELACION FILLER/BETUN	1,263	1,000	1,750	0,982
ARIDO	CAJIZO	CAJIZO	CAJIZO	CAJIZO

TABLA 1. Composición de las mezclas. Granulometría.

cla con ligante B 40/50, más rígida, posee un mejor índice de calidad y con espesores pequeños es la mezcla con ligante B 80/100 la de mayor calidad. Si se comparan las mezclas 7, 8, 9 y 10 se observa que con espesores grandes las 9 y 10 se comportan mejor que las 7 y 8; con espesores pequeños las mezclas 8, abierta sin finos, y las 9 y 10, densas con mucho ligante, se comportan mejor que la 7, abierta con finos.

Representando la relación entre el índice de calidad para valores de H de 6 y 30 cm y el módulo de las mezclas se obtiene la figura 8. Para grandes espesores son mejores las mezclas rígidas y para espesores pequeños las flexibles.

La figura 7 pone de manifiesto que para valores del contenido de ligante por debajo de 4,8 % en peso S. A., la velocidad de propagación de fisuras aumenta bruscamente, para valores mayores disminuye de forma lenta.

CONCLUSIONES

Para firmes de mucho tráfico (T0 y T1). Estos firmes tienen un espesor de más de 25 cm de mezclas bitumi-

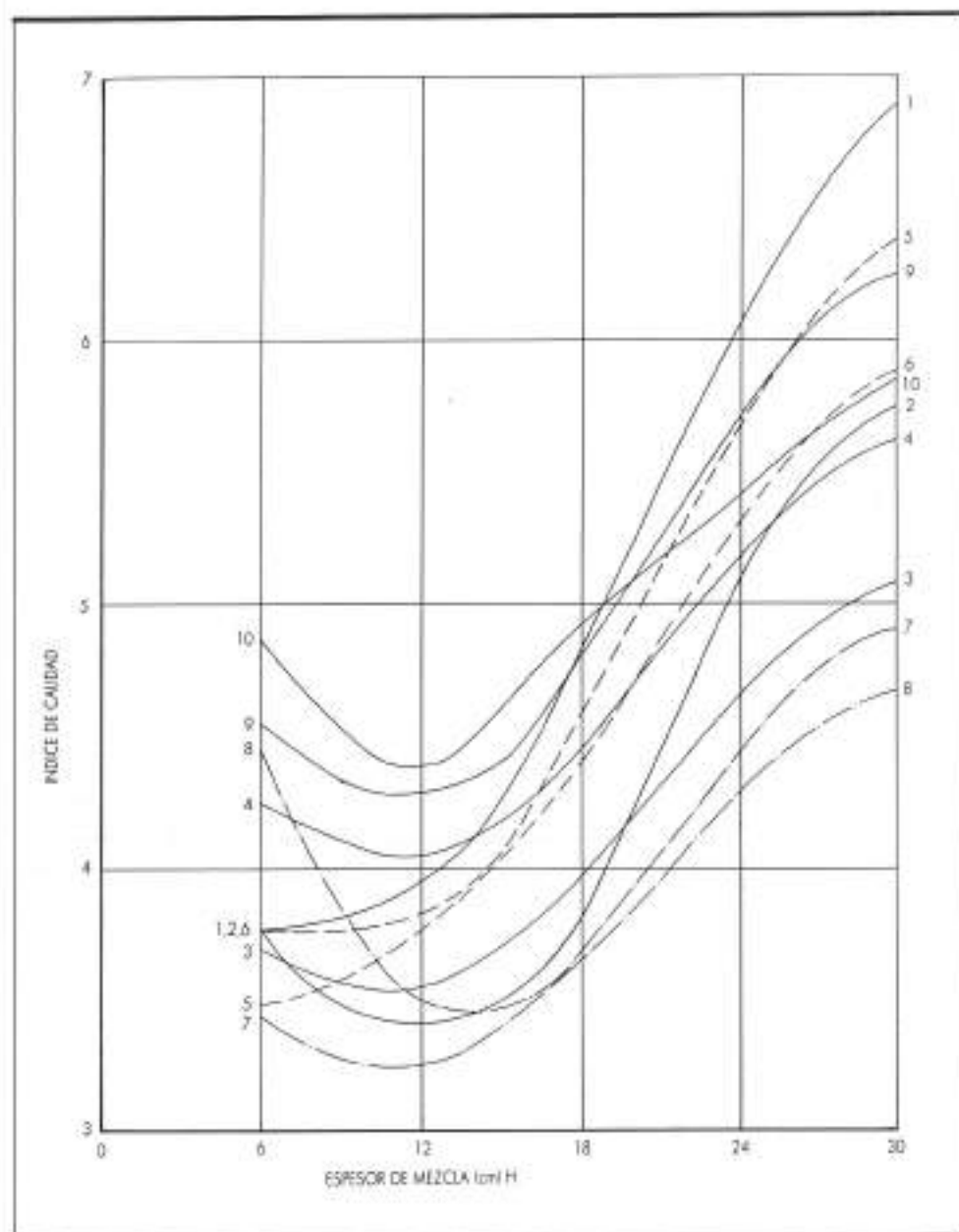


FIGURA 6.

noas. Su estructura se divide en tres partes: una capa de base, una capa intermedia y una capa de rodadura. En la capa de base se producen los fenómenos de microfisuración que dan lugar a la fisura. En la capa intermedia se produce la propagación de la fisura y continúa a través de la capa de rodadura.

De los estudios presentados en este artículo se concluye la conveniencia de que la capa de base sea rígida, es decir, de alto módulo (ver figura 8). El ligante más indicado puede ser del tipo B 40/50. La capa intermedia debe tener un contenido de ligante de al menos un 4,8 %

(ver figura 7), y el ligante puede ser del tipo B 60/70 ó B 40/50.

Firmes de poco tráfico (T4). Estos firmes tienen un espesor de mezcla bituminosa de menos de 6-7 cm. No se distingue en ellos una estructura de capas y en la única que presentan se producen, en su zona inferior, los fenómenos de microfisuración. La propagación de la fisura se produce en el resto.

Convendrá que la mezcla sea flexible, es decir, de bajo módulo, y el ligante podrá ser del tipo B 60/70 o B 80/100 (ver figuras 7 y 8).

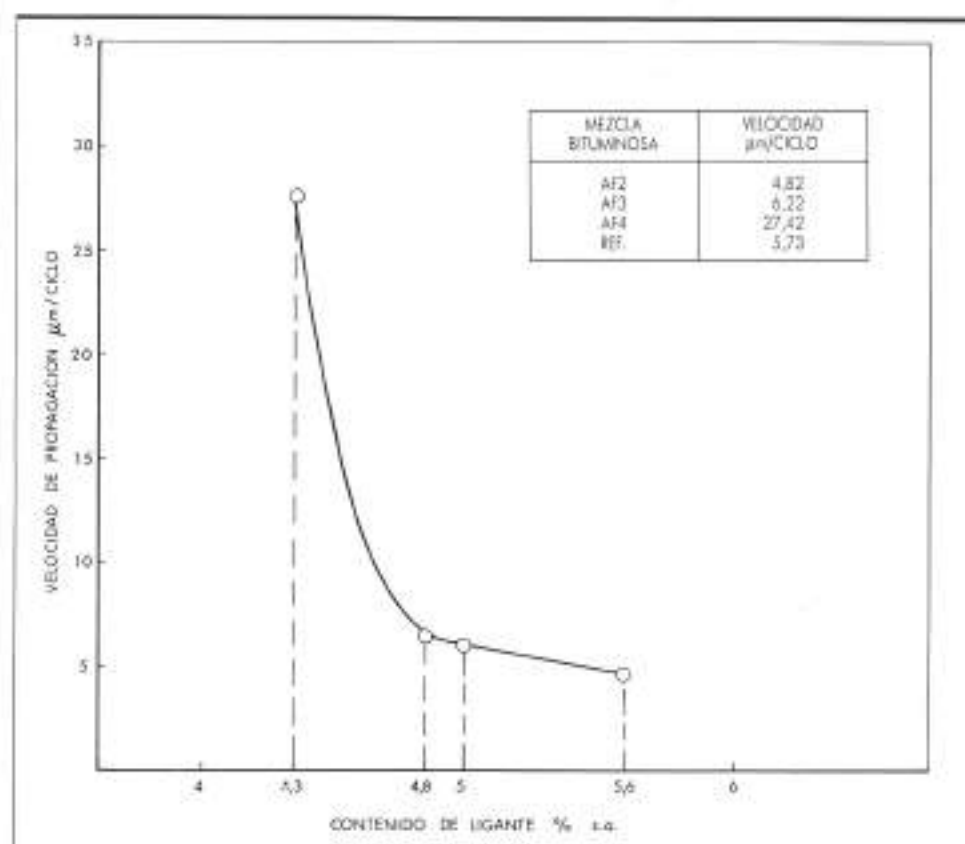


FIGURA 7. Relación entre la velocidad de propagación de una fisura y el contenido de ligante hidrocarbonado.

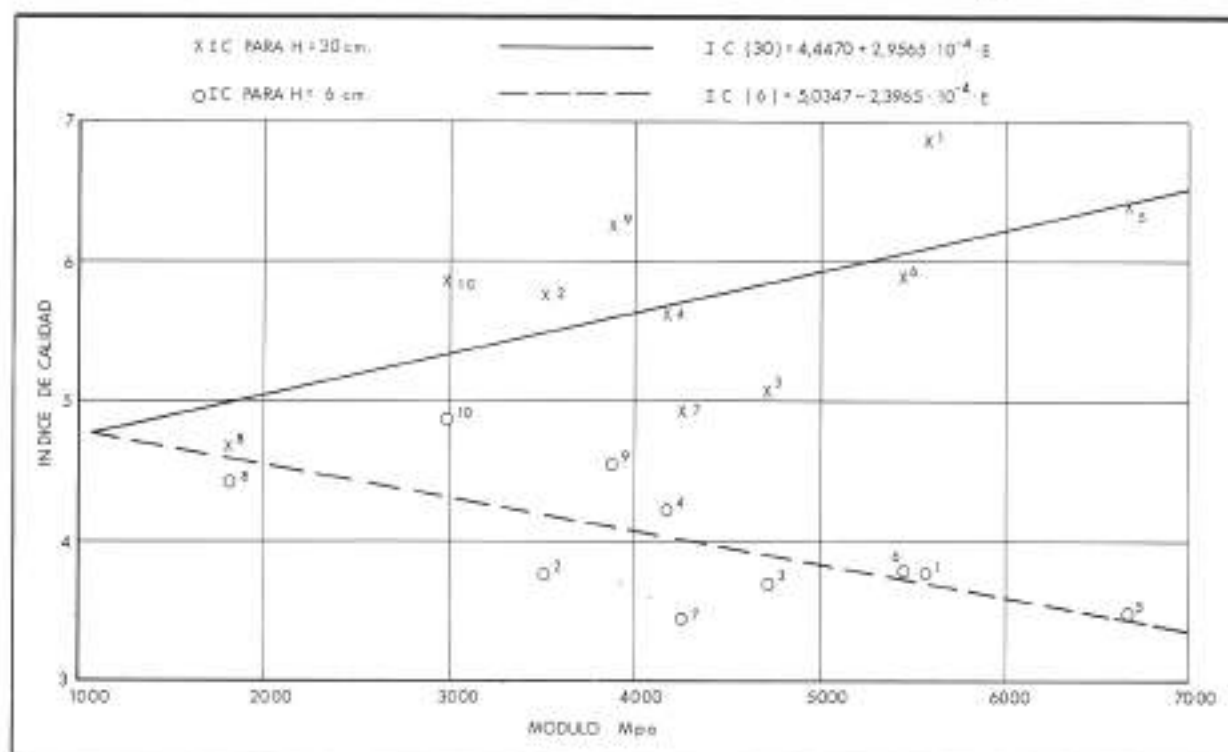


FIGURA 8.

TAMIZ UNE	MEZCLAS % PASA			
	M5 (S20)	M6 (S20)	M7 (A12)	M8 (A12)
25 mm	100	100	100	100
20 mm	87,5	87,5	100	100
12,5 mm	72,5	72,5	85,0	85,0
10 mm	67,5	67,5	60,0	60,0
5 mm	50,5	50,5	35,0	35,0
2,5 mm	37,5	37,5	17,0	17,0
630 µm	20,0	20,0	11,0	11,0
320 µm	14,0	14,0	8,0	7,0
160 µm	9,0	9,0	3,0	2,0
80 µm	6,0	6,0	4,0	0,0
CONTENIDO DE LIGANTE % S. A.	4,75	4,75	4,00	3,5
TIPO DE LIGANTE	B 40/50	B 80/100	B 60/70	B 60/70
RELACION FILLER/BETUN	1,263	1,236	1,000	—
ARIDO	CALIZO	CALIZO	CALIZO	CALIZO

TABLA 2. Composición de las mezclas. Granulometría.

MEZCLA BITUMINOSA	LEY DE FATIGA 20 °C		RIGIDEZ 20 °C	
	$a \times 10^{-6}$	b	ANGULO FASE (GRADOS)	MODULO DINAMICO (Mpa)
M1	1.087,70	-0,144	35,26	5.573,4
M2	1.293,50	-0,162	39,36	3.531,7
M3	2.875,50	-0,241	36,56	4.710,2
M4	3.453,40	-0,230	37,35	4.171,1
M5	1.162,63	-0,162	32,56	6.668,2
M6	1.803,86	-0,192	38,69	5.444,6
M7	2.086,92	-0,222	38,27	4.258,9
M8	3.727,99	-0,246	42,57	1.823,3
M9	2.457,13	-0,190	41,75	3.875,0
M10	4.644,77	-0,231	43,42	2.971,4

TABLA 4. Resultados de los ensayos de fatiga NLT 350/90.

TAMIZ UNE	MEZCLAS % PASA	
	M9 (S12)	M10 (D10)
25 mm	100	100
20 mm	100	100
12,5 mm	90,0	100
10 mm	77,0	90,0
5 mm	55,0	70,0
2,5 mm	38,0	52,0
630 µm	20,0	24,0
320 µm	14,0	16,0
160 µm	9,0	10,0
80 µm	6,0	6,5
CONTENIDO DE LIGANTE % S. A.	5,0	5,40
TIPO DE LIGANTE	B 60/70	B 60/70
RELACION FILLER/BETUN	1,200	1,204
ARIDO	CALIZO	CALIZO

TABLA 3. Composición de las mezclas. Granulometría.

TAMIZ UNE	MEZCLAS % PASA			
	AF2	AF3	AF4	REF
25 mm	100	100	100	100
20 mm	100	100	100	100
12,5 mm	95	88	85	88
10 mm	78	79	72	79
5 mm	53	55	39	57
2,5 mm	38	38	28	42
630 µm	22	20	14	24
320 µm	17	14	10	18
80µm	7	5,5	4	6,5
CONTENIDO DE LIGANTE % S. A.	5,6	4,8	4,3	5,0
TIPO DE LIGANTE	B 60/70	B 60/60	B 60/70	B 60/70
RELACION FILLER/BETUN	1,250	1,146	0,930	1,300
ARIDO	CALIZO	CALIZO	CALIZO	CALIZO

TABLA 5. Composición de las mezclas. Granulometría.

8. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a D. Antonio García, D. Jesús Cirugeda y D. Enrique Pérez su colaboración en los trabajos experimentales y sus recomendaciones en la definición de los ensayos especiales.

9. REFERENCIAS

1. JEAN-MICHEL, PIAU. «Modélisation thermomécanique du

comportement des enrobés bitumineux». Bull. Liason Labo. P. et Ch. 163 sept.-oct. 1989, págs. 41-54.

2. Optimización del comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas del nuevo PG-4/88. Dirección General de Carreteras. Diciembre de 1990.

3. Materiales y técnicas para minimizar el agrietamiento por reflexión de los pavimentos bituminosos. Dirección General de Carreteras. Diciembre 1991.

4. Norma NLT-350/90. «Ensayo de fatiga de flexotensión dinámica de mezclas bituminosas».