

RESULTADOS DEL PRIMER ENSAYO EFECTUADO EN LA PISTA DEL CENTRO DE ESTUDIOS DE CARRETERAS

(2.ª PARTE)

RECAREDO ROMERO AMICH (*)
AURELIO RUIZ RUBIO (**)

RESUMEN. Se presenta en este artículo la parte de los resultados del primer ensayo en la pista de firmes del CEDEX, referente al agrietamiento de las secciones. La evolución de este parámetro señala un mejor comportamiento de la sección 322 del Catálogo español que el de la sección 321. Esta última no cumple además los supuestos de dicho Catálogo. En el artículo se da cuenta entre otros aspectos del proceso de fallo por fisuración, la relación del fallo con las condiciones climáticas y la influencia de la disminución del espesor de pavimento en las secciones señaladas.

ABSTRACT. *The part of the first research done on the pavement test track of CEDEX, which referred to the cracking of the sections tested, is presented in this article. The results obtained indicate a better performance of section 322 of the Spanish Catalogue than Section 321. This last one does not comply with the conditions required by the Catalogue. In this article, other aspects such as the process of the failure, the relation between the failure and the climatic conditions, and the influence of the decrease of thickness in the sections are given.*

1. INTRODUCCION

El principal objetivo perseguido con la construcción de la Pista de Ensayo de Firmes es disponer de una herramienta que permita seleccionar la opción más adecuada entre distintas posibilidades de la técnica de carreteras. Desde este punto de vista, la Pista de Ensayo es un banco de pruebas en el que se puedan estudiar y comparar las características y el comportamiento de secciones estructurales de firmes sometidas a solicitaciones análogas a las del tráfico, aceleradas y perfectamente controladas. Es decir, estas instalaciones permiten seleccionar entre varias posibilidades (configuración del firme, materiales, técnicas constructivas) la de mayor vida de servicio, de forma acelerada. La comparación se realiza mediante el estudio de la evolución de las secciones durante el ensayo debido a la repetición de cargas. El análisis se basa fundamentalmente en el seguimiento com-

parado de los parámetros clásicos de estimación del deterioro de los firmes.

2. TIPOLOGIA DE DETERIOROS

Las deficiencias de una carretera son aquellas características no deseadas que pueden provenir de un mal proyecto o ejecución de la obra, o como consecuencia de su uso. Dentro de estas deficiencias, se entiende como «deterioro» los daños producidos por el tráfico o por las condiciones climáticas, que se traducen en una pérdida de calidad de las funciones para las que se proyectó el firme. Cuando la pérdida de calidad llega a un punto en el que se estima que la vía no puede cumplir su función, se dice que se ha alcanzado el «fallo».

En la tabla 1 se indican los principales deterioros que se pueden producir en firmes con pavimento bituminoso y base granular.

Dentro de estos deterioros pueden diferenciarse dos grupos:

- En el primero se incluyen los que no producen una pérdida de capacidad de soporte del firme. Aquí están los que no se deben específicamente al paso de las cargas (fisuración a bajas temperaturas) y los que, aunque se producen por las cargas, no originan un deterioro estructural de todas las capas del firme.

(*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Coordinador de Programas de Ensayo a Escala Real del Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX (Ministerio de Obras Públicas y Transportes).

(**) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Director del Laboratorio de Infraestructura Viana del Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX (Ministerio de Obras Públicas y Transportes).

1. FISURACION POR FATIGA.
2. FISURACION POR RETRACCION A BAJAS TEMPERATURAS.
3. FORMACION DE RODERAS EN LA MEZCLA BITUMINOSA.
4. PERDIDA DE REGULARIDAD POR CAMBIOS DE VOLUMEN DIFERENCIALES EN LAS CAPAS GRANULARES Y/O EXPLANADA.
5. DESINTEGRACIONES SUPERFICIALES.
6. EXUDACIONES.
7. PERDIDA DE RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO.

TABLA 1. Deterioros principales de firmes con pavimento bituminoso y base granular.

Estos últimos son consecuencia del desgaste superficial: pérdida de la resistencia al deslizamiento, desintegraciones superficiales, exudaciones.

- En un segundo grupo, que es el que interesa para el estudio planteado, se consideran los deterioros inducidos por las cargas y que producen un deterioro estructural en el conjunto del firme: la fisuración por fatiga y la pérdida de regularidad superficial por cambios de volumen en las capas bituminosas, granulares o explanada.

Las deformaciones plásticas de la mezcla bituminosa pueden ser debidas al fallo de las capas inferiores, en cuyo caso pertenecen al segundo grupo, o pueden tener su origen en la propia mezcla (roderas por postcompactación o fluencia). Estas últimas no constituyen, en general, un deterioro propiamente estructural y por tanto deberían incluirse en el primer grupo. Sin embargo, no puede separarse, mediante ensayos «in situ» no destructivos, la parte de la deformación superficial debida a la propia mezcla de las producidas por deformaciones en las capas granulares y/o explanada. Por tanto, en este trabajo se engloban en un único factor de deterioro, que denominaremos «pérdida de regularidad», y que se incluye en el segundo grupo de deterioros.

Junto a la medida directa de estos deterioros se lleva también a cabo la de la capacidad de soporte mediante deflexiones. La pérdida de capacidad de soporte podría haberse considerado un deterioro en sí mismo, individualizando los casos en que se produce independientemente de los otros deterioros (reducción de módulo por fatiga), pero por otro lado podría ser redundante ya que en general se manifiesta en agrietamientos y deformaciones, ya recogidos en la tabla 1. No obstante, dada la importancia del análisis de deflexiones, en el que se basan la gran mayoría de los sistemas de seguimiento de los firmes, se decidió incluirlo en la evaluación de deterioros.

En definitiva, en este estudio se consideran como deterioros del firme:

- La fisuración de la mezcla bituminosa.
- La pérdida de regularidad superficial.
- El aumento de las deflexiones.

En relación con los deterioros señalados es necesario determinar cuál será el criterio de fallo, es decir, en qué momento se considera que una sección determinada ha agotado su capacidad de servicio.

En principio existen dos sistemas para definir el fallo: el paramétrico y el global. En el primero se fijan umbrales límite para cada uno de los deterioros considerados, y se considera que se ha producido el fallo cuando se alcanza el umbral límite de alguno de los deterioros. En el segundo se construye un índice que engloba el conjunto de los deterioros y se fija el umbral límite para este índice. Evidentemente este segundo método, más restrictivo, tiene el inconveniente de que se dificulta la comparación al enmascarar el tipo de fallo, aunque por otro lado tiene la ventaja de su simplicidad. Dadas las características del estudio a realizar, se decidió en este primer trabajo comparar ambos criterios.

3. FISURACION DE LA MEZCLA BITUMINOSA. DEFINICION DE PARAMETROS

En los firmes correctamente proyectados, la rotura de las capas formadas por materiales con cohesión no se produce por el paso de una única carga, sino por la repetición de solicitaciones inferiores a la de rotura, en un proceso de fatiga del material.

Si los materiales fuesen homogéneos y no hubiese variación de espesores, y si las cargas se aplicasen uniformemente en todo su recorrido (si no hubiese un efecto dinámico por las irregularidades de la superficie y la amortiguación del vehículo), el fallo se produciría en un mismo instante de forma generalizada para todo el tramo en cuestión. Sin embargo, la heterogeneidad que se produce tanto en la fabricación del material como en la ejecución de la capa lleva en realidad a que se rompan en primer lugar las zonas más débiles del tramo, extendiéndose posteriormente la rotura a las zonas próximas o produciéndose en las siguientes zonas más débiles.

La rotura de una capa de mezcla no es, por tanto, un proceso instantáneo, sino que se produce a lo largo de un cierto tiempo. En general, el proceso va acelerándose, puesto que las primeras grietas facilitan la entrada de agua y debilitan las zonas próximas.

La aparición de los primeros deterioros en superficie es un índice de que el proceso de rotura de la capa ha comenzado (el inicio se habrá producido antes de ese instante pues la transmisión a la superficie de las fisuras formadas en el fondo de la capa requiere un cierto tiempo) y da lugar a fallos localizados. Ahora bien, la cuestión es: ¿en qué momento se considera que se ha producido el fallo generalizado o rotura de un tramo?

Un criterio es el de establecer el fallo en el momento en el que la rotura de la capa se ha generalizado a todo el tramo. Su principal inconveniente es que trasladado a la práctica lleva a una rehabilitación enormemente costo-

sa. Otro criterio es el de fijarlo en el momento en el que aparecen las primeras roturas localizadas. Este criterio sin embargo, es conservador pues estas últimas pueden ser debidas a defectos puntuales producidos durante la ejecución del firme, que pueden corregirse localmente sin actuar en todo el tramo. Un criterio más lógico parece el del porcentaje de superficie agrietada, buscando con ello un momento intermedio entre el inicio y el final del proceso de rotura de la capa.

En la Norma 6.3-I.C de Refuerzos de Firmes del MOPT el criterio para definir el fallo es fundamentalmente el nivel de deflexiones, considerándose los agrietamientos únicamente como indicadores del tipo de rehabilitación necesaria, y para el contraste de la homogeneidad de los tramos establecidos mediante las deflexiones. No existe, por tanto, definición de fallo en función de los agrietamientos.

Ante la ausencia de normativa al respecto, ha sido preciso establecer criterios ex profeso para este trabajo. Para ello se han estudiado los empleados en otros países, que en general se basan en los siguientes índices:

- Longitud de la zona fisurada.
- Área de la zona fisurada.

En el primer caso el parámetro representativo del deterioro es el porcentaje de longitud del tramo considerado que se encuentra fisurado, que se obtiene dividiendo la suma de las longitudes de los sectores del tramo agrietados por la longitud total. Como tramo se considera el correspondiente a un determinado proyecto, a una zona homogénea en cuanto a un determinado criterio o a una longitud fija. La longitud real de las grietas se mayor a una longitud ficticia para tener en cuenta la longitud realmente afectada por la fisura.

En el criterio de área, el parámetro indicador del deterioro es el porcentaje de área que se encuentra fisurada, obteniéndose al dividir la suma de las áreas fisuradas por el área total. Este criterio tiene sentido cuando las grietas están agrupadas (piel de cocodrilo) y el área afectada es fácilmente medible. El ancho real de las grietas se mayor para obtener un ancho de afección de la grieta nos dará el área ficticia a considerar.

Este criterio, al igual que el anterior, no tiene en cuenta la tipología de las grietas, calculándose el valor del parámetro independientemente de la importancia de la grieta o el estado de la misma (características como la distancia entre bordes de la fisura, la existencia o no de pérdidas de materiales en superficie, etc., no son considerados, y pueden ser un indicador importante del estado del firme).

El concepto «gravidad de la fisuración» permite diferenciar entre aquellas grietas con poca separación entre bordes y sin que éstos presenten desperfectos, y que no están interconectadas entre sí, de las que presentan una gran separación entre bordes, están entrelazadas y presentan pérdidas de material. Las primeras indican una lenta evolución del deterioro y no presentan un peli-

gro para la circulación. Las segundas señalan una rápida evolución del deterioro y, debido a la formación de placas sueltas, llevan en seguida a desintegraciones que pueden ser un peligro para el tránsito de vehículos.

Este criterio puede utilizarse en conjunción con alguno de los anteriores, que entonces aumentan su poder de definición del fallo. En este trabajo se ha combinado con el de área fisurada. El parámetro representativo del deterioro es el porcentaje ponderado de superficie fisurada, que se obtiene multiplicando cada área fisurada (real o ficticia) por un coeficiente de ponderación que tenga en cuenta la mayor o menor gravedad de las fisuras contenidas en esa superficie, sumando las áreas así calculadas y dividiendo el resultado por el área total.

Por lo tanto, se definen tres parámetros mediante la metodología descrita en la figura 1.

El parámetro LF se define como el porcentaje de longitud ficticia agrietada respecto a la longitud total. Siendo L la longitud total del tramo en estudio, el cálculo de LF se realiza mediante la fórmula:

$$LF = \frac{\sum_i a_i^*}{L} \times 100$$

a_i^* = Longitudes ficticias.

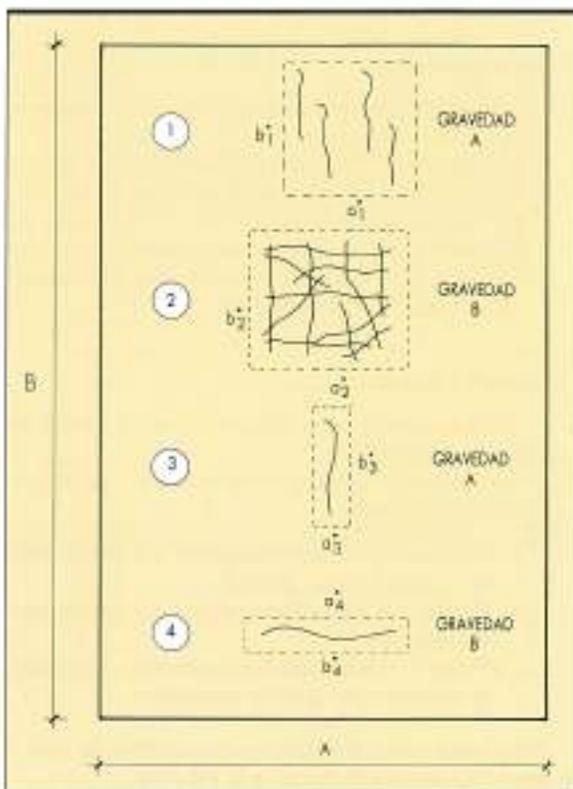


FIGURA 1. Cálculo de los parámetros LF, AF y GF.

El parámetro AF se define como el porcentaje de área ficticia agrietada respecto al área total considerada, pudiéndose calcular por la fórmula:

$$AF = \frac{\sum a_i^* b_i^*}{AB} \times 100$$

siendo:

- A: Ancho total de la zona de estudio (zona rodada).
- B: Longitud total de la zona de estudio.
- b_i : Longitudes ficticias.

El parámetro GF se define como:

$$GF = \frac{\sum a_i^* b_i^* c_i}{AB} \times 100$$

c_i : Coeficientes de gravedad.

A cada superficie utilizada para el cálculo del parámetro AF se le asigna un coeficiente c_i de gravedad, que depende del tipo de gravedad existente en esa superficie. Los valores de los coeficientes c_i utilizados en este trabajo son:

- Gravedad tipo A: $C_a = 1$
- Gravedad tipo B: $C_b = 2$

— Gravedad tipo A:

- Grietas aisladas cuya separación entre bordes es menor de 5 mm.
- Agrupación de grietas cuya distancia entre bordes es menor de 5 mm en más de la mitad de las fisuras, no presentan desperfectos en los bordes, no tienen pérdida de material en superficie ni se encuentran entrelazadas formando el agrietamiento denominado «piel de cocodrilo».

— Gravedad tipo B:

- Grietas aisladas cuya separación entre bordes es menor de 5 mm.
- Agrupación de grietas donde se cumple alguna de estas condiciones:
 - A. Distancia entre bordes superior a 5 mm en más de la mitad de las grietas.
 - B. Bordes con desperfectos y pérdida de material en superficie.
 - C. Fisuras entrelazadas formando una cuadrícula: la conocida por «piel de cocodrilo».

Tal y como están definidos los parámetros de área y de gravedad se cumple siempre la relación:

$$2 > GF / AF > 1$$

Cuanto más cercano se encuentre este cociente del valor dos, mayor será la gravedad de la fisuración producida; por el contrario, cuanto menor sea este cociente y más se acerque al valor unidad, menor gravedad presentarán las grietas que se han producido.

Los parámetros de longitud, área y gravedad representan el deterioro en términos absolutos. Se han definido otros dos parámetros para evaluar la velocidad de evolución del deterioro, que son los siguientes:

- VLF (Velocidad de Longitud Fisurada), obtenido por la diferencia de LF dividida por el número de ciclos en el que se ha producido.
- VAF (Velocidad de Área Fisurada), calculado en forma similar al anterior pero sobre AF .

La fórmula que define VLF , por ejemplo, entre los ciclos N_1 y N_2 queda de la siguiente manera:

$$VLF(N_1/N_2) = \frac{LF(N_2) - LF(N_1)}{N_2 - N_1}$$

Una vez definidos los parámetros representativos de la fisuración superficial, es necesario establecer los criterios de fallo para cada uno de ellos. Esto implica fijar el umbral límite de cada uno de los parámetros a partir del cual se considera que la sección ha fallado.

Los criterios de fallo para la fisuración superficial se recogen en la tabla 2.

LF (Longitud Fisurada) $\geq 50\%$
AF (Área Fisurada) $\geq 40\%$
GF (Gravedad de la zona Fisurada) $\geq 60\%$

TABLA 2. Criterios de fallo respecto a la fisuración superficial.

4. TOMA DE DATOS

La fisuración superficial se evalúa mediante inspección visual. Para ello se recorren las secciones de ensayo y se localizan las grietas que hayan aparecido en la zona de ensayo.

A continuación las fisuras se pintan en toda su longitud. En cada auscultación se utiliza pintura de un color distinto para poder distinguir la aparición de grietas en el tiempo.

Posteriormente se coloca en la superficie de los subtramos una trama metálica (ver foto 1), de tamaño $1,0 \times 1,25$ metros y dividida en líneas de 25 cm por medio de varillas longitudinales y transversales. La trama se sitúa al comienzo de la zona de ensayo de una sección de manera que sus varillas transversales inferior y superior coincidan con dos puntos de referencia.

Se realiza entonces una fotografía de la superficie



FOTO 1. Trama metálica sobre fisuras de la zona rodada. Sección 3, puntos 14 al 15.

del firme en la que aparezca toda la trama y las fisuras de su interior. Un ejemplo se presenta en la foto 1, que corresponde a una auscultación avanzada.

Finalmente el estado de las fisuras se informatiza. A tal efecto se ha desarrollado un programa que permite la entrada y almacenamiento en el ordenador mediante digitalización de todos los datos correspondientes a las grietas. El programa realiza también el análisis y la presentación de resultados.

Las medidas efectuadas en cada auscultación se han realizado siempre en los mismos puntos, de manera que los valores obtenidos con distinto número de ciclos de carga pueden ser contrastados entre sí y de esta forma se pueda realizar un análisis preciso de la evolución de los deterioros estudiados en cada sección.

Esto exige una buena referenciación de la superficie de las secciones de ensayo. El sistema adoptado ha sido el siguiente:

- En cada sección se establecieron una serie de líneas longitudinales de referencia, que se denominaron por la distancia (medida en decímetros) en la sección transversal a una línea origen (línea 0), situada entre la viga carril y la zona de rodada, que se estableció de manera que su distancia al eje longitudinal central de la zona rodada (línea 10, ver figura 2) fuera de 1 metro.
- En cada línea se estableció una serie de puntos como referencia longitudinal, con una equidistancia entre sí de 1 metro. La denominación de cada punto se definió por la distancia longitudinal, medida en metros, a un punto de origen (punto 0, ver figura 2).
- En cada sección se estableció una zona de estudio, localizada en las secciones 1, 3, 4 y 6 entre los puntos 0 y 15, y en las secciones 2 y 5 entre los puntos 0 y 20. De esta forma no se tienen en cuenta las zonas de transición (ver figura 3).
- Cualquier punto de medida queda referenciado en transversal por la línea longitudinal a la que pertenece, y en longitudinal por el punto en el que está situado.

5. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FISURACIÓN

La fisuración empieza a manifestarse en forma de grietas transversales. Este hecho es debido, probablemente, al continuo cambio de posicionamiento transversal del vehículo y a que las tensiones horizontales longitudinales (sentido de avance del vehículo) son mayores que las transversales.

Las fisuras transversales tienen en general un ancho de magnitud importante ($> 0,6$ m) debido a la superposición de la zona pisada por los neumáticos que se produce en posiciones 2, 3 y 4 del vehículo.

Una vez que se han producido las primeras grietas transversales, el agrietamiento avanza uniendo éstas por medio de fisuras longitudinales y diagonales, mientras se extienden las transversales, formando al final la característica «piel de cocodrilo».

En el ciclo 500.000, dado que las secciones 5 y 6 habían alcanzado un nivel de fisuración importante (LF del 50%), estos subtramos fueron considerados fuera de servicio. Como la deformación transversal también era considerable, y en algunas zonas producía problemas en

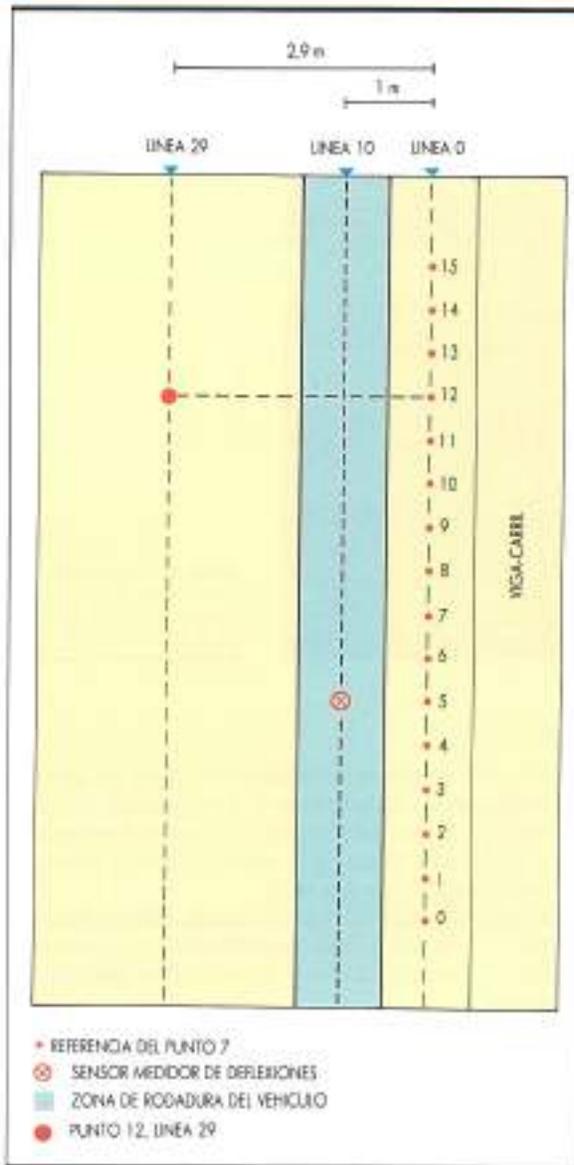


FIGURA 2. Referenciación superficial de una sección de ensayo.

el movimiento del vehículo (particularmente rozamientos de la rueda de seguridad con la superficie de los firmes y fuertes oscilaciones verticales), se procedió a reparar estas secciones para permitir la circulación sin problemas. El mismo proceso, y por las mismas causas, se realizó en la segunda mitad de la sección 3 en el cielo 850.000.

Previamente a la primera operación de conservación, se realizó una campaña de extracción de testigos en estas secciones. Un resumen de los resultados obtenidos se presenta en las tablas 3 y 4.

En la sección 5 se extrajo un total de 37 testigos, 15

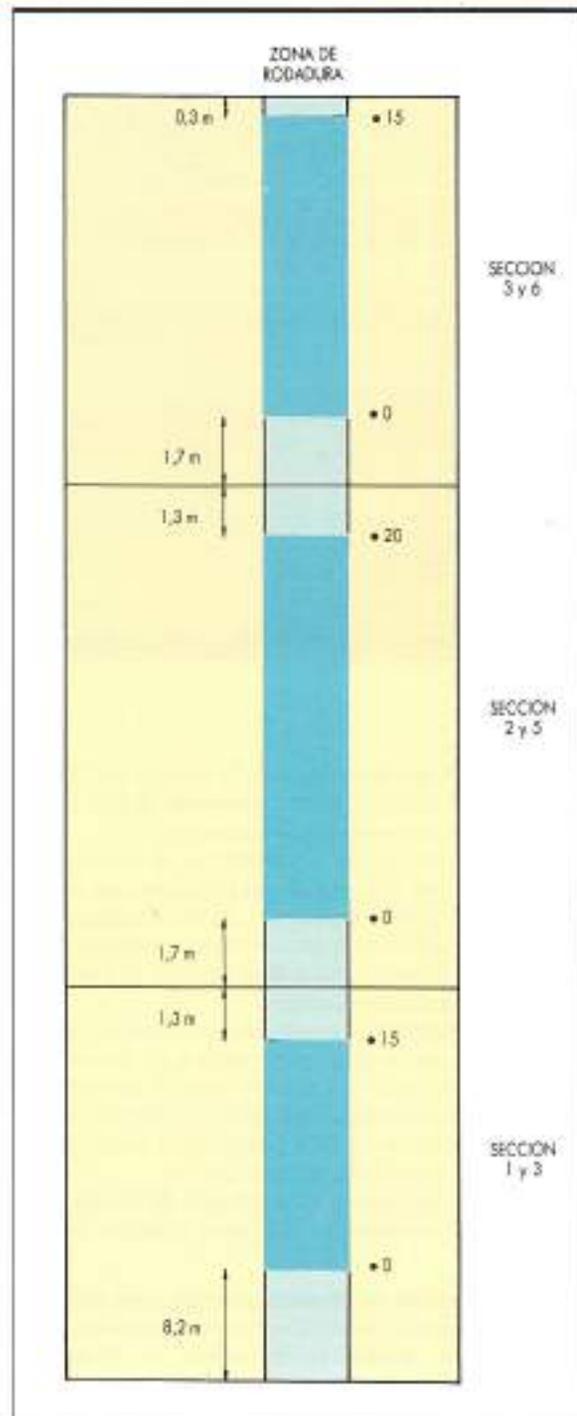


FIGURA 3. Zonas de estudio en las secciones de ensayo.

de ellos del interior de la zona rodada (IZR en las tablas); 15 de la línea 19, es decir, fuera de la zona rodada pero en los límites de ésta (LZR), y 7 de la línea 36, es

CARRETERAS Y AEROPUERTOS

SECCIÓN	NUMERO CAPAS	SITUACION CAPAS	F.Z.R.		L.R.Z.		I.Z.R.	
			(A)	(B)	(A)	(B)	(A)	(B)
5	3		7	100	5	33	2	13
			0	0	8	54	2	13
			0	0	2	13	11	74
6	2		5	100	13	87	3	30
			0	0	2	13	7	70

F.Z.R. = Datos de testigos extraídos fuera de la zona rodada línea 36.
 L.R.Z. = Datos de testigos extraídos en los límites de la zona rodada línea 19.
 I.Z.R. = Datos de testigos extraídos en el interior de la zona rodada.
 (A) = Valor en número absoluto de testigos.
 (B) = Valor en porcentaje sobre el número total de testigos de cada procedencia.



TABLA 3. Número de testigos con separación de la capa de mezcla bituminosa en subcapas.

decir, alejados de la zona rodada (FZR). De los extraídos dentro de la zona rodada, 5 se localizaron sobre grietas superficiales, otros 5 inmediatamente después de finalizar una grieta y otros 5, por último, en zona sin agrietar.

Varios de los testigos presentaban una o varias de las tres capas de mezcla separadas (en esta sección se extendió la capa intermedia en dos tongadas y la de rodadura en una), datos que se presentan en la tabla 3.

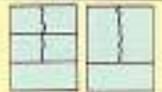
De los 37 testigos, 6 presentaban fisuras. Los 6 estaban extraídos del interior de la zona rodada, y correspondían a los 5 testigos localizados sobre fisuras y a un testigo de los situados al final de una grieta. Los datos sobre la situación de estas fisuras (capas a las que afectan) se presentan en la tabla 4.

En la sección 6 se extrajeron 30 testigos en total, 15 en los límites de la zona rodada, 10 en el interior de ésta y 5 fuera de la zona rodada. Únicamente 3 testigos pre-

sentaron fisuras, todos ellos del interior de la zona rodada, y todos ellos localizados sobre fisuras superficiales. Los datos se presentan en las mismas tablas 3 y 4.

De acuerdo con estas tablas, la hipótesis más probable es que el agrietamiento de la mezcla haya seguido el siguiente proceso:

- A. Separación de la mezcla en todas las capas posibles (tres en la sección 5 y dos en la 6). Si existen tres primero se separa la superior y posteriormente la inferior.
- B. Rotura de la capa superior por fatiga. Debilitamiento de esa capa y mayores tensiones en las capas inferiores de la mezcla.
- C. Rotura de la capa intermedia. Debilitamiento de esa capa y mayores tensiones en la capa inferior de la mezcla.
- D. Rotura de la capa inferior. Como consecuencia toda la capa de mezcla queda agrietada.

SECCION	NUMERO CAPAS	SITUACION CAPAS	(A)	(B)
5	3		2	33
			3	50
			1	17
6	2		1	33
			2	67

(A) = Valor en número absoluto de testigos.

(B) = Valor en porcentaje sobre el número total de testigos.

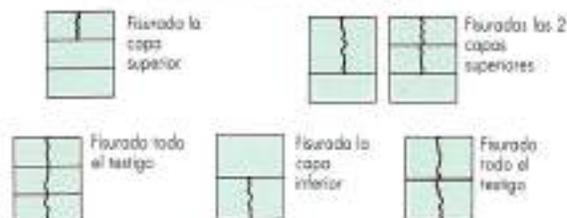


TABLA 4. Número de testigos con fisuras en las subcapas separadas de la capa de mezcla.

6. EVOLUCION DE LA FISURACION CON EL NUMERO DE CICLOS DE CARGA

Los gráficos que representan la evolución de los parámetros de fisuración (*LF*, *AF* y *GF*) con el número de ciclos de carga se dan en las figuras 4, 5 y 6. De su análisis pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- En los subtramos de la sección-tipo 322 la clasificación, de mejor a peor, de las secciones según los parámetros representativos de la fisuración, es: 1, 2 y 3. Esta ordenación está de acuerdo con el espesor de mezcla respectivo de forma que con mayor espesor se produce menor fisuración y es menor, también, el valor de los parámetros.
- En los subtramos de la sección-tipo 321 la clasificación, de mejor a peor, de las secciones según los pa-

rámetros, es: 4, 5 y 6. También esta ordenación está de acuerdo con el espesor de mezcla respectivo.

- Teniendo en cuenta todas las secciones, la clasificación que se obtiene entre ellas por los parámetros es, de mejor a peor: 1, 2, 4, 5, 3 y 6. Esta ordenación señala una mayor capacidad de soporte y durabilidad de la sección-tipo 322 frente a la 321.

A partir de los valores obtenidos de los parámetros representativos de la fisuración en valor absoluto (*LF*, *AF* y *GF*) en las diferentes secciones y auscultaciones (es decir, con los datos de su evolución con la repetición de cargas) se ha realizado un proceso de modelado. Se han probado curvas de tipo exponencial, logarítmico, doble logarítmica y polinómica utilizando en todas ellas el método del polinomio de Tchebycheff y minimizando el error medio cuadrático. Los mejores resultados se han obtenido al ajustar curvas polinómicas de cuarto grado, cuyos coeficientes respectivos, junto con los valores del coeficiente de correlación, se adjuntan en las tablas 5, 6 y 7. Como se ve, las correlaciones son bastante buenas, con valores de R^2 entre 0,90 y 1,00.

Estos modelos de evolución de los tres parámetros *LF*, *AF* y *GF* con el número de ciclos de carga en las seis secciones ensayadas, representados conjuntamente en forma de curvas, conforman las figuras 7, 8 y 9.

En la figura 10 se presenta el modelo de variación de *LF* con el espesor de mezcla bituminosa en cada una de las secciones-tipo. El cálculo se ha realizado con los valores de las secciones al término del ensayo (medio millón de ciclos en las variantes de la sección 321 y un millón de ciclos en las variantes de la 322). El método utilizado es el mismo que en la modelización anterior. En este caso los mejores resultados se obtienen ajustando polinomios de segundo grado. Los resultados de los coeficientes se presentan en la tabla 8.

De la figura 10 se deduce de nuevo la sensibilidad, en cuanto a fisuración de la sección tipo 321 al espesor de mezcla bituminosa cuando se han aplicado medio millón de ciclos de carga. En ese momento la sección 321 (la 4 del ensayo) pasa de tener aproximadamente un 10 % de Longitud Fisurada con el espesor teórico (18 cm) a presentar alrededor del 90 % de *LF* si éste se reduce un 22 % (de 18 a 14 cm). Como media, por lo tanto, cada centímetro menos de mezcla bituminosa conduce en la sección 321 a que después de medio millón de ciclos de carga tenga un 20 % más de longitud de la sección que presente grietas.

De la misma figura se deduce también la sensibilidad de la sección-tipo 322 al espesor de mezcla, respecto a la fisuración y después de un millón de cargas. En ese instante la sección 322 (la 1 del ensayo) pasa de no tener fisuración con el espesor teórico (15 cm) a presentar algo más del 80 % de Longitud Fisurada al reducir éste un 35 % (de 15 a 10 cm). Como media, por lo tanto, cada centímetro menos de mezcla bituminosa en la sección 322 produce que en la sección se fisure un 15 % más de su longitud después de aplicar un millón de ciclos de carga.

GRAFICO DE RESULTADOS DE SECCIONES HASTA CICLO 1000000

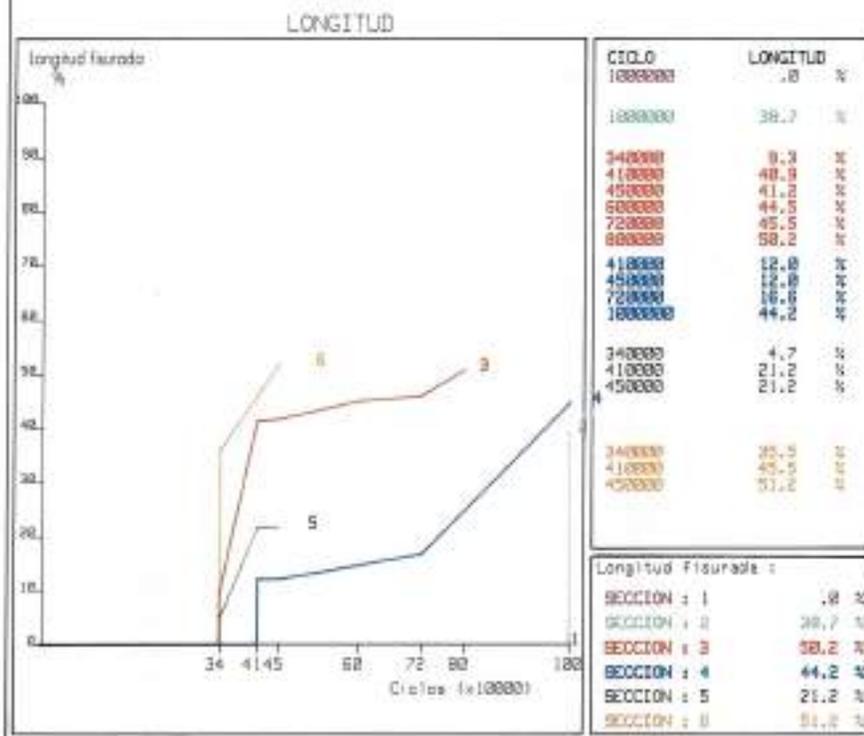


FIGURA 4. Evolución de la longitud fisurada (LF) con el número de ciclos de carga en las secciones de ensayo.

GRAFICO DE RESULTADOS DE SECCIONES HASTA CICLO 1000000

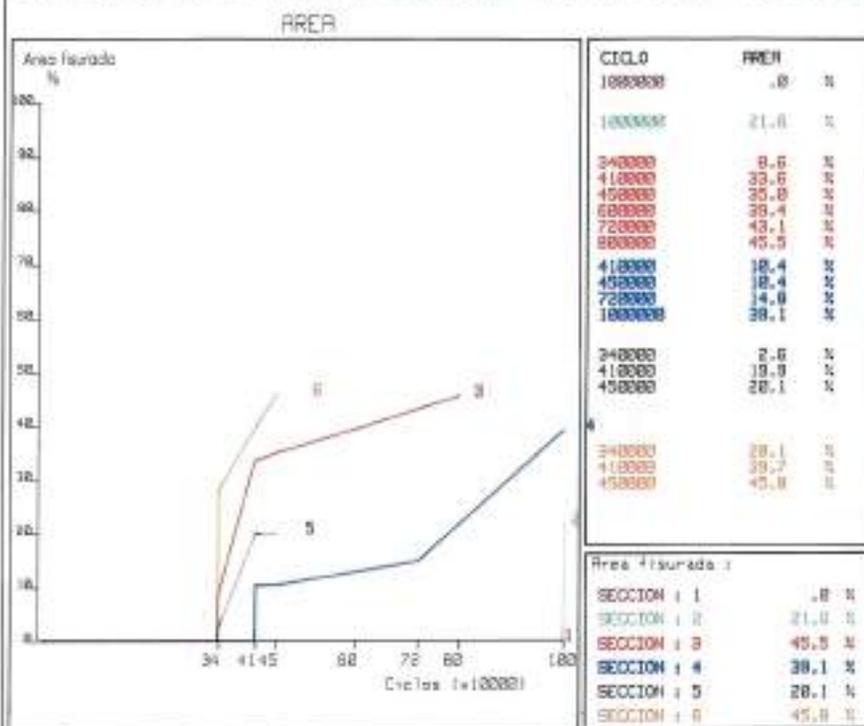


FIGURA 5. Evolución del área fisurada (AF) con el número de ciclos de carga en las secciones de ensayo.

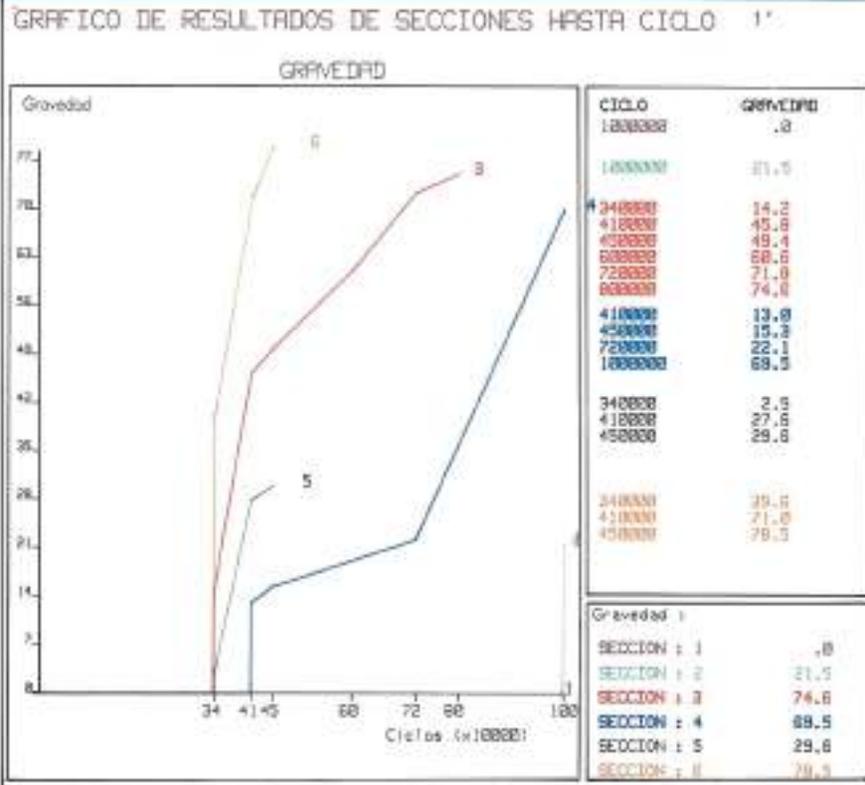


FIGURA 6. Evolución de la gravedad de fisuración IGF con el número de ciclos de carga en las secciones de ensayo.

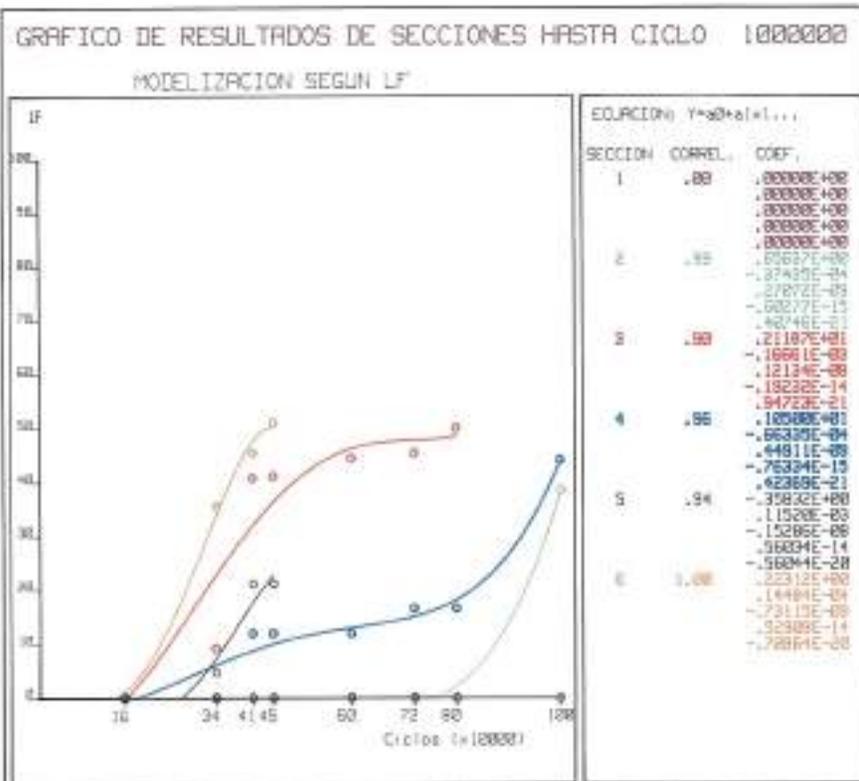


FIGURA 7. Modelización de la evolución de la longitud fisurada L'f con el número de ciclos de carga en las secciones de ensayo.

GRAFICO DE RESULTADOS DE SECCIONES HASTA CICLO 1000000

MODELIZACION SEGUN RF

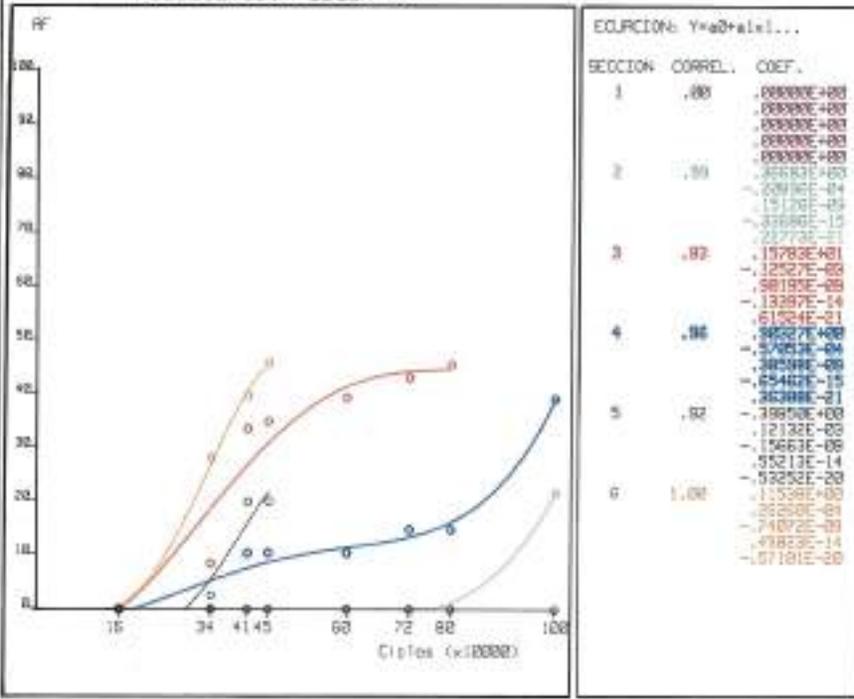


FIGURA 8. Modelización de la evolución del área lesionada (AF) con el número de ciclos de carga en las secciones de ensayo.

GRAFICO DE RESULTADOS DE SECCIONES HASTA CICLO 1000000

MODELIZACION SEGUN GF

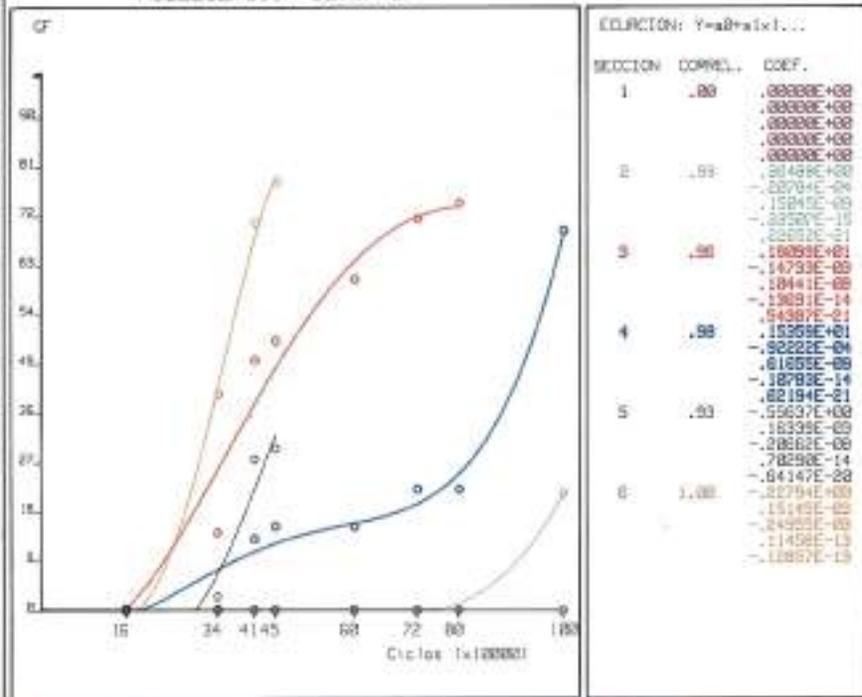


FIGURA 9. Modelización de la evolución de la gravedad de fisuración (GF) con el número de ciclos de carga en las secciones del ensayo.

CARRETERAS Y AEROPUERTOS

GRAFICO DE RESULTADOS DE SECCIONES HASTA CICLO 1000000

VELOCIDAD DE FISURACION SEGUN LF

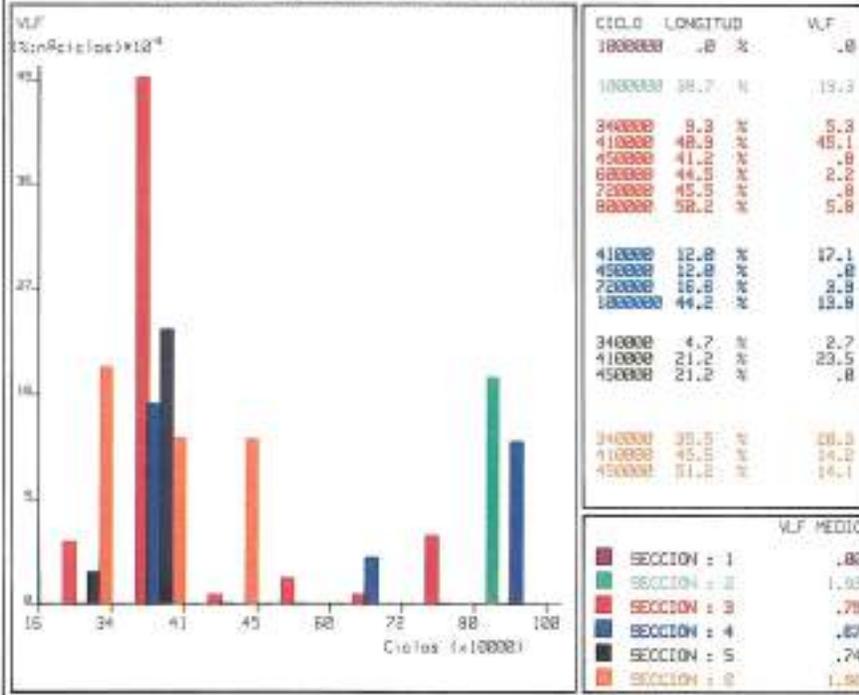


FIGURA 11. Variación de la velocidad de longitud fisurada (VLF) con el número de ciclos de carga en las secciones de ensayo.

GRAFICO DE RESULTADOS DE SECCIONES HASTA CICLO 1000000

VELOCIDAD DE FISURACION SEGUN AF

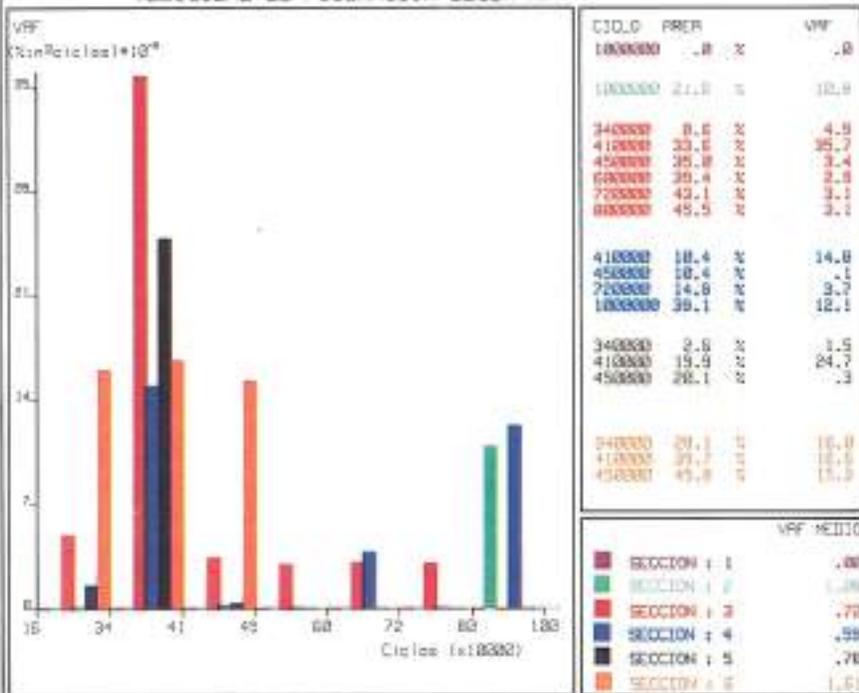


FIGURA 12. Variación de la velocidad de área fisurada (VAF) con el número de ciclos de carga en las secciones de ensayo.

CARRETERAS Y AEROPUERTOS

SECCION	VELOCIDAD DE LONGITUD FISURADA (%/10 ⁵ - CICLOS)							VLFM
	C: 165-340	C: 340-410	C: 410-450	C: 450-600	C: 600-720	C: 720-800	C: 800-1.000	
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	19,3	19,3
3	3,3	45,1	0,8	2,2	0,8	5,8	0,0	7,9
4	0,0	17,1	0,0	0,0	3,9	0,0	13,8	6,7
5	2,7	23,6	0,0	—	—	—	—	7,4
6	20,3	14,2	14,1	—	—	—	—	18,0

C = Intervalo de ciclos (en miles).

VLFM = Velocidad media a lo largo del ensayo (desde la primera fisura) (%/10⁵ - ciclos).

TABLA 9. Evolución del parámetro VLF con el número de ciclos de carga.

SECCION	VELOCIDAD DE AREA FISURADA (%/10 ⁵ - CICLOS)							VAFM
	C: 165-340	C: 340-410	C: 410-450	C: 450-600	C: 600-720	C: 720-800	C: 800-1.000	
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,8	10,8
3	4,9	35,7	3,4	2,9	3,1	3,1	—	7,2
4	0,0	14,8	0,1	0,0	3,7	0,0	12,1	5,9
5	1,5	24,7	0,5	—	—	—	—	7,1
6	16,0	16,6	15,3	—	—	—	—	16,1

C = Intervalo de ciclos (en miles).

VAFM = Velocidad media a lo largo del ensayo (desde la primera fisura) (%/10⁵ - ciclos).

TABLA 10. Evolución del parámetro VAF con el número de ciclos de carga.

SECCION	NUMERO DE CICLOS			
	LF = 50 %	AF = 40 %	GF = 60	MEDIA
1	> 1.000 (0)	> 1.000 (0)	> 1.000 (0)	> 1.000
2	> 1.000 (39)	> 1.000 (22)	> 1.000 (22)	> 1.000
3	800	600	600	670
4	> 1.000 (44)	1.000	960	1.000
5	> 500 (21)	> 500 (20)	> 500 (30)	> 500
6	440	410	380	410

(0) = Valor del parámetro al finalizar el ensayo en esa sección cuando no se alcanza el fallo.

TABLA 11. Ciclos de fallo en las que se produce el fallo de las secciones por fisuración.

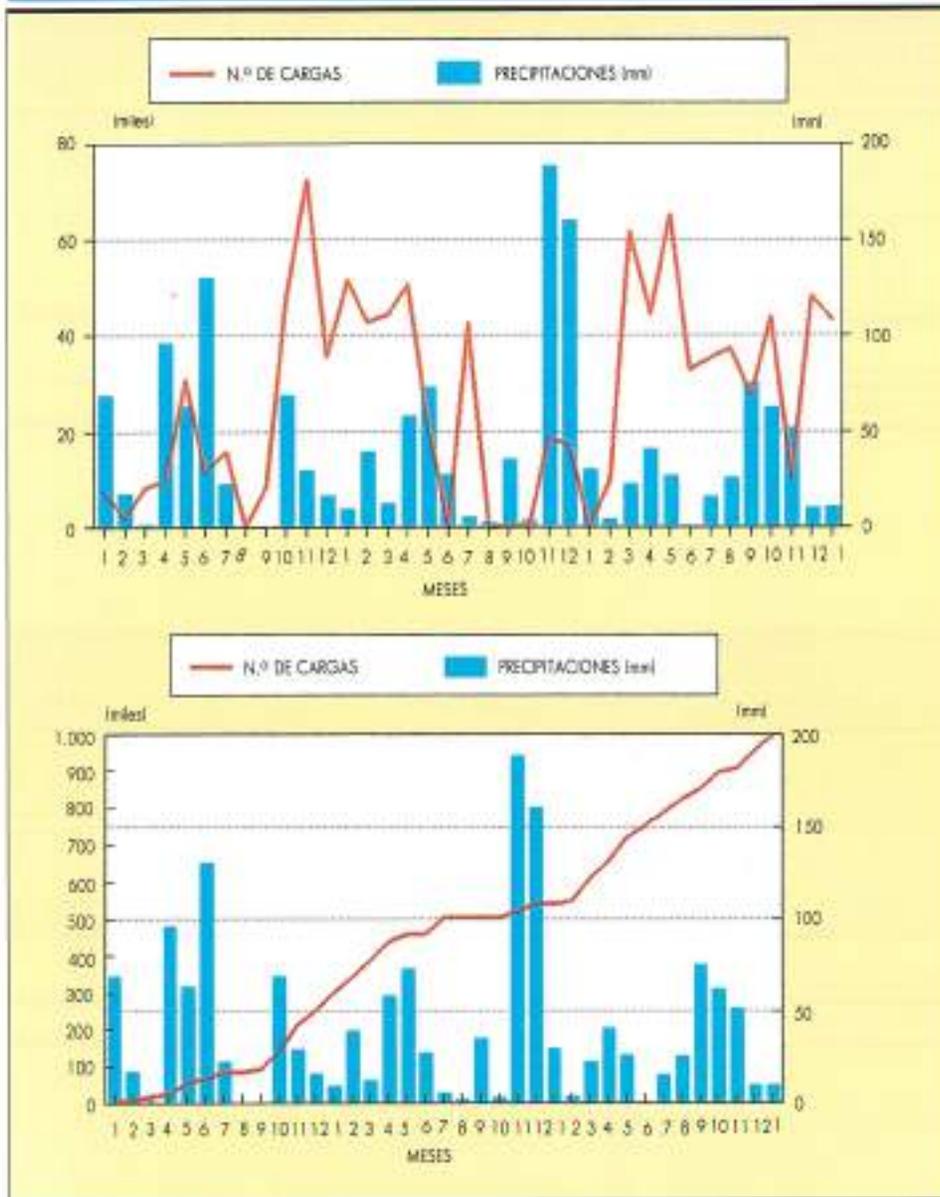


FIGURA 13. Relación entre precipitaciones y número de cargas.

8. APLICACION DE LOS CRITERIOS DE FALLO

Aplicando a los resultados obtenidos en cada sección los criterios de fallo respecto a la fisuración superficial establecidos al comienzo del ensayo (ver tabla 2), se confecciona la tabla 11. En esta tabla se indica el número de ciclos de carga recibidos por cada una de las secciones (incluyendo la 5) cuando se alcanza el nivel de fallo para cada uno de los parámetros *LF*, *AF* y *GF*. En los casos en que este nivel de fallo no se ha alcanzado al finalizar el ensayo se indica, entre paréntesis, el valor del parámetro en ese instante. La última columna de la tabla indica el ciclo de fallo medio, calculado a partir de los niveles de fallo de los tres parámetros antedichos.

Del análisis de esta tabla se deducen lo siguiente:

- De las dos secciones tipo la 321 (la 4 del ensayo) alcanza el fallo por fisuración con 1.000.000 de ciclos de carga (es decir, los previstos y realizados en el ensayo), mientras que la 322 (la 1) no sólo no ha llegado al fallo en ese instante sino que se encuentra muy lejos de él (fisuración nula).
- La sección 2 no ha alcanzado el fallo por fisuración con un millón de cargas, aunque presenta en ese instante un agrietamiento intermedio entre el nulo y el nivel de fallo (valores de los parámetros de 39 %, 22 % y 22 frente al 50 %, 40 % y 60 del criterio de fallo).

- La sección 3 alcanza el fallo por fisuración por los tres parámetros antes del millón de cargas. Estableciendo una media entre los tres criterios de los parámetros el fallo de la sección 3 se produce con 670.000 ciclos de carga.
- De lo anterior se deduce que en las secciones variantes de la 322 al reducir el espesor de mezcla un 35 % (es decir, a los 10 cm de la sección 3 del ensayo) el fallo por fisuración se produce aplicando 670.000 ciclos. Cuando el espesor es igual o superior a 12,5 cm (secciones 2 y 1) la estructura aguanta como mínimo el tráfico previsto (un millón de ciclos de carga) sin alcanzar el fallo por fisuración.
- La sección 6 alcanza el fallo por fisuración según los tres parámetros estudiados. Haciendo una media de los tres criterios de los tres parámetros, el fallo por fisuración de la sección 6 se alcanza con 410.000 ciclos de carga.
- La sección 5 no ha alcanzado el fallo por fisuración con medio millón de cargas, presentando en este momento un agrietamiento intermedio entre el nulo y el nivel de fallo. No se dispone de datos posteriores a ese ciclo debido a la reparación efectuada, pero como su espesor (16 cm) se encuentra entre la sección 4 (18 cm) y la 6 (14,5 cm) se puede suponer que la sección 5 alcanza el fallo por fisuración en el ciclo 700.000 número intermedio del fallo de las anteriores.
- De lo anterior se deduce que en las secciones variantes de la 321 al reducir el espesor un 19 % (es decir, a los 14,5 cm de la sección 6 del ensayo), el fallo por fisuración se produce después de aplicar 410.000 cargas, es decir, un 60 % menos del tráfico previsto. Al reducir el espesor un 11 % (sección 5D, de 16 cm) únicamente se soportan un 30 % menos de cargas (700.000) que las previstas (un millón).

GEOLINER



Al servicio de la ingeniería civil

GEOLINE®: Impermeabilizaciones superficiales

GEOLOCK®: Impermeabilizaciones verticales

MEBRA-DRAIN®: Asentamiento y estabilización de suelos

Tensar: Refuerzo de suelos, taludes y pavimentos.



Tensar

Tensar es un producto de Tensar Corporation, una empresa de Tensar Corporation, una empresa de Tensar Corporation.



GEOLINER
GEO LINER SYSTEMS, S.A.

Chile, 1 - Portal 1, 2º - 2
Tels. 839 67 11 - 639 68 50 - 638 64 20
Fax 639 24 82
28020 MAJADAHONDA (MADRID)

El camino del líder.

Repsol Productos Asfálticos, líder en el mercado de los asfaltos, avanza trabajando para todo el mundo. Kilómetro a kilómetro. Ofreciendo la gama de productos de base asfáltica con las máximas garantías de calidad y servicio.

Ajustados a las especificaciones

técnicas más estrictas que exigen los mercados nacional e internacional. Asegurando su suministro con absoluta fiabilidad, para llegar a tiempo hasta donde usted quiera. Siguiendo el camino del líder. El camino de Repsol Productos Asfálticos.

