

Estudio de algunos casos de fisuración descendente en carreteras españolas

Tradicionalmente se ha admitido que la mayor parte de las fisuras que aparecen en la superficie del pavimento procede de las capas inferiores, afectadas por la fatiga o por la retracción que acompaña al fraguado de materiales tratados con cemento. Sin embargo, en la última década diversos trabajos de investigación han puesto de manifiesto la relevancia de otro problema muy diferente: la iniciación de fisuras en la capa de rodadura que progresivamente van afectando a las capas inferiores.

En este artículo se muestran varios casos estudiados en carreteras españolas, en los que se ha constatado que las fisuras observadas en la superficie afectaban sólo a la capa de rodadura, aunque en algunos casos habían progresado, dañando ya la parte superior de la capa intermedia. Para caracterizar las mezclas asfálticas afectadas por este problema se extrajeron testigos, comprobando la granulometría de las mezclas, sus características mecánicas y el estado del ligante. Como resultado general puede concluirse que las mezclas afectadas tenían problemas de segregación granulométrica en vertical, y en todos los casos el ligante había envejecido sensiblemente, a pesar de tratarse de actuaciones algunas de ellas con sólo unos pocos años en servicio.

It has traditionally been accepted that most of the cracks that appear in pavement surfaces come from the lower layers, affected by fatigue or by the retraction that accompanies the hardening of cement-treated materials. However, in the last decade, different research projects have shed light on the relevance of another, very different problem: the beginning of cracks in the wearing course which progressively affect the lower layers.

This paper highlights various case studies conducted on Spanish roads in which it has been verified that the observed surface cracks affected only the wearing course, although in some cases they had progressed downward considerably, damaging the upper part of the binder layer. In order to characterise the type of asphalt mixes affected by this problem, pavement samples were extracted to verify the gradation of the mixes, their mechanical properties and the state of the binder. As a general result, it can be concluded that the affected mixes had problems of vertical particle size segregation and in all cases the binder had aged significantly, despite dealing with surfaces that in some cases have only been in service for a few years.

Juan Gallego Medina
Miguel Ángel del Val Melús
Ángel Sampedro Rodríguez
Universidad Politécnica de Madrid

Jacinto Luis García Santiago
Patricia Díaz Martín
Sacyr, S. A. U.

1. Introducción

Tradicionalmente se ha admitido que la mayor parte de las fisuras que aparecen en la superficie del pavimento proce-

de de las capas inferiores, afectadas por la fatiga o por la retracción que acompaña al fraguado de materiales tratados con cemento. Con dicho enfoque las fisuras superficiales no serían más que la evolución o el reflejo de un problema originado en las capas inferiores. Sin embargo, en la última década diversos trabajos de investigación han puesto de manifiesto la relevancia de otro problema muy diferente: la iniciación de fisuras en la capa de rodadura que progresivamente van afectando a las capas inferiores. Es lo que se ha denominado fisuración descendente (*top-down cracking*).

Existen ya numerosos estudios sobre este fenómeno. Durante los trabajos de la Acción COST 333 en el marco de la

Estudio de algunos casos de fisuración descendente en carreteras españolas

Comisión Europea se realizó una encuesta a las agencias de carreteras sobre los fallos observados con mayor frecuencia en los firmes [1]. El resultado mostraba que los fallos del tipo "agrietamiento longitudinal en la rodada" estaban por delante de los problemas de fatiga iniciada en el fondo de las capas bituminosas. Esa morfología longitudinal es propia de la fisuración descendente.

En 1997 el Departamento de Transportes de Colorado, en una obra de rehabilitación del firme semiflexible de la interestatal I-25, fresó un espesor de 8 cm de mezcla bituminosa y lo repuso con una nueva mezcla. A principios de 1998 ya se observaban fisuras en superficie. Varias campañas de toma de testigos y otros estudios pusieron de manifiesto que la fisuración longitudinal no era el resultado de la reflexión de fisuras desde las capas inferiores, sino que se había iniciado en la nueva capa bituminosa, es decir, se trataba de una fisuración descendente [2].

El Departamento de Transportes de Michigan también llevó a cabo estudios [3] para determinar la importancia del problema de la fisuración descendente, así como para establecer los factores con influencia en el fenómeno. Se seleccionaron 13 pavimentos flexibles y 5 pavimentos construidos sobre capas tratadas con cemento, previamente demolidas y convertidas en capas de comportamiento granular (*rubblized pavements*). Como resultado del estudio se identificaron numerosos tramos con problemas de fisuración descendente y se observó cómo, igual que en el caso del estudio en Colorado, factores tales como la baja resistencia a tracción indirecta de la capa bituminosa, los defectos de compactación o la segregación de áridos aparecen frecuentemente en los casos de fisuración descendente.

Respecto a la relevancia de este mecanismo de fallo, autores como Myers et al. [4] y Croll [5] han llegado a afirmar que fallos tradicionales, como la fatiga o la fisuración reflejada, pueden comenzar también en superficie, hasta conectar con el deterioro de las capas inferiores.

En los apartados siguientes se presenta una metodología de estudio aplicada a varios casos de carreteras españolas en las que se han identificado fisuras descendentes y en las que mediante el correspondiente estudio de la mezcla bituminosa y del ligante que contiene se han establecido los factores que parecen acompañar a la aparición de fisuras descendentes en esos firmes.

2. Metodología de estudio y normas de ensayo.

Dado que se trata de un problema sobre el que sólo recientemente se ha tomado conciencia, se diseñó un protocolo de trabajo a seguir en todos los casos de estudio, de modo que los datos obtenidos fuesen homogéneos y comparables entre sí, a fin de poder establecer con mayor facilidad las tendencias observadas. El protocolo establecía los siguientes pasos:

1. Selección de los tramos sospechosos de sufrir fisuración descendente. Se identificaban a partir de la morfología de la fisuración observable en la superficie: fisuras longitudinales, relativamente rectilíneas aunque algo sinuosas, situadas a un lado de la rodada e incluso en la propia rodada. Cuando era posible, en la carretera se identificaban dos tramos: uno afectado y otro poco o nada afectado.
2. Campaña de extracción de testigos en el tramo afectado (y en el no afectado cuando existía). La testificación se realizaba según el croquis de la Figura 1. Se extraían testigos sobre la fisura (para comprobar si era descendente o ascendente, su profundidad y las capas afectadas), así como testigos cercanos a ella, pero fuera de su influencia, de modo que pudieran ensayarse dichos testigos mediante ensayos mecánicos sin que el resultado se viese afectado por una fisura preexistente. En el tramo no afectado el patrón de la campaña de testigos era similar en cuanto a la ubicación de los taladros, aunque sin fisura, naturalmente.
3. Estudio de la mezcla bituminosa de los testigos en la parte correspondiente a la capa de rodadura: densidad aparente (UNE-EN 12697-6), contenido de ligante (UNE-EN 12697-1 y UNE-EN 12697-3), granulometría de los áridos recuperados (UNE-EN 933-1) y resistencia a tracción indirecta (UNE-EN 12697-23). Para el estudio de la capa de rodadura se cortó ésta a mitad de espesor en el laboratorio, distinguiéndose así una semicapa superior y una semicapa inferior. Con ello se pretendían analizar por un lado las características de los centímetros superiores de la capa de rodadura, más expuestos a los agentes meteorológicos, y por otro la zona del fondo de esa capa.
4. Estudio del betún recuperado de los testigos: penetración (UNE-EN 1426), punto de reblandecimiento (UNE-

EN 1427), módulo de cizallamiento y ángulo de desfase (UNE-EN 1470) y punto de fragilidad Fraass (UNE-EN 12593). Se analizaron independientemente el betún extraído de la semicapa superior y el de la semicapa inferior.

5. Análisis de los resultados de cada caso, y posterior comparación entre ambos, para intentar identificar las propiedades o características de las mezclas y de los ligantes que acompañan a la aparición de la fisuración descendente.

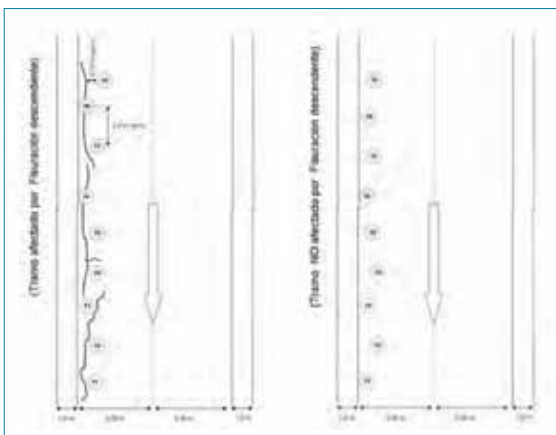


Figura 1. Esquema de localización de los testigos extraídos en el tramo afectado y en el no afectado.

3. Casos de estudio

El protocolo de trabajo anterior se aplicó a varias carreteras. No en todas fue posible encontrar un tramo afectado y otro no afectado. A continuación se presentan las características de los tramos estudiados y los resultados de los ensayos realizados sobre los testigos de mezcla bituminosa y sobre el betún extraído de ellos.

3.1 Carretera C-681

Los tramos pertenecen a la carretera C-681, entre Tossa y Llagostera (Girona). El estudio se ha realizado en torno al p.k. 2+500, e incluye tanto un tramo afectado por fisuración descendente como un tramo aparentemente más sano. Se trata de una carretera convencional de dos carriles con un tráfico de intensidad media.

Los testigos tomados sobre fisuras del pavimento ponían de manifiesto que se trataba de fisuras descendentes puesto que no atravesaban todo el espesor del firme, sino que afectaban a la capa de rodadura y en algunos casos a la capa intermedia (figura 2).

Según se observa en esos testigos, el firme estaba constituido por unos 20 cm de mezclas bituminosas, distribuidos en tres capas sucesivas de espesores aproximadamente iguales, la de rodadura con áridos silíceos, y las dos inferiores con áridos calizos. La campaña de extracción de testigos la realizó la empresa Servià Cantó, una de las entidades participantes en el Proyecto Fénix.

Los ensayos realizados a los testigos mostraron que existía una segregación vertical del árido dentro de la capa de rodadura, más acentuada en el tramo afectado por fisuración descendente, observándose que la semicapa inferior tiene más gruesos que la semicapa superior y que en el tramo fisurado la mezcla era algo más gruesa que en el tramo no fisurado (figura 3).

Las densidades de las mezclas bituminosas en uno y otro tramo se muestran en la Tabla 1. Se observa que en ambos la densidad es muy similar. Este hecho no parece por lo tanto marcar diferencias.

Se evaluó también el contenido de ligante. Los resultados se presentan en la Tabla 2. Se observa que el contenido de ligante es similar en la capa de rodadura de ambos tramos, incluso mayor en el tramo fisurado.

Por lo que respecta a las características del ligante recuperado, la Tabla 3 presenta los valores obtenidos de penetración y de punto de reblandecimiento. En este sentido las características de las semicapas superiores son similares.

En cuanto a las características dinámicas del ligante, se realizaron ensayos de barrido de frecuencias a 52 °C con reómetro dinámico. Los valores del módulo de cizallamiento complejo (G^*) y del ángulo de desfase (δ) se recogen en la Tabla 4. Se



Figura 2. Aspecto de la carretera C-681 y dos de los testigos extraídos.

Estudio de algunos casos de fisuración descendente en carreteras españolas

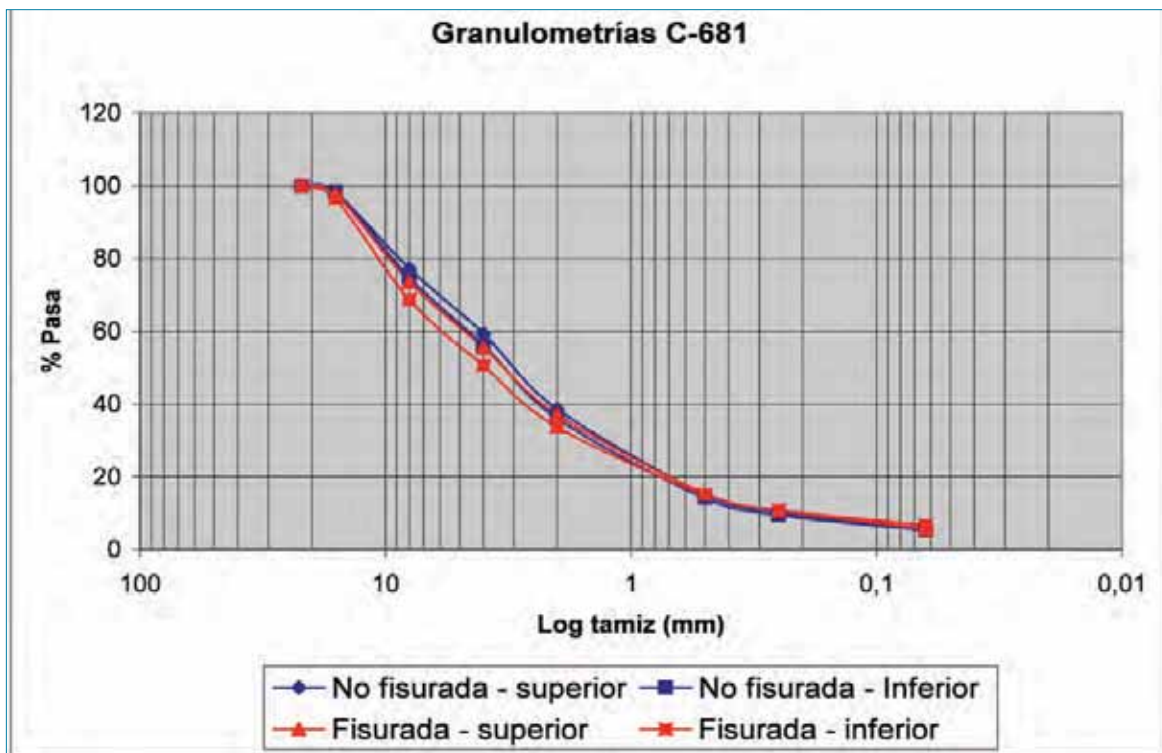


Figura 3. Granulometrías en la rodadura de la carretera C-681.

Tabla 1. Densidad de los testigos de la capa de rodadura (carretera C-681).

Tramo fisurado		Tramo no fisurado	
Nº testigo	Densidad (g/cm³)	Nº testigo	Densidad (g/cm³)
1	2,253	10	2,309
2	2,248	11	2,305
3	2,296	12	2,287
4	2,281	13	2,274
5	2,255	14	2,265
6	2,281	15	2,274
7	2,282	16	2,282
8	2,265	17	2,250
9	2,267	18	2,298
Media	2,270	Media	2,283
σ^2	0,016	σ^2	0,019

observa que los módulos son mayores en el betún del tramo fisurado, y los ángulos de desfase menores; ambos parámetros evidencian un mayor envejecimiento de ese ligante.

Para determinar el comportamiento a bajas temperaturas de los ligantes recuperados se realizó el ensayo Fraass. Los resultados se presentan en la Tabla 5. Al igual

Tabla 2. Contenido de ligante en los testigos de la capa de rodadura (carretera C-681).

Tramo fisurado		Tramo no fisurado	
Semicapa superior	Semicapa inferior	Semicapa superior	Semicapa inferior
4,57 %	4,78 %	4,52 %	4,67 %
4,675 %		4,595 %	

Tabla 3. Penetración y temperatura de reblandecimiento de los ligantes recuperados (carretera C-681).

	Tramo fisurado		Tramo no fisurado	
	Semicapa superior	Semicapa inferior	Semicapa superior	Semicapa inferior
Penetración (10 ⁻¹ mm)	14,7	19	14	N.D.
Temperatura de anillo y bola (°C)	71	66,8	72	N.D.

Tabla 4. Módulo de cizallamiento complejo y ángulo de desfase (carretera C-681).

	Frecuencia (Hz)	Tramo fisurado		Tramo no fisurado	
		Semicapa superior	Semicapa inferior	Semicapa superior	Semicapa inferior
G* (kPa)	0,1	37	16	18	N. D.
	1	196	93	110	
	10	841	456	542	
δ (°)	0,1	69	72	74	N. D.
	1	61	65	66	
	10	48	55	54	

que ocurría con los valores de G* y δ la temperatura de fragilización muestra que el betún del tramo fisurado es más frágil, rompiéndose a una temperatura 5 °C más alta que el del tramo no fisurado, lo que de nuevo evidencia que ha envejecido más (puesto que inicialmente se trataba del mismo betún).

En lo que se refiere a la resistencia mecánica de la mezcla bituminosa se realizaron ensayos de tracción indirecta. La Tabla 6 muestra los resultados. Aparentemente los testigos del tramo fisurado ofrecieron menor resistencia a tracción in-

directa. No obstante debe señalarse que la varianza de los resultados es alta con respecto a la diferencia de las medias, lo que limita la significación estadística del resultado.

3.2 Carretera CL-602

En este segundo caso los tramos analizados pertenecen a la carretera CL-602, entre Olmedo e Íscar (Valladolid). El estudio incluye tanto un tramo afectado claramente por fisuración descendente (en torno al p.k. 80+900) como otro afectado más moderadamente (p.k. 85+100). Al igual que en el caso anterior se trata también de una carretera de dos carriles con un tráfico de intensidad media. Así mismo la campaña de extracción de testigos la realizó otra entidad participante en el Proyecto Fénix: la empresa Collosa.

Según se observa en los testigos (figura 4), el firme estaba constituido por unos 5 cm de mezcla bituminosa se-

Tabla 5. Punto de fragilidad Fraass (carretera C-681).

	Tramo fisurado	Tramo no fisurado
	Semicapa superior	Semicapa superior
Temperatura (°C)	0	-5

Estudio de algunos casos de fisuración descendente en carreteras españolas

Tabla 6. Resistencia a tracción indirecta(carretera CL-681).

Tramo fisurado		Tramo no fisurado	
Nº testigo	Resistencia a tracción indirecta (MPa)	Nº testigo	Resistencia a tracción indirecta (MPa)
4	2,173	10	2,225
5	2,429	12	2,190
6	1,566	18	2,812
Media	2,056	Media	2,409
σ^2	0,443	σ^2	0,349



Figura 4. Extracción de testigos en la CL-602. El testigo evidencia fisuración descendente.

midensa (AC surf 16 S) sobre unos 7 cm de mezcla gruesa (AC bin 22 G), la cual a su vez se apoyaba sobre un antiguo firme que fue reciclado con cemento antes de extender dichas capas.

Las densidades que se obtuvieron, tanto en el tramo fisurado como en el moderadamente fisurado, fueron las que

muestra la Tabla 7. Se observa que la densidad media es algo mayor en el tramo no fisurado, aunque con una diferencia mínima. La desviación estándar es del mismo orden de magnitud que la diferencia entre los dos tramos.

Se analizó la granulometría de la capa de rodadura, tanto en el tramo afectado como en el moderadamente afectado (figura 5). Se observa que el tramo fisurado tiene una granulometría más gruesa que el tramo moderadamente fisurado. Además, la diferencia granulométrica entre las semicapas superior e inferior de rodadura es más acentuada en el tramo fisurado. Es decir, existe mayor segregación granulométrica en vertical en el tramo fisurado que en el moderadamente fisurado.

También se analizó el contenido de ligante, observándose que era algo superior en el tramo moderadamente fisurado (tabla 8).

A los ligantes recuperados de las mezclas se les realizaron los ensayos de penetración, punto de reblandecimiento y caracterización mediante reómetro dinámico, así como el ensayo Fraass de fragilidad. La penetración de los ligantes recu-

Tabla 7. Densidades de los testigos (carretera CL-602).

Tramo fisurado		Tramo no fisurado	
Nº testigo	Densidad (g/cm³)	Nº testigo	Densidad (g/cm³)
R2	2,332	A5	2,326
R3	2,346	A6	2,328
R13	2,332	A8	2,369
Media	2,337	Media	2,341
σ^2	0,008	σ^2	0,024

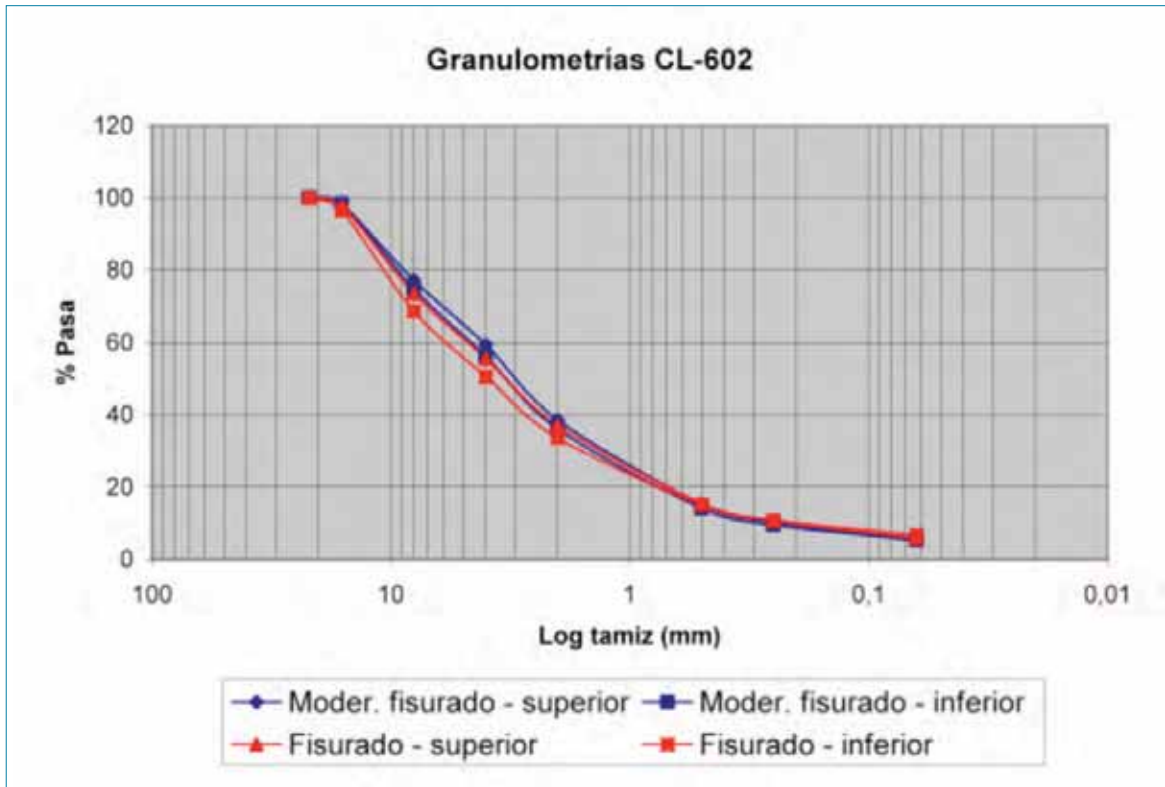


Figura 5. Granulometría de la mezcla bituminosa (Carretera CL-602).

perados y las correspondientes temperatura de anillo y bola se presentan en la Tabla 9. Se observa que en el tramo fisurado, la semicapa superior está más envejecida que en el tramo moderadamente fisurado.

Con respecto a las características dinámicas del ligante, se realizaron ensayos de barrido de frecuencias a 52°C con reómetro dinámico. Los valores del módulo de cizallamiento complejo (G^*) y del ángulo de desfase (δ) se reflejan en la Tabla 10.

Los módulos G^* más altos y los ángulos de desfase δ más bajos ponen de manifiesto que el betún de la semicapa superior del tramo fisurado está más envejecido.

Para determinar las características a bajas temperaturas de los ligantes recuperados se realizó el ensayo Fraass. Los resultados se incluyen en la Tabla 11.

El betún del tramo fisurado se fragiliza 4 °C por encima del betún del tramo moderadamente afectado, es decir, el primero ha envejecido más si se considera que se trata del mismo betún original.

Se llevaron a cabo ensayos de tracción indirecta sobre los testigos completos de la capa de rodadura (antes de dividirlos en dos semicapas). Los resultados del ensayo, realizados a 15 °C, fueron los que muestra la Tabla 12.

Tabla 8. Contenidos de ligante sobre la masa de áridos (carretera CL-602).

Tramo fisurado		Tramo moderadamente fisurado	
Semicapa superior	Semicapa inferior	Semicapa superior	Semicapa inferior
4,17 %	4,96 %	4,85 %	4,56 %
4,56 %		4,70 %	

Estudio de algunos casos de fisuración descendente en carreteras españolas

Tabla 9. Penetración y punto de reblandecimiento (carretera CL-602).

	Tramo fisurado		Tramo moderadamente fisurado	
	Semicapa superior	Semicapa inferior	Semicapa superior	Semicapa inferior
Penetración (10 ⁻¹ mm)	4	12,2	8,2	9,2
Temperatura de anillo y bola (°C)	82	74,6	79	77

Tabla 10. Módulo de cizallamiento complejo y ángulo de desfase a 52°C (CL-602).

	Frecuencia (Hz)	Tramo fisurado		Tramo moderadamente fisurado	
		Semicapa superior	Semicapa inferior	Semicapa superior	Semicapa inferior
G* (kPa)	0,1	139	42	85	60
	1	525	185	343	260
	10	1.476	697	1.072	961
δ (°)	0,1	55,6	62,8	59,2	62,6
	1	46,6	56,0	51,3	54,9
	10	30,4	45,2	36,6	42,1

Tabla 11. Punto de fragilidad Fraass (CL-602).

	Tramo fisurado	Tramo moderadamente fisurado
		Semicapa superior
Temperatura (°C)	4	0

Como se puede observar la resistencia a tracción indirecta es algo mayor en los testigos del tramo moderadamente afectado, aunque la dispersión de los resultados limita la validez de esta afirmación.

3.3 Otras carreteras españolas estudiadas

Dentro del Proyecto Fénix se han estudiado otras carreteras españolas. Se citan a continuación dos de ellas, cuyos resultados no se exponen con detalle en aras de la brevedad y porque dichos resultados son menos reveladores, ya que todo el firme estaba afectado, sin que hubiera tramos sanos con un firme igual que el afectado. Este hecho impide realmente identificar los factores que han podido dar lugar a la fisuración descendente.

En la autopista AP-1 se estudió un tramo comprendido entre el p.k. 2+000 y el p.k. 2+500 (calzada de sentido hacia el

norte); como se ha indicado consta de un único tramo con firme homogéneo, afectado todo él por la fisuración descendente.

El firme está compuesto, entre las capas originales y los sucesivos refuerzos, por 35 cm de mezclas bituminosas. Según se podía observar en los testigos, la fisuración afectaba sólo a la capa de rodadura. Los testigos fueron extraídos por la sociedad concesionaria de la autopista (Sacyr Concesiones).

Otro de los tramos estudiados corresponde a la carretera N-111 a su paso por la provincia de Soria. El estudio se ha realizado entre el p.k. 165+800 y el p.k. 166+100 (carril de sentido hacia Madrid), y consta así mismo de un único tramo afectado por la fisuración descendente, sin que fuera posible localizar un tramo aparentemente más sano en la misma carretera y con el mismo firme. Se trata de una carretera que ha soportado un tráfico de intensidad media-alta. El firme estaba compuesto de dos capas de mezcla bituminosa que sumaban 16 cm de espesor, según se observó al extraer los testigos (figura 6), obtenidos también por Sacyr Concesiones.

4. Conclusiones

Recientemente la ingeniería de pavimentos está concediendo una mayor relevancia al fenómeno de la fisuración des-

Tabla 12. Resistencia a tracción indirecta (CL-602).

Tramo fisurado		Tramo no fisurado	
Nº testigo	Resistencia a tracción indirecta (MPa)	Nº testigo	Resistencia a tracción indirecta (MPa)
R2	1,525	A5	1,480
R3	1,435	A6	1,976
R8	1,534	A8	2,225
Media	1,498	Media	1,894
σ^2	0,055	σ^2	0,379

cidente. Se trata de fisuras que se inician en superficie y progresan hacia las capas inferiores. Es probable que muchas de las fisuras que tradicionalmente se han identificado como debidas a la reflexión de fisuras originadas en las capas inferiores del firme hayan tenido realmente su origen en la capa de rodadura. Estas fisuras descendentes suelen tener una disposición longitudinal, algo sinuosa, acompañadas con frecuencia de ramificaciones, y están situadas junto a las rodadas de los vehículos o coincidiendo con ellas.

El trabajo llevado a cabo ha puesto de manifiesto que el fenómeno se da con relativa frecuencia, ya que en todos los casos estudiados se confirmó la sospecha de que podía tratarse de fisuración descendente. El estudio se ha centrado en las características de las mezclas bituminosas de la capa de rodadura que han sufrido este fenómeno. A la vista de los resultados obtenidos, se han identificado algunos factores que acompañan a los casos de fisuración descendente encontrados:

- La mezcla bituminosa sufría una segregación granulométrica en vertical, es decir, se acumulaban en el fondo de la capa de rodadura partículas más gruesas.



Figura 6. Aspecto de la fisuración descendente en la carretera N-111 (la fisura afecta a la capa de rodadura y muy poco a la intermedia).

- Los betunes recuperados de la mezcla demostraron que en los tramos afectados por fisuración descendente el ligante había envejecido en los 2 o 3 centímetros superiores más que en los tramos no afectados.
- La resistencia a tracción indirecta de la capa de rodadura de los tramos afectados es algo menor que en los tramos no afectados.

A la vista de todo ello, para minimizar la incidencia de la fisuración descendente parece recomendable el empleo de ligantes modificados. Estos ligantes, más viscosos que los betunes puros, pueden contribuir a limitar la segregación granulométrica de la mezcla durante su extensión, y resisten generalmente mejor el envejecimiento. Adicionalmente, suelen ofrecer mejores resistencias a tracción indirecta.

Es preciso seguir investigando sobre la fisuración descendente, e indudablemente habrá de ser considerada como uno de los fallos más frecuentes del firme, tanto durante el diseño como después en la conservación, fase en la que se pueden requerir estrategias especialmente adaptadas a este tipo de deterioro que hasta ahora había sido prácticamente ignorado.

5. Agradecimientos

Este artículo recoge resultados de una investigación desarrollada en el marco del Proyecto Fénix (www.proyectofenix.es), el cual ha sido posible gracias a la contribución financiera del Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial (CDTI) de España, a través de su Programa CENIT. Las entidades que participan en el Proyecto manifiestan su reconocimiento por dicha contribución. En particular, los autores quieren mostrar su agradecimiento a todas las organizaciones y empresas par-

Estudio de algunos casos de fisuración descendente en carreteras españolas

ticipantes y a sus numerosos colaboradores cuya capacidad de trabajo y eficacia han permitido el desarrollo de este Proyecto en un ambiente de cooperación.

6. Referencias

- [1] EUROPEAN COMMISSION. Development of New Bituminous Pavement Design Method. Final Report of the Action COST 333. Directorate General Transport, 2000.
- [2] ANDERSON, M., D'ANGELO, J., & HUBER, G. Forensic Investigation of Early Cracking on I-25 in Denver, Colorado. Report No. CDOT-DTD-R-2001-10. Final Report. Colorado Department of Transportation, 2001.
- [3] BALADI, G., SCHORSH, M., SVASDISANT, T. Determining the causes of top-down cracks in bituminous pavements. Report No. MDOT-PRCE-MSU-2003-110. Final report. East Lansing, Michigan: Pavement Research Centre of Excellence, Michigan Department of Transportation y Michigan Asphalt Paving Association. 255 p., 2003.
- [4] MYERS, L.A., ROQUE, R., RUTH, B.E. *Mechanisms of surface-initiated longitudinal wheel path cracks in high-type bituminous pavements*. Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists. Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 67, 1998.
- [5] CROLL, J.G.A. *Possible role of thermal ratchetting in alligator cracking of asphalt pavements*. International Journal of Pavement Engineering. Vol. 10, N° 6, 2009.

Estudio de algunos casos de fisuración descendente en carreteras españolas

Comisión Europea se realizó una encuesta a las agencias de carreteras sobre los fallos observados con mayor frecuencia en los firmes [1]. El resultado mostraba que los fallos del tipo "agrietamiento longitudinal en la rodada" estaban por delante de los problemas de fatiga iniciada en el fondo de las capas bituminosas. Esa morfología longitudinal es propia de la fisuración descendente.

En 1997 el Departamento de Transportes de Colorado, en una obra de rehabilitación del firme semiflexible de la interestatal I-25, fresó un espesor de 8 cm de mezcla bituminosa y lo repuso con una nueva mezcla. A principios de 1998 ya se observaban fisuras en superficie. Varias campañas de toma de testigos y otros estudios pusieron de manifiesto que la fisuración longitudinal no era el resultado de la reflexión de fisuras desde las capas inferiores, sino que se había iniciado en la nueva capa bituminosa, es decir, se trataba de una fisuración descendente [2].

El Departamento de Transportes de Michigan también llevó a cabo estudios [3] para determinar la importancia del problema de la fisuración descendente, así como para establecer los factores con influencia en el fenómeno. Se seleccionaron 13 pavimentos flexibles y 5 pavimentos construidos sobre capas tratadas con cemento, previamente demolidas y convertidas en capas de comportamiento granular (*rubblized pavements*). Como resultado del estudio se identificaron numerosos tramos con problemas de fisuración descendente y se observó cómo, igual que en el caso del estudio en Colorado, factores tales como la baja resistencia a tracción indirecta de la capa bituminosa, los defectos de compactación o la segregación de áridos aparecen frecuentemente en los casos de fisuración descendente.

Respecto a la relevancia de este mecanismo de fallo, autores como Myers et al. [4] y Croll [5] han llegado a afirmar que fallos tradicionales, como la fatiga o la fisuración reflejada, pueden comenzar también en superficie, hasta conectar con el deterioro de las capas inferiores.

En los apartados siguientes se presenta una metodología de estudio aplicada a varios casos de carreteras españolas en las que se han identificado fisuras descendentes y en las que mediante el correspondiente estudio de la mezcla bituminosa y del ligante que contiene se han establecido los factores que parecen acompañar a la aparición de fisuras descendentes en esos firmes.

2. Metodología de estudio y normas de ensayo.

Dado que se trata de un problema sobre el que sólo recientemente se ha tomado conciencia, se diseñó un protocolo de trabajo a seguir en todos los casos de estudio, de modo que los datos obtenidos fuesen homogéneos y comparables entre sí, a fin de poder establecer con mayor facilidad las tendencias observadas. El protocolo establecía los siguientes pasos:

1. Selección de los tramos sospechosos de sufrir fisuración descendente. Se identificaban a partir de la morfología de la fisuración observable en la superficie: fisuras longitudinales, relativamente rectilíneas aunque algo sinuosas, situadas a un lado de la rodada e incluso en la propia rodada. Cuando era posible, en la carretera se identificaban dos tramos: uno afectado y otro poco o nada afectado.
2. Campaña de extracción de testigos en el tramo afectado (y en el no afectado cuando existía). La testificación se realizaba según el croquis de la Figura 1. Se extraían testigos sobre la fisura (para comprobar si era descendente o ascendente, su profundidad y las capas afectadas), así como testigos cercanos a ella, pero fuera de su influencia, de modo que pudieran ensayarse dichos testigos mediante ensayos mecánicos sin que el resultado se viese afectado por una fisura preexistente. En el tramo no afectado el patrón de la campaña de testigos era similar en cuanto a la ubicación de los taladros, aunque sin fisura, naturalmente.
3. Estudio de la mezcla bituminosa de los testigos en la parte correspondiente a la capa de rodadura: densidad aparente (UNE-EN 12697-6), contenido de ligante (UNE-EN 12697-1 y UNE-EN 12697-3), granulometría de los áridos recuperados (UNE-EN 933-1) y resistencia a tracción indirecta (UNE-EN 12697-23). Para el estudio de la capa de rodadura se cortó ésta a mitad de espesor en el laboratorio, distinguiéndose así una semicapa superior y una semicapa inferior. Con ello se pretendían analizar por un lado las características de los centímetros superiores de la capa de rodadura, más expuestos a los agentes meteorológicos, y por otro la zona del fondo de esa capa.
4. Estudio del betún recuperado de los testigos: penetración (UNE-EN 1426), punto de reblandecimiento (UNE-

EN 1427), módulo de cizallamiento y ángulo de desfase (UNE-EN 1470) y punto de fragilidad Fraass (UNE-EN 12593). Se analizaron independientemente el betún extraído de la semicapa superior y el de la semicapa inferior.

5. Análisis de los resultados de cada caso, y posterior comparación entre ambos, para intentar identificar las propiedades o características de las mezclas y de los ligantes que acompañan a la aparición de la fisuración descendente.

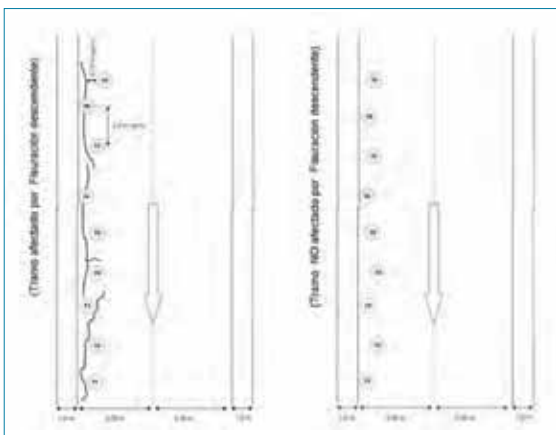


Figura 1. Esquema de localización de los testigos extraídos en el tramo afectado y en el no afectado.

3. Casos de estudio

El protocolo de trabajo anterior se aplicó a varias carreteras. No en todas fue posible encontrar un tramo afectado y otro no afectado. A continuación se presentan las características de los tramos estudiados y los resultados de los ensayos realizados sobre los testigos de mezcla bituminosa y sobre el betún extraído de ellos.

3.1 Carretera C-681

Los tramos pertenecen a la carretera C-681, entre Tossa y Llagostera (Girona). El estudio se ha realizado en torno al p.k. 2+500, e incluye tanto un tramo afectado por fisuración descendente como un tramo aparentemente más sano. Se trata de una carretera convencional de dos carriles con un tráfico de intensidad media.

Los testigos tomados sobre fisuras del pavimento ponían de manifiesto que se trataba de fisuras descendentes puesto que no atravesaban todo el espesor del firme, sino que afectaban a la capa de rodadura y en algunos casos a la capa intermedia (figura 2).

Según se observa en esos testigos, el firme estaba constituido por unos 20 cm de mezclas bituminosas, distribuidos en tres capas sucesivas de espesores aproximadamente iguales, la de rodadura con áridos silíceos, y las dos inferiores con áridos calizos. La campaña de extracción de testigos la realizó la empresa Servià Cantó, una de las entidades participantes en el Proyecto Fénix.

Los ensayos realizados a los testigos mostraron que existía una segregación vertical del árido dentro de la capa de rodadura, más acentuada en el tramo afectado por fisuración descendente, observándose que la semicapa inferior tiene más gruesos que la semicapa superior y que en el tramo fisurado la mezcla era algo más gruesa que en el tramo no fisurado (figura 3).

Las densidades de las mezclas bituminosas en uno y otro tramo se muestran en la Tabla 1. Se observa que en ambos la densidad es muy similar. Este hecho no parece por lo tanto marcar diferencias.

Se evaluó también el contenido de ligante. Los resultados se presentan en la Tabla 2. Se observa que el contenido de ligante es similar en la capa de rodadura de ambos tramos, incluso mayor en el tramo fisurado.

Por lo que respecta a las características del ligante recuperado, la Tabla 3 presenta los valores obtenidos de penetración y de punto de reblandecimiento. En este sentido las características de las semicapas superiores son similares.

En cuanto a las características dinámicas del ligante, se realizaron ensayos de barrido de frecuencias a 52 °C con reómetro dinámico. Los valores del módulo de cizallamiento complejo (G^*) y del ángulo de desfase (δ) se recogen en la Tabla 4. Se



Figura 2. Aspecto de la carretera C-681 y dos de los testigos extraídos.

Estudio de algunos casos de fisuración descendente en carreteras españolas

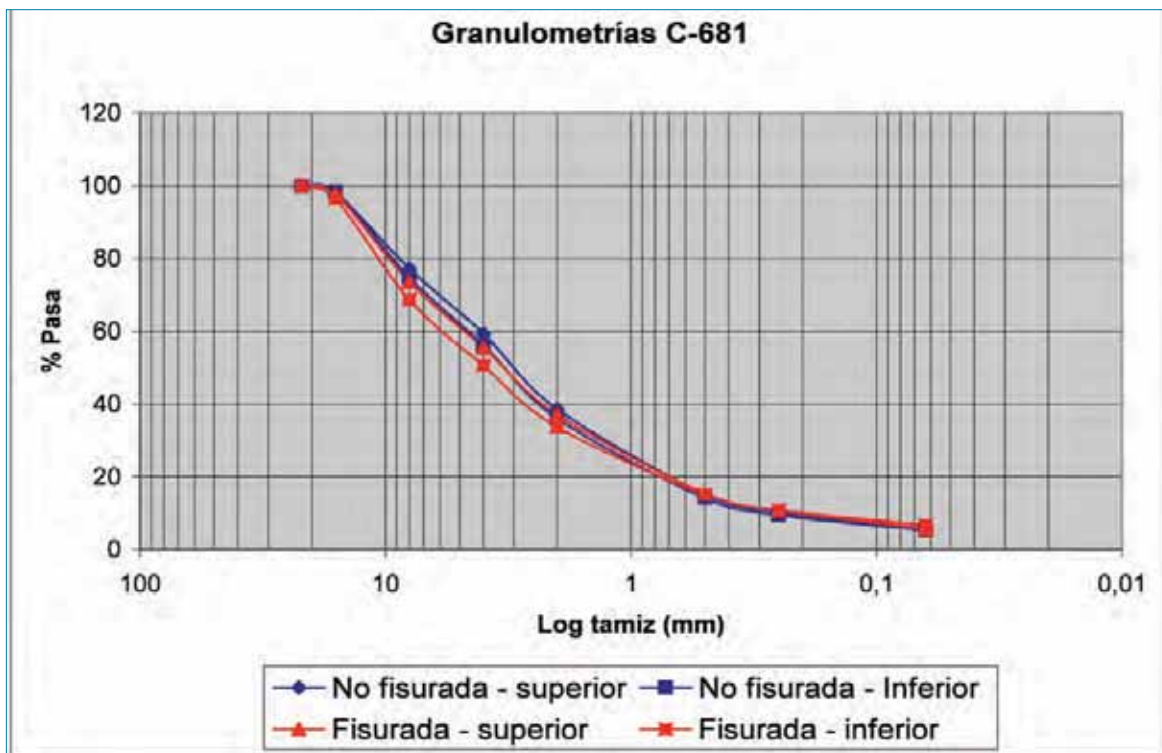


Figura 3. Granulometrías en la rodadura de la carretera C-681.

Tabla 1. Densidad de los testigos de la capa de rodadura (carretera C-681).

Tramo fisurado		Tramo no fisurado	
Nº testigo	Densidad (g/cm³)	Nº testigo	Densidad (g/cm³)
1	2,253	10	2,309
2	2,248	11	2,305
3	2,296	12	2,287
4	2,281	13	2,274
5	2,255	14	2,265
6	2,281	15	2,274
7	2,282	16	2,282
8	2,265	17	2,250
9	2,267	18	2,298
Media	2,270	Media	2,283
σ^2	0,016	σ^2	0,019

observa que los módulos son mayores en el betún del tramo fisurado, y los ángulos de desfase menores; ambos parámetros evidencian un mayor envejecimiento de ese ligante.

Para determinar el comportamiento a bajas temperaturas de los ligantes recuperados se realizó el ensayo Fraass. Los resultados se presentan en la Tabla 5. Al igual

Tabla 2. Contenido de ligante en los testigos de la capa de rodadura (carretera C-681).

Tramo fisurado		Tramo no fisurado	
Semicapa superior	Semicapa inferior	Semicapa superior	Semicapa inferior
4,57 %	4,78 %	4,52 %	4,67 %
4,675 %		4,595 %	

Tabla 3. Penetración y temperatura de reblandecimiento de los ligantes recuperados (carretera C-681).

	Tramo fisurado		Tramo no fisurado	
	Semicapa superior	Semicapa inferior	Semicapa superior	Semicapa inferior
Penetración (10 ⁻¹ mm)	14,7	19	14	N.D.
Temperatura de anillo y bola (°C)	71	66,8	72	N.D.

Tabla 4. Módulo de cizallamiento complejo y ángulo de desfase (carretera C-681).

	Frecuencia (Hz)	Tramo fisurado		Tramo no fisurado	
		Semicapa superior	Semicapa inferior	Semicapa superior	Semicapa inferior
G* (kPa)	0,1	37	16	18	N. D.
	1	196	93	110	
	10	841	456	542	
δ (°)	0,1	69	72	74	N. D.
	1	61	65	66	
	10	48	55	54	

que ocurría con los valores de G* y δ la temperatura de fragilización muestra que el betún del tramo fisurado es más frágil, rompiéndose a una temperatura 5 °C más alta que el del tramo no fisurado, lo que de nuevo evidencia que ha envejecido más (puesto que inicialmente se trataba del mismo betún).

En lo que se refiere a la resistencia mecánica de la mezcla bituminosa se realizaron ensayos de tracción indirecta. La Tabla 6 muestra los resultados. Aparentemente los testigos del tramo fisurado ofrecieron menor resistencia a tracción in-

directa. No obstante debe señalarse que la varianza de los resultados es alta con respecto a la diferencia de las medias, lo que limita la significación estadística del resultado.

3.2 Carretera CL-602

En este segundo caso los tramos analizados pertenecen a la carretera CL-602, entre Olmedo e Íscar (Valladolid). El estudio incluye tanto un tramo afectado claramente por fisuración descendente (en torno al p.k. 80+900) como otro afectado más moderadamente (p.k. 85+100). Al igual que en el caso anterior se trata también de una carretera de dos carriles con un tráfico de intensidad media. Así mismo la campaña de extracción de testigos la realizó otra entidad participante en el Proyecto Fénix: la empresa Collosa.

Según se observa en los testigos (figura 4), el firme estaba constituido por unos 5 cm de mezcla bituminosa se-

Tabla 5. Punto de fragilidad Fraass (carretera C-681).

	Tramo fisurado	Tramo no fisurado
	Semicapa superior	Semicapa superior
Temperatura (°C)	0	-5

Estudio de algunos casos de fisuración descendente en carreteras españolas

Tabla 6. Resistencia a tracción indirecta(carretera CL-681).

Tramo fisurado		Tramo no fisurado	
Nº testigo	Resistencia a tracción indirecta (MPa)	Nº testigo	Resistencia a tracción indirecta (MPa)
4	2,173	10	2,225
5	2,429	12	2,190
6	1,566	18	2,812
Media	2,056	Media	2,409
σ^2	0,443	σ^2	0,349



Figura 4. Extracción de testigos en la CL-602. El testigo evidencia fisuración descendente.

midensa (AC surf 16 S) sobre unos 7 cm de mezcla gruesa (AC bin 22 G), la cual a su vez se apoyaba sobre un antiguo firme que fue reciclado con cemento antes de extender dichas capas.

Las densidades que se obtuvieron, tanto en el tramo fisurado como en el moderadamente fisurado, fueron las que

muestra la Tabla 7. Se observa que la densidad media es algo mayor en el tramo no fisurado, aunque con una diferencia mínima. La desviación estándar es del mismo orden de magnitud que la diferencia entre los dos tramos.

Se analizó la granulometría de la capa de rodadura, tanto en el tramo afectado como en el moderadamente afectado (figura 5). Se observa que el tramo fisurado tiene una granulometría más gruesa que el tramo moderadamente fisurado. Además, la diferencia granulométrica entre las semicapas superior e inferior de rodadura es más acentuada en el tramo fisurado. Es decir, existe mayor segregación granulométrica en vertical en el tramo fisurado que en el moderadamente fisurado.

También se analizó el contenido de ligante, observándose que era algo superior en el tramo moderadamente fisurado (tabla 8).

A los ligantes recuperados de las mezclas se les realizaron los ensayos de penetración, punto de reblandecimiento y caracterización mediante reómetro dinámico, así como el ensayo Fraass de fragilidad. La penetración de los ligantes recu-

Tabla 7. Densidades de los testigos (carretera CL-602).

Tramo fisurado		Tramo no fisurado	
Nº testigo	Densidad (g/cm³)	Nº testigo	Densidad (g/cm³)
R2	2,332	A5	2,326
R3	2,346	A6	2,328
R13	2,332	A8	2,369
Media	2,337	Media	2,341
σ^2	0,008	σ^2	0,024

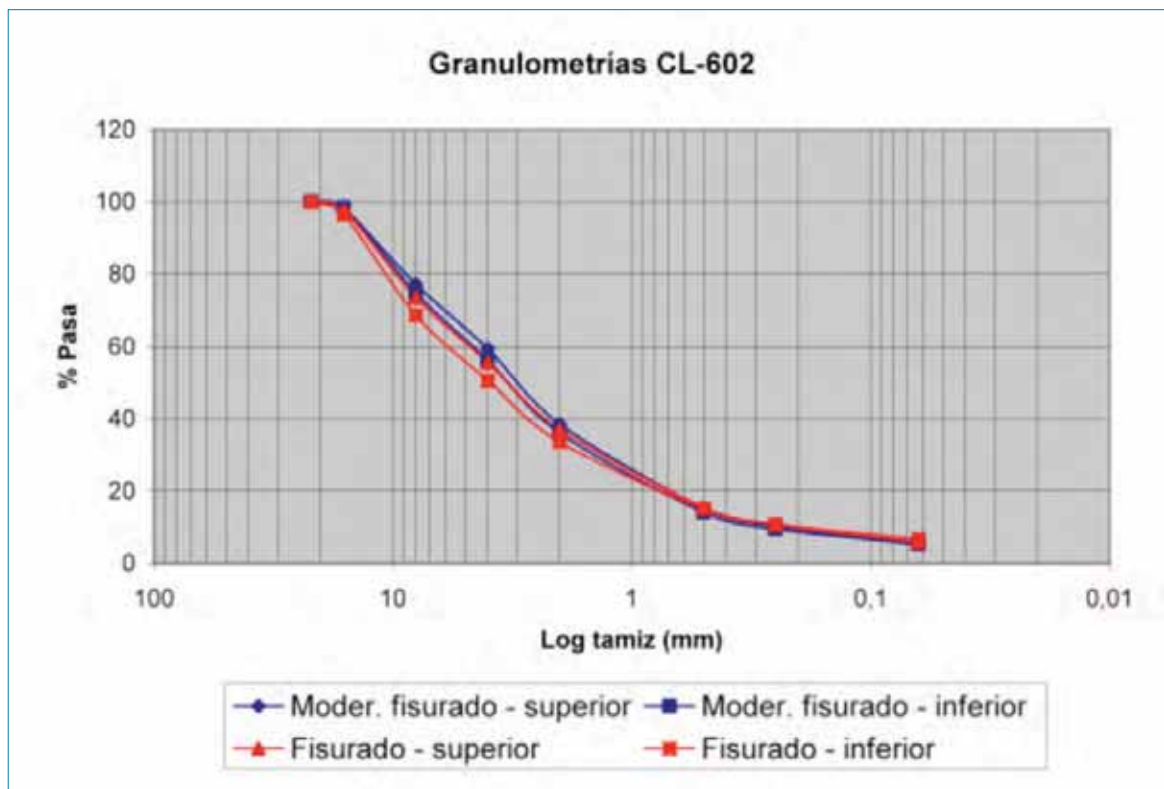


Figura 5. Granulometría de la mezcla bituminosa (Carretera CL-602).

perados y las correspondientes temperatura de anillo y bola se presentan en la Tabla 9. Se observa que en el tramo fisurado, la semicapa superior está más envejecida que en el tramo moderadamente fisurado.

Con respecto a las características dinámicas del ligante, se realizaron ensayos de barrido de frecuencias a 52°C con reómetro dinámico. Los valores del módulo de cizallamiento complejo (G^*) y del ángulo de desfase (δ) se reflejan en la Tabla 10.

Los módulos G^* más altos y los ángulos de desfase δ más bajos ponen de manifiesto que el betún de la semicapa superior del tramo fisurado está más envejecido.

Para determinar las características a bajas temperaturas de los ligantes recuperados se realizó el ensayo Fraass. Los resultados se incluyen en la Tabla 11.

El betún del tramo fisurado se fragiliza 4 °C por encima del betún del tramo moderadamente afectado, es decir, el primero ha envejecido más si se considera que se trata del mismo betún original.

Se llevaron a cabo ensayos de tracción indirecta sobre los testigos completos de la capa de rodadura (antes de dividirlos en dos semicapas). Los resultados del ensayo, realizado a 15 °C, fueron los que muestra la Tabla 12.

Tabla 8. Contenidos de ligante sobre la masa de áridos (carretera CL-602).

Tramo fisurado		Tramo moderadamente fisurado	
Semicapa superior	Semicapa inferior	Semicapa superior	Semicapa inferior
4,17 %	4,96 %	4,85 %	4,56 %
4,56 %		4,70 %	

Estudio de algunos casos de fisuración descendente en carreteras españolas

Tabla 9. Penetración y punto de reblandecimiento (carretera CL-602).

	Tramo fisurado		Tramo moderadamente fisurado	
	Semicapa superior	Semicapa inferior	Semicapa superior	Semicapa inferior
Penetración (10 ⁻¹ mm)	4	12,2	8,2	9,2
Temperatura de anillo y bola (°C)	82	74,6	79	77

Tabla 10. Módulo de cizallamiento complejo y ángulo de desfase a 52°C (CL-602).

	Frecuencia (Hz)	Tramo fisurado		Tramo moderadamente fisurado	
		Semicapa superior	Semicapa inferior	Semicapa superior	Semicapa inferior
G* (kPa)	0,1	139	42	85	60
	1	525	185	343	260
	10	1.476	697	1.072	961
δ (°)	0,1	55,6	62,8	59,2	62,6
	1	46,6	56,0	51,3	54,9
	10	30,4	45,2	36,6	42,1

Tabla 11. Punto de fragilidad Fraass (CL-602).

	Tramo fisurado	Tramo moderadamente fisurado
		Semicapa superior
Temperatura (°C)	4	0

Como se puede observar la resistencia a tracción indirecta es algo mayor en los testigos del tramo moderadamente afectado, aunque la dispersión de los resultados limita la validez de esta afirmación.

3.3 Otras carreteras españolas estudiadas

Dentro del Proyecto Fénix se han estudiado otras carreteras españolas. Se citan a continuación dos de ellas, cuyos resultados no se exponen con detalle en aras de la brevedad y porque dichos resultados son menos reveladores, ya que todo el firme estaba afectado, sin que hubiera tramos sanos con un firme igual que el afectado. Este hecho impide realmente identificar los factores que han podido dar lugar a la fisuración descendente.

En la autopista AP-1 se estudió un tramo comprendido entre el p.k. 2+000 y el p.k. 2+500 (calzada de sentido hacia el

norte); como se ha indicado consta de un único tramo con firme homogéneo, afectado todo él por la fisuración descendente.

El firme está compuesto, entre las capas originales y los sucesivos refuerzos, por 35 cm de mezclas bituminosas. Según se podía observar en los testigos, la fisuración afectaba sólo a la capa de rodadura. Los testigos fueron extraídos por la sociedad concesionaria de la autopista (Sacyr Concesiones).

Otro de los tramos estudiados corresponde a la carretera N-111 a su paso por la provincia de Soria. El estudio se ha realizado entre el p.k. 165+800 y el p.k. 166+100 (carril de sentido hacia Madrid), y consta así mismo de un único tramo afectado por la fisuración descendente, sin que fuera posible localizar un tramo aparentemente más sano en la misma carretera y con el mismo firme. Se trata de una carretera que ha soportado un tráfico de intensidad media-alta. El firme estaba compuesto de dos capas de mezcla bituminosa que sumaban 16 cm de espesor, según se observó al extraer los testigos (figura 6), obtenidos también por Sacyr Concesiones.

4. Conclusiones

Recientemente la ingeniería de pavimentos está concediendo una mayor relevancia al fenómeno de la fisuración des-

Tabla 12. Resistencia a tracción indirecta (CL-602).

Tramo fisurado		Tramo no fisurado	
Nº testigo	Resistencia a tracción indirecta (MPa)	Nº testigo	Resistencia a tracción indirecta (MPa)
R2	1,525	A5	1,480
R3	1,435	A6	1,976
R8	1,534	A8	2,225
Media	1,498	Media	1,894
σ^2	0,055	σ^2	0,379

cidente. Se trata de fisuras que se inician en superficie y progresan hacia las capas inferiores. Es probable que muchas de las fisuras que tradicionalmente se han identificado como debidas a la reflexión de fisuras originadas en las capas inferiores del firme hayan tenido realmente su origen en la capa de rodadura. Estas fisuras descendentes suelen tener una disposición longitudinal, algo sinuosa, acompañadas con frecuencia de ramificaciones, y están situadas junto a las rodadas de los vehículos o coincidiendo con ellas.

El trabajo llevado a cabo ha puesto de manifiesto que el fenómeno se da con relativa frecuencia, ya que en todos los casos estudiados se confirmó la sospecha de que podía tratarse de fisuración descendente. El estudio se ha centrado en las características de las mezclas bituminosas de la capa de rodadura que han sufrido este fenómeno. A la vista de los resultados obtenidos, se han identificado algunos factores que acompañan a los casos de fisuración descendente encontrados:

- La mezcla bituminosa sufría una segregación granulométrica en vertical, es decir, se acumulaban en el fondo de la capa de rodadura partículas más gruesas.



Figura 6. Aspecto de la fisuración descendente en la carretera N-111 (la fisura afecta a la capa de rodadura y muy poco a la intermedia).

- Los betunes recuperados de la mezcla demostraron que en los tramos afectados por fisuración descendente el ligante había envejecido en los 2 o 3 centímetros superiores más que en los tramos no afectados.
- La resistencia a tracción indirecta de la capa de rodadura de los tramos afectados es algo menor que en los tramos no afectados.

A la vista de todo ello, para minimizar la incidencia de la fisuración descendente parece recomendable el empleo de ligantes modificados. Estos ligantes, más viscosos que los betunes puros, pueden contribuir a limitar la segregación granulométrica de la mezcla durante su extensión, y resisten generalmente mejor el envejecimiento. Adicionalmente, suelen ofrecer mejores resistencias a tracción indirecta.

Es preciso seguir investigando sobre la fisuración descendente, e indudablemente habrá de ser considerada como uno de los fallos más frecuentes del firme, tanto durante el diseño como después en la conservación, fase en la que se pueden requerir estrategias especialmente adaptadas a este tipo de deterioro que hasta ahora había sido prácticamente ignorado.

5. Agradecimientos

Este artículo recoge resultados de una investigación desarrollada en el marco del Proyecto Fénix (www.proyectofenix.es), el cual ha sido posible gracias a la contribución financiera del Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial (CDTI) de España, a través de su Programa CENIT. Las entidades que participan en el Proyecto manifiestan su reconocimiento por dicha contribución. En particular, los autores quieren mostrar su agradecimiento a todas las organizaciones y empresas par-

Estudio de algunos casos de fisuración descendente en carreteras españolas

ticipantes y a sus numerosos colaboradores cuya capacidad de trabajo y eficacia han permitido el desarrollo de este Proyecto en un ambiente de cooperación.

6. Referencias

- [1] EUROPEAN COMMISSION. Development of New Bituminous Pavement Design Method. Final Report of the Action COST 333. Directorate General Transport, 2000.
- [2] ANDERSON, M., D'ANGELO, J., & HUBER, G. Forensic Investigation of Early Cracking on I-25 in Denver, Colorado. Report No. CDOT-DTD-R-2001-10. Final Report. Colorado Department of Transportation, 2001.
- [3] BALADI, G., SCHORSH, M., SVASDISANT, T. Determining the causes of top-down cracks in bituminous pavements. Report No. MDOT-PRCE-MSU-2003-110. Final report. East Lansing, Michigan: Pavement Research Centre of Excellence, Michigan Department of Transportation y Michigan Asphalt Paving Association. 255 p., 2003.
- [4] MYERS, L.A., ROQUE, R., RUTH, B.E. *Mechanisms of surface-initiated longitudinal wheel path cracks in high-type bituminous pavements*. Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists. Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 67, 1998.
- [5] CROLL, J.G.A. *Possible role of thermal ratchetting in alligator cracking of asphalt pavements*. International Journal of Pavement Engineering. Vol. 10, N° 6, 2009.