

Los firmes semirrígidos

Un análisis de los firmes con base hidráulica empleados en España



The semirigid pavements.
An analysis of pavements based in hydraulic
bases employees in Spain

Francisco Javier Payán de Tejada González

MITMA

Presidente del Comité de Firmes de la ATC

Jesús Díaz Minguela

IECA

Miembro del Comité de Firmes de la ATC

¿Por qué se emplean en España los firmes con base de suelocemento? ¿Han sustituido éstos a las bases de gravacemento apoyados en ese mismo material? Se analiza a continuación ambos firmes. En general, hemos comprobado que la gravacemento ha proporcionado un mejor comportamiento y una mayor durabilidad que el suelocemento, tal y como éste se elabora actualmente (problemas de entrada de agua, de menor módulo, mayor susceptibilidad, etc.).

A estos firmes semirrígidos les afecta mucho las variables climáticas en la rodadura bituminosa que provocan fenómenos de envejecimiento del betún y retracción térmica, lo que produce su fisuración y favorece la entrada de agua a su interior. Por tanto, los autores piensan que deberían utilizarse mezclas menos permeables (o usar estas en mejor situación), con más betún y aplicarse buenos riegos de adherencia, a la vez que se debería emplear un suelocemento de altas prestaciones con mayor resistencia a compresión, lo que mejoraría de forma importante su durabilidad y, por tanto, su sostenibilidad.

Why are soil-cement-based pavements used in Spain? Have the same material replaced gravel-cement based pavements? Both firms are discussed below. In general, we have verified that the gravel-cement has provided better behavior and greater durability than the soil-cement, as it is currently produced (water problems, lower modulus, greater susceptibility, etc.).

These semi-rigid pavements are greatly affected by climatic variables in the bituminous rolling caused by bitumen aging phenomena and thermal shrinkage, which produces cracking and favors the entry of water inside. Therefore, the authors think that less permeable mixtures should be used (or use these in a better situation), with more bitumen and good adherence risks applied, while a high-performance soil-cement with greater compressive strength should be used, which would significantly improve its durability and, therefore, its sustainability.

1. Introducción

Normalmente, se definen los firmes semirrígidos como aquellos formados por una base de materiales tratados con cemento y cubiertos con una o varias capas de mezclas bituminosas.

De los cuatro tipos de firmes que figuran en la Instrucción española, dos son con bases de materiales tratados con cemento, uno con base de zahorra y otro rígido o de hormigón. El más empleado en su día, fue el de gravacemento, pero por sus ventajas medioambientales ha derivado hacia los firmes con base de suelocemento, apoyada sobre una capa estabilizada (ver las capas de explanada en la Norma 6.1-IC).

Los firmes formados con gravacemento tienen la ventaja de ser más rígidos, resultando un firme con muy buen resultado como se ha demostrado en las autovías de primera generación construidas en los años 80 y 90, a los que se añade el inconveniente o la ventaja de colocarse sobre una capa de suelocemento y el contar con un importante espesor de mezcla bituminosa, por lo que soportan un mayor número de ejes de 13 toneladas. Para la fabricación de la gravacemento, se exige un árido machacado con unas determinadas características que le proporcionan una gran calidad.

Las mayores exigencias en cuanto a calidad de la gravacemento y, por tanto, su mayor coste, ha hecho que se haya tendido a la construcción de firmes con bases de suelocemento que en principio son secciones más sostenibles. Esta solución ofrece las siguientes ventajas:

- Son firmes económicos de primera instalación.

- Son firmes medioambientalmente más ecológicos al emplearse suelo de la traza o de los desmontes o el suelo de las fincas colindantes, evitando la apertura de canteras o graveiras, el machaqueo del material y reduciendo su transporte.
- Tienen rodadura bituminosa, lo que permite el confort del usuario.
- El suelocemento puede fabricarse in situ con un equipo de reciclado, aunque lo normal es fabricarse en una central por las ventajas que conlleva.
- Resultan firmes tradicionales, aunque parezca que sean recientes, pues el constructor viene haciendo suelocemento desde la época de Las Rozas-Villalba (más de 60 años).

Al material se le exigen unas adecuadas características mecánicas (resistencia a 7 días que es el mínimo tiempo que se tiene para poder controlar en obra), aunque en el cálculo del firme se emplea el módulo de elasticidad y la resistencia a fatiga o resistencia a largo plazo, y cierta durabilidad, es decir estabilidad química y volumétrica y resistencia a la meteorización.

A pesar de la calidad exigida a estos materiales, en los últimos años se han producido una serie de problemas en tramos de reciente construcción que afectan a la capa de base de suelocemento, lo que no había ocurrido previamente con los firmes construidos con bases de gravacemento. Algunos de estos problemas se han producido en la zona de Castilla y León lo que ha movido a los autores de este artículo a estudiar sus causas y a realizar una comparación entre el comportamiento de los firmes con base de gravacemento y con suelocemento.

Para ello, se dispone de las auscultaciones sistemáticas realizadas por la Dirección General de Carreteras a lo largo de los últimos 20 años mediante equipos dinámicos que han permitido obtener una gran cantidad de datos sobre el estado de los firmes. Esta información nos permite conocer el comportamiento y evolución de los firmes a largo plazo y, en consecuencia, comparar las diferentes soluciones.

Entre las auscultaciones realizadas, se ha obtenido el valor de la deflexión patrón que da un índice de la capacidad estructural del firme. Por otra parte, en la red de carreteras dependiente de la Demarcación de Carreteras del Estado en Valladolid, se ha realizado cada dos años una campaña de inspección visual del pavimento.

Con objeto de conocer el comportamiento comparado de ambos tipos de firmes, se han analizado los datos disponibles de las campañas de auscultación y de las inspecciones visuales en algunos de los tramos de los que se disponía de más información, concretamente en cinco tramos de la A-62 y en uno de la A-60.

2. Firmes con gravacemento sobre suelocemento

Para este trabajo, se han seleccionado tres tramos en la A-62 de los que se dispone de bastante información sobre su evolución. Los tramos estudiados se presentan en la tabla 1, donde se ha incluido también el año de construcción y las capas que constituyen el firme con su espesor.

Los tramos 1 y 2 se sometieron a una rehabilitación del pavimento entre octubre y junio de los años

Tabla 1: Tramos estudiados en la A-62

DENOMINACION	AÑO	CARRETERA/ Tramo	TOTAL CAPAS FIRME	CALZADA	P.K. Inicial	P.K. Final
1-GC/SC-20+20+20	1993	A-62 / L.P.Palencia -Cigales	20MB+20GC+20SC	DCHA	100+880	116+377
2-GC/SC-20+20+20	1993	A-62 /ronda oeste de Valladolid	20MB+20GC+20SC	IZDA	117+900	100+880
3-GC/SC-22+20+20	1989	A-62/ Arroyo- Tordesillas	22MB+20GC+20SC	IZDA	145+300	136+000

Tabla 2: Deflexión media de los tramos con gravacemiento de la A-62

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2014	2015	2020	P.K. Final
1-GC/SC-20+20+20	4,9	4,5	3,56	5,00	4,81		5,44	5,63	7,13		116+377
2-GC/SC-20+20+20	14,6	13,7	13,80	16,50	16,51		17,39	17,4	18,66		100+880
3-GC/SC-22+20+20	10,6	12,7	8,70	10,60	9,92	11,97			13,11	13,84	136+000

1997 Y 1998 consistente en un recrecido de 5 cm de mezcla bituminosa tipo hormigón bituminoso y, posteriormente, a una rehabilitación en el año 2017 consistente en el fresado y reposición de las capas de mezcla bituminosa que presentaban fisuración, sobre las que se extendió en todo el ancho de la calzada una capa de rodadura tipo discontinua de 3 cm de espesor. Ambas actuaciones están fuera del rango temporal del que se tienen datos de deflexiones.

Al tramo 3, se le extendió un refuerzo el año 97/98 consistente en un recrecido con una capa de mezcla bituminosa tipo AC de 7 cm (4 + 3) y, posteriormente, se hizo una rehabilitación importante en el año 2015, por lo que los valores de

deflexión del año 2020 son posteriores a esta actuación.

En la tabla 2 se presentan los valores medios de la deflexión patrón corregida por temperatura y humedad. También se ha descontado el factor de corrección de 1,4 que se aplicó hasta el 2008, año en el que se publicó la Nota Técnica de 30 de diciembre sobre “Los factores de corrección de los equipos de auscultación de la deflexión de firmes y pavimentos en la Red de Carreteras del Estado”

Estos mismos valores se presentan en el gráfico 1. Se puede observar el bajo valor de la deflexión obtenido a pesar de los años transcurridos, hasta 32 años para el tramo más antiguo. Ade-

más, el valor de la deflexión parece depender fundamentalmente de la capacidad portante de la capa de base de gravacemiento dado que, en la campaña de 2020, con las capas de mezclas renovadas, no se ha obtenido una reducción en ese valor.

Por otra parte, se ha analizado la evolución de la dispersión de los valores. Como se puede ver en el gráfico 2, el valor de la desviación típica muestral aumenta con el paso de los años, lo que ya se había detectado en otros estudios para firmes con bases semirrígidas.

Este fenómeno puede deberse a que en los firmes semirrígidos se producen deterioros más localiza-

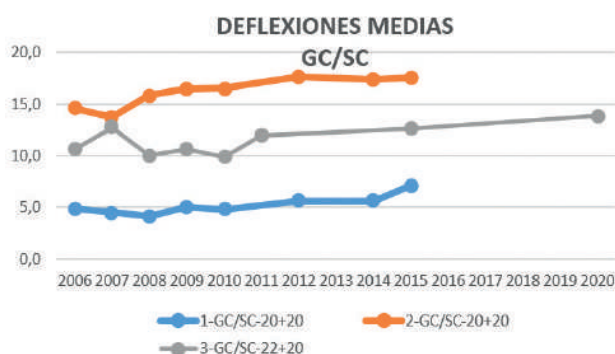


Gráfico 1. Deflexiones medias en tramos con gravacemiento de la A-62



Gráfico 2. Deflexiones típicas muestral en gravacemiento de la A-62

Tabla 3. Valores de la inspección visual según anejo 4 de la O.C. 9/2002 sobre Rehabilitación de firmes en la A-62

Valor IV medio por 25 metros	2004	2006
1-GC/SC-20+20+20 (101-117) CD	2,0	2,75
2-GC/SC-20+20+20 (101-117) CI	5,3	5,2
3-GC/SC-22+20+20 CI	2,0	2,3

dos que producen valores extremos esporádicos de la deflexión patrón, mientras que en los firmes con bases granulares el deterioro suele ser más uniforme.

Se ha realizado también un análisis de la inspección visual de estos tramos, teniendo en cuenta que para este parámetro no se puede hacer un seguimiento de su evolución a largo plazo ya que es frecuente, cuando el deterioro del pavimento es grave, el extendido de capas de mezclas nuevas reponiendo los tramos de rodadura agrietados mediante actuaciones de conservación. Sin embargo, sí es posible comprobar hasta qué grado de deterioro ha llegado el firme en un momento determinado, lo que comparado con los valores de la deflexión permite centrar el origen de los mismos, ya sea en la base o en las capas de mezclas bituminosas.

Las inspecciones visuales se han realizado siguiendo la metodo-

logía que se establecía en el anejo 4 de la Orden Circular 9/2002 sobre rehabilitación de firmes. A cada defecto, según su importancia, se le da un valor de forma que cuanto más alto es el valor para una sección del pavimento, más deteriorado se encuentra. La valoración se realiza por tramos de 25 m. Así, valores por encima de dos (2) suponen un deterioro importante y por encima de cuatro (4) un deterioro muy generalizado.

Para los tramos 1, 2 y 3, en la tabla 3 se presentan los valores obtenidos en los años 2004 y 2006, en los que aún no se habían realizado reparaciones puntuales mediante parches.

Los valores en esa fecha, después de 11 años desde su construcción y 6 desde el último refuerzo consistente en un recrecido con una capa de 5 cm de espesor para los tramos 1 y 2, y de 15 años desde su construcción y los mismos 6 desde el último refuerzo de 7 cm

para el tramo 3, nos indican un deterioro generalizado del pavimento (ver foto 1).

Dado que los valores de deflexión son bajos y que durante la obra de rehabilitación estructural se pudo comprobar el buen estado generalizado de la gravacemiento, hay que achacar el deterioro al mal comportamiento de las capas de mezclas bituminosas.

Los factores que han podido influir en ese deterioro son varios.

- La falta de adherencia entre capas (ver foto 2 y 3), especialmente entre las capas del refuerzo y las originales del firme y entre éstas y la gravacemiento. Esta situación hace que las capas de mezcla bituminosa y de gravacemiento no trabajen solidariamente, teniendo que soportar cada una de ellas mayores deformaciones de las previstas, lo que reduce su vida a fatiga.
- La entrada de agua a través de las fisuras del pavimento. Esta agua tiende a situarse en las interfaces entre las capas de aglomerado y entre el aglomerado y la gravacemiento cuando no están perfectamente adheridas y en los huecos de las mezclas bituminosas, especialmen-



Foto 1



Foto 2

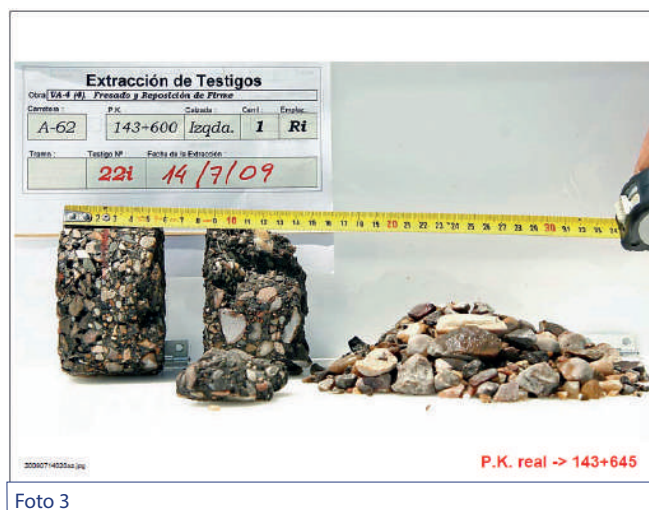


Foto 3



Foto 4



Foto 5



Foto 6



Foto 7

te en las capas de base tipo G que tienen un mayor porcentaje de huecos y un menor contenido de betún. El agua confinada en los huecos de la mezcla y entre capas, sometida a las cargas del tráfico pesado, genera presiones intersticiales capaces de erosionar los materiales y lavar el betún que da la cohesión a la mezcla (ver fotos 2, 3 y 4).

- Los fenómenos de envejecimiento del betún y de retracción térmica de la mezcla también son un factor importante en el deterioro de los pavimentos bi-

tuminosos. El envejecimiento del betún produce su oxidación y fragilización, especialmente a bajas temperaturas, lo que conlleva a su agrietamiento de arriba abajo, facilitando la entrada de agua al cuerpo del firme. Las retracciones térmicas, especialmente en climas con fuertes gradientes térmicos, tanto estacionales como diarios, producen el mismo efecto de fisuración del pavimento con las mismas consecuencias.

En los firmes con bases semi-rígidas constituidas por gravace-
mento sobre suelocemento, he-

mos podido comprobar su buen comportamiento de cara a la durabilidad, haciendo necesario únicamente la rehabilitación de las capas de mezclas bituminosas que es, en general, una operación sencilla cuya frecuencia se puede dilatar en el tiempo si durante la construcción se toman medidas para evitar la falta de adherencia entre capas, se emplean ligantes y tecnologías que reduzcan su envejecimiento, y se colocan mezclas más impermeables o más flexibles y ricas en betún, especialmente en las bases bituminosas en contacto con la base tratada con cemento. También es necesario cuidar el rie-



Foto 8



Foto 9

Tabla 3. Valores de la inspección visual según anejo 4 de la O.C. 9/2002 sobre Rehabilitación de firmes en la A-62

Valor IV medio por 25 metros	2004	2006
1-GC/SC-20+20+20 (101-117) CD	2,0	2,75
2-GC/SC-20+20+20 (101-117) CI	5,3	5,2
3-GC/SC-22+20+20 CI	2,0	2,3

Tabla 4. Tramos estudiados de suelocemento en la A-62 y A-60

SECCION	AÑO	CARRETERA TRAMO	TOTAL CAPAS FIRME	CALZADA	P.K. Inicial	P.K. Final
1-A62-SC-20	1999	A-62 / Tordesillas - Alaejos	25MB+20SC	DCHA	156+900	181+400
2-A62-SC-20	1999	A-62 / Tordesillas - Alaejos	22MB+20SC	DCHA	181+400	192+890
3-A60-SC-20	2013	A-60 / Valladolid - Villanubla	20MB+20SC	DCHA	0+000	15+560

go de adherencia ya que, aunque la adherencia hormigón-betún es muy buena en general, una mala ejecución de la obra puede afectar muy negativamente a esta unidad.

En la foto 5 se presenta el estado de la gravacemento descubierta durante las obras de rehabilitación del tramo de la A-62 entre el pk 130 y el 151. En esta foto se aprecian claramente las grietas formadas por la retracción de la capa, pero también se observa el buen estado del resto de la capa. En la foto 6 se ven las grietas de retracción de la gravacemento reflejadas en la capa de base de la mezcla bituminosa con su típica

disposición a 90 °. En la foto 7 se puede ver la única zona en que se vio la gravacemento rota, junto a la línea de borde del carril exterior y con humedad apreciable, y en la foto 8 se puede ver el buen estado de la gravacemento colindante con la zona anterior de rotura. Por último, se puede apreciar este mismo efecto de una gravacemento sana junto a la zona deteriorada.

Podemos concluir que la gravacemento es un material que se ha comportado estupendamente a pesar de los años transcurridos desde su colocación, con el inconveniente ya conocido de la formación de fisuras y grietas por

retracción que puede limitarse con la prefisuración a distancias próximas.

3. Firmes con suelocemento

Para este trabajo se han seleccionado tres tramos, dos en la A-62 y uno en la A-60. De los tramos de la A-62 se dispone bastante información sobre su evolución ya que su construcción data de finales de los años noventa. El tramo de la A-60 se terminó en 2013 y es un ejemplo de fallo del firme al poco tiempo de su construcción. Los tramos estudiados se presentan en la tabla 4, donde se ha incluido también el año de construcción y las capas que constituyen el firme con su espesor.

Los tramos 1 y 2 fueron objeto de una obra de emergencia en el año 2018 y una obra de rehabilitación estructural el año 2020-2022. También se realizaron a lo largo de los años diversas operaciones de conservación del pavimento mediante el fresado y reposición de la capa de rodadura en zonas puntuales.

El tramo 3 tenía, en la época de su auscultación con el curvímetro, el firme original.

Estos mismos valores se presentan en el gráfico 3. En el gráfico 4 se presenta la evolución de la desviación típica de los valores de la deflexión patrón para cada tramo.

Analizando los gráficos, se puede comprobar que, en el caso de las bases de suelocemento, los valores de deflexión son superiores a los de las bases de gravacemento, como era de esperar dadas las secciones. Pero, además, la evolución del valor de la deflexión es

Tabla 5. Deflexión media de los tramos estudiados											
SECCIÓN	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2015	2017	2018	2020
1-A62-SC-20	22,0	20,9	20,53	17,12	17,46	20,44		19,24	22,44		
2-A62-SC-20	22,8	21,8	25,43	20,96	21,11	23,32		27,56	31,77		
3-A60-SC-20							13,1			15,4	20,05

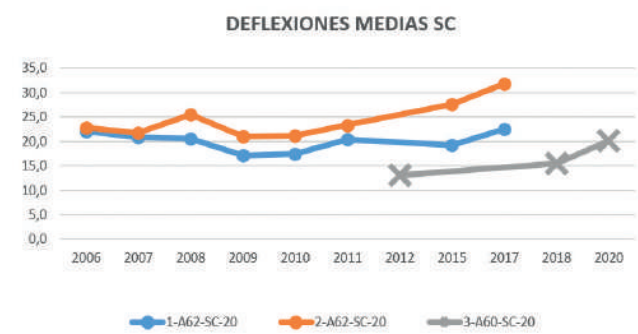


Gráfico 3. Deflexiones medias en tramos con suelocemento de la A-62 y A-60

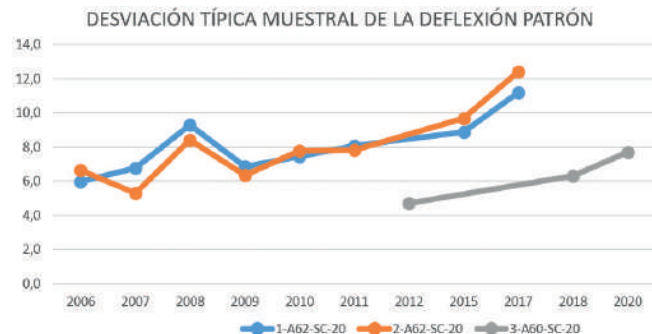


Gráfico 4. Deflexiones típicas muestra en suelocemento de la A-62 y A-60

Tabla 6. Valores de la inspección visual según anejo 4 de la O.C. 9/2002 sobre Rehabilitación de firmes		
Valor IV medio por 25 metros	Max. IV	AÑO
1-A62-SC-20	5,4	2015
2-A62-SC-20	5,7	2013



también peor en el caso de las bases de suelocemento, con un crecimiento más exponencial, que se hace muy patente para el valor de la desviación típica muestral.



En relación con la inspección visual, los valores máximos obtenidos y el año a que corresponden se incluyen en la tabla 6

Como se deduce de los valores presentados, el deterioro del pavimento era muy alto esos años. El índice de inspección visual a partir de ese momento mejoraba algo gracias a las actuaciones de renovación del pavimento en zonas localizadas hechas por conservación.

En las fotos 10 y 11, puede verse el estado del firme en sus peores momentos en el año 2017 y 2020, antes de realizarse la actuación de emergencia, que consistió mayoritariamente en la extensión de una doble capa de microaglomerado en frío, y antes de hacerse la obra de rehabilitación estructural.

En las fotos 12, 13 y 14, se pueden ver algunas de las zonas de suelocemento rotas, en las que debido la presencia de agua en las grietas del material y, en las zonas más deterioradas, se apreciaba la capa superior del suelocemento reducida a barrillo, mientras que el resto se mantenía en bloques de dureza y cohesión apreciables.

Las fotos 15 y 16 son de testigos extraídos del firme. Se puede ver

que, en algunos casos, las capas de mezcla bituminosa se encuentran deterioradas, con pérdida de betún, disgregación de la mezcla y falta de adherencia, como en el caso de los firmes con gravace-mento vistos anteriormente.

Por último, en las autovías A-62

y A-60, se hicieron sendas cam- pañas de auscultación estructural midiendo la deflexión por impac- to para calcular mediante cálculo inverso el orden de magnitud de los módulos de la capa de suelo- cemento. Los valores obtenidos bajo diferentes hipótesis resultaron

bajos.

En este tramo, terminado de construir el año 2013, se fueron produciendo ondulaciones en el pavimento sin presentar agrie- tamiento superficial por lo que, desde el punto de vista de la ins- pección visual, con la metodolo-



Foto 12



Foto 13



Foto 14



Foto 15



Foto 16



Foto 17



Foto 18



Foto 19



Foto 20

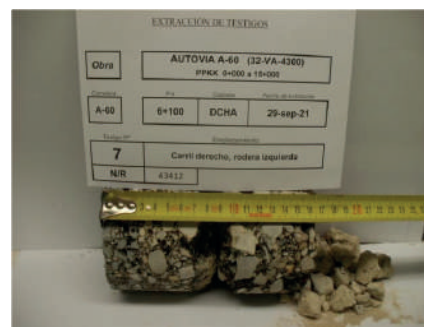


Foto 21



Foto 22

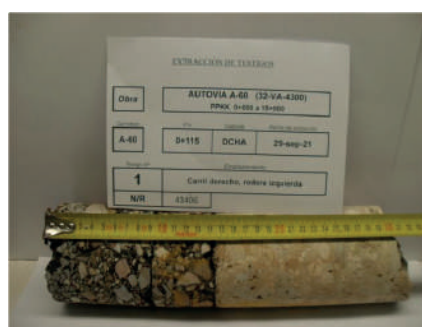


Foto 23

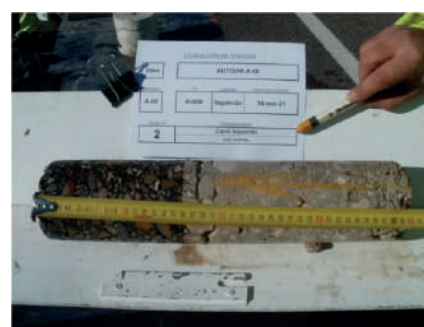


Foto 24

gía utilizada, el estado era bueno, hasta que la capa de rodadura se rompía formándose un agrietamiento generalizado en la zona de hundimiento. En ese momento, el valor del índice subía cada vez más. La evolución seguida por los hundimientos parece indicar que la cesión se va produciendo poco a poco hasta que el pavimento es incapaz de resistir las deformaciones y se rompe.

El firme de este tramo está constituido por una capa de rodadura con mezcla bituminosa de tipo discontinuo que se apoya en una capa intermedia y una capa de base tipo AC. La capa de rodadura tiene un porcentaje de huecos elevado, existiendo zonas que se aproximan a una mezcla drenante, lo que habría posibilitado la entrada de agua al cuerpo del firme.

Las fotos 17 y 18 corresponden a una calicata realizada en el firme de la A-60 en la que se llegó hasta la explanada. Las capas de mezcla bituminosa, intermedia y base,

presentan poca cohesión, se rompen y disgregan fácilmente con el martillo neumático, y no presentan adherencia entre ellas. La capa de suelocemento tampoco ofrece resistencia al picado con el martillo y presenta una humedad apreciable (7,0 %). También se detecta un desleimiento de la parte superior de la capa con formación de barrillo y una superficie irregular. Por último, la explanada se presenta aparentemente en buen estado y presenta gran resistencia a la perforación con un punzón.

Se ha realizado también una campaña de testigos de longitud suficiente para atravesar el espesor completo del suelocemento. En las fotos 19 a 24 se presentan los diferentes tipos de testigos obtenidos. Junto a algún testigo que logró obtener el suelocemento de una pieza (ver foto 23), en el resto sólo se obtuvieron o bien trozos de mayor o menor tamaño o bien un material disgregado con tamaños finos, indicando claramente el deterioro del mismo.

En conclusión, el suelocemento parece ser un material muy sensible a la entrada de agua que puede aumentar en el caso de utilizar mezclas bituminosas con un gran porcentaje de huecos, como son las mezclas discontinuas y los hormigones bituminosos tipo G.

En los años setenta, se diseñó la ley de fatiga de la gravacemento (Instituto Eduardo Torroja) pero no así la del suelocemento, aunque esta última está diseñada en la Universidad Politécnica de Burgos para un único suelocemento formado por un suelo seleccionado y un 3,5% de cemento del tipo CEM-IV con un 7% de humedad obteniéndose, en todas las probetas realizadas con el 98% de la densidad máxima, una resistencia a largo plazo a compresión de 4,88 MPa, una resistencia a flexotracción de 0,89 MPa (con la que se calculan los ejes que soporta la sección) y un módulo de 7.800 MPa.

La ley de fatiga resultante es:

$$\frac{\sigma}{R_f} = 1 - 0,070 \cdot \log N$$

Siendo:

- σ la tensión a flexotracción que provoca la rotura después de un número N de aplicaciones de carga tipo
- R_f la resistencia a flexotracción a largo plazo del material.

El CEDEX ha obtenido en materiales de suelocemento aplicados en carreteras de Castilla y León diferentes valores del módulo de elasticidad a largo plazo, tan variables como desde 4000 en la arena-cemento (o jabre-cemento) hasta más de 12.000 en el desecho de zahorra.

Esta variabilidad en los valores de los módulos y resistencias a largo plazo puede explicar el diferente comportamiento de este material comprobado en diferentes situaciones. Hay que considerar que nuestra normativa sólo contempla una clase de suelocemento, mientras que en otros países, como Francia que tiene 6 tipos diferentes, se distinguen varias clases según su resistencia a flexotracción a largo plazo y el módulo. Así pues, pensamos que se debe mejorar la calidad del suelocemento empleado, asegurando su durabilidad, para evitar defectos como los habidos en algunos tramos de autovía. Para ello se propone emplear un suelocemento de altas prestaciones, con una resistencia a compresión mayor de los 2,5 MPa solicitados, en el que se pida mayor sollicitación a la resistencia para que no se utilice cualquier suelo mientras que las ventajas medioambientales se mantienen.

4. Conclusiones generales

En conclusión, hemos podido comprobar que la gravacemento ha proporcionado un mejor comportamiento y una mayor durabilidad que el suelocemento, tal y como éste se está elaborando actualmente.

El firme de suelocemento presenta una mayor deflexión que el firme de gravacemento y la evolución del valor de la deflexión es también peor sin tener en cuenta las ventajas medioambientales o de sostenibilidad.

La capacidad soporte en los firmes de gravacemento se adjudica a esta capa, siendo compartida entre el suelocemento y la mezcla bituminosa en los firmes de suelocemento, por lo que debe cuidarse el envejecimiento de la mezcla bituminosa y el fallo prematuro del suelocemento que es un material que puede ser muy sensible a la entrada de agua, la cual puede aumentar en el caso de utilizar mezclas bituminosas con un gran porcentaje de huecos.

A estos firmes semirrígidos les afecta mucho la reacción de las mezclas bituminosas al clima que produce fenómenos de envejecimiento del betún y retracción térmica que generan fisuras que favorecen la entrada de agua al cuerpo del firme.

También hemos constatado la susceptibilidad del suelocemento al agua, mayor que la de la gravacemento por el por el material empleado empleado (sobre todo con suelos muy finos). Por tanto, el empleo de este material debe hacerse considerando este hecho, bien impidiendo la entrada de agua al cuerpo del firme, bien mejorando su resistencia en presencia de humedad.

La entrada de agua al cuerpo del firme se ve favorecida, entre otros, por:

- La existencia de mezclas con gran porcentaje de huecos sobre el suelocemento, como son las mezclas de hormigón bituminoso tipo G que suelen encontrarse en contacto directo con el suelocemento, o las mezclas drenantes o discontinuas tipo B en rodadura.
- La formación de grietas en el pavimento debidas al envejecimiento del betún y a las retracciones térmicas de las mezclas.
- La fisuración del pavimento por reflexión de las grietas de retracción de los materiales tratados con cemento.

Por otra parte, la entrada de agua se verá dificultada por:

- La colocación de mayores espesores de mezcla bituminosa sobre el suelocemento.
- La utilización de mezclas con menor contenido de huecos y mayor contenido de betún.
- La ejecución de la prefisuración del suelocemento a intervalos cortos.
- El aseguramiento de una buena adherencia entre las capas de mezclas bituminosas y entre éstas y el suelocemento.
- La realización a tiempo de operaciones de conservación como el sellado de fisuras que cierran las vías de entrada de agua al cuerpo del firme.

Otro elemento que influye en el comportamiento del suelocemento es su fabricación y extendido. Variaciones en la calidad de los materiales empleados respecto a los considerados en la fórmula de trabajo o en las condiciones de exten-

dido y compactación pueden llevar a su rápido deterioro (normalmente se toman muestras no representativas de todo el material). Este aspecto, hace del suelocemento un material muy sensible a ciertos parámetros.

Si bien, el suelocemento ofrece otra serie de ventajas económicas y medioambientales que conviene aprovechar. Por tanto, los autores piensan que se debería analizar las posibilidades de mejorar el diseño de los firmes con bases de suelocemento en el que se contemplaran los siguientes aspectos:

- Emplear un suelocemento de altas prestaciones con mayor resistencia a compresión (pues frente a los franceses que tienen en su normativa 6 tipos diferentes desde 1994, nosotros solo tenemos una).
- El empleo de mezclas menos permeables, con menor porcentaje de huecos y mayor contenido de betún.
- El empleo de betunes con una mayor durabilidad.
- La utilización de tecnologías de fabricación de las mezclas bituminosas que reduzcan el envejecimiento del betún y, por tanto, mejoren su durabilidad.
- El aseguramiento en obra de la buena ejecución de los riegos de adherencia para garantizar la adherencia entre capas.

Por último, y dado el buen comportamiento de los firmes con gravacemento, se debería analizar la posibilidad de volver a su empleo en las carreteras con tráfico muy pesado que, aunque está contemplado en la vigente instrucción, no suele considerarse habitualmente salvo en el País Vasco, por su coste e inconvenientes medioambientales.

Las conclusiones de este estudio se basan en la experiencia de que se dispone en una zona de España muy localizada y con unas condiciones climáticas y de entorno concretas por lo que los autores creen que deberían hacerse más estudios sobre el comportamiento de estos firmes en otras localizaciones con condiciones diferentes para poder disponer de una visión de su comportamiento global.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a Joanna Rodríguez Pérez su inestimable colaboración poniendo orden en la multitud de datos tratados, sin el cual hubiera sido imposible su posterior tratamiento e interpretación. A D. Félix Pérez Jiménez, Catedrático Emérito de la Universidad Politécnica de Barcelona y a D. Alberto Bardesi Orue-Echevarría, Director Técnico de la Asociación Técnica de Carreteras, por su colaboración en la revisión final de este artículo, así como a las empresas de Conservación Integral que realizaron puntualmente cada dos años las inspecciones visuales con precisión y método, y, por último, a la Dirección General de Carreteras, personalizada en la Dirección Técnica, que a través de los años ha ido realizando las auscultaciones que han servido de base a este estudio.

Bibliografía

- [1] Dirección Técnica de la DGC. Informes de deflexiones con curviómetro. Varios años.
- [2] Dirección General de Carreteras. Orden FOM/3460/2003, de 28 de noviembre, por la que se aprueba la norma 6.1-IC "SECCIONES DE FIRME", de la INS-

TRUCCION DE CARRETERAS. 2003

- [3] Dirección General de Carreteras. "Nota Técnica de 30 de diciembre sobre "Los factores de corrección de los equipos de auscultación de la deflexión de firmes y pavimentos en la Red de Carreteras del Estado". 2008
- [4] Euroconsult. "Informes de deflexiones con deflectómetro de impacto" 2020 y 2021.
- [5] Revista RUTAS de la ATC
- [6] Solís Villa, L, Ruiz Rubio, A y Díaz Minguela, J. "Auscultación de firmes construidos con suelocemento" Revista de Carreteras de la AEC 4ª época, número 130 noviembre/diciembre 2003. ❖