

EXPERIENCIAS DE PREFISURACIÓN DE CAPAS TRATADAS CON CEMENTO EN LA R.C.E.

Fernando Pedrazo Majarrez

Jefe de Área de Planeamiento, Proyectos y Obras
Demarcación de Carreteras del Estado en Extremadura
Dirección General de Carreteras
Ministerio de Fomento

Introducción

La utilización de capas de materiales tratados con cemento se ha venido realizando en las obras de la Demarcación de Carreteras del Estado en Extremadura muy paralelamente a su introducción y desarrollo por la normativa técnica.

Los primeros tramos se ejecutaron durante la construcción de la Autovía de Extremadura (hoy Autovía del Suroeste, A-5). Fruto de estas experiencias fue la adopción de forma casi sistemática de los tratamientos con cemento en capas de firme en las más recientes actuaciones desarrolladas: la Autovía de la Plata (A-66) y la Autovía Trujillo-Cáceres (A-58).

Como se ha puesto de manifiesto en otros trabajos, en el firme semirrígido se alcanza una especialización de funciones de los materiales que lo convierten en una óptima solución. Proporciona una elevada capacidad portante compatible con las altas prestaciones de una rodadura bituminosa.

Otra característica reseñable es que constructivamente el suelocemento se trata de una unidad industrializada, aspecto que redundará en una facilidad para conseguir un buen nivel de calidad del producto.

No obstante, como todo en la vida, tiene una parte menos favorable que consiste en una mayor sensibilidad estructural a las variaciones térmicas. La fisuración de la capa de suelocemento puede acabar remontando a la superficie, iniciando un proceso de daño acelerado por el agua. Afortunadamente, se ha desarrollado una técnica constructiva paliativa de este problema: la prefisuración de la capa.

Sensible a esta problemática, el artículo 513 del PG-3 de la DGC prescribió la necesidad de realizar la prefisuración en fresco en los casos que lo indique la Norma 6.1-IC, introduciendo en la fisura algún elemento que impida su cierre y a la vez permita la transmisión de cargas entre los dos lados de la junta, como una emulsión o una lámina de plástico.

PREFISURACIÓN DE CAPAS TRATADAS CON CEMENTO

En este trabajo se repasa sucintamente el procedimiento que se ha seguido para la ejecución del suelocemento en las obras reseñadas, describiendo en detalle la solución de prefisuración por inyección de emulsión bituminosa.

Finalmente se comentarán los beneficios que se observan en esta solución.

Marco general de las actuaciones

La Autovía de la Plata a su paso por Extremadura tiene una longitud total de 301 kilómetros, ya ejecutados, donde mayoritariamente se han empleado explanadas mejoradas estabilizadas y sub-bases de suelocemento. Por su parte, la Autovía Trujillo-Cáceres tiene una longitud de 46,5 km, y en este caso, todas sus explanadas están estabilizadas y todos sus firmes son semirrígidos.

Los materiales granulares empleados en los trabajos han sido diversos, material procedente de la alteración de macizos graníticos (jabres), rechazos de canteras de diabasa, granito o cuarcita, arcosas, tobas andesíticas, calcoesquistos, grava silícea machacada, areniscas de rañas, granodioritas, pizarras, y machaqueos de granitos y grauvacas de la propia traza.

Respecto al diseño específico del firme de las obras se puede señalar que para la Autovía de la Plata:

- Los tráficos actuales en el itinerario (datos oficiales de 2007) se encuentran entre 5.500 v/día con un 32 % de pesados y 16.500 v/día con porcentaje de pesados del 15 %. En los correspondientes proyectos la categoría de tráfico que se adoptó fue T1 en general, y puntualmente T0.
- Las categorías de explanada se determinan actualmente según el módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga (Ev_2), obtenido de acuerdo con la NLT-357 “Ensayo de carga con placa”. En todos los casos se adopta del tipo E3 ($Ev_2 \geq 300$ MPa).

Respecto a la Autovía Trujillo-Cáceres:

- La intensidad de tráfico contabilizada en el itinerario se encuentra en el torno de los 8.000 v/día, con porcentaje de pesados del 5 %. En los proyectos el tráfico se clasificó como T2.
- Las categorías de explanada adoptadas fueron E3 ($Ev_2 \geq 300$ MPa) y E2 ($Ev_2 \geq 120$ MPa).

Diseño del firme del tronco de las autovías

Actualmente en nuestro país el proyecto de las capas tratadas con ligantes hidráulicos para la Red de Carreteras del Estado sigue un modelo empírico-analítico recogido en una norma de obligado cumplimiento (Norma 6.1-IC, Secciones de firmes, 2003), salvo justificación técnica muy específica. Las soluciones se presentan tabuladas atendiendo exclusivamente a dos variables de diseño;

el volumen de tráfico pesado y la categoría de la explanada sobre la que se apoya el firme. Dichas soluciones han sido comprobadas por métodos analíticos y siguen guardando relación con las contenidas en ediciones anteriores de la norma, ya validadas por la experiencia.

En el caso de los firmes semirrígidos, la capa de suelocemento se dispone bajo las bases de mezclas bituminosas conformando una subbase¹. La estabilización in situ se realiza sobre la capa superior de la explanada, constituyendo una explanada mejorada o subbase inferior de menor calidad.

La sección de la vigente instrucción que se adoptó mayoritariamente para la Autovía de la Plata fue la 132, con 20 cm de suelocemento en subbase, o la 131 cuando puntualmente se recurrió a una subbase granular. En la Autovía Trujillo-Cáceres se optó por las soluciones 222, con 22 cm de suelocemento, y la 232, con 20 cm de SC, modificada esta última en algún caso para mantener 18 cm de MBC.

Obsérvese ya, que la moderada intensidad de tráfico nos conduce a soluciones con un espesor reducido de mezcla bituminosa (15, 18 ó 20 cm).

Acertadamente a nuestro juicio, la Norma indica que en el caso de las secciones elegidas es preceptivo prefigurar con espaciamientos de 3-4 m.

Condiciones climáticas de la zona

Un importante aspecto a tener en cuenta se refiere a las condiciones climáticas de la zona donde se realizan los trabajos. Ello ayuda a entender mejor las precauciones adoptadas en el diseño de la capa de suelocemento.

Tomando la estación meteorológica de Cáceres como representativa de la banda central de la región extremeña, con los datos proporcionados por la Agencia Estatal de Meteorología para el periodo 1971-2000, se pueden deducir los siguientes índices termopluviométricos:

Lang	$F = \frac{P}{t}$
Martonne	$I = \frac{P}{t + 10}$
Dantin-Revenga	$I = \frac{100 t}{P}$

siendo: P , la precipitación media anual (mm).
 t , la temperatura media anual (°C).

¹ Funcionalmente distinta de la clásica subbase drenante ya que el objetivo de mejora de la capacidad portante.

PREFISURACIÓN DE CAPAS TRATADAS CON CEMENTO

En nuestro caso, con $P = 523 \text{ mm}$ y $t = 16,1^\circ$, los resultados que proporcionan estos índices son los siguientes:

Índice	Valor	Interpretación
Lang	32,5	Zona árida
Martonne	20,0	Zona climática seca mediterránea, semiárida/subhúmeda
Dantin-Revenga	3,1	Zona semiárida/árida

Todos los índices son coincidentes en calificar la zona como semiárida/árida. De igual manera la clasificación agroclimática de Papadakis calificaría la zona dentro del grupo climático Mediterráneo Subtropical. También resulta interesante considerar las temperaturas que se alcanzan y sus oscilaciones:

Mes	Media de las temperaturas máximas diarias ($^\circ\text{C}$)	Media de las temperaturas mínimas diarias ($^\circ\text{C}$)	Oscilación ($^\circ\text{C}$)
Enero	11,8	4,0	7,8
Febrero	13,7	5,2	8,5
Marzo	17,0	6,6	10,4
Abril	18,6	8,2	10,4
Mayo	22,7	11,2	11,5
Junio	28,5	15,5	13,0
Julio	33,0	18,7	14,3
Agosto	32,6	18,7	13,9
Septiembre	28,5	16,3	12,2
Octubre	21,7	11,9	9,8
Noviembre	16,1	7,8	8,3
Diciembre	12,4	5,4	7,0

Las oscilaciones anteriores se han calculado sobre valores medios mensuales, de forma que realmente se pueden alcanzar recorridos diarios más elevados que los indicados.

También podemos establecer una cota extrema de las mismas comparando la máxima temperatura mensual con la mínima, resultando:

EXPERIENCIAS DE PREFISURACIÓN DE CAPAS TRATADAS CON CEMENTO EN LA R.C.E.

Mes	Oscilación extrema (°C)	Mes	Oscilación extrema (°C)
Enero	25,6	Julio	34,0
Febrero	30,8	Agosto	35,0
Marzo	28,6	Septiembre	34,8
Abril	32,2	Octubre	34,0
Mayo	33,8	Noviembre	28,2
Junio	35,4	Diciembre	26,4

En conclusión, en la zona se puede alcanzar habitualmente en verano oscilaciones cercanas a los 15 °C, o incluso superiores, con temperaturas máximas cercanas a los 40 °C.

Tratamiento de los materiales

En las siguientes tablas se recoge de forma resumida las características esenciales de los materiales empleados en las capas de suelocemento.

Material	Jabre no plástico	Granodioritas	Rechazo cuarcitas	Rechazo granito	Machaqueo granito	Machaqueo grauvaca	Tobas andesíticas
Límite líquido	-	27	21	-	-	23,9	28
Índice de plasticidad	-	5,5	5	-	-	6,7	7
Densidad máxima Próctor modificado (t/m ³)	2,08	2,23	2,18	2,17	2,08-2,20	2,22	2,02
Humedad óptima (%)	7,5	7,5	7	6	6,5-7,0	6,5	9

Tabla 1. Características representativas de los materiales empleados.

Hay que comentar que los valores indicados intentan caracterizar el material y corresponden a promedios.

Conforme al artículo 513 del vigente PG3, para el caso que nos ocupa, la categoría de tráfico pesado obliga al empleo de un huso concreto (SC40), de tamaño nominal máximo 40 mm. Por ello, además de una cuidada selección del yacimiento, normalmente es necesario

PREFISURACIÓN DE CAPAS TRATADAS CON CEMENTO

algún tratamiento previo de elaboración, como un cribado, un machaqueo primario, una trituración con bulldozer y/o rodillo pata de cabra, o un mezclado de fracciones para corrección granulométrica. Al respecto hay que señalar que el efecto secundario de la trituración será el incremento de finos.

En el caso del suelocemento el contenido mínimo de cemento exigido por la normativa es del 3%. En la siguiente tabla se presentan de forma orientativa los porcentajes de cemento con que se ha trabajado:

Material	Jabre no plástico	Granodioritas	Rechazo cuarcitas	Rechazo granito	Machaqueo granito	Machaqueo grauvaca	Tobas andesíticas
Contenido de cemento	5	4	3,5-4,5	3-4,2	3,5	3,5-4	5,5

Tabla 2. Contenido de cemento orientativo para los materiales empleados.

También conviene matizar que en estas unidades la forma de operar se asemeja ya a un proceso industrializado, de forma que los porcentajes indicados corresponden a la fase de estabilización del proceso, siendo prudente iniciar los trabajos con porcentajes ligeramente superiores e ir corrigiendo conforme se comprueba el cumplimiento de las especificaciones.

Puesta en obra del suelocemento

En todos los casos se han utilizado centrales móviles de mezcla discontinua² con dosificación ponderal que aseguran unas producciones teóricas de 500-600 t/h. Los tiempos de amasado suelen estar entre los 8-10 segundos por tonelada y dependen de la amasadora, especialmente de su longitud e inclinación. Ocasionalmente se han utilizado plantas con producciones teóricas de 250 t/h.

Para la puesta en obra, habitualmente se utilizan extendedoras automotrices (por ejemplo del tipo ABG TITAN 511 ó 525) trabajando a todo el ancho de la capa, que suele ser de 9,2 m si se incluye el arcén interior, o de un máximo de 11,3 m si se ejecutan simultáneamente todos los arcnos. Obviamente, en estas últimas condiciones resulta importante el control de las segregaciones.

El arcén exterior que se ejecuta con suelocemento requiere de un recrecido de 10 cm o del extendido de los 30 cm totales en dos capas, según la anchura de trabajo del extendido de calzada. Estos suplementos se pueden ejecutar con extendidora lateral o convencional.

² Estos equipos difieren realmente poco de los que se utilizarían para la fabricación de una mezcla bituminosa en frío. Que el amasado sea continuo o discontinuo depende de si se hace trabajar o no la compuerta de la tolva de regulación.



Foto 1. Planta de suelocemento.

Entre la extendedora y el tren de compactación se emplaza el equipo mecánico de prefisuración.

El rendimiento de los trabajos de extendido puede estar en los 700-800 m de calzada/día en condiciones meteorológicas favorables.

El tren de compactación suele estar compuesto de dos rodillos con varias alternativas de composición, donde también evidentemente influye el tonelaje de cada equipo:

- Un rodillo tandem y un rodillo neumático.
- Un rodillo liso y un rodillo tandem.
- Un rodillo liso y uno o dos de neumáticos.

El riego de curado debe programarse para seguir inmediatamente al extendido del suelocemento. Se suele utilizar una emulsión tipo ECR1 con una dotación de 300 gr/m² de betún residual.

Es importante mantener la restricción de tráfico pesado por la capa ejecutada, no sólo por el posible deterioro de una capa constituida por un material frágil, sino también por la degradación superficial que se provoca. En todo caso, será inevitable el trasiego de los equipos de extendido de la primera capa de mezcla bituminosa.

La prefisuración de la capa de suelocemento

La prefisuración consiste pues en la ejecución de dos tipos de discontinuidades en la capa:

- Transversales.
- Longitudinales.

Las técnicas en fresco empleadas en las obras han sido diversas, como la utilización de una uña inyectora de emulsión montada sobre equipo móvil o una excavadora mixta con viga en su brazo mecánico que introduce una lámina de polietileno para constituir la junta. También se ha utilizado el serrado en seco de la capa.



Foto 2. Prefisuración en fresco.



Foto 3. Prefisuración con equipo móvil.



Foto 4. Detalle de la uña inyectora.



Foto 5. Detalle de fisura de retracción en coincidencia con junta.

Para la ejecución de las juntas transversales, la uña inyectora se monta sobre equipos como minitractores o quad³.

En este caso, la experiencia demuestra que la junta es compactable hasta el completo enrase con el terreno circundante. Finalizada la capa resulta imperceptible determinar la posición de la junta, salvo que la fisuración de retracción/dilatación la delate a temprana edad.

Para la prefisuración longitudinal la uña inyectora se puede emplazar sobre la propia extendidora. Alternativamente se puede emplazar un elemento punzante en la regla de la entendedora que premarque la fisura y utilizar los mismos medios que en la prefisuración transversal.

En los tramos que se optó por el serrado se hicieron pruebas para determinar el momento óptimo de corte. En unos casos se realizó antes del riego de curado y en otro posteriormente. Para alcanzar el rendimiento de la puesta del suelo-cemento se han requerido dos cortadoras. La profundidad de serrado adoptada suele ser de $\frac{1}{3}$ del espesor. Este método puede ser útil para la prefisuración a posteriori de los arcenes o tratar zonas donde por avería del equipo de prefisuración se tuvo que postergar la ejecución de la junta.



Foto 6. Prefisuración longitudinal.



Foto 7. Serrado en seco.

³ Hoy en día estas técnicas han sido patentadas.

PREFISURACIÓN DE CAPAS TRATADAS CON CEMENTO

No obstante, su empleo suele estar más penalizado económicamente. En nuestro marco climático se ha comprobado en la propia obra que el espaciamiento de 5 m para la junta transversal resulta excesivo, sobre todo si la dotación de cemento supera el 5,5 % y se trabaja en verano, por lo que habitualmente se prefisura transversalmente cada 4 m.

Como medida cautelar, es conveniente que la junta longitudinal se ejecute en coincidencia con el eje definitivo de la calzada.

Justificación del uso de la prefisuración

La incorporación de cemento a un suelo, aunque sea en bajas cantidades, le proporciona unas mayores resistencias, pero le hace susceptible de la aparición de fenómenos de retracción y dilatación térmica. Hay que tener presente que si la ganancia de resistencia a compresión es significativa, la resistencia a tracción sigue siendo muy limitada.

El fenómeno de la retracción hidráulica de secado se produce durante el fraguado en ambiente no saturado. En buena lógica la adopción de un riego de curado sobre la capa ejecutada debería mitigar este problema.

Por otro lado, una capa tratada con cemento donde su fraguado está ya estabilizado, dispone de una reducida resistencia a tracción, lo que hace difícil que pueda seguir las deformaciones que imponen las variaciones de temperatura ambiental sin provocar una nueva fisuración.

No obstante, podemos pensar que la capa de suelocemento se encuentra protegida por capas de material bituminoso capaces de amortiguar el progreso de la fisura. Nuestro problema es que actualmente somos incapaces de predecir si serán capaces o no de evitar la extensión de la fisuración a la superficie, situación que es dependiente de sus propiedades intrínsecas, espesor y significativamente de las condiciones climáticas.

Si las fisuras alcanzan finalmente la superficie del pavimento se entra en un proceso de degradación acelerada del firme (daño acumulado), propiciado por la infiltración del agua de escorrentía que hace variar las condiciones de humedad de los materiales subyacentes y que además pueden entrar en carga al paso de los neumáticos en situaciones de sobresaturación.

Durante la construcción de la A-5 ya se pudo observar que uno de los tramos (variante de Mérida), presentó problemas de prefisuración. En esa época, la lógica prudencia frente a una nueva y desconocida unidad, como era el suelocemento, condujo al empleo de contenidos de cemento relativamente elevados⁴. En el Trujillo-Miajadas, que disponía de menor espesor de mezcla bituminosa (18 cm), presentó también moderados problemas de fisuración transversal.

⁴ Se puede considerar que se trataba casi de gravacemento.

En las obras nuevas se observaba la presencia de dos circunstancias que potencialmente podían ser desencadenantes del problema:

- La moderada intensidad de tráfico de las nuevas autovías nos conducen a soluciones con un espesor reducido de mezcla bituminosa (15, 18 ó 20 cm).
- Las elevadas oscilaciones térmicas estivales de la zona donde se emplazan las obras.

Por todo ello, sin renunciar a proporcionar una mayor capacidad portante al paquete de firme, se intentó paliar la fisuración térmica mediante el empleo de la técnica constructiva de prefisuración.

Bibliografía recomendada

- Orden de 27 de diciembre de 1999, por la que se actualizan determinados artículos del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes en lo relativo a conglomerantes hidráulicos y ligantes hidrocarbonatos. Ministerio de Fomento, 2000.
- Auscultación de firmes construidos con suelocemento. Luis Alberto Solís Villa, Aurelio Ruiz Rubio y Jesús Díaz Minguela. Carreteras, Nº 130, Pag. 86-98, 2003.
- Orden FOM/3460/2003, de 28 de noviembre, por la que se aprueba la Norma 6.1 IC de secciones de firmes, de la Instrucción de Carreteras. Ministerio de Fomento, 2003.
- Manual de firmes con capas tratadas con cemento. Centro de Estudios de Carreteras. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones y Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 2003.
- Orden FOM/891/2004, de 1 de marzo de 2004, por la que se actualizan determinados artículos del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes, relativos a firmes y pavimentos. Ministerio de Fomento, 2004.
- Ponencias del Primer Simposio Internacional sobre Estabilización de Explanadas y Reciclado In Situ de Firmes con Cemento. IECA, Asociación Española de la Carretera y ATC, Salamanca, 2001.
- Ponencias del Segundo Simposio Internacional sobre Estabilización de Explanadas y Reciclado In Situ de Firmes con Cemento. AIPCR, París, 2005.

