



SUELOCEMENTO IN SITU

GUIAS PRACTICAS

INTRODUCCIÓN

El suelo cemento es un material obtenido de la mezcla homogénea de un suelo o material granular, cemento y agua, y eventualmente algún aditivo (como por ejemplo un retardador de fraguado), que convenientemente compactada se utiliza como capa estructural en firmes.

El suelo cemento in situ es una técnica de construcción de las capas de suelo cemento en la que, frente a la solución clásica de fabricación en una planta, la mezcla del suelo con el cemento se realiza en el mismo punto de aplicación.

Para ello, se utilizan equipos similares a los empleados en estabilización de explanadas (vía húmeda), fabricándose la lechada de cemento de forma ponderal en un primer equipo dosificador, que inyecta el conglomerante a la cámara del rotor del segundo equipo, en el que se lleva a cabo el amasado.

VENTAJAS E INCONVENIENTES. CONTRIBUCIÓN A LA SOSTENIBILIDAD

El aprovechamiento de los suelos existentes en su empleo como suelo cemento evita el empleo de áridos de calidad, y con ello, la reducción de los recursos naturales disponibles. Se trata de una técnica enfocada claramente a lograr una mayor sostenibilidad, a cuyas ventajas medioambientales y técnicas se suman importantes beneficios económicos.

Ventajas medioambientales

Las ventajas del suelo cemento, independientemente de que se fabrique en planta o in situ, son:

- El empleo de suelos locales o de la traza contribuye a evitar explotar nuevos yacimientos de áridos o a reducir las reservas de los existentes.
- Se disminuye la necesidad de vertederos, al aprovecharse los suelos de la traza.
- Es una técnica en frío que consume poca energía. Se disminuye con ello notablemente la contaminación y las emisiones de vapores nocivos.
- Se trata de una técnica especialmente adaptada al empleo de cementos con alto contenido de adiciones. Esto supone una reducción de las emisiones durante su fabricación, al reducir la cantidad de clínker empleado e incorporar subproductos industriales como escorias o cenizas volantes, lo que favorece el cumplimiento del protocolo de Kioto y de los compromisos de desarrollo sostenible.

A estas ventajas se suman otras debidas específicamente a la realización in situ:

- Al limitarse el transporte a una sola operación, en vez de tener que llevar los suelos a la planta y desde esta última el suelo cemento al punto de puesta en obra, se disminuyen las emisiones de CO₂ y otros contaminantes, se reduce el daño que generan los combustibles y aceites, y desaparecen los impactos colaterales que provoca dicho transporte en los caminos y flora adyacentes (polvo, erosiones y otros).
- Se reducen los daños que la instalación de una planta de fabricación puede ocasionar al suelo que ocupa y al entorno colindante.



Foto 1. Equipos realizando un suelo cemento in situ en ensanche

Ventajas técnicas

Correspondientes a cualquier capa de suelocemento, independientemente del método de fabricación:

- Proporciona una elevada capacidad de soporte al firme, disminuyendo las tensiones que llegan a la explanada y a las capas superiores de mezcla bituminosa. Con ello se aumenta la durabilidad y la vida de servicio de la carretera.
- Se reducen los efectos negativos que sobre el firme tienen los cambios de humedad y las agresiones climáticas. Además se incrementa la resistencia a la helada.

Específicas del suelocemento in situ

- Es posible realizar capas de mayor espesor que en el caso de utilizarse una extendidora de suelocemento.
- Con la realización in situ se disminuyen las molestias por el tráfico de obra y los daños a la red de carreteras adyacentes debido a que no se transportan los materiales a una planta de fabricación, ni desde ésta a la obra.
- Al no realizarse dicho transporte, se suprime la posibilidad de que el material se puede secar durante el transporte y la extensión en los días de calor. Por otra parte se aumenta el tiempo disponible para llevar a cabo las operaciones de compactación y terminación dentro del plazo de trabajabilidad.
- Se trata de una solución muy adecuada para ensanches de carreteras en los que se prevea además el reciclado in situ con cemento del firme existente. En este caso, se debe aportar una zorra en la caja del ensanche con unas características tales que, tras su mezcla con cemento, el suelocemento resultante tenga unas características resistentes similares a las del firme existente reciclado con la misma dotación de conglomerante. Con ello, es posible realizar cuñas de ensanche y modificar el trazado en las curvas por cualquiera de las márgenes, sin necesidad de un ancho mínimo constructivo.



Fotos 2 y 3. Perspectiva de dos suelocementos realizados in situ, curados y terminados

Ventajas económicas

Independientemente del método de fabricación del suelocemento:

- Se reduce el volumen de áridos de calidad a utilizar en la obra y el coste de su transporte.

Específicas del suelocemento in situ:

- Se eliminan los costes de instalar una planta de fabricación.
- Se reducen los plazos de ejecución, dado que el suelocemento se realiza con equipos cuyo rendimiento puede ser bastante superior al que es posible conseguir con una planta.
- Es posible programar la obra por fases, sin que ello se traduzca en tener una planta inactiva durante un cierto tiempo.
- Las ventajas técnicas y ambientales citadas también se traducen en beneficios económicos.

Además administrativamente se suprime la necesidad de obtener los permisos medioambientales y del ayuntamiento o del organismo gestor correspondiente para la instalación de una planta de fabricación.

Inconvenientes o limitaciones

- El suelocemento, como todas las capas de materiales tratados con cemento, es muy sensible al espesor, pequeñas variaciones del mismo suponen importantes reducciones en la vida útil del firme. En el caso de realización in situ, resulta difícil determinar la profundidad exacta del tratamiento, por lo que se debe prever un sobreespesor que asegure que se obtenga en cualquier punto el espesor mínimo especificado en el proyecto. Además, si la explanada está estabilizada, se debe profundizar unos centímetros en la misma, con el objetivo de que no quede material suelto sin tratar entre ambas capas (situación que no se produce al fabricarse en planta).
- La precompactación del material a la salida de la estabilizadora es muy reducida, por lo que el proceso de nivelación para obtener la rasante debe ser más preciso.
- La gran capacidad de los modernos equipos de ejecución in situ permite el mezclado de suelos de deficiente calidad con el conglomerante sin que se obtenga en ciertos casos un producto homogéneo y uniforme, y sin que esto sea fácil de detectar sin ensayos numerosos y continuos. Es el caso de suelos muy plásticos que no se deban usar o suelos con terrones de partículas plásticas que son muy difícil de deshacer y distribuir. El control de calidad visual del suelo resulta mucho más complicado.
- No es fácil conocer la cantidad de conglomerante aportado en cada zona o sección. Sólo se puede obtener valores medios de consumos por cada cuba de cemento.
- Si alguno de los difusores de la estabilizadora se obstruye y no se detecta el error, se puede estar fabricando una franja de suelocemento sin conglomerante o con un contenido muy pequeño del mismo. Aunque se dosifique algo de lechada por el solape con los conos de distribución de los difusores colindantes, la cantidad de cemento aportada en esa banda es muy inferior a la necesaria.
- Los elevados rendimientos de producción se encuentran en oposición con el plazo necesario para la obtención de los resultados de control marcado por las normas, lo que hace que las reparaciones resulten costosas si, cuando se conocen los resultados, estos no resultan aceptables. Para evitar esta situación, se debe ser generoso en la dotación de cemento asegurando la obtención de buenos resultados.



Fotos 4 y 5. Suelos muy plásticos, empleados en la realización de un fallido suelocemento in situ

NORMATIVA

Materiales y fórmula de trabajo

En el artículo 513 “Materiales tratados con cemento (suelocemento y grvacemento)” del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales PG-3 para obras de carreteras del Ministerio de Fomento se recogen las características exigidas a los suelos para poder ser utilizados en suelocemento. Como material granular de partida a mezclar con el conglomerante se pueden emplear zahorras, suelos granulares, subproductos o productos inertes procedentes de desecho, cuyas características deben incluirse en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares del proyecto. El material granular debe estar exento de terrones de arcilla, materia vegetal, marga u otras materias extrañas que puedan afectar a la durabilidad de la capa y no debe ser susceptible de ningún tipo de meteorización o de alteración física o química, ni de lixiviarse con el agua dando lugar a productos que puedan dañar a estructuras u otras capas del firme. Tampoco deberá tener reactividad potencial con los álcalis del cemento.

Prácticamente es posible utilizar la mayoría de los suelos, salvo los que presenten materiales que puedan afectar a la durabilidad del firme. Sin embargo, en algunos casos, ciertas características como

una granulometría inadecuada, con ausencia de algunos tamaños intermedios que haga muy difícil su correcta compactación, o una plasticidad excesiva que requiera una dosificación muy elevada de cemento para obtener las resistencias exigidas, pueden hacer económicamente inviable el empleo de un determinado suelo.

De forma resumida, se incluyen en la tabla 1 las prescripciones exigidas a los materiales granulares a utilizar en suelocemento tanto en el citado artículo 513 del PG-3 como en diferentes normativas autonómicas.

Tabla 1. Prescripciones de los suelos a utilizar en suelocemento

Propiedad	Pliego PG-3 del Mº de Fomento Art. 513	Recomendaciones de Castilla y León	Instrucción de Firms de Andalucía	Norma del País Vasco
Tamaño máximo	< 50 mm	< 50 (40) mm	< 50 mm	< 50 mm
Husos	SC40 y SC20 ⁽¹⁾	--	SC40 y SC20 (= PG3)	= PG3
Pasa # 2 UNE	SC40: entre 17 y 52 %	≥ 20%	> 20%	= PG3
	SC20: entre 36 y 94 %			
Pasa # 0,063 UNE	SC40: entre 2 y 20 %	≤ 35%	SC40: = PG3	= PG3
	SC20: entre 2 y 35%		SC20: entre 3 y 30 %	
Plasticidad	LL<30 IP<15	LL<30 IP<12	LL<30 IP<12 (preferible < 10)	= PG3
Materia orgánica	< 1%	= PG3	Exento	= PG3
Sulfatos (%SO ₃)	< 1% Si > 0,5% cemento SR	= PG3	= PG3	= PG3

(1) granulometrías definidas en el PG-3 para el suelocemento

	Cernido ponderal acumulado (% en masa) en tamices UNE-EN 933-2 (mm)									
	50	40	25	20	12,5	8	4	2	0,5	0,063
SC40	100	80-100	67-100	62-100	53-100	45-89	30-65	17-52	5-37	2-20
SC20	-	-	100	92-100	76-100	63-100	48-100	36-94	18-65	2-35

La granulometría del huso SC 20 definida en el artículo 513 del PG-3 solo se puede emplear en carreteras con categoría de tráfico pesado T3 y T4, además de en arcenes, salvo en la red autonómica de carreteras de Andalucía, que es admisible para todo tipo de tráfico, y en la de Castilla y León, en la que no se prescribe huso granulométrico (solo pase por tamices 2 y 0,063 UNE).

Siempre es importante conocer las razones por las que se introducen estas limitaciones en algunas normativas autonómicas para permitir o no ciertas excepciones (tabla 2).



Foto 6. Detalle del suelocemento realizado in situ

Tabla 2. Causas de las prescripciones de los suelos a utilizar en suelocemento

CARACTERÍSTICA	LIMITACIÓN	CAUSA DE LA LIMITACIÓN
Máx. % de finos	35 %	Obtener un esqueleto mineral de estabilidad adecuada Evitar contenidos excesivos de cemento
Mín. % de finos	3 %	Evitar dificultades en la compactación Evitar contenidos excesivos de cemento
Máx. % arenas 2 mm	65 %	Obtener un esqueleto mineral de estabilidad adecuada Evitar contenidos excesivos de cemento
Mín. % de arenas 2 mm	35 %	Obtener un contenido adecuado de mortero
Tamaño máx.	40 – 60 mm	Mejorar la regularidad superficial Evitar segregaciones Evitar dificultades de compactación
Continuidad granulométrica		Mejorar la compactación Evitar contenidos excesivos de cemento
Plasticidad máxima	IP < 10 - 15	Evitar problemas durante el mezclado y extendido del material Evitar contenidos excesivos de cemento Disminuir la sensibilidad del material al agua
Materia orgánica máxima	< 1%	Evitar retraso o falta de fraguado y endurecimiento del material
Sulfatos o sulfuros	< 1% Suelos cohesivos: ensayo de inmersión - compresión	Evitar reacciones expansivas Evitar pérdidas de resistencia del material

En todas las normativas se limita el **contenido mínimo de cemento al 3%** en masa respecto del total del material en seco, debiéndose aportar el necesario para conseguir una resistencia mínima a compresión a la edad de 7 días de 2,5 MPa (media aritmética de al menos 3 probetas de la misma amasada obtenida según UNE-EN 13286-41). Este valor puede reducirse en un 15% en el caso de emplear cementos con un alto contenido de adiciones. En el PG-3 se limita además la resistencia máxima a 4,5 MPa, exigencia que se suprime en algunas normativas autonómicas si el suelocemento se prefisura.

Las probetas deben fabricarse con la energía que proporcione la densidad mínima requerida que, salvo que el Pliego del proyecto indique otra, debe ser el 98% de la densidad máxima Proctor modificado (UNE-EN 13286-2), y nunca con una densidad mayor.

Proyecto

Los espesores de las capas de suelocemento para firmes de carretera en función de la categoría de tráfico pesado y la calidad de la explanada se recogen en la Norma 6.1-IC "Secciones de firme" de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento o en las respectivas normas autonómicas,. Los espesores varían desde 25 hasta 30 cm.

La normativa estatal no admite el suelocemento fabricado in situ nada más que firmes de arcenes en las categorías de tráfico pesado T1, T2 o T31 (S-EST3 con resistencia a compresión simple a siete días no inferior a 2,5 MPa y prefisurado con espaciamentos comprendidos entre 3 y 4 m).

No obstante, para muchas Administraciones autonómicas el suelocemento in situ presenta un interés especial, aparte de las ventajas mencionadas anteriormente, puesto que en una parte importante de sus obras el tamaño de las mismas hace inviable en la práctica el montar una planta expresamente para ellas. Por ello han ido incorporando gradualmente esta unidad de obra a sus prescripciones.



Foto 7. Aspecto a la salida del equipo

Fue en las Recomendaciones de Proyecto y Construcción de Firmes y Pavimentos de la Junta de Castilla y León publicadas en 1984 donde por primera vez se incluyó el suelocemento in situ de forma explícita. En ellas se indica que la mezcla del suelo con el cemento debe realizarse en principio en planta, aunque en ocasiones es aceptable la mezcla in situ. Se destaca, no obstante, que si bien con esta última opción se obtienen mayores rendimientos y resulta más económica, es necesario un mayor control para asegurar los espesores y la calidad del material exigidos, especialmente la homogeneidad (del material y de sus resistencias) y la regularidad superficial.

Dada la gran sensibilidad del suelocemento, y por tanto del conjunto del firme a eventuales reducciones del espesor, en las Recomendaciones se exige que, si el suelocemento se fabrica in situ, los espesores mínimos indicados en las tablas de secciones de firme de nueva construcción se incrementen en 3 cm. Debe tenerse en cuenta que dichos espesores son los mínimos una vez compactada la capa.

Este incremento de espesor de 3 cm no se debe traducir en un sobrecoste de la obra, dada la mayor economía de la técnica de fabricación in situ, por lo que en los cuadros de precios se debe indicar expresamente si se trata de un suelocemento fabricado en planta o de un suelocemento fabricado in situ. Si por circunstancias de la obra no previstas en el proyecto resulta necesario cambiar un suelocemento en planta por un suelocemento in situ, en la sección que se construya debe incrementarse el espesor en 3 cm según lo indicado anteriormente, pero sin que el mayor volumen de este material suponga un mayor coste total de la capa.

Este criterio de incrementar el espesor de la capa de suelocemento en 3 cm cuando se realiza in situ, ha sido seguido por la Instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía y la Norma para el dimensionamiento de firmes de la red de carreteras del País Vasco (en este caso, sólo admite esta solución con tráficos de categoría inferior a T1).

Ejecución

Para la realización del suelocemento in situ debe recurrirse a equipos específicos (del tipo de los empleados para la estabilización in situ de explanadas o el reciclado de firmes) que efectúen todas las operaciones en continuo, sin intervención manual (fresado, dosificación, distribución del cemento, mezclado y extensión), y que deberán encontrarse en correcto estado de uso (sin ningún tipo de pérdidas). La dosificación del cemento se ha de hacer siempre en forma de lechada, aportando la humedad necesaria mediante equipos que dosifiquen en masa. Los inyectores para introducir dicha lechada en la estabilizadora han de mantenerse siempre limpios.

El mezclado debe realizarse durante todo el tiempo que resulte necesario para lograr la homogeneidad exigida, por lo que la velocidad de avance de los equipos ha de mantenerse por debajo de los 10 m/min. Siempre que se observe una heterogeneidad o defecto repetido en el mezclado, como cambios de granulometría, defectos de dosificación, etc, se detendrán los trabajos hasta eliminar la causa (desgaste de picas, suciedad de los inyectores, etc).

Dado que la anchura de trabajo de los equipos obliga a la ejecución por bandas, se deben cuidar especialmente los solapes, que serán de unos 20 cm, para que no queden franjas de suelo sin tratar, pero evitando sobredosificaciones y controlando que su contenido de humedad no sea diferente del resto.



Fotos 8 y 9. Diferentes tipos de suelocemento realizados in situ (barridos y limpios)



Fotos 10 y 11. Rehabilitación de un carril mediante la técnica de suelocemento in situ

Para la compactación se debe disponer de un rodillo de al menos 17 t de masa, que realice una o dos pasadas dobles vibrando detrás del equipo mezclador y un segundo rodillo de masa superior a 15 t detrás de la motoniveladora que realice el refino. Para que la superficie quede correctamente cerrada, es conveniente disponer además de un rodillo de neumáticos.

Si debido al elevado espesor de la capa no resulta posible obtener la densidad exigida del 98% (medida con el vástago del densímetro introducido hasta el fondo de la capa), el suelocemento se debe realizar en dos capas que deben quedar perfectamente adheridas. Si por las condiciones de la obra resultase muy difícil la ejecución en doble capa dentro del plazo de trabajabilidad, se puede permitir la realización de una capa única siempre que la densidad obtenida, midiendo en el fondo de la capa, no resulte inferior al 96% de la densidad máxima Proctor modificado y que las probetas fabricadas con esta densidad del 96% cumplan las exigencias de resistencia establecidas.



Foto 12. Perspectiva de los equipos y la compactación

Para poder lograr una regularidad superficial aceptable en la ejecución in situ, antes de terminar la compactación se debe realizar un refino con motoniveladora, que en el caso de obras de más de 20.000 m² (salvo ensanches) las Recomendaciones de la junta de

Castilla y León exige que esté dotada de equipos auxiliares de nivelación (por ejemplo 3D), que faciliten la obtención de una rasante adecuada, sin que ello dependa excesivamente de la habilidad del maquinista. En el refino solamente se debe retirar material, sin realizar aportaciones en capa de pequeño espesor y evitando que se produzcan desplazamientos importantes del material para evitar segregaciones. Una vez llevado a cabo el refino se finalizará la compactación.

Todo el proceso de ejecución de una banda debe completarse dentro del plazo de trabajabilidad del material de la banda adyacente extendida con anterioridad, a fin de evitar la aparición de juntas frías. En caso de no determinarse el mismo mediante ensayos (norma UNE-EN 13286-45), el tiempo máximo transcurrido entre la fabricación del material de la primera banda y el final de la compactación de la banda adyacente extendida después no ha de ser superior a 2 horas. Por ello se limita la longitud de las bandas de trabajo a 100 m. Esta longitud puede ampliarse si se comprueba que la ejecución se realiza correctamente y la temperatura ambiente no supera los 30°C.

Las paradas se deben realizar en secciones transversales completas, en las que se haya finalizado la compactación de todas las bandas.

Siempre que aparezcan segregaciones, nidos de áridos o cualquier otra heterogeneidad o defecto, deberán detenerse los trabajos hasta eliminar la causa que provoque el defecto.

Control de calidad

En las Recomendaciones de Castilla y León se destaca la importancia que el control de calidad tiene en la adecuada ejecución de esta unidad de obra, indicándose una serie de directrices que deben seguirse y que se resumen a continuación.

El suelo debe ser homogéneo en todas sus características, realizándose la disgregación, premezclado o incluso sustitución del mismo en caso necesario. La homogeneidad se comprobará determinando las características prescritas (granulometría, plasticidad, materia orgánica y sulfatos) sobre un total de 1 muestra cada 2.000 m². Salvo autorización expresa del Director de las Obras no se admitirán variaciones de los resultados obtenidos superiores al 20% del valor medio obtenido.

Además deben controlarse los siguientes aspectos:

- la granulometría y la humedad del material a la salida de la cámara de mezclado de la estabilizadora, realizándose además un ensayo Proctor Modificado al inicio de la obra y otro cada 5.000 m³ de material o semana de trabajo, a fin de evaluar la densidad máxima y la humedad óptima de la fórmula de trabajo.
- la dosificación de cemento y la homogeneidad de su dotación (comprobación del correcto funcionamiento y reparto de los inyectores visualmente 2 veces al día).

- la densidad obtenida (un punto cada 500 m²), que no debe ser inferior al 98 % de la máxima obtenida en el ensayo Proctor modificado, y la humedad de compactación. Para ello se debe disponer de equipos de control rápidos, tipo sonda nuclear durante toda la obra (incluso permanentemente durante la realización del tramo de prueba y los primeros días de trabajo). Al inicio de la obra se debe establecer un plan de compactación y comprobar varias veces a lo largo de los trabajos que resulta adecuado. Se debe controlar además periódicamente que el número de pasadas de cada rodillo es el indicado.
- el espesor de la capa, mediante la apertura de calicatas (al menos una cada 8.000 m²), que además sirven para comprobar la homogeneidad de la granulometría, la humedad y el color del suelo. Independientemente del sistema de fabricación del suelocemento posteriormente hay que comprobar los espesores y la homogeneidad mediante la extracción de testigos (1 cada 2.000 m²).
- la resistencia a compresión a 7 días, sobre un total de dos series de 3 probetas confeccionadas cada día (mañana y tarde), con la densidad media obtenida en obra. Es conveniente fabricar también algunas probetas para romper a 90 días a título informativo.
- la regularidad de la superficie acabada, que no deberá rebasar la teórica en ningún punto, ni diferir de ella en más de 15 mm en el caso de tratarse de una base, ni de 20 mm en una subbase. Además se comprobará que la superficie acabada no presenta irregularidades cuando se pase la regla de 3 m superiores a 8 mm en el caso de una base, ni a 12 mm en el caso de una subbase. Estos valores podrán aumentarse respectivamente a 20 y 30 mm (12 y 22 mm comprobados con la regla de 3 m), en tramos de velocidad máxima no superior a 60 km/h.
- las deflexiones a partir de los 15 días, debiendo obtenerse valores inferiores a 100 (10⁻²mm) sobre el suelocemento o a 75 (10⁻²mm) si se miden sobre la primera capa extendida de mezcla bituminosa. En caso contrario, se debe reconstruir el suelocemento (salvo que se pueda compensar con un sobreespesor de mezcla bituminosa).



Fotos 13 y 14. Suelos muy finos, sin estructura granular, no aconsejables para realizar suelocemento



Fotos 15 y 16. Control de espesores, humedad y densidad

ASPECTOS A CUIDAR EN LA EJECUCIÓN IN SITU

Como en todas las capas de materiales tratados con cemento, hay que asegurar que el material de partida cumple con las prescripciones y que determinadas operaciones se realizan adecuadamente para lograr unos resultados satisfactorios. Entre estas últimas pueden destacarse las siguientes:

- 1º. mezclar de manera homogénea, con la dotación de conglomerante y la humedad necesarias,
- 2º. compactar adecuadamente para obtener la densidad y resistencia prescritas,
- 3º. curar de forma correcta y, aunque no sea una operación específica del suelocemento en sí, asegurar una buena adherencia con la capa superior de mezcla bituminosa.

Si estas precauciones se respetan no debería surgir en principio ningún problema. No obstante en una serie de obras se han producido ciertos errores al realizar un suelocemento in situ. Estos fallos, que en algunas ocasiones se han detectado durante la construcción, pudiendo corregirse a tiempo, en otras solamente se han observado al disponer encima una capa de mezcla bituminosa. Es probable que en estos casos el paso directo de los camiones de aglomerado sobre la capa de suelocemento haya contribuido a poner de manifiesto los problemas de la misma. No obstante, el número de casos fallidos ha sido muy reducido frente al de obras bien realizadas.

La falta de cumplimiento de alguna de las prescripciones, como las incluidas en las Recomendaciones de la Junta de Castilla y León, se traduce prácticamente en todos los casos en la aparición defectos. A continuación se describen algunos de los problemas más frecuentes.

- Empleo de suelos de características no aptas para fabricar suelocemento.** En alguna ocasión se han utilizado suelos muy plásticos, con índices de plasticidad del orden de 15 a 18 y límites líquidos muy superiores a 30, o bien suelos con terrones de partículas plásticas muy difíciles de disgregar. Este defecto es difícil de detectar en obra si no se realiza el control adecuado, puesto que los equipos modernos de ejecución tienen capacidad suficiente para mezclar el suelo con la lechada de cemento sin que en la realidad los resultados que se obtienen, y en particular las resistencias mecánicas, sean mínimamente aceptables. El problema es que si no se controla la calidad del suelo (que se puede apreciar visualmente cuando se extrae, transporta y extiende pero puede resultar difícil de comprobar cuando ya está extendido en la traza), los errores se detectan solamente por la caída de resistencias al romper las probetas, es decir, cuando ya ha transcurrido más de una semana y se han realizado varios kilómetros. En algunas ocasiones, si no existe una comunicación fluida entre el laboratorio de control de calidad y la dirección de las obras, puede pasar demasiado tiempo hasta que se modifica el sistema constructivo o se cambia el suelo, lo que supone que puede estar construida una parte importante de la obra, dado el elevado rendimiento de los equipos.



Foto 17. Probeta de suelocemento con terrones de partículas plásticas no disgregadas

Este problema es difícil que suceda si se cumplen las prescripciones en cuanto a homogeneidad indicadas anteriormente al hablar de control de calidad, de forma que no se obtengan variaciones de los resultados superiores al 20% del valor medio.

Es decir, si se declara en los ensayos previos o durante la obra que el valor medio del índice de plasticidad (IP) es, por ejemplo, 8, el contenido de materia orgánica (MO) 0,3 y hay ausencia de sulfatos, en las muestras de suelo que se analicen cada 2.000 m² el IP solo podrá variar entre 6,4 y 9,6, la MO entre 0,2 y 0,4 y no podrá tener sulfatos. Lo mismo ocurre con la granulometría (porcentajes retenidos en los distintos tamices), respecto a la inicialmente declarada.



Foto 18. La dosificadora de lechada se hunde en un suelo arenoso

A esta exigencia se suma otra de gran importancia que debe cumplirse en todas las obras: la obligatoriedad de disgregar y premezclar (y por supuesto ensayar) el suelo en acopio antes de extenderlo en la traza. De no hacerse así, el suelo que se extiende en obra puede tener variaciones muy importantes en sus características. En algún caso, la extracción de suelos mucho más plásticos del fondo de los préstamos, junto con el empleo de suelos procedentes de préstamos diferentes sin realizar los controles necesarios ha dado lugar a fracasos de gran importancia, que probablemente hubiera sido más difícil que se produjeran con una fabricación en planta, en donde es necesario el acopio previo de los suelos.

No obstante hay suelos que no permiten la realización in situ del suelocemento. Este es el caso de las arenas limpias de granulometría uniforme, prácticamente sin finos, en las que, independientemente de las dificultades para compactarlas que pueden hacer inviable su utilización incluso aunque se fabrique el suelocemento en planta, no permiten el paso de los equipos de ejecución in situ por encima de ellas. Conviene mencionar a este respecto que la estabilizadora tiene que empujar la dosificadora de lechada, que estando a carga completa puede pesar 65 t. Lo mismo sucede con algunos otros suelos en los que el equipo de dosificación se puede hundir en el suelo sin compactar y no avanzar, mientras que en el caso de fabricación en planta, la extendedora puede trabajar sin problemas porque rueda sobre la capa de apoyo del suelocemento ya compactada.

- **Ensayos previos no representativos.** Tanto si el suelocemento se ejecuta in situ como si se fabrica en central, el estudio de dosificación debe realizarse sobre muestras representativas del suelo. De nada sirve determinar una dosificación concreta de un suelocemento para obtener la resistencia a compresión prescrita de 2,5 MPa a 7 días, realizando incluso estudios de sensibilidad a las variaciones de humedad o a la densidad obtenida si dichas muestras son muy diferentes al suelo colocado en la obra, o se producen variaciones importantes en los préstamos de donde se obtienen los suelos.
- **Problemas de dosificación.** Si no se realiza un mantenimiento cuidadoso de los equipos, puede producirse la obstrucción de alguno de los difusores. En este caso, aunque el equipo dosificador siga enviando la lechada con la misma dotación de cemento, esta se distribuye entre el resto de los difusores, pero la franja regada por el obstruido quedará sin conglomerante o con una dotación mínima. En estas franjas de escasa o nula resistencia mecánica, las cargas de tráfico o las variaciones de temperatura pueden dar lugar a la aparición de fisuras longitudinales.

Los problemas debidos a la falta de dosificación de conglomerante o una baja dotación son muy difíciles de controlar en la ejecución in situ. Únicamente se pueden obtener valores instantáneos de consumos en el ordenador del equipo dosificador de lechada (poco fiables si no se realizan contrastes periódicos), o bien valores medios dividiendo las toneladas descargadas por cada cuba de cemento por la superficie trabajada, los cuales deben corresponderse con la dotación media. Pero este valor medio no da una indicación de la homogeneidad de la distribución del conglomerante, por lo que no hay que descartar que puedan aparecer fallos en las zonas más débiles, aun habiendo otras colindantes de mayor resistencia. Es decir, sólo es posible comprobar que el contenido de cemento no es inferior al especificado, pero no como se ha distribuido.

Por todo ello, y considerando el sobrecoste y los problemas que generan las reparaciones posteriores, siempre es conveniente ser generoso en la dotación de conglomerante del suelocemento, especialmente en el caso de realizaciones in situ, y comprobar frecuentemente el estado de los inyectores de lechada en la estabilizadora.



Fotos 19 y 20. Fisuras aparecidas por fallo de algún inyector y calicata de comprobación



Fotos 21 y 22. Fisuras aparecidas por falta de solape en la construcción

- **Suelocemento con un contenido insuficiente de conglomerante.** Se trata del caso más extremo de problemas en la dosificación. Las reacciones de fraguado y de endurecimiento del cemento convierten el material suelto en otro dotado de resistencia mecánica y una capacidad de soporte mucho mayor. Para ello es evidente que hay que añadir al suelo el porcentaje adecuado de cemento. Este problema de falta de conglomerante se ve agravado si además el suelo contiene muchos finos y estos son plásticos las resistencias obtenidas pueden ser muy pequeñas. La combinación de ambos factores (suelo de mala calidad y escasa dotación de cemento) ha dado lugar a que, en algún caso, el suelocemento pudiese ser excavado manualmente incluso después de haber transcurrido varios meses.
- **Humedad del suelo.** Para fabricar el suelocemento in situ con unas ciertas garantías de calidad es necesario el empleo de equipos modernos de última generación que incorporan el cemento al suelo en forma de lechada. Este método, que se conoce como vía húmeda, es más preciso que el de dosificación en polvo.

En la fabricación de la lechada se requiere utilizar como mínimo dos puntos porcentuales de agua con dosificaciones bajas de cemento, valor que se incrementa hasta el 2,5 – 3,0% con dotaciones mayores de cemento. Dicho agua se incorpora al suelo, por lo que la humedad del mismo deberá estar como máximo dos puntos por debajo de la humedad óptima obtenida en el ensayo Próctor modificado, puesto que, en caso contrario, se incrementaría excesivamente la humedad, haciendo inviable la compactación. La reducción de densidades obtenidas se traduce en un descenso considerable de las resistencias.

Por eso, si el suelo tiene una humedad próxima a la óptima Próctor modificado o superior, deberá orearse y secarse previamente, porque de lo contrario no se podrá fabricar el suelocemento in situ con unas garantías mínimas de calidad.

- **Problemas de ejecución.** Como en todas las unidades de obra, la buena construcción de esta capa depende de la profesionalidad y el buen hacer del personal constructor, pero algunos aspectos, que se comentan a continuación, son más difíciles de controlar que cuando el suelocemento se fabrica en central.
- **Falta de espesor.** Aunque se pueden abrir calicatas detrás del equipo y referirlas a la calle colindante para estimar tanto la profundidad del tratamiento como su homogeneidad, no es viable realizarlas constantemente (aunque inmediatamente después se tapen y se compacten). De alguna manera se depende de la confianza en los equipos que realizan el mezclado, normalmente subcontratado, y en el personal que los maneja.
- **Solapes entre calles de ejecución.** En algunas obras, por un falso sentido de la economía, se han ajustado excesivamente los anchos de los solapes, de forma que ha quedado material suelto sin tratar entre dos calles contiguas. Ello se ha traducido posteriormente en la aparición de fisuras longitudinales en las capas de mezcla bituminosa, separadas aproximadamente 2,50 m.
- **Nivelación.** Al no existir precompactación en el extendido, si la nivelación depende de la pericia del conductor de la motoniveladora, normalmente resultará peor que la obtenida con extendedora. El apoyo de una buena topografía con suficiente número de puntos de referencia o el empleo de motoniveladora dotada de equipos auxiliares de nivelación, como por ejemplo el 3D, ayuda a resolver este problema. Se trata de asegurar la obtención de la rasante sin depender de la habilidad del maquinista y evitando que la cuchilla de la motoniveladora mueva constantemente el material de un lado para otro con el fin de regularizar la capa, reduciendo el espesor en algunos puntos y provocando segregaciones y nidos de gruesos en la superficie. Normalmente, con las referencias topográficas precisas, no resulta complicado obtener una rasante cumpliendo con las tolerancias especificadas, la cual se mejora además de forma considerable con las capas bituminosas dispuestas encima.



Foto 23. Nivelación de un suelocemento con equipo dotado de 3D

- Problemas con la prefisuración.** Para evitar la reflexión de las fisuras de retracción del suelocemento en las capas superiores de mezcla bituminosa, es usual recurrir a la técnica de prefisuración en fresco cuando la categoría de tráfico pesado es superior a la T31 y/o en el caso de clima continental. Los equipos de prefisuración suelen estar diseñados para cortar con rapidez o bien todo el ancho de la capa o bien al menos media calzada (unos 4 ó 5 m), mientras que los equipos de fabricación de suelocemento in situ están diseñados para trabajar en calles de 2,5 m (para permitir su transporte sin medidas especiales). Por ello, la coordinación de estos equipos de prefisuración con los de ejecución de suelocemento in situ es compleja, porque o bien se van prefisurando calles de 2,5 m, para lo que se requieren muchas operaciones que pueden reducir el rendimiento del conjunto, o bien se recurre a extender dos calles de suelocemento (4,70 m incluyendo el solape) y se prefisuran después ambas a la vez. En este último caso hay que asegurar un plazo de trabajabilidad del suelocemento que permita nivelar y compactar la calle puesta en obra en primer lugar, teniendo en cuenta que estas operaciones no podrán iniciarse en la misma hasta que no se haya mezclado el suelocemento de la calle colindante (la prefisuración en fresco se lleva a cabo antes de compactar el material) .



Foto 24. Equipo prefisurando un suelocemento realizado in situ

En ambos casos los equipos de prefisuración suelen reducir el rendimiento de la unidad. Ello obliga a asegurar un plazo amplio de trabajabilidad del material para permitir compactar, refinar con la motoniveladora y terminar la compactación, sin que se hayan empezado a formarse todavía enlaces entre las partículas que puedan verse dañados por estas operaciones.

- Excesivo ritmo de ejecución.** Muchas de estas obras son realizadas por subcontratistas (hay más de 60 equipos en España y un gran número de empresas especializadas en estas unidades de obra), que reciben un precio ajustado y normalmente están interesados en una ejecución lo más rápida posible. Hay que evitar que ello se pueda traducir en deficiencias importantes que conduzcan a fracasos. Entre las que se producen en ocasiones están el insuficiente espesor o profundidad del tratamiento para obtener mayores rendimientos, una velocidad de avance excesiva de la estabilizadora que no permita obtener un mezclado correcto, la incorporación de una menor cantidad de cemento, pues aunque este se abone a parte, cuanto más elevada es la dotación menor es el rendimiento y mayor el número de paradas para cargar el equipo de fabricación de la lechada (que puede traducirse en 2,5–3 horas sin trabajar) o el empleo del mismo personal durante más de 10 horas seguidas.

Las restantes precauciones son similares a los del suelocemento fabricado en planta y propios de cualquier material tratado con cemento, como por ejemplo la necesidad de comprobar periódicamente los valores obtenidos en el ensayo Proctor (densidad y humedad), el curado correcto para permitir un buen fraguado y endurecimiento del material, la necesidad de una correcta limpieza antes de extender la emulsión de adherencia o el asegurar una correcta unión del suelocemento con la capa superior de mezcla bituminosa.

En cualquier caso, al igual que en el suelocemento fabricado en planta o cualquier otro material tratado con cemento, se recuerdan los siguientes aspectos:

- La importancia de una adecuada compactación que permita obtener la densidad exigida, puesto que de dicha densidad depende la resistencia y la durabilidad de la capa.
- La necesidad de realizar un buen control de la humedad que permita aproximarse a la humedad óptima del ensayo Proctor modificado, por su influencia en la posibilidad de conseguir las densidades necesarias.



Foto 25. Equipos de suelocemento in situ en un ensanche

De todos los problemas comentados, cabe pues destacar los siguientes puntos principales a cuidar en la ejecución in situ:

- La calidad del suelo a emplear, debiéndose acopiar y homogenizar previamente todo el suelo y realizar ensayos previos que resulten representativos, entre los que se incluyan ensayos de sensibilidad a los cambios de humedad y de densidad con diferentes porcentajes de cemento.
- La dotación, que ha de superar de forma generosa a la mínima estrictamente necesaria.
- El espesor de la capa, que una vez tratada debe ser como mínimo el proyectado, para lo que es imprescindible una buena nivelación del suelo antes del tratamiento. Además se debe profundizar algunos centímetros en la capa inferior para asegurar una buena conexión entre ambas capas y no dejar material sin tratar.
- La idoneidad del subcontratista o contratista que ejecuten el suelocemento.



Foto 26. Detalle de la terminación del suelocemento realizado in situ correctamente

La Dirección General de Carreteras e Infraestructuras de la Junta de Castilla y León publicó la Instrucción CE-2/2006 sobre prescripciones para el empleo de suelocemento in situ, en la que se indican las condiciones a cumplir por el contratista para permitir este tipo de unidad.

CONCLUSIONES

El suelocemento in situ es una técnica altamente sostenible que permite el empleo de los suelos locales para realizar una capa de firme sin necesidad de instalar una planta de fabricación. Los errores aparecidos en algunos casos son fácilmente evitables como se demuestra con el gran volumen de obras realizadas correctamente. Por otra parte, los tramos defectuosos de suelocemento in situ se han reparado con la misma técnica, lo que demuestra la validez de la misma cuando se ejecuta adecuadamente.

La economía de fabricación del suelocemento in situ nunca debe traducirse en una reducción de los parámetros de calidad. La homogeneidad del suelo colocado, junto a una ejecución cuidadosa y un control de calidad correcto, son aspectos imprescindibles para asegurar el éxito.

Las ventajas de la realización in situ han promovido la aplicación de esta técnica en todo tipo de carreteras, desde vías de baja intensidad de tráfico hasta autovías. Cada vez son más las obras en las que a nivel de proyecto modificado o incluso en el diseño original se permite el suelocemento fabricado in situ con equipos de reciclado o estabilización. El hecho de que en las normativas de algunas comunidades autónomas se contemple ya esta posibilidad se traducirá sin duda en un empleo todavía mayor de la misma, siempre teniendo en cuenta que para obtener resultados satisfactorios es necesario respetar escrupulosamente las prescripciones técnicas.

REFERENCIAS

- Manual de firmes con capas tratadas con cemento. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) e Instituto Español del Cemento y sus aplicaciones (IECA). Madrid, 2003.
- Norma 6.1-IC, Secciones de Firme y Capas Estructurales de Firmes, Orden FOM/3460/2003 de 28 de noviembre. Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento. Madrid, 2003.
- Pliego de Prescripciones Técnicas Generales PG-3, artículo 513 “Materiales tratados con cemento (suelocemento y gravacemento)”. Orden FOM/891/04. Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento. Madrid, 2004.
- Recomendaciones de proyecto y construcción de firmes y pavimentos. Dirección General de Carreteras e Infraestructuras. Consejería de Fomento, Junta de Castilla y León. Valladolid, 2004.
- Jofré, C y Díaz Minguela, J. Soilcement subbases: mix in place vs. mix in plant. 2º Simposio Internacional de Estabilización de Explanadas y Reciclado de Firmes, TREMTI. Paris, 2005.
- Guía de soluciones para obras de estabilización de suelos, ejecución de suelocemento in situ y reciclado de firmes. ANTER, 2010.

Se puede acceder al **Manual de firmes con capas tratadas con cemento** editado por **IECA**, a través de la sección de esta misma página web “**Publicaciones**”, en donde se informa de las condiciones para ello.

