

# Estabilización de suelos con cemento en obras ferroviarias





## Introducción

La estabilización de suelos es una técnica cuyo fin es modificar las características de los mismos mediante la incorporación de un conglomerante (normalmente cal y/o cemento) para permitir su aprovechamiento. Los objetivos directos que se obtienen suelen ser:

- Permitir el aprovechamiento de los suelos existentes en las obras de deficiente calidad, evitando su extracción y transporte a vertedero, así como la aportación de otros diferentes, que en ocasiones pueden hallarse a distancias importantes.
- Obtener una plataforma de apoyo estable para las capas de forma, subbalasto y balasto, colaborando estructuralmente con ellas de manera que se reduzcan las tensiones transmitidas a las capas del terraplén que se encuentren por debajo.
- Reducir los asentamientos que se producen en los terraplenes, lo cual puede suponer un ahorro considerable en el mantenimiento de las líneas de ferrocarril.
- Reducir la sensibilidad al agua de los suelos, y con ello aumentar su resistencia a la erosión, a la helada, y a otros agentes climáticos, además de mejorar la impermeabilidad de las capas.
- Permitir la circulación por los caminos de acceso con terrenos intransitables.

Esta técnica, ampliamente extendida en el ámbito de las carreteras, ofrece enormes posibilidades en el campo ferroviario, pudiendo emplearse tanto en las distintas partes de los terraplenes (cimiento, núcleo y capas de coronación),



Estabilizado de la cimentación de una estructura en la línea Madrid-Valladolid

como en las capas situadas por encima de la plataforma (capa de forma y subbalasto), en cuyo caso se le debe exigir al material cierta resistencia. Además, puede emplearse en puntos singulares como la cimentación de las estructuras o en los bloques técnicos.

## Contribución a la sostenibilidad

La estabilización de suelos es una técnica ampliamente ligada al concepto de sostenibilidad en la construcción de terraplenes y capas superiores de infraestructuras sometidas a cualquier tipo de tráfico (ferrocarriles, carreteras, puertos y aeropuertos, caminos de servicio, etc.).

El aprovechamiento de los suelos existentes en las obras mediante su estabilización, evita la reducción de los recursos naturales disponibles al disminuir el empleo de suelos de mejor calidad. Además, se suprimen las operaciones de extracción de los suelos existentes y su transporte a vertedero, así como las de los suelos que los sustituyen.

Por tanto, se trata de una técnica enfocada claramente a lograr una mayor sostenibilidad, a cuyas ventajas medioambientales, se suman importantes beneficios técnicos, económicos y sociales.

## Ventajas medioambientales

- El empleo de suelos de la traza evita explotar nuevos yacimientos y disminuye la necesidad de vertederos.
- La eliminación del transporte de los suelos, tanto al vertedero, como del préstamo a la obra, disminuye las emisiones de CO<sub>2</sub> y otros contaminantes y reduce el daño que generan los vertidos de combustibles y aceites, así como los impactos colaterales (polvo, erosiones y otros) que dicho transporte provocaría sobre los caminos y flora adyacentes.
- Se trata de una técnica especialmente adaptada al empleo de cementos con alto contenido de adiciones. Esto se traduce en una disminución de las emisiones durante su fabricación, al reducir la cantidad de clinker 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.
- Es una técnica en frío que consume poca energía. Se disminuyen con ello notablemente la contaminación y las emisiones de vapores nocivos.

## Ventajas técnicas

- Permite el empleo de los suelos de la traza, mejorando sus características y rigidez hasta el grado deseado. Con una mayor dotación de conglomerante se pueden obtener capas más rígidas que permitan una adecuada transición entre los elementos más rígidos, como los puentes o los túneles, y los más flexibles como los terraplenes.
- Proporciona una elevada capacidad de soporte a la plataforma, disminuyendo las tensiones en las capas de forma y subbalasto, así como en las capas inferiores del terraplén, lo que se traduce en un incremento de la vida de servicio de la infraestructura ferroviaria.
- Reduce el coste de mantenimiento de las líneas al disminuir los asentamientos en los terraplenes. Además asegura la estabilidad de los suelos, tanto por la reducción de su sensibilidad al agua y a la helada, como por el incremento de su resistencia a la erosión.
- Mejora la impermeabilidad de la capa tratada, obteniendo una mayor estabilidad en el tiempo (durabilidad) y un mejor comportamiento frente al agua, protegiendo las capas inferiores.
- Permite reponer líneas existentes reduciendo o manteniendo la cota de la rasante, al presentar soluciones con capas de menor espesor que las tradicionales, lo que supone una ventaja interesante por la existencia de la catenaria.
- Permite realizar los caminos de servicio con los suelos de la traza, sin la necesidad de disponer por encima una capa de rodadura (salvo si circulan vehículos pesados).
- Puede permitir en ciertos casos el paso inmediato del tráfico de obra en los caminos de acceso.
- Se disminuyen las molestias por el tráfico de obra y los daños a la red de carreteras adyacentes debido a que se evita transportar los suelos a vertedero y aportar otros nuevos.

## Ventajas económicas

- El empleo de los suelos locales y la eliminación del transporte suponen una reducción importante de costes.
- Permite un importante ahorro en el volumen total de áridos a emplear en las capas de forma y subbalasto. Además, se pueden reducir los espesores de las capas

utilizadas y con ello el coste total de las mismas, dado el incremento de rigidez que se puede lograr con los suelos tratados con cemento.

- Es posible reducir los asentamientos que se producen en los terraplenes, lo que supone un ahorro considerable en el mantenimiento de las líneas de ferrocarril.
- Permite economizar en la construcción de los caminos de servicio, al ser estos tratamientos más baratos que la solución tradicional a base de zahorra artificial, sobre todo en conservación.
- Se reducen los plazos de ejecución dado que la estabilización se realiza con equipos de alto rendimiento.
- Las ventajas técnicas y ambientales citadas también se traducen en beneficios económicos.

## Ámbito de aplicación

La mayor parte de los suelos son susceptibles de poder ser estabilizados con cemento, obteniendo las ventajas antes mencionadas. No obstante, salvo que los ensayos de laboratorio digan lo contrario o salvo cuidados especiales, no se deben estabilizar con cemento suelos que tengan contenidos elevados de sulfatos solubles (por encima del 1% se puede formar ettringita muy expansiva) o de materia orgánica (puede inhibir el endurecimiento de la mezcla, aunque se puede resolver con altos contenidos de cemento).

En principio, todos los demás suelos pueden estabilizarse con cemento, aunque las altas dotaciones de conglomerante que se precisan cuando el contenido de finos plásticos es muy elevado, así como las mayores dificultades de mezclado, aconsejan restringir los tratamientos con cemento a los suelos con un índice de plasticidad no superior a 15 y un cernido ponderal por el tamiz UNE 2 mm superior al 20% y por el tamiz 0,063 mm inferior al 35%. En otros casos, puede resultar preciso realizar una estabilización mixta, primero con cal y posteriormente con cemento.

## Tipología

Los suelos estabilizados se pueden clasificar en dos tipos diferentes:

- **Suelos mejorados** (S-EST 1 y S-EST 2 en la nomenclatura empleada en carreteras), en los que puede emplearse cemento o cal, y en los que con un pequeño porcentaje

de conglomerante se mejoran algunas propiedades del suelo (como por ejemplo la susceptibilidad a los cambios de humedad). El contenido mínimo de conglomerante es el 2% para asegurar cierta homogeneidad en el mezclado. Después del tratamiento, suelen seguir constituyendo un material suelto. Su empleo es adecuado para todas las capas del terraplén (zona de saneo, cimient, núcleo y coronación), espaldones, rellenos de fondos de desmonte, cubrición de túneles artificiales, trasdoses de muros y rellenos en general.

- **Suelos estabilizados con cemento** (S-EST 3 en la denominación de carreteras) al que se le exige una resistencia mínima a compresión de 1,5 MPa a los 7 días según norma UNE-EN 13286-41 sobre probeta de diámetro 15 cm x 18 cm longitud, confeccionada según UNE EN 13286-50 o UNE-EN 13286-51, y que por tanto tiene cierta rigidez. El módulo elástico puede variar, en función del contenido de cemento, desde unos 1.000 MPa hasta unos 4.000 MPa. Estos suelos son aptos para su empleo en capas de coronación de terraplén para la formación de la plataforma, para la capa de forma e incluso para sustituir al subbalasto.



Estabilización de jabres y bolos que rellenan los huecos entre macizos de granito en Cáceres

resultados ante una reducida aportación de cemento, no se debe a priori eliminar otros tipos, pues se dan casos de suelos de elevada plasticidad cuyo comportamiento resulta mejor al ser mezclados con cemento que con cal (por la presencia, por ejemplo, de carbonatos).

Con suelos muy finos y arcillosos suele resultar más adecuado realizar un tratamiento mixto cal-cemento: la aplicación de la cal logra reducir la plasticidad y consigue agrupar los finos en granos de mayor diámetro sobre los que sí puede actuar el cemento, lográndose obtener una resistencia apreciable.

Análogamente, se puede emplear este doble tratamiento en suelos muy húmedos, donde la cal actúa secando. En la estabilización mixta, antes de la aplicación del cemento, conviene dejar un periodo de actuación de la cal de al menos 5 ó 6 horas (plazo que se debe definir en los ensayos previos). En los suelos estabilizados con cemento, el tipo de conglomerante tiene una importancia menor en comparación con la dotación del mismo o la densidad mínima alcanzada en la compactación. Aunque es posible utilizar la gran mayoría de los cementos comercializados en España, los cementos más recomendables para estabilizar suelos son aquellos con alto contenido de adiciones activas como pueden ser los tipos ESP VI-1, CEM V, CEM IV, CEM III o CEM II-B. Se trata de cementos con inicio y final de fraguado suficientemente largos (mayor plazo de trabajabilidad), moderado calor de hidratación (limitada fisuración por retracción) y desarrollo inicial de resistencias lento, que se recuperan o mejoran a largo plazo. Con ello se limita el efecto de la retracción.

En general deben procurarse emplearse cementos de resistencia media o baja (clase 32,5 N o 22,5 en el caso de cementos ESP), reservando las categorías superiores para situaciones especiales como la ejecución en tiempo frío.

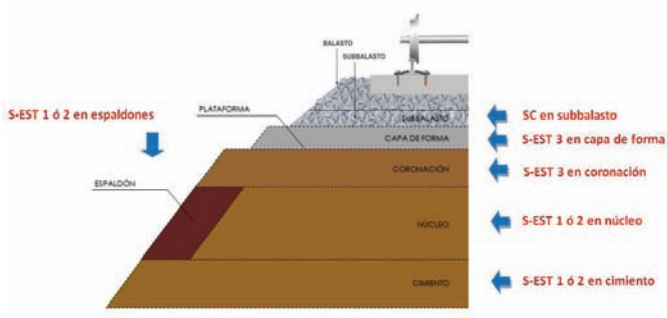


Figura 1. Aplicaciones de los suelos estabilizados en la estructura ferroviaria

## Efecto del conglomerante. Cementos más adecuados

El cemento, mezclado íntimamente con el suelo, desarrolla una red de enlaces durante las reacciones de hidratación que proporcionan a la mezcla una buena capacidad de soporte e impermeabilidad, logrando incluso, con la dotación adecuada, una cierta resistencia mecánica a corto plazo. Todo ello mejora tanto su durabilidad, entendiendo por tal la resistencia a los agentes físicos y químicos agresivos, como su estabilidad dimensional.

La gama de suelos que se pueden estabilizar con cemento es muy amplia. Aunque son los suelos granulares los que presentan una mejor y más rápida mejora de

Si la capa estabilizada se tiene que disponer sobre terrenos yesíferos o que contengan sulfatos, es conveniente aislarla y, en cualquier caso, utilizar cementos resistentes a los sulfatos (siempre que el contenido en  $SO_3 > 0,5\%$ ).

En los suelos estabilizados con cemento, las dotaciones de cemento varían ampliamente según las características finales y el módulo elástico que se quieran obtener y el tipo de suelo que se utilice. Como se ha comentado, para evitar elevados contenidos de conglomerante, se suele restringir la estabilización con cemento a los suelos que cumplen las siguientes condiciones:

- Índice de plasticidad  $IP < 15$
- Límite líquido  $LL < 40$
- Pase por el tamiz UNE 2 mm  $< 20\%$
- Pase por el tamiz UNE 0,063 mm  $< 35\%$  (50 % en los suelos mejorados)

### Normativa

En el Pliego General de Prescripciones Técnicas Tipo para los proyectos de plataformas (PGP-2011) se clasifican los suelos en “aptos, especiales y no utilizables”, dentro del artículo

G-0104, Rellenos, del capítulo III.1, Obras de tierra. Los suelos clasificados como aptos son los de buena calidad geotécnica y, por tanto, pueden ser usados en la construcción del núcleo del terraplén sin ningún requisito adicional, aunque sus características mejoran considerablemente al estabilizarlos. Las características exigibles a los suelos para ser clasificados como aptos son las que se recogen en la Tabla 1.

Por su parte, los suelos especiales son aquellos que, no cumpliendo alguna de las limitaciones anteriores, cumplen las incluidas en la Tabla 2, requieren un estudio previo más exhaustivo y se deben emplear encapsulados (bajo ciertas condiciones) o tratados con cal (artículo G-0112 tratamientos in situ de suelos con cal). Se debe estudiar detenidamente la posibilidad del estabilizado con cemento.

En determinadas ocasiones y según las características del suelo, puede ser necesaria la estabilización con cemento, como es el caso de un “Suelo Apto” cuyo CBR no alcance el valor de 5 para el núcleo del terraplén o el valor de 10 para la coronación. También puede ser recomendable la estabilización mixta de las capas del núcleo de terraplén, primero con cal y luego con cemento, a fin de modificar las características de los suelos y dotarlos de cierta capacidad de soporte, aumentando su CBR e impermeabilidad de manera que se minimicen los asentamientos del terraplén, lo que

Tabla 1. Condiciones que deben cumplir los materiales clasificados como “suelos aptos”

Parámetro	Número mínimo de ensayos	Valor de referencia	Valor extremo (no excedido en ningún ensayo)	% ensayos con valores entre referencia y extremo
Granulometría (UNE 103-101 y UNE 103-102)	8	---	---	---
Límites de Atterberg (UNE 103-103 y UNE 103-104)	8	Zona A (figura 2)	Zona B (figura 2)	< 15%
Contenido en materia orgánica (UNE 103-204)	8	M.O. $\leq 1\%$ sin materia vegetal	2%	< 15%
Contenido en Sulfatos (UNE 103-201)	8	$SO_3 \leq 2,5\%$ $SO_3 \leq 1\%$ para estabilizar	3,5%	< 15%
Contenido en sales solubles, distintas del yeso (NLT 114/96)	8	Sales solubles $\leq 1\%$	1,5%	< 15%
Índice CBR para 95% densidad PM (UNE 103-502)	8	$CBR_{95\% PM} \geq 5$	4	< 15%
Hinchamiento libre en suelos con >15% finos (UNE 103-601)	8	$H_{libre, PM} \leq 2\%$	2,5%	< 15%
Colapso de suelos en suelos con >15% finos (NLT 254/96)	8	Colapso $\leq 1\%$	1,5%	< 15%

Tabla 2. Condiciones que deben cumplir los materiales clasificados como “suelos especiales”

Parámetro	Número mínimo de ensayos	Valor de referencia	Valor extremo (no excedido en ningún ensayo)	% ensayos con valores entre referencia y extremo
Granulometría (UNE 103-101 y UNE 103-102)	8	---	---	---
Límites de Atterberg (UNE 103-103 y UNE 103-104)	8	Zona B (figura 3)	Zona C (figura 3)	< 15%
Contenido en materia orgánica (UNE 103-204)	8	M.O. ≤ 4%	5%	< 15%
Contenido en Sulfatos (UNE 103-201)	8	SO <sub>3</sub> ≤ 10 % SO <sub>3</sub> ≤ 1 % para estabilizar	12%	< 15%
Contenido en sales solubles, distintas del yeso (NLT 114/96)	8	Sales solubles ≤ 2%	3%	< 15%
Índice CBR para 95% ensidad PM (UNE 103-502)	8	CBR ≥ 3	2,5	< 15%
Hinchamiento libre en suelos con >15% finos (UNE 103-601)	8	H <sub>libre 98% PN</sub> ≤ 2%	2,5%	< 15%
Colapso de suelos en suelos con >15% finos (NLT 254/96)	8	Colapso <sub>95% PN</sub> ≤ 1%	2,5%	< 15%

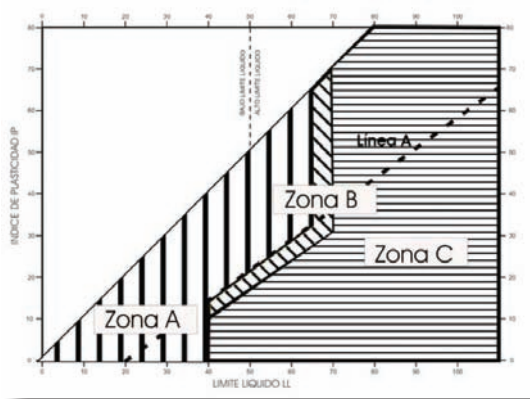


Figura 2. Gráfico de Casagrande con indicación de los valores de referencia y extremo para “suelo apto”

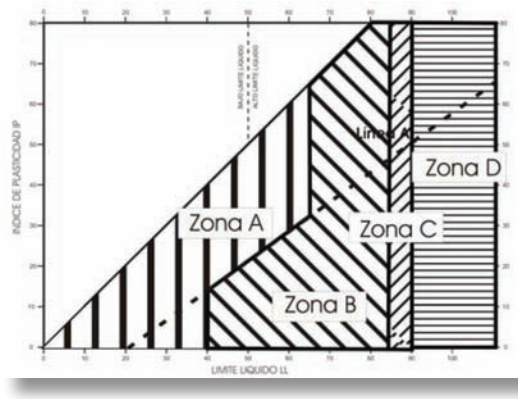


Figura 3. Gráfico de Casagrande con indicación de los valores para “suelo especial”

redundará en unos costes de mantenimiento de la obra mucho menores.

El espesor de las capas estabilizadas suele ser de 25 ó 30 cm. En algunos casos se han construido capas estabilizadas de 35 y 40 cm, pero se requiere el empleo de equipos de elevada potencia y una ejecución muy cuidadosa, a fin de asegurar que se consiguen las densidades especificadas, sobre todo en el fondo de capa.

El empleo de capas tratadas con cemento en sustitución de las capas de forma y subbalasto, abre la posibilidad de obtener importantes reducciones en el espesor de dichas capas con respecto a las dimensionadas con suelos sin tratar.

Además, proporciona un apoyo más estable, dejando una estructura de mayor capacidad resistente, que reduzca las tensiones verticales sobre la plataforma, y de mayor resistencia transversal, tanto en la vía cargada (lo cual permite

Balasto	30 cm	Balasto	30 cm
Subbalasto	30 cm	Capa tratada con cemento (suelocemento)	25 cm
Capa de forma	40 cm	Suelo estabilizado con cemento	20 cm
<b>Suelo</b>		<b>Suelo</b>	
<b>Estructura convencional</b>		<b>Estructura propuesta</b>	

Figura 4. Comparación estructura clásica - estructura nueva construida en Meirama

mejores prestaciones en la explotación ferroviaria), como en la vía descargada (mejorando la estabilidad de la vía sin Juntas frente a los esfuerzos de origen térmico, permitiendo una mejor adaptación a las singularidades del trazado).

Como es bien sabido, para la determinación de los espesores de las capas de asiento resulta fundamental la capacidad portante de la plataforma y las tensiones que a ella le llegan al paso de las cargas dinámicas del tráfico ferroviario, de tal manera que uno de los objetivos finales de un correcto dimensionamiento de la superestructura ferroviaria es obtener unas tensiones verticales en la cara superior de la plataforma que resulten claramente inferiores a su capacidad portante. Se trata, sin duda, y entre otros objetivos, de minimizar las tareas de mantenimiento de la vía, disminuyendo los costes y los perjuicios técnicos y mecánicos que tales trabajos conllevan.

Al igual que en cualquier tipo de proyecto, hay que tener en cuenta el tráfico ferroviario previsto para el futuro y las tensiones que va a generar, de manera que si se prevé que en algún momento se puedan superar a las admisibles, se debería intervenir para reducir dichas tensiones, mediante la modificación necesaria de la estructura de asiento de la vía, mediante el aumento de la capacidad portante de la plataforma o mediante ambas acciones a la vez.

En el caso del ferrocarril de Alta Velocidad existen aún diversas incertidumbres en lo relativo a las acciones dinámicas, al comportamiento a fatiga de unos materiales que van a estar más solicitados de lo habitual y en lo referente a la resistencia lateral de la vía, al mantenimiento de las características mecánicas obtenidas en la construcción de la estructura de la misma.

Así se plantean y estudian continuamente soluciones alternativas a las tradicionales, que confieren mayor

fiabilidad y estabilidad a la circulación ferroviaria de altas prestaciones.

En este contexto se propone una nueva estructura alternativa a la habitual, fruto del empleo de un suelo estabilizado con cemento (con una resistencia a compresión a 7 días  $R_{c7d} \geq 1,5$  MPa) como capa de coronación de terraplén y de un suelocemento como capa de subbalasto (construido in situ mediante la misma técnica que el estabilizado, pero con mayor dotación de conglomerante para obtener una resistencia a compresión a 7 días  $R_{c7d} \geq 2,5$  MPa), en los que las características exigidas al suelo son mucho más permisivas. Construido en el año 2011 en un ramal del Eje Atlántico de alta velocidad, en las inmediaciones de la estación ferroviaria de Cerceda-Meirama, sobre un jabre proveniente de los desechos de la mina Lignitos de Meirama contaminados con el de las balsas de vertido del petróleo recogido del Prestige, los requisitos exigidos al suelo se reflejan en la Tabla 3.

En cuanto a la permeabilidad de esta capa, se comprobó que su valor es inferior al del subbalasto, obteniéndose resultados de 5,8 a  $6,6 \times 10^{-9}$  m/s.

## Etapas de una estabilización con cemento

La estabilización de un suelo para obtener una capa de calidad requiere realizar previamente los estudios de laboratorio oportunos para cada caso en particular. Las características del suelo (tipo, clasificación, grado de humedad, u otros) y la maquinaria disponible (actualmente hay en España un elevado número de equipos de última generación) son dos parámetros básicos que definen la forma de estabilizar y la cantidad de conglomerante más apropiada para conseguir las óptimas condiciones técnicas y económicas.



Tabla 3. Condiciones de los materiales empleados en la estructura nueva en Meirama

Parámetro	Suelocemento	Suelo estabilizado con cemento
Granulometría: • Tamaño máximo • Pase 2 mm • Pase 0,063 mm	• 50 mm • 20-55% • 2-20%	• 80 mm
Límites de Atterberg	LL < 30 IP < 10 (resultó no plástico)	LL < 40 IP < 15 (resultó no plástico)
Contenido en materia orgánica	< 1% (el suelo tenía 0,02%)	< 1% (el suelo tenía 0,02%)
Contenido en sulfatos	$SO_3 \leq 1\%$ (tenía 0,12% sales solubles y 0,3% de sulfatos totales)	$SO_3 \leq 1\%$ (tenía 0,12% sales solubles y 0,3% de sulfatos totales)
Contenido de cemento CEM IV/B 32,5N	4 y 5 % (dos tramos)	3 y 3,5 % (dos tramos)
Densidad - Humedad Proctor Modificado	$D_{m\acute{a}x} = 1,99$ $H_{o\acute{o}pt} = 11,6\%$	$D_{m\acute{a}x} = 1,98$ $H_{o\acute{o}pt} = 11,6\%$
Densidad - Humedad Obra	$D_{m\acute{a}x} = 1,87-1,96$ $H_{o\acute{o}pt} = 11,3-15,2\%$	$D_{m\acute{a}x} = 1,8-1,94$ $H_{o\acute{o}pt} = 14-17\%$
Resultados placa de carga $E_{v1} / E_{v2}$	355 a 642 / 613 a 1.038	127 a 190 / 245 a 482
Resistencia a compresión a 7 días (probeta Ø15x18 cm)	$\geq 2,5$ MPa obra=2,1y2,14MPa (2 tramos)	$\geq 1,5$ MPa obra= 1,3 y 2 MPa (2 tramos)

Así, se pueden diferenciar las siguientes fases en una estabilización que se describen a continuación.

### Etapas previas a la ejecución

- **Clasificación del suelo.** El primer paso, consiste en realizar los ensayos previos para caracterizar correctamente el suelo. Para ello, se toman muestras suficientemente representativas del suelo y se llevan a cabo los ensayos de identificación. En el Pliego General de Prescripciones Técnicas Tipo para los proyectos de plataformas PGP-2011 se incluyen los ensayos a realizar y el número mínimo.
- **Elección y dosificación del conglomerante.** De acuerdo con las características del suelo se selecciona el tipo de

conglomerante más apropiado. En la Figura 5 se incluye un gráfico orientativo sobre cuando resulta más adecuado usar cal o cemento (en gris) o las zonas de interferencia (en blanco) en función de la plasticidad y el contenido en finos del suelo. No se debe descartar nunca, la estabilización mixta con cal y cemento, bien porque el suelo tenga mucha humedad y requiera previamente un secado, o bien porque contenga finos muy plásticos sobre los que no se consigue obtener resistencias con la acción del cemento.

Con un 1-1,5% de cal se reduce la plasticidad, aumentando la humedad óptima de compactación y disminuyendo la densidad máxima del suelo, y tras un período de maduración, con un 2-3% de cemento se pueden lograr capas de forma de excelente calidad.

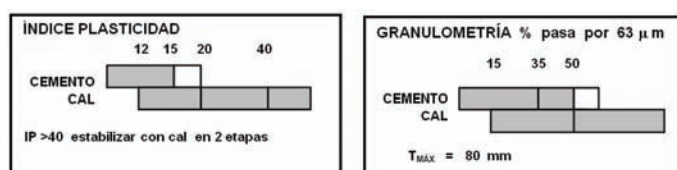


Figura 5. Gráfico simplificado para determinar el conglomerante

- **Ensayos previos.** Definido el conglomerante, se realizan los ensayos de dosificación necesarios para conocer la cantidad del mismo a aportar. Para ello se realiza para cada contenido de cemento (o para un porcentaje medio) el ensayo Proctor Modificado siguiendo la norma UNE- EN 13286-2 y se determina la humedad óptima y la densidad máxima de compactación.



Dosificadora de lechada



Perspectiva del suelo estabilizado

Con dichos valores se confeccionan probetas y se obtiene el valor del índice CBR o la resistencia a 7 días (según se prescriba). La fórmula de trabajo debe indicar al menos:

- La granulometría del suelo, la plasticidad y las demás características definidas anteriormente para el suelo.
- La humedad óptima del material en el momento del mezclado.
- La densidad a obtener.
- El tipo y dotación de cemento a utilizar. Dada la variabilidad de las características de los suelos que pueden encontrarse en la traza, es aconsejable para asegurar una homogeneización correcta que la dotación de cemento no sea inferior al 3% a fin de asegurar la obtención de las cualidades perseguidas a lo largo de la obra y evitar problemas posteriores, en general muy costosos de solucionar. La dosificación óptima de cemento se determina ensayando varias series de probetas con distintas dotaciones de cemento. Dichas probetas se fabrican con la humedad óptima y la densidad mínima exigidas. Se debe adoptar un cierto margen de seguridad para tener en cuenta la variabilidad de la obra.

- El plazo de trabajabilidad del suelo estabilizado, determinado según la norma UNE-EN 13286-45 a la temperatura máxima prevista en obra.

### Etapas de la ejecución

La estabilización de un suelo puede realizarse in situ o en central. Este último proceso es similar al de otras unidades de obra como el suelocemento, pero es poco frecuente.

Las operaciones a realizar en la estabilización in situ son en general las siguientes:

- **Preparación del suelo al menos en tres aspectos básicos:** granulometría (escarificado, disgregación y retirada de gruesos), humedad (humectación o secado) y nivelación.
- **Distribución del conglomerante:** según como se realice, se diferencia entre estabilizado por vía seca (el cemento se extiende en polvo sobre la superficie de la capa a



Equipo estabilizando la capa de forma



Refino para nivelar el suelo estabilizado



Compactación final



Equipo de control de la densidad



Compactación junto a arquetas



Locomotora de carga en las pruebas de auscultación en Meirama

estabilizar) o por vía húmeda (se incorpora como lechada al suelo dentro de la estabilizadora).

- **Mezclado:** un adecuado proceso de mezclado, con la humedad apropiada para asegurar una buena homogeneidad del suelo estabilizado en todo el espesor requerido, es muy importante para lograr un aprovechamiento óptimo de esta unidad.
- **Compactación inicial:** tras el mezclado se realizan varios ciclos de compactación con el rodillo vibrando a su máxima amplitud para compactar bien el fondo de la capa.
- **Refino o nivelación:** posteriormente se lleva a cabo un refino con la motoniveladora para obtener la rasante.
- **Compactación final:** se realiza con un rodillo liso, que a veces se combina con un rodillo de neumáticos para cerrar la superficie, hasta obtener como mínimo la densidad especificada.
- **Curado y/o protección superficial:** El curado se puede realizar manteniendo la superficie húmeda



Tramo de conexión con el ramal estabilizado en Meirama

mediante un riego con agua pulverizada, o bien extendiendo una emulsión bituminosa de rotura rápida y baja viscosidad con una dotación mayor de 300 gr/m<sup>2</sup> de betún residual.

De acuerdo con los equipos disponibles, algunas de las operaciones anteriores pueden agruparse o realizarse

Tabla 4. Etapas de la estabilización

ETAPAS	OBJETIVO	EQUIPOS USUALES
<b>Etapas previas a la ejecución:</b>		
1. Clasificación del suelo	Identificación de la naturaleza y características del suelo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ensayos de laboratorio (granulometría, plasticidad, humedad, materia orgánica, etc).</li> </ul>
2. Elección y estudio de dosificación del conglomerante	Definición del conglomerante y ensayos para definir la dosificación.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estudio de laboratorio (Proctor, CBR, resistencia).</li> </ul>
<b>Etapas durante la ejecución</b>		
1. Preparación del suelo		
<ul style="list-style-type: none"> <li>Escarificado y disgregación</li> </ul>	Disgregar el suelo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pala, bulldozer o motoniveladora con ripper</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Eliminación de gruesos</li> </ul>	Suprimir elementos de tamaño superior a 80 mm	<ul style="list-style-type: none"> <li>Equipos mecánicos o agrícolas</li> <li>Machacadora in situ</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Nivelación</li> </ul>	Obtención de la rasante	<ul style="list-style-type: none"> <li>Motoniveladora</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Aireación o humectación</li> </ul>	Conseguir la humedad óptima Proctor (incluyendo la de aportación en el caso de la vía húmeda)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aireación: ripper o estabilizadora</li> <li>Humectación: distribuidor de lechada, en su ausencia, camión cisterna con barra regadora</li> </ul>
2. Distribución del conglomerante:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>por vía seca</li> <li>por vía húmeda</li> </ul>	Aporte del conglomerante con la dotación requerida de acuerdo con la fórmula de trabajo y el espesor a tratar	<ul style="list-style-type: none"> <li>Distribuidor de conglomerante (en polvo o lechada)</li> </ul>
3. Mezclado		
	Mezcla del suelo con el conglomerante y el agua, logrando una mezcla homogénea	<ul style="list-style-type: none"> <li>Recicladora-estabilizadora</li> <li>Pulvimixer o rotavator (en obras de reducido tamaño o importancia)</li> </ul>
4. Compactación inicial		
	Obtención de la densidad en el fondo de la capa, precompactando el suelo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rodillo liso vibrante</li> </ul>
5. Refino		
	Obtención de la rasante definitiva. Mejora de la regularidad superficial	<ul style="list-style-type: none"> <li>Motoniveladora</li> </ul>
6. Compactación final		
	Obtención de la densidad requerida ( $\geq 97-98\%$ de la máxima Proctor modificado)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rodillo liso vibrante + rodillo de neumáticos en ocasiones</li> <li>Rodillo mixto</li> </ul>
7. Riego de curado		
<ul style="list-style-type: none"> <li>Con agua</li> </ul>	Mantener la superficie húmeda	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cuba de agua con barra pulverizadora</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Con emulsión</li> </ul>	Crear una película impermeable	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cuba de emulsión con barra regadora</li> </ul>

conjuntamente. Los equipos usualmente empleados y el objetivo de cada etapa se resume en la Tabla 4.

que se pueden emplear para reducir estos problemas cuando se extiende a temperaturas superiores a 35 °C son:

- empleo de cementos con alto contenido en adiciones (Tipo IV, V o ESP VI) y resistencia 32,5 N, que tienen un menor calor de hidratación, lo que se traduce en una fisuración más reducida.
- empleo de un retardador de fraguado para incrementar el plazo de trabajabilidad, que en estos casos disminuye.
- pulverización de agua durante la compactación.
- extensión del riego de curado inmediatamente.

## Precauciones durante la ejecución

### Ejecución en época calurosa

En épocas calurosas, las altas temperaturas pueden dar lugar a una desecación del material que altera desfavorablemente las relaciones de hidratación del cemento. Algunas de las medidas

## Ejecución en época fría

No se debe extender el material cuando la temperatura ambiente descienda por debajo de 5°C y exista fundado temor de heladas, ya que la ganancia de resistencia es muy débil y prácticamente inexistente por debajo de dicha temperatura. En caso de que la temperatura tienda a aumentar, se puede fijar este límite en 2°C.

En este caso se deberán emplear cementos con un contenido reducido de adiciones (tipo II, e incluso tipo I con ciertas precauciones) y categoría resistente 42,5 N y obtener altas resistencias.

## Ejecución en tiempo lluvioso

En caso de lluvia la ejecución de la estabilización debe suspenderse, tanto por la gran dificultad para compactar el material al incrementarse considerablemente la humedad por encima de la óptima, como por el peligro de que se produzca un lavado de la superficie. No obstante, se puede trabajar cuando haya una lluvia fina y ligera, que tienda a desaparecer.

## Ejecución con viento fuerte

En caso de dosificarse el cemento en polvo, no se debe extender cuando haya viento fuerte (velocidad por encima de 35 km/h). Incluso si el cemento se incorpora como lechada y aunque se esté en un ambiente marítimo con un alto porcentaje de humedad, hay que tener en cuenta que la capacidad del viento para desecar rápidamente la superficie del material es muy alta, por lo que se deberán tomar las precauciones adecuadas.

## Realizaciones en España

Los casos de modificación del suelo para conseguir estructuras resistentes, estables y duraderas se remontan a las civilizaciones más primitivas. En España, el origen de las estabilizaciones, en el concepto moderno de la mejora in situ de un suelo mediante la incorporación de cemento o cal con maquinaria adecuada, puede establecerse en el amplio programa de afirmado de caminos del Instituto Nacional de Colonización (posteriormente IRYDA) en el año 1963.

En el campo de las carreteras, esta tecnología está normalizada y se emplea de forma continuada desde hace varias décadas en todas las aplicaciones: autovías, carreteras locales, urbanizaciones, viales, etc.



Estabilización de la capa de forma.  
Olmedo (Valladolid)

La aplicación de las estabilizaciones en la estructura ferroviaria es más reciente, aunque se espera un gran impulso por las ventajas que conlleva. Entre las actuaciones más destacadas realizadas con cemento, cabe citar:

- **Eje Atlántico de alta velocidad.** Tramo Cerceda-Meirama, ramal de acceso a Sogama. Estabilización del suelo existente en 20 cm sustituyendo a los 40 cm de la capa de forma y sustitución de los 30 cm de subbalasto por 25 cm de suelocemento realizado in situ con los mismos equipos (es un suelo estabilizado con mayor dotación de cemento).
- **Tramo Madrid - Valladolid.** Estabilización de los bloques técnicos de las estructuras en Valdestillas.
- **Tramo Zaragoza - Lérida.** Estabilización de una capa de 30 cm en la plataforma para obtener cierta capacidad después de pasar el invierno.
- **Estación de AVE en Segovia.** Estabilización de la plataforma de los arcnos.



Estabilización de plataformas de los arcnos en la  
estación del AVE de Segovia



Estabilización de la plataforma en línea Zaragoza-Lérida

- **Cáceres.** Extracción de los jabres y bolos que rellenan los huecos existentes entre macizos de granito, mezclados y estabilizados con cemento con un buldócer (no se podía emplear estabilizadora por la gran cantidad de bolos) y relleno de nuevo en una superficie de 200.000 m<sup>2</sup>.
- **Acceso Ferroviario a la Terminal del Prat (Puerto Barcelona).** Estabilizado con cemento por vía húmeda de 3.100 m<sup>2</sup> en un espesor de 40 cm.
- **Terminal de contenedores de la Estación La Negrilla en Sevilla.** Estabilizado con cemento por vía seca de 64.000 m<sup>2</sup>, en un espesor de 30 cm.
- **Caminos de enlace para supresión de paso a nivel en Pedroso de la Armuña (Salamanca).** Estabilizado con cemento por vía seca de 20.000 m<sup>2</sup> en un espesor de 25 cm.
- **Pasos superiores en la vía férrea de Ávila.** Estabilizado con cemento por vía seca de 20.000 m<sup>2</sup> en un espesor de 20 cm.
- **Ave L'Arboç en Tarragona,** donde se realizó la estabilizado con cemento por vía seca.

A estas se suman otro conjunto de estabilizaciones o mejoras del suelo realizadas con cal, como son el tratamiento de la capa de forma, secado y estabilización de la plataforma en Olmedo y en Valdestillas (tramo Madrid - Valladolid) con superficies superiores a 300.000 m<sup>2</sup> en varios tramos, la estabilización de la capa de forma en Sahagún de Campos (Palencia - León), en la plataforma de la misma estación de Perpiñan o un gran número de caminos de acceso, como se realizó en Peñaranda de Bracamonte (aplicación de cal viva).

## Conclusiones

La estabilización de suelos con cemento es una técnica moderna, económica y sostenible que permite mejorar las características de los suelos de la traza y su aprovechamiento.

Esta técnica es posible utilizarla tanto en los núcleos de los terraplenes como en las capas de coronación de los mismos, así como en las capas de forma y subbalasto, exigiendo en este caso resistencias propias de un suelocemento.

El empleo de suelos estabilizados en la plataforma y en las capas superiores de la superestructura, permite minimizar los asentamientos de los terraplenes a lo largo de la vida útil de la obra, aumentando la impermeabilidad de las capas y con ello su durabilidad, lo cual se traduce en unos menores costes de mantenimiento.

Dicha técnica permite además variar el módulo de elasticidad de la capa, logrando una mejor transición en los diferentes elementos y reduciendo las variaciones fuertes de rigidez del conjunto, sobre todo a la salida de los túneles y viaductos.

Es fundamental la incorporación de esta técnica de estabilización de suelos con cemento a la normativa ferroviaria vigente, ya que el gran número de equipos de última generación disponibles y la gran experiencia acumulada en el ámbito de las carreteras, avala una solución ampliamente contrastada por sus ventajas técnicas, económicas y medioambientales.

## Referencias

- Pliego General de Prescripciones Técnicas Tipo para los proyectos de plataformas (PGP-2011), artículo G-0104 sobre "Rellenos" y G-0112 "Tratamientos in situ de suelos con cal". ADIF
- Querada Laviña, José y Díaz Minguela, Jesús. Aplicación de capas tratadas con cemento en la superestructura ferroviaria. Propuesta de alternativa de infraestructura de la vía. Determinación de la carga dinámica y tensiones de la plataforma del tramo de ensayo en Meirama. Octubre de 2011.
- Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes PG-3, artículo 512: "Suelos estabilizados in situ". O.C. 10/2002, de 30 de septiembre. Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento.
- Manual de estabilización de suelos con cemento o cal. ANCADE, ANTER, IECA. Madrid, 2008.
- Jornada sobre "Estabilización de terrenos con cal", organizada por ADIF y CEDEX. Madrid, 30 de noviembre de 2012.





Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones

C/ José Abascal, 53 - 1º

28003 Madrid

T.: +34 91 442 93 11

[tecnologia@ieca.es](mailto:tecnologia@ieca.es)

[www.ieca.es](http://www.ieca.es)