



TRATAMIENTOS Y ESTABILIZACIONES DE SUELOS. ESTADO DEL ARTE

Autores/Ponente

Ángel Sampedro Rodríguez

Consultor

Profesor Coordinador de Ingeniería de Carreteras
E.P.S. de la Universidad Alfonso X El Sabio

Miguel López-Bachiller Fernández

Presidente de la Asociación Nacional Técnica de Estabilizados de suelos y
Reciclado de firmes (ANTER)

Diego Parejo Vadillo

Vicepresidente de la Asociación Nacional Técnica de Estabilizados de
suelos y Reciclado de firmes (ANTER)

José Luis Armayor Cachero

Consultor

Three vertical decorative images are positioned on the left side of the page. The top image shows a close-up of a textured, orange-brown surface, possibly a wall or a piece of machinery. The middle image is a blue-tinted photograph of a road curving into the distance. The bottom image shows a close-up of a textured, orange-brown surface, similar to the top one, but with more vertical lines and patterns.

RESUMEN

La presente comunicación analiza y expone el estado del arte de las técnicas de tratamientos y estabilizaciones de suelos con cal y cemento en España.

En la construcción de carreteras y cualquier otra que requiera grandes explanaciones, es fundamental minimizar y compensar al máximo posible el movimiento de tierras y materiales debido a consideraciones de tipo económico, ambiental y técnico. Las técnicas de estabilización de suelos contribuyen de forma clara a la competitividad y sostenibilidad de la ingeniería de firmes de carreteras.

En nuestra actividad se hace necesaria, no sólo la utilización de todos los materiales que se encuentran directamente en la traza de las propias obras, sean cuales sean sus propiedades sino, además, la reutilización de los distintos tipos de residuos que, encontrándose en zonas próximas a las obras, sean susceptibles de ser empleados. Ello nos obliga a un estudio detallado de sus propiedades para así adoptar los tratamientos y medidas necesarios con el objetivo de lograr que su comportamiento sea satisfactorio y fiable durante la vida útil de la obra, y por supuesto, a un coste razonable.

Desde el punto de vista medioambiental, la estabilización de materiales con cal y cemento permite el **empleo de residuos** (urbanos, industriales, RCDs, etc.) en la construcción de carreteras, pudiéndolos utilizar, incluso, en capas de firmes, lo cual implica su valorización y potencia el papel de la carretera como sumidero de residuos. Hay ejemplos de estas realizaciones que se presentarán en la presente comunicación.

Otro aspecto medioambiental muy interesante es la posibilidad de reutilizar suelos contaminados en la construcción de carreteras. La estabilización de suelos permite su **descontaminación por inertización** de los agentes contaminantes y su posterior reutilización en ellas.



Uno de los tipos de estabilizaciones de suelos que está experimentando un mayor desarrollo en España son las **estabilizaciones mixtas** cal-cemento en las que se optimiza el empleo de ambos tipos de conglomerantes. Ante materiales con leves plasticidades o excesivamente húmedos, su tratamiento previo con pequeños porcentajes de cal permite un mejor rendimiento de su posterior estabilización con cemento.

En la presente comunicación los autores pretenden exponer las experiencias, sobre todo en los temas de ejecución, obtenidas en los últimos ejemplos de obras de estabilizaciones de suelos más representativas de cada tipo de aplicación.

Las prestaciones de los materiales correctamente estabilizados son muy superiores a las de los suelos naturales. En la presente comunicación se presentarán, por último, algunos ejemplos de obras en las que se han realizado análisis comparativos de las secciones alternativas mediante programas de cálculo analítico. Los resultados han sido sorprendentes y, además, han podido ser confirmados por los controles de producto terminado (placas de carga).

Palabras Clave: estabilización, tratamiento, mejora, cal, cemento.

Three vertical decorative images are positioned on the left side of the page. The top and bottom images are orange-toned and show architectural details, possibly stone carvings or reliefs. The middle image is blue-toned and shows a close-up of a curved, reflective surface, possibly a car's headlight or a polished metal part.

1. INTRODUCCIÓN

En la construcción de obras lineales y cualquier otra que requiera grandes explanaciones, es fundamental minimizar y compensar al máximo posible el movimiento de tierras y materiales debido a consideraciones de tipo económico, ambiental y técnico.

Además, las condiciones de competitividad y el entrono exigen la continua mejora de los procesos constructivos en cuestiones de coste, plazo y calidad. La reducción al mínimo de los préstamos y vertederos necesarios es el factor determinante en esta optimización.

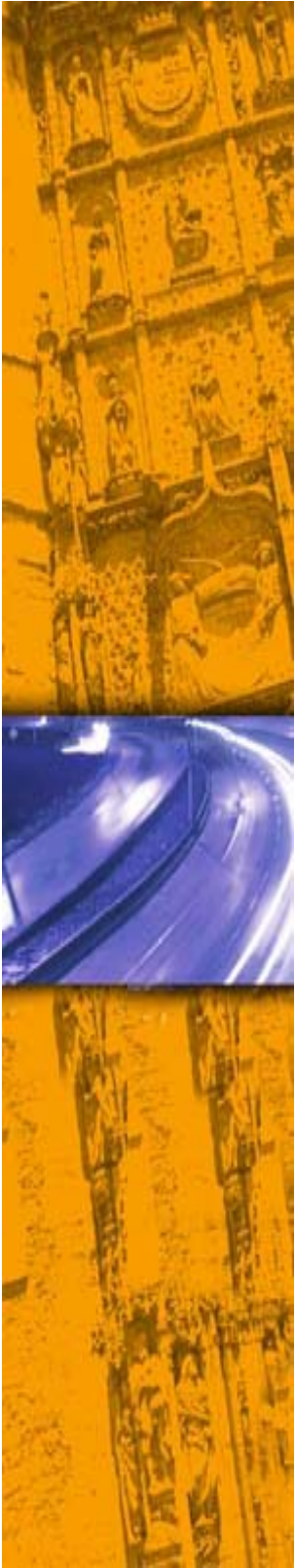
Por lo tanto, se hace cada vez más necesaria la utilización de todos los materiales que se encuentran directamente en la traza de las propias obras, sean cuales sean sus propiedades.

Ello nos obliga a un estudio detallado de sus propiedades para así adoptar los tratamientos y medidas necesarios con el objetivo de lograr que su comportamiento sea satisfactorio y fiable durante la vida útil de la obra, y por supuesto, a un coste razonable.

Los tratamientos y estabilización de suelos son una solución muy interesante desde los puntos de vista económico, ambiental y técnico, citados anteriormente.

En general, a partir de las experiencias tan satisfactorias obtenidas en las estabilizaciones con cal o cemento aplicadas en la construcción de explanadas en carreteras, se ha extendido su práctica a cualquier tipo de explanaciones con

suelos con problemas geotécnicos y baja capacidad de soporte.

Three vertical images are stacked on the left side of the page. The top image shows a close-up of a textured, orange-toned surface. The middle image shows a blue, curved surface, possibly a road or a pipe. The bottom image shows a close-up of a textured, orange-toned surface, similar to the top one.

Por otro lado, desde el punto de vista medioambiental, la estabilización de materiales permite el empleo de **residuos** (urbanos, industriales, RCDs, etc.) en la construcción de carreteras, pudiéndolos emplear, incluso, en capas de firmes, lo cual implica su valorización y potencia el papel de la carretera como sumidero de residuos.

Los tratamientos de suelos más novedosos que se están aplicando en España actualmente son:

- **Secado** e, incluso, **descongelación**, de cualquier tipo de suelo con cal viva en condiciones climatológicas adversas, permitiendo seguir con los trabajos y concluir las obras en plazo.
- **Tratamientos de todo el terraplén**, construido a base de capas o tongadas de suelos estabilizados con cal o cemento.
- **Tratamientos de zonas de vertederos**, con gran heterogeneidad de suelos, sobre los que se puede, de esta manera, construir instalaciones deportivas y de ocio.
- **Estabilizaciones mixtas cal – cemento** en las que se optimiza el empleo de ambos tipos de conglomerantes. Ante materiales con leves plasticidades o excesivamente húmedos, su tratamiento previo con pequeños porcentajes de cal permite un mejor rendimiento de su posterior estabilización con cemento.
- **Reutilización de residuos** de todo tipo, empleándolos como materiales en todo tipo de explanaciones y capas de firmes.

- **Tratamientos de lodos** para mejorar sus condiciones de manipulación y posterior reutilización en capas de plataformas.
- **Tratamientos de mejora del terreno** mediante la aplicación de técnicas diversas: columnas de suelocemento, inyecciones de lechada de cal, etc.
- **Descontaminación de suelos por inertización** que permiten su tratamiento e, incluso, reutilización.

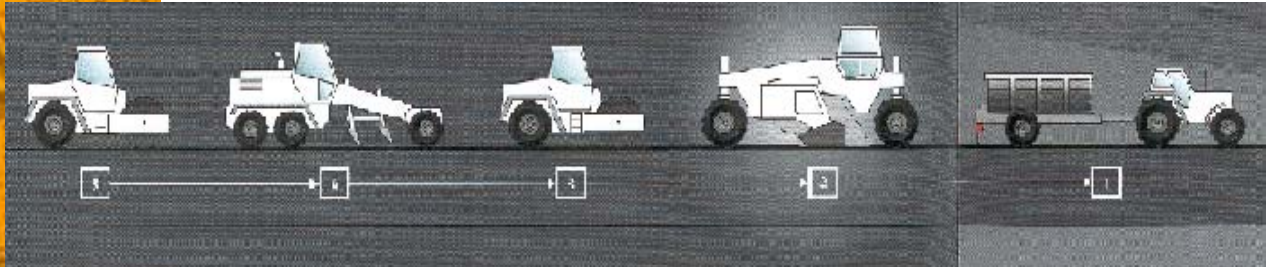
Los conglomerantes usados son cal (viva o apagada) y cemento, pudiendo emplearse, además, otros agentes estabilizadores y aditivos. No obstante, la normativa española sólo contempla el empleo de cualquiera de los dos primeros.

2. EJECUCIÓN DE LAS ESTABILIZACIONES

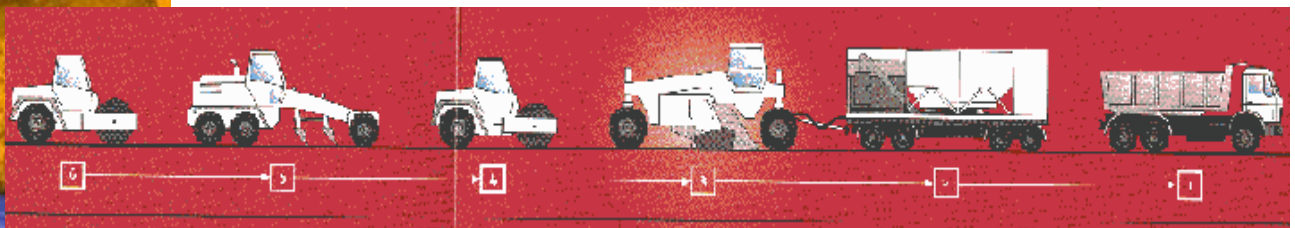
La estabilización de suelos puede ejecutarse de dos formas diferentes:

- Mezcla in situ (Vía seca / húmeda).
- Mezcla en central o planta móvil.

Ejecución in situ por vía seca:




Ejecución in situ por vía húmeda:



El **mezclado en planta** está indicado en el caso de tratamiento con cemento para capas de base de firmes, aunque, en determinados casos, puede ser sustituido por el mezclado in situ.

Un sistema que se podría denominar **mezclado ex situ** es el de realizar el mezclado con estabilizador de suelos en zonas o explanaciones exteriores a la traza. La mezcla suelo-conglomerante se realiza en explanaciones próximas a los préstamos de terreno, o en zonas próximas a la traza. Se extiende el suelo en tongadas y se realiza su mezcla con el conglomerante *in situ*, con la metodología convencional.

Estas tongadas de material estabilizado se recogen, bien para apilar en montones, o bien para transportarlo y colocarlo sobre la traza. Esta metodología está especialmente indicada para tratar



suelos procedentes de préstamos, residuos, y en zonas de la traza de difícil ejecución: cuñas de transición a obras de fábrica, etc.

El sistema de **mezclado in situ** está siendo el más utilizado en España para tratamientos y estabilizaciones de capas de explanada y resto de tratamientos. La maquinaria disponible actualmente para la estabilización de suelos permite obtener resultados excelentes con esta técnica. Su calidad en cuanto a la finura, dosificaciones y homogeneidad del mezclado puede llegar a ser excelente.

La estabilización in situ se realiza siguiendo las siguientes fases:

2.1 Preparación del suelo y almacenamiento del conglomerante

La preparación de los suelos consiste en una serie de operaciones previas cuya ejecución es necesaria, y muy importante, para mejorar los rendimientos del tratamiento propiamente dicho:

- Escarificación y esponjamiento de los suelos para mejorar los rendimientos del mezclado. Se realiza con riper montado en motoniveladora o tractor de orugas, o bien mediante escarificadores de gradas o de discos. Este aspecto es determinante para lograr la profundidad y homogeneidad de mezclado requerida.



- En el caso de que los suelos sean de aportación, se deberán extender en capas conforme al espesor de trabajo prefijado.
- Aireación de los suelos, en el caso de que sea necesario.
- Humectación de los suelos en el caso de suelos demasiado secos mediante los sistemas de riego tradicionales. Este aspecto es muy importante ya que sobre un suelo esponjado y humedecido, la cal, según cae, se quedará adherida, evitando el riesgo de venteo, y comenzará a actuar inmediatamente sobre el suelo, incluso, antes de empezar la mezcla. En el caso de utilizar equipos pulvimezcladores, puede inyectarse el agua directamente en el proceso de mezclado, dentro de la cámara.
- Eliminación de grandes terrones, frecuentes en algunos tipos de suelos, mediante riper, rastrillos o desterronadores. De esta forma se favorece la homogeneidad del mezclado y se evitan numerosas averías y desgaste de piezas en los mezcladores.

El suministro y almacenamiento del conglomerante debe hacerse teniendo en cuenta los criterios de accesibilidad, distancias, espacio necesario, seguridad y ritmo de producción de la obra.

2.2 Extendido del conglomerante

Adición y extensión de la cantidad, calculada previamente mediante los estudios de laboratorio pertinentes, del conglomerante en forma de polvo (vía seca) o de lechada (vía húmeda). Para ello, se utilizarán los equipos que garanticen la precisión requerida.

El extendido de la cal o cemento en polvo a granel, debe realizarse, por razones de precisión, seguridad y comodidad, mediante cualquiera de las tipologías de máquinas de extendido que actualmente existen en el mercado.

Estos equipos consisten en camiones-silo o tanques remolcados con tolvas acopladas en la parte posterior con compuertas y dispositivos de extracción regulables.

Es conveniente que el dispositivo de descarga estará protegido con faldones cuya parte inferior se aproxime al suelo, con el objeto de evitar que el viento afecte al extendido mientras se descarga el conglomerante sobre el suelo.

En el caso de que el extendido se realice por vía seca, deberán coordinarse adecuadamente los avances del equipo de dosificación del conglomerante y del de mezcla, siendo conveniente que ambos funcionen uno a continuación del otro, de tal forma que el polvo permanezca el mínimo tiempo posible sobre el suelo sin mezclarse.

En el caso de **la vía húmeda**, pueden emplearse equipos móviles de fabricación de lechada que van por delante, empujados por el estabilizador de suelos. Este es el tipo de máquinas empleadas actualmente en España (Wirtgen).



2.3 Mezclado

Esta es la fase más específica e importante de esta técnica. Consiste en el mezclado del conglomerado y el suelo en todo el espesor de la capa mediante las pasadas necesarias para lograr su homogeneidad. Para ello se pueden utilizar equipos estabilizadores de suelos, pulvimezcladores, etc., que aseguren la eficacia necesaria.

Esta fase consiste en mezclar el conglomerante con el material a estabilizar con la suficiente disgregación y homogeneidad necesarias. La eficacia exigida dependerá, fundamentalmente, de dos factores: de los objetivos buscados con el tratamiento y del tipo de capa tratada (firme, coronación, terraplén, camino, etc.).

Para la estabilización de capas de infraestructuras civiles, cuyas especificaciones son muy exigentes por razones obvias de calidad, la maquinaria específica para realizar el mezclado son los **"estabilizadores de suelos"**, o equipos pulvimezcladores de eje horizontal. Estos equipos también se usan habitualmente en el reciclado de firmes.

Con esta maquinaria puede realizarse una mezcla homogénea en profundidades de hasta 50 cm., mediante una sola pasada, alcanzando grandes rendimientos (hasta 10.000 – 12.000 m²/día).

No obstante, no hay que dejarse llevar demasiado por este concepto de espesor máximo de mezclado. Hay que tener en cuenta que el espesor máximo de capa vendrá dado, generalmente, por la capacidad de compactación.




Y además, no siempre implica un mejor rendimiento total el hecho de trabajar con el mayor espesor de capa posible, pues en el caso de trabajar con suelos plásticos, excesivamente húmedos, el hecho de tener que mezclar una tongada de demasiado espesor, dificulta el mezclado y avance de la máquina.

2.4 Compactación y terminación

A continuación se realizará la compactación mecánica y humectación, en caso de ser necesaria, hasta conseguir las densidades exigidas, nivelación y curado de la capa mezclada mediante las técnicas convencionales de movimiento de tierras.



Foto 1: Trabajos de nivelación tras la estabilización de la capa (SOLTEC).

A vertical strip on the left side of the page contains three distinct images. The top image shows a close-up of a yellow construction machine, likely a motor grader, with its blade lowered. The middle image is a blurred, high-speed shot of a road curving into the distance. The bottom image shows a close-up of a yellow construction machine's tracks or wheels on a dirt surface.

La compactación de las capas tratadas se realiza tras su nivelación con motoniveladora como en cualquier explanación. La explanada compactada deberá recibir una protección superficial dependiendo de su naturaleza y de la climatología para permitir su endurecimiento antes de colocar la siguiente capa. El curado y protección puede efectuarse manteniendo la superficie húmeda o mediante un riego de curado, *gravillonado o arrocillo*, etc.

3. ASPECTOS PRÁCTICOS

Es muy importante resaltar el error en el que se puede caer, desde el punto de vista de los autores, muy frecuente en algunas obras civiles de gran envergadura cuando se estudia la posibilidad de la estabilización de suelos y se plantea la posibilidad de realizar la ejecución de la estabilización con medios agrícolas o no específicos para estas unidades de obra.

Como en cualquier técnica, las especificaciones deben variar según las exigencias del tipo de tratamiento que se esté buscando, del tipo de obra que se esté ejecutando y, dentro de esta, del tipo de capa que se esté tratando.

A partir de aquí no se debe caer en la tentación de, aplicando métodos y maquinaria no específicos para las obras de ingeniería civil, creyendo que se estén reduciendo los costes del tratamiento.

A este respecto es importante comentar lo siguiente:

- No se está asegurando la ejecución del tratamiento, pues una maquinaria específica para estas labores es la única que garantiza los efectos de mejora buscados en todos los suelos tratados. Recuerde el lector cómo se realizan los ensayos para la determinación de los efectos de la cal sobre el suelo...
- Debido a lo anterior, se corre el riesgo de tener que asumir algún día los costes de no calidad, es decir, que la infraestructura sufra algún fallo debido a que los suelos no han sido debidamente tratados en su totalidad. De estos “contra-ejemplos” y costes de *no calidad* ya existen, desgraciadamente, varios casos.
- Y además, este supuesto abaratamiento de la ejecución no será tal pues los rendimientos no sólo bajarán drásticamente, sino que, lo que es aún peor, serán muy difíciles de estimar.
-

Hay que darse cuenta de que emplear maquinaria no concebida para la estabilización de suelos (maquinaria agrícola, rodillos tumber y pata de cabra, etc.) supondrá trabajar con capas de menor espesor y dar un número de pasadas limitado, pero desconocido.

- Considerando todos los costes que entran en juego, incluidos los comentados, la estabilización de un suelo con problemas geotécnicos y resistentes suele ser la solución más económica, sin ningún género de duda.





- Cuando para tratar los suelos que irán en el núcleo de los terraplenes se hable de un *ligero tratamiento*, pues seguramente no se necesite ir a más, nadie se estará refiriendo a bajar la guardia y hacer “medio-bien” las cosas. Únicamente este concepto se refiere a que el porcentaje necesario de cal será menor, el justo para alcanzar los valores necesarios.
- También es importante considerar el hecho de que cuando se esté planteando una estabilización de suelos para construir terraplenes, obviamente, no se deberán tener las mismas exigencias que para capas de coronación o de firmes (las consideradas en la mayoría de normativas sobre estabilización de suelos), sino que habrá que adaptarlas a las propias de terraplenes.

Pero lo que sí debe quedar claro es que, en lo referente a la ejecución, sí deberá realizarse conforme a los equipos y metodología exigidos en el citado artículo. El Ministerio de Fomento lo ha confirmado directamente mediante una Nota de Servicio remitida a sus Demarcaciones.

- Cuando se estén buscando unos valores geotécnicos y resistentes evaluados en laboratorio mediante ensayos, sólo se podrá asegurar que se van a lograr en obra mediante las técnicas de ejecución necesarias para alcanzar las exigencias de dosificación y mezclado aquí descritas.

- Y por último, debe asegurarse la calidad y el estado del conglomerante utilizado, pues es la única forma de garantizar las mejoras buscadas.

4. NUEVOS TRATAMIENTOS

El objetivo fundamental de esta ponencia es el de exponer los últimos y más peculiares ejemplos de tratamientos y estabilizaciones de suelos con cal o cemento que, en este último capítulo, se va a tratar de exponerlos de forma resumida.

Estas aplicaciones todavía están pendientes de desarrollarse en su totalidad, lo cual es motivo de ánimo y estímulo para los autores de esta comunicación.

4.1 Estabilizaciones mixtas cal – cemento

Una de las aplicaciones de las estabilizaciones de suelos que mayores posibilidades de empleo tienen son las estabilizaciones mixtas, en las que se aplica cal y cemento, de tal forma que se optimiza el empleo de ambos tipos de conglomerantes.

Ante materiales con leves plasticidades o excesivamente húmedos, su tratamiento previo con pequeños porcentajes de cal permite un mejor rendimiento de su posterior estabilización con cemento.

Este tipo de estabilizaciones permiten:



- Lograr valores finales de elevada capacidad de soporte partiendo de suelos ligeramente cohesivos.
- El empleo de suelos que incumplen levemente los requisitos para ser empleados en la construcción de capas tratadas con cemento.
- La construcción de capas tratadas con cemento en condiciones climatológicas adversas.

Por ejemplo, para la construcción de la capa de base de los firmes de las nuevas pistas de vuelo del Aeropuerto de Barajas (Madrid) se planteó sustituir la capa de zahorra artificial prevista en un principio por una capa de suelocemento que permitiera reducir los espesores previstos y, por tanto, el movimiento de tierras necesario.

Parte de los suelos a emplear presentaban ligeras plasticidades que hacían que en los ensayos previos de dosificación exigieran porcentajes de cemento superiores sin aumento de la resistencia.

A ello se añadió otro problema: con un plazo prefijado para la terminación de las obras y puesta en funcionamiento de las pistas, comenzó un otoño muy lluvioso y frío. La única forma de poder terminar en plazo los trabajos de la base de los firmes fue la de realizar una estabilización mixta.

Durante el verano se ejecutó el suelocemento in situ, por vía húmeda, sin necesidad de emplear cal previamente. Pero cuando empezaron las lluvias y hasta que finalizó la obra, durante el invierno, se empleó un pequeño porcentaje de cal viva, en torno al 1 %, para secar y corregir plasticidad, por





vía seca. Y, a continuación, pasado un período de una hora, para que toda la cal pudiese actuar sobre todo el espesor de capa, se pasaba a estabilizar la capa con cemento, in situ, por vía seca también.



Foto 2: Ejecución del tratamiento con cemento por vía húmeda.

4.2 Tratamientos de lodos

Otra de estas nuevas aplicaciones es la utilización de cal viva para el secado y tratamiento de los **lodos** procedentes de la excavación de las modernas tuneladoras cuando atraviesan terrenos blandos.

Los efectos ya conocidos del óxido de calcio sobre estos lodos facilita su manipulación y transporte y permite, además, su

reutilización en la construcción de infraestructuras civiles, evitando su depósito en vertederos, como se venía haciendo hasta ahora.



Foto 3: Secado y estabilización de los lodos en las obras de Metro de Madrid.

Esta aplicación puede emplearse de la misma forma con cualquier tipo de lodo empleado en las obras de construcción de túneles, pantallas, estructuras de hormigón, etc.

4.3 Reutilización y valorización de residuos

Aunque no sea el aspecto medioambiental que más páginas de los medios de comunicación ocupe, la gestión de los residuos de cualquier tipo supone uno de los principales retos medioambientales a los que se enfrenta actualmente la humanidad.

En otra comunicación del autor al presente Congreso se ha expuesto la ejecución de una capa de base de suelocemento en una autopista de Cataluña en la que se han empleado como suelos Residuos de Construcción y Demolición (RCD), con excelentes resultados.

Las estabilizaciones y tratamientos de suelos permiten corregir los problemas geotécnicos y resistentes que puedan tener los residuos, permitiendo, no sólo su reutilización sino, lo que es más importante, su valorización, pues la mejora resistente permite su empleo en capas más exigentes, de mayores prestaciones.

Otro ejemplo de este tipo de aplicaciones también mencionado con detalle en otra comunicación para este Congreso es la construcción de Instalaciones Deportivas en Ciempozuelos (Madrid), construidas sobre rellenos antiguos de vertederos gracias a la estabilización del último metro sobre el que se han apoyado, directamente, las infraestructuras necesarias.

Actualmente están en marcha toda una serie de líneas de investigación sobre estos temas que producirán un impulso de estas aplicaciones durante los próximos años.



4.4 Tratamientos de mejora del terreno

Los casos más frecuentes, en cimentaciones de obras de carretera, en los que se utilizan técnicas de mejora del terreno, son los asociados a la construcción de rellenos (terraplenes) sobre suelos blandos.

El apoyo de terraplenes, especialmente de gran altura, sobre suelos blandos puede tener problemas de estabilidad ante el deslizamiento y de asentos, tanto constructivos como posteriores.

Ante estos problemas, se aplican distintas tipologías de tratamientos de mejora del terreno cuya finalidad es la de mejorar las condiciones de resistencia, deformabilidad y permeabilidad del cimiento de los rellenos.

Dentro de este tipo de tratamientos, las estabilizaciones con cal y cemento tienen su aplicabilidad en los siguientes casos:

- **Sustitución** del terreno natural por otro mejor, pudiéndose estabilizar y mejorar los propios suelos del cimiento. Este tipo de tratamiento es eficaz y viable en profundidades de 1 a 3 metros.
- **Inyecciones** de cemento o cal que mediante la introducción de lechadas de cemento o cal en el terreno mejoran los suelos blandos. Este tipo de tratamiento es eficaz y viable en profundidades de hasta 100 metros.
- **Jet-Grouting** o inyecciones de alta presión para mezclar un agente cementante (lechada de cemento) con el suelo blando para lograr su endurecimiento. Su eficacia llega a profundidades de entre 20 y 50 metros.



- **Columnas de suelocemento o suelocal.** Los equipos de perforación en suelos blandos que se usan para construir pilotes han sufrido diversas adaptaciones para poder mezclar el suelo con cemento (o con cal u otros productos), y opcionalmente, con agua, para crear columnas que aumentan la capacidad de soporte del terreno y reducen los asentos provocados por eventuales cargas colocadas en superficie. Su eficacia llega a profundidades de hasta 20 metros.

Otro tipo de cimentaciones (puentes, pasos inferiores, muros, etc.) suelen resolverse frecuentemente mediante cimentaciones profundas cuando afectan a suelos blandos, aunque en determinados casos pueden ser de aplicación las técnicas que se denominan "tratamientos de mejora del terreno".

Un ejemplo de estas técnicas son los "micropilotes", que se utilizan para la consolidación de cimentaciones en zonas problemáticas. En las últimas obras de restauración del Puente Romano de Córdoba se han ejecutado micropilotes de cal en las bases de las pilas para consolidar las cimentaciones.

4.5 Descontaminación de suelos

La estabilización con cal o cemento permite la descontaminación de suelos contaminados mediante la inertización de metales pesados. Este tratamiento está internacionalmente aceptado y hay numerosas experiencias en los Países Bajos y en el Reino Unido.



Esta estabilización permite, en determinados casos, la reutilización de estos suelos en la construcción de explanaciones.



Foto 4: Descontaminación de suelos mediante lechada de cal.

A vertical decorative strip on the left side of the page, composed of three distinct rectangular images stacked vertically. The top image shows a close-up of a textured, golden-yellow surface. The middle image shows a blue, curved, reflective surface, possibly a road or a pipe. The bottom image shows a close-up of a textured, golden-yellow surface, similar to the top one but with different patterns.

CONCLUSIONES

De todo lo expuesto puede deducirse que las ventajas técnicas, económicas y medioambientales que suponen las estabilizaciones y tratamientos de suelos con cal han motivado que su aplicación se esté desarrollando más allá de las funciones inicialmente previstas.

Ello ha hecho que se estén aplicando en la construcción de cualquier parte de nuestras infraestructuras, en tratamientos de mejora del terreno, en tratamientos medioambientales, etc.

La corrección de los problemas geotécnicos y la mejora de las características resistentes producen una mejora clara en la durabilidad y capacidad de soporte de las capas estabilizadas.

En el siguiente gráfico puede apreciarse la equivalencia estructural entre el juego de capas estabilizadas que propone la Norma 6.1 – IC “Secciones de firme” y la que sería equivalente compuesta por una capa de 15 cm. de zahorra artificial y suelo seleccionado, según un dimensionamiento analítico realizado por los autores para una obra en Andalucía realizada durante el año 2007.

EQUIVALENCIA ESTRUCTURAL SOBRE SUELO MARGINAL

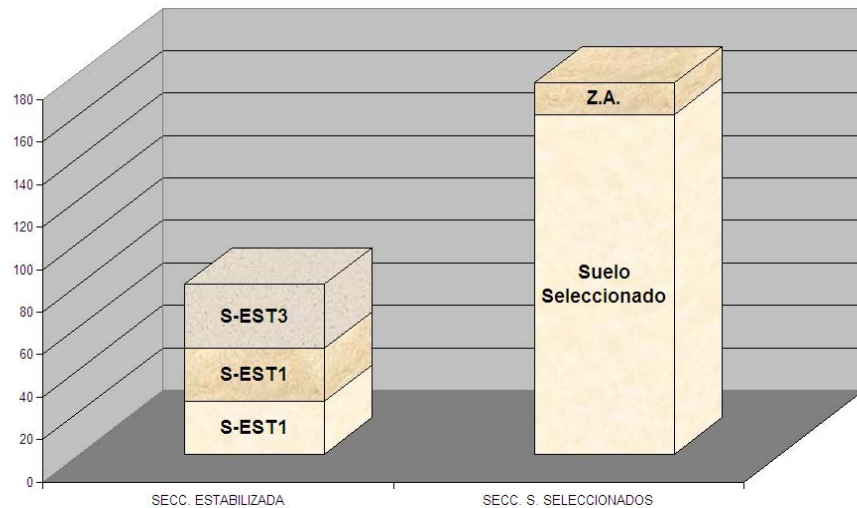


Ilustración 1: Comparación analítica de secciones.

El resultado es espectacular, la sección que, compuesta a base de capas de suelos seleccionado, es equivalente a la estabilizada, es del más del doble de espesor.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANCADE (Asociación Nacional de fabricantes de Cales y Derivados de España). "Manual de Estabilización de suelos con cal". Madrid, 1997.
2. ANCADE, CEACOP. Varias Ponencias. "Jornadas sobre el uso de la Cal en la Estabilización de suelos en Andalucía". Córdoba, 2000.
3. ANCADE y ANTER. "La estabilización de suelos con cal en carreteras y líneas de alta velocidad". SMOPYC 2008 – Salón Internacional de Maquinaria para Obras Públicas, Construcción y Minería. Zaragoza, 2008.
4. Armayor, J.L. y Sampedro, A. "Ingeniería del terreno (INGEOTER) – Volumen 9". *Capítulo 17: Estabilización y tratamiento de suelos con cal*. Madrid, 2007.
5. CEDEX – IECA. "Manual de firmes con capas tratadas con cemento". Madrid, 2003.
6. CEDEX – INTEVÍA. "Caracterización de zahorras, suelos estabilizados y materiales tratados con cemento para firmes de carretera". Varias Ponencias. Madrid, 2004.
7. Eades, J.L., and Grim, R.E. "A Quick test to Determine Lime Requirements for Soil Stabilization". USA, 1966.
8. E.T.U. de Ingenieros Técnicos de Obras Públicas. "Curso de estabilización de suelos". Varios autores. Madrid, 2008.



9. Faculdade de Engenharia de la Universidade do Porto (FEUP). "Curso sobre Tratamento de Materiais com Cal e/ou Cimento para Infra-estruturas de Transporte. Seminário de Casos de Obra Portugueses (TRATCICA 2008). Varios autores. Porto, 2008.
10. IECA, AEC, ATC. Varias Ponencias. "I^{er} Simposio Internacional sobre Estabilización de Explanadas y Reciclado In Situ de Firmes con Cemento". Salamanca, 2001.
11. INTEVÍA. "Los suelos marginales en la construcción de Obras Lineales". Varias Ponencias. Sevilla 2002.
12. INTEVÍA. "Explanadas estabilizadas y capas de firme tratadas con cemento. Aspectos prácticos". Varias Ponencias. Sevilla, 2006.
13. Junta de Andalucía – GIASA. "Recomendaciones para la redacción de Pliegos de Especificaciones Técnicas Generales para el Tratamiento de los suelos con cal". Sevilla, 2003.
14. Junta de Andalucía, AEC. Varias Ponencias. "IV Congreso Andaluz de Carreteras". Jaén, 2007.
15. Junta de Castilla y León, ANCADE, ACALINCO. Varias Ponencias. "Jornada sobre la Cal en la Mejora y Estabilización de suelos". Valladolid, 2001.
16. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) – Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA). "Traitement des sols á la chaux et/ou aux liants hydrauliques". Guide technique. Paris, 2000.



17. Little, Dallas N. "Handbook for Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime". USA, 1995.
18. Ministerio de Fomento. Artículos 200 "Cales para estabilización de suelos", 202 "Cementos", 330 "Terraplenes", 512 "Suelos estabilizados in situ" y 513 "Materiales tratados con cemento (suelocemento y gravacemento)" del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3). España, 2002.
19. Ministerio de Fomento. Norma 6.1 – IC "Secciones de firme". Madrid, 2002.
20. Ministerio de Fomento. "Guía de cimentaciones en obras de carretera". Madrid, 2002.
21. Sampedro, A. "Curso sobre Tratamientos de suelos". Academia de Ingenieros del Ejército. Madrid, 2004.
22. Sampedro, A.; Gallego, J. "De cal y carreteras...". CARRETERAS Nº 135. Madrid, 2004.
23. Sampedro, A; Mañas, P. "El Pre-reciclado de firmes". Ponencia del VII Congreso Nacional de Firmes. AEC y Junta de Castilla y León. Ávila, 2006.
24. Transportation Research Board. "State of the art Report 5: *Lime Stabilization*". USA, 1987.