

Jornada Técnica sobre experiencias recientes en estructuras de tierra para infraestructuras viarias. Madrid, 10 de febrero de 2011

ESTABILIZACIONES CON CAL EN TERRAPLENES CON MATERIALES MARGINALES Y EN ZONAS ESPECIALES EN LÍNEAS DE ALTA VELOCIDAD

Autores:

Angel Sampedro Rodríguez

Prof. Universidad Alfonso X El Sabio (UAX)

Luis M. Sopeña Mañas

Prof. Universidad Politécnica de Madrid (UPM)

Miguel Rodríguez Plaza

ADIF

Francisco Cabrera Jerónimo

ADIF

Raimundo Angosto Pérez

ADIF

José Javier Navarro Ugena

ADIF

1. Introducción

La presente comunicación analiza y expone las últimas experiencias y aplicaciones de tratamientos de materiales marginales con cal para su empleo en líneas de alta velocidad ferroviaria.

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. Por lo tanto, se hace más necesaria la utilización de todos los materiales que se encuentran

directamente en la traza de las propias obras, o en préstamos, sean cuales sean sus propiedades.

En el caso de líneas de alta velocidad el trazado es más rígido, debido a los parámetros geométricos mínimos, lo cual hace especialmente necesaria la resolución de estos problemas.

Los suelos cohesivos o plásticos, con contenidos apreciables de arcillas y limos, muy frecuentes en toda la geografía española, presentan graves problemas geotécnicos para su empleo en la construcción de infraestructuras debidos a su elevada plasticidad, reducida capacidad de soporte e inestabilidad de volumen en función de la humedad (hinchamiento y retracción).

Además de los suelos arcillosos, para los cuales están desarrolladas la mayoría de las especificaciones técnicas, son susceptibles de tratar con cal todos aquellos que contienen minerales puzolánicos, aunque no sean plásticos.

El tratamiento y estabilización con cal de cualquiera de estos suelos es una solución muy interesante desde los puntos de vista técnico, económico y medioambiental. Esta técnica se viene aplicando de forma sistemática en España desde hace varias décadas.

Los efectos de mejora conseguidos y sus ventajas han hecho que su aplicación se haya extendido a una gran variedad de infraestructuras:

- Tratamientos de mejora y estabilización en terraplenes y explanadas en carreteras.
- Tratamientos y mejora de suelos en plataformas ferroviarias, especialmente de alta velocidad.
- Estabilización y reparación de caminos y vías de servicio.
- Estabilización de explanaciones aeroportuarias (pistas de vuelo).
- Estabilización de terrenos para las explanaciones en grandes obras de urbanización.
- Estabilización de zonas de vertederos para construir sobre ellas.
- Etc.

Los tratamientos de suelos con cal 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.

- Tratamiento de **todo el terraplén**, construido a base de capas o tongadas de suelos arcillosos estabilizadas con cal.
- Tratamientos de **zonas especiales** para la protección de la infraestructura.
- **Estabilizaciones mixtas cal – cemento** en las que se optimiza el empleo de ambos tipos de conglomerantes. Ante materiales con leves plasticidades y/o excesivamente húmedos, su tratamiento previo con pequeños porcentajes de cal permite un mejor rendimiento de su posterior estabilización con cemento.
- **Secado y estabilización de lodos** que permiten su trabajabilidad y reutilización en los rellenos necesarios para obras de infraestructura.
- **Tratamiento de residuos** para su empleo en la construcción de infraestructuras.
- **Tratamientos de mejora del terreno**, para poder construir infraestructuras sobre terrenos blandos.
- **Descontaminación de suelos**, permitiendo, incluso, su reutilización en la construcción de los rellenos necesarios.



Foto 1: Secado de suelos mediante cal viva.

Por último, es muy importante reseñar que el diseño, ejecución y control de calidad de estos tratamientos de suelos deben ser muy cuidadosos y exigentes, ateniéndose a las recomendaciones y normativas vigentes, y empleando equipos específicos para estas

unidades de obra. Se trata de tratamientos posibles muy diversos, con suelos problemáticos, y con unos parámetros, en cada caso, diferentes, en función de las especificaciones finales. Sólo de esta forma, se garantizarán los efectos buscados a corto y largo plazo.

2. Estado de la técnica

La mejora y estabilización de suelos con cal para plataformas de alta velocidad se emplea de forma sistemática en los países que construyen este tipo de infraestructuras. Las posibles aplicaciones son múltiples:

- **Terraplenes:** el tratamiento con cal permite la reutilización de los suelos de la traza, cuando sus propiedades geotécnicas les confieren la categoría de marginales, debido a un exceso de finos, corrigiendo sus problemas de plasticidad y expansividad, y mejorando su capacidad de soporte.
- **Cimientos de terraplenes:** la estabilización de suelos blandos sobre los que se apoyan los terraplenes mejora su capacidad de soporte y protege estas zonas de la humedad, disminuyendo los asentamientos posteriores de los terraplenes.
- **Fondos de desmonte:** la estabilización de los suelos sobre los que se apoya la superestructura de vía permite un mejor comportamiento en estas zonas, las cuales tienen mayores riesgos de problemas de drenaje.
- **Cuñas y contracuñas de transición:** la estabilización de los materiales en las zonas de transición ante las obras de fábrica y puntos duros de la plataforma permite una transición gradual del comportamiento de los materiales y disminuye los riesgos de fallo debido a la complicada ejecución de esas zonas.
- **Capa de forma (coronación):** ante la aparición de materiales con algo de exceso de finos y plasticidad, estos pueden emplearse, siempre y cuando se corrijan las propiedades que le confieren estos finos mediante su mejora con cal. Así, esta capa se comportará soportando las sollicitaciones como se le requiere durante su vida de servicio.

- **Zonas especiales:** en determinados casos, ante la situación comprometida de algunas zonas de los rellenos, como puede ser el caso de zonas inundables, pueden diseñarse unos *contraterraplenes* estabilizados con cal.

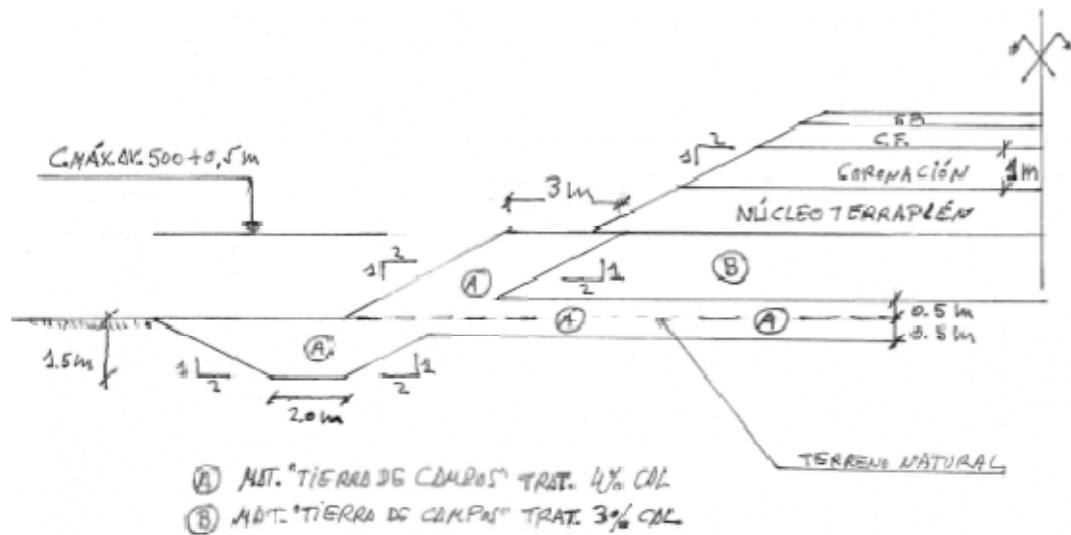


Figura 1: Diseño de *contraterraplenes* en zona inundable.

3. Tratamiento de suelos con cal

3.1 Tipos de cales

Las cales utilizadas en la estabilización de suelos, en España, son **Cales Aéreas Cálcicas (CL)**, llamadas así porque endurecen con el CO_2 presente en el aire, y compuestas principalmente por óxido e hidróxido de calcio y de magnesio, sin adición de materiales puzolánicos e hidráulicos.

Según la denominación impuesta por la Norma UNE-EN 459-1 "*Cales para la construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad*", estas presentan las siguientes formas:

- *Cales vivas, Q:* Cales aéreas constituidas principalmente por óxido de calcio (CaO) y de magnesio (MgO), producidos por la calcinación de caliza. Dentro de este tipo deben emplearse las **CL 90-Q** o **CL80-Q**.

- *Cales apagadas o hidratadas, S:* Cales aéreas, cálcicas resultantes del apagado controlado de las cales vivas. Están compuestas principalmente por hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$. Dentro de este tipo deben ser **CL 90-S o CL 80-S**.

3.2 Tipos de tratamientos

Hay distintas posibilidades de tratamientos de suelos con cal, en función de los objetivos a conseguir: el secado, la modificación y la estabilización propiamente dicha.

En el caso de **suelos con exceso de humedad**, la adición de cal viva disminuye el contenido de agua por la acción combinada de: aporte de producto seco, consumo del agua necesaria para hidratarse y formar hidróxido cálcico, y evaporación de agua debida a la reacción anterior, fuertemente exotérmica.

De esta forma, el aporte de un 1 % de cal viva puede disminuir el contenido de humedad del suelo en un 4 ó 5 %. Si a ello se suma el efecto de aireación y volteo de un material procedente de un préstamo, el valor de la disminución puede llegar al 7 %.

Además, en suelos excesivamente húmedos y sometidos a temperaturas extremadamente bajas, se plantea un problema añadido: la congelación del agua impide su colocación en obra.

La mezcla del suelo con cal viva permite, debido a la conjunción de los efectos anteriormente señalados, elevar la temperatura del suelo, deshaciendo el hielo y reduciendo inmediatamente el exceso de humedad.

Otra posibilidad de tratamiento, el más común, es la **modificación inmediata** de las propiedades geotécnicas, reduciendo en un corto periodo de tiempo (minutos/horas) la cantidad de agua retenida por la arcilla y mejorando su trabajabilidad.

La mezcla de cal con el suelo provoca reacciones rápidas que originan cambios físico-químicos producidos por cambios iónicos, neutralización y floculación. Las finas partículas de arcilla se aglomeran en elementos más gruesos y friables. Estas reacciones se producen siempre que el suelo tenga un cierto porcentaje de finos.

En obra se aprecia que el suelo pierde su carácter pegajoso y toma un aspecto arenoso, mejorando enormemente su trabajabilidad y compactibilidad, mejorando también la capacidad portante. La modificación actúa tan rápidamente como se hace la mezcla de cal con el terreno. En general, para conseguir estas modificaciones, la dosificación necesaria de cal oscila entre el 1 y el 3 por ciento.

Y, por último, la **estabilización** propiamente dicha consiste en una mejora a largo plazo (meses/años) por cementación, que depende de la temperatura ambiente y de la naturaleza de la arcilla, aumentando la resistencia del suelo con el fin de poder emplearlo en capas más solicitadas. De esta forma pueden obtenerse explanadas y subbases con buenas propiedades estructurales que van incrementándose en el tiempo, a la vez que hace insensible la capa estabilizada al agua y a los ciclos hielo-deshielo.

Al elevar la cal el pH del suelo estabilizado hasta valores de 12,4, se libera sílice y alúmina de la arcilla que reaccionan con los iones calcio procedentes de la cal, formando silicatos y aluminatos cálcicos hidratados que, como en el caso de los cementos portland, incrementan la resistencia mecánica.

Esta reacción de tipo puzolánico es progresiva con el tiempo y aumenta la impermeabilidad, la resistencia mecánica y la resistencia a las heladas del suelo tratado. Los porcentajes necesarios de cal para garantizar la permanencia de las reacciones puzolánicas a lo largo del tiempo oscilan entre el 3 y el 8 por ciento.

El mecanismo de estabilización es mucho más complejo que el de modificación, debido a las dos variables que influyen en su desarrollo. Por un lado, su desarrollo en el tiempo, y por otro, las reacciones entre la cal y los componentes mineralógicos del suelo. Es aconsejable, por lo tanto, basar el proyecto de una estabilización determinada en un estudio más en detalle de cómo mejora la cal los parámetros resistentes del suelo a medio y largo plazo.

3.3 Factores potencialmente adversos

Dos son los aspectos que más negativamente pueden influir en la estabilización de suelos con cal: su contenido en materia orgánica y en sulfatos solubles.

Con respecto al contenido de **materia orgánica**, esta puede inhibir las reacciones puzolánicas, retardando los efectos de la cal sobre el suelo. Pero, por otro lado, la mezcla del suelo con la cal permite eliminar parte de esta materia orgánica.

En el caso de suelos con porcentajes excesivos de ésta, conviene realizar estudios viendo la evolución de la mejora buscada a más largo plazo de lo habitual, para dosificar correctamente la cal necesaria.

El contenido de **sulfatos solubles**, bien por su existencia en el propio terreno, o bien por ser aportados por las aguas subterráneas existentes, puede afectar la estabilización mediante la reacción de los sulfatos solubilizados en el agua con los aluminatos cálcicos hidratados, producidos por la reacción puzolánica entre el suelo y la cal, formando *etringita*

(trisulfoaluminato cálcico) u otras sustancias similares (*taumasita*), muy expansivas, que pueden llegar a romper las capas ya extendidas y compactadas.

4. Estabilización de terraplenes en alta velocidad

Actualmente, los tratamientos de suelos con cal, se están empezando a aplicar de forma habitual en líneas de alta velocidad ferroviaria. En concreto, se están realizando ahora trabajos de estabilización de suelos con cal para la formación de los rellenos en el ***Subtramo: Nudo de Venta de Baños-Conexión Valladolid-Palencia-León.***

En estas obras ha surgido la oportunidad de realizar un estudio especial, de la estabilización con cal de suelos de carácter marginal de la traza, facies Tierra de Campos, para poderlos reutilizar en la construcción de rellenos, y en particular en rellenos inundables, correspondientes al estribo de acceso al viaducto del Pisuerga (la alternativa era recurrir a pedraplén, que debía proceder de canteras muy alejadas de la traza).

A tal efecto, se diseñó una sección especial, recogida en el esquema de la figura 1, tratando con cal el relleno hasta 50 cm por encima de la cota de avenida de 500 años, así como la zona del cimiento y saneo. La sección se zonificó, disponiendo el material mas “estabilizado” en cimiento y parte mojada de espaldones, y completándola con un sobreacho de 3 metros, que ejerza de protección frente a la acción erosiva (así como un tacón para evitar la socavación).

Geológicamente la zona objeto de estudio se ubica en el sector central de la Cuenca del Duero. Ésta constituye una amplia depresión terciaria originada como consecuencia de los diferentes eventos tectónicos acaecidos durante la orogenia Alpina, rellena por sedimentos continentales pertenecientes al Terciario y al Cuaternario.

El Terciario de la Cuenca del Duero, en esta zona, está representado por sedimentos continentales generados mediante un dispositivo de relleno de abanicos aluviales en los bordes (facies detríticas: Tierra de Campos) que pasan gradualmente a facies lacustres (margas, calizas y evaporitas) en las partes centrales: Facies Dueñas.

El trazado de la LAV discurre en su mayor parte sobre los distintos niveles de terrazas cuaternarias y sobre el aluvial actual del río Pisuerga; estos materiales se disponen discordantes sobre el sustrato terciario, constituido por las Facies Dueñas y Tierra de Campos, formadas por materiales arcillo-margosos. Ambas unidades pueden encontrarse enmascaradas con cierta frecuencia por rellenos antrópicos.

Debido a que el volumen procedente del movimiento de tierras de la obra no cubre las necesidades para la construcción de los rellenos es necesaria la búsqueda de zonas de préstamo o la reutilización de los suelos marginales procedentes de las excavaciones. Por criterios técnicos, económicos y, por supuesto, medioambientales, se ha optado por la última opción.

Para reutilizar un material como relleno el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Proyectos de Plataforma de Alta Velocidad (PGP en adelante) aprobado por ADIF exige un índice CBR superior a cinco (5) y un hinchamiento, medido en dicho ensayo, inferior al uno por ciento (1%).

Los materiales a tratar con cal conforme a PGP vigente deben ser suelos arcillosos exentos de materia vegetal, con un máximo de materia orgánica de 2%, un tamaño máximo no superior a 150 mm y un contenido en sulfatos inferior al 0,8%.

La limitación de las sustancias anteriores tiene por objeto evitar el retraso del endurecimiento del material y evitar que se produzcan reacciones expansivas, debidas a la formación de etringita y, en este caso, taumasita, y pérdidas de resistencia.

Independientemente de las restricciones impuestas por el PGP, en general, un suelo es susceptible de mejora con cal cuando su porcentaje en finos es superior a 5% y el índice de plasticidad es igual o superior a 10, aunque, como ya se ha dicho, si un suelo contiene materiales puzolánicos, también mejorará con la cal, aunque no sea plástico.

Conforme al PGP, el material tratado con cal debe cumplir las siguientes condiciones:

- La dosificación de cal debe ser igual o superior a 2%.
- El índice CBR a los 7 días con la compactación del 95% del PM debe ser igual o superior a 6 y, si se trata de coronación o fondo de desmonte, será igual o superior a 12.
- El hinchamiento en el ensayo CBR será inferior al 2%.

Con el objeto de poder estudiar la reutilización de estos materiales en la construcción de los rellenos necesarios, se ha realizado un análisis geotécnico más detallado en esta zona, y un estudio posterior de la posible reutilización de dichos materiales mediante su estabilización. La formación concreta a estabilizar en este caso es la ya mencionada Facies Tierra de Campos (TC).

Para determinar la efectividad de la cal en estos suelos, se ha procedido a mezclarlos con diferentes porcentajes de conglomerante (1, 2, 3 y 4 % en peso seco de suelo).

En la realización de estos ensayos se ha empleado cal apagada o hidratada del tipo CL-90-S. No obstante, esto no presentaría ningún obstáculo de cara al empleo de cal viva en obra. Este cambio a cal viva podría ser interesante por dos razones: por humedades excesivas en los suelos, de tal forma que se necesite el efecto de secado que produce la cal viva, o por razones logísticas, puesto que la cal viva tiene el doble de densidad que la cal apagada.

En tal caso, sólo habrá que tener la precaución de añadir la mayor cantidad de agua necesaria que necesita este conglomerante.

En los suelos analizados se han detectado proporciones elevadas de carbonatos, entre el 15 y 40%. Esto provoca, como ya se ha dicho, que los suelos no sean todo lo reactivos que debieran con la cal y los efectos de mejora necesitan mayores porcentajes de conglomerante.

En la siguiente gráfica pueden apreciarse los efectos de mejora conseguidos con distintos porcentajes de cal.

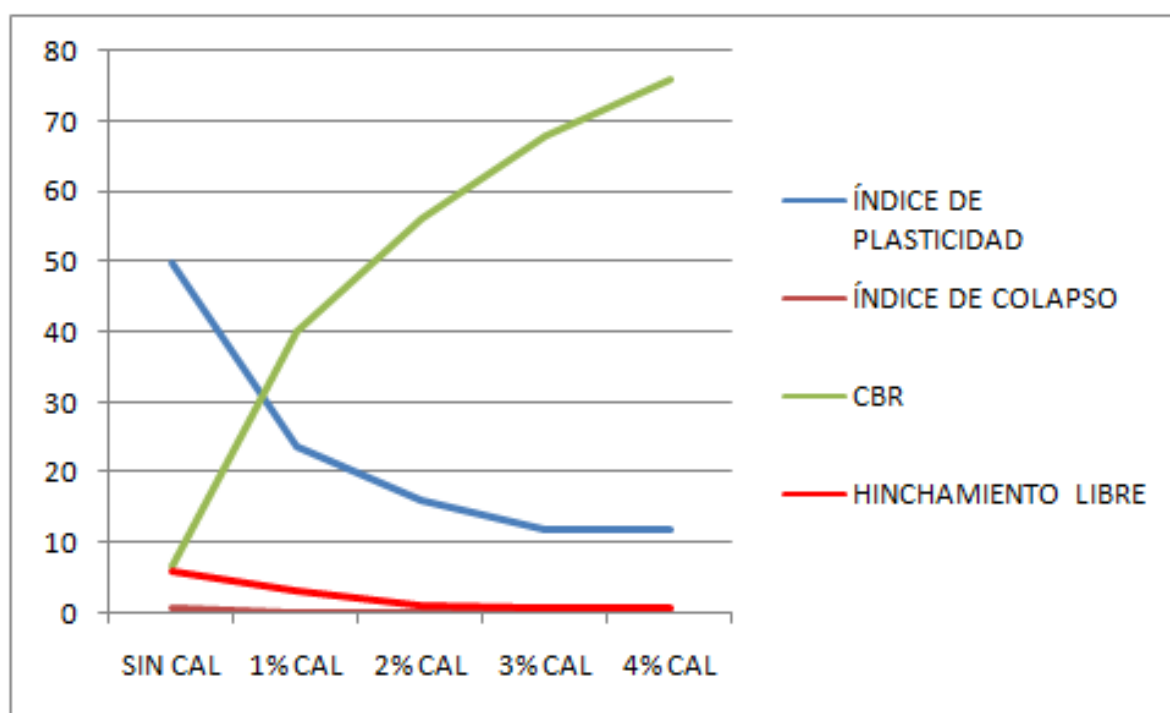


Figura 2: Evolución de los parámetros geotécnicos con distintos porcentajes de cal.

Se han realizado ensayos de dosificación con muestras de arcillas margosas de alta plasticidad. Presentan un Límite Líquido de 84,6 y un Índice de Plasticidad de 49,8. Un índice de colapso de 0,92, CBR de 6,7 y 15,0, y un hinchamiento libre del 6,1%. Por lo tanto, desde el punto de vista de su empleo, estos suelos presentan problemas de plasticidad y expansividad.

Con el 3% de cal el Índice de Plasticidad se reduce a 11,8, el CBR obtenido por encima de 68 y el hinchamiento libre, a 7 días, se reduce al 0,97%. Se está dejando, en estas condiciones, un material totalmente distinto del inicial, con unas prestaciones geotécnicas y resistentes, incluso, mejor de las que suelen presentar los suelos naturales.

Así pues, como es bien conocido, estos suelos de la Tierra de Campos, tratados con proporciones de cal que van desde el 3% al 4%, permiten obtener un producto estable desde el punto de vista de los cambios de humedad, impermeable, y con una alta capacidad geomecánica (índices CBR superiores a 20-30, resistencia a compresión simple del orden de los 5-10 kp/cm²).

Al obtenerse mediante el tratamiento con cal ese “producto” tan estable (similar, en cierto sentido, a una especie de “mortero suelo-cal”), resulta probada su capacidad para ser “sumergible”. Y su alta cohesión lo hace también resistente a la erosión bajo la acción del agua.

En síntesis, se concluye que los suelos de Tierra de Campos, tratados adecuadamente con las proporciones oportunas de cal, permiten obtener un material insensible a los cambios de humedad, estable bajo la acción del agua, tanto saturable como sumergible, y en consecuencia apto para su empleo en las zonas clasificadas como “inundables” en los rellenos.

Por lo tanto, dada la potencial disponibilidad próxima de volúmenes suficientes de estos materiales de la formación de Tierra de Campos, se estimó que su empleo, con el adecuado tratamiento con cal, en este relleno inundable aquí analizado, era una alternativa completamente válida desde el punto de vista técnico, a la vez que una oportunidad desde la perspectiva económica y medioambiental.

5. Tratamiento especial de acondicionamiento para capa de forma

Con el objetivo de resolver los problemas que se plantean en la L.A.V. Palencia-León, actualmente en construcción, relativos a los materiales existentes y su aprovechamiento, se han llevado a cabo análisis detallados de sus características y propiedades geotécnicas, con vistas a su aplicación en las obras de tierra, partiendo de las prescripciones técnicas vigentes en las obras de ADIF.

Alguna de las características de esos materiales, que en el conjunto de la línea se engloban en dos grandes grupos (Cuaternarios de terrazas QT, y Terciarios arcillosos, plásticos, esencialmente de la Formación Tierra de Campos), plantean algunas problemáticas

específicas de cara a su aprovechamiento en las obras, generando una incidencia muy notable si se descarta su empleo, y en consecuencia, se recurre a canteras muy alejadas de la traza.

Evaluando detalladamente las propiedades geotécnicas de dichos materiales, y sobre todo los realmente existentes en los Préstamos, se han estudiado posibles utilizaciones de los mismos, exclusivamente aplicables a esta Línea Palencia-León, atendiendo sobre todo al comportamiento geotécnico que se espera de las correspondientes unidades de obra con ellos ejecutadas, inspirándose básicamente en las prescripciones vigentes, pero introduciendo algunas ligeras matizaciones.

En todo caso, como quiera que la condición ineludible es garantizar que el comportamiento de la obra ejecutada sea válido, y de calidad y garantía suficiente como parte de una plataforma de alta velocidad ferroviaria, la justificación final, no obstante, debe constatarse mediante las oportunas pruebas a escala real en obra, con terraplenes o bandas de ensayo, sometidos a las pésimas condiciones de servicio correspondientes. En definitiva, el peso de la prueba in situ, ejecutada con el material real y la maquinaria de obra, prevalecería, por tanto, sobre los valores literales de alguna de las limitaciones cuantitativas preestablecidas para los parámetros intrínsecos del material, basadas en toma de muestras y ensayos de laboratorio.

En esa línea de trabajo, cabe hacer referencia a la habilitación de algunos materiales procedentes de préstamo para su empleo en Capa de Forma (coronación), mediante lo que se ha denominado como ***“Acondicionamiento de finos de los préstamos cuaternarios QT existentes, para reducir su plasticidad”***.

En esencia, el problema radica en que, con frecuencia, los materiales procedentes de esos préstamos contienen proporciones de finos superiores al 5%, aunque por debajo del 15%, pero además de plasticidad superior a los límites prescritos.

En consecuencia (y al margen del posible debate que puede plantearse sobre el concepto de “finos no plásticos” en sentido estricto), grandes volúmenes de ese tipo de material resultarían no utilizables en la Capa de Forma, y por tanto sería necesario recurrir a canteras muy alejadas, con todos inconvenientes que ello plantea.

Así, con el objetivo de acondicionar la fracción fina de esos materiales de préstamo (QT) para reducir su plasticidad, se ha propuesto efectuar un tratamiento de *“inertización”*, añadiendo un producto como cal, mezclada con el conjunto global del suelo.

Como quiera que las proporciones necesarias de cal son pequeñas (en el entorno del 1%-2%), dado que, al margen de que los gruesos silíceos no son reactivos frente a ella, el objetivo fundamental es inertizar exclusivamente esa fracción fina (que en Capa de Forma

supone, como máximo, solo el 15% del conjunto), el producto así obtenido continua siendo un material suelto, de comportamiento esencialmente granular (en lugar de la alta cohesión del producto que se obtiene en el tratamiento clásico con cal de suelos arcillosos).

En cualquier caso, se ha dicho, la aceptación debe pasar inexorablemente por la ejecución de las pertinentes pruebas preliminares in situ, a escala real. Y por ello, se efectuaron rellenos de ensayo, ejecutados con los mismos materiales, procedimiento y maquinaria que los de obra.



Foto 2: Material de préstamos tipo QT.

Los materiales ensayados fueron los procedentes de préstamos tipo QT, con un contenido de finos iguales o inferiores al 15%, mezclados con cal con el objetivo de inertizar la plasticidad de esos finos, para evaluar la posibilidad de que el material así obtenido sea válido para la constitución de Capa de Forma.

Previamente, se realizó una campaña de ensayos de laboratorio para su caracterización completa, tanto del material natural, como mezclado con diversas proporciones de cal (1%-2%-3%). Los resultados del material tratado a 7 días, mostraron una reducción de la

plasticidad de los finos, así como una drástica disminución de la fracción arcillosa (inferior a 2 micras). El resto de parámetros (compactación, CBR, hinchamiento), fueron también satisfactorios.

Como quiera que es muy importante que el producto derivado del tratamiento del material QT con cal así aplicado siga manteniendo un comportamiento “granular”, dada la proximidad de la capa de forma a la infraestructura de vía y los posibles efectos derivados de las cargas dinámica cíclicas, para constatar de forma fehaciente que se cumplían las previsiones realizadas, transcurridos unos 15 días desde la ejecución de la prueba, se procedió a la apertura de calicatas.

En las fotografías 3 y 4, se muestra el aspecto del material tratado en una de las catas efectuadas, que, como se aprecia nítidamente, es prácticamente similar al del material natural, antes de tratar y ponerlo en obra, mostrado en la fotografía 2.



Foto 3: Material tratado con cal.

Una vez elegida la fórmula de trabajo (fijada en el 1,5% de cal), se ejecutó un terraplén de prueba. Al margen del control de la compactación, en particular para la comprobación del comportamiento del producto así obtenido bajo la acción del agua, se efectuaron ensayos de carga in situ mediante placa (de 600 mm de diámetro) en la zona central de la banda, sometiéndolo, por tanto, a unas condiciones extremas en lo que respecta al agua (inmersión-saturación), que simulen, en definitiva, las pésimas esperables en servicio.



Foto 4: Material tratado con cal.

Cabe señalar que los resultados de los ensayos de carga, sometidos a inundación, mostraron que el comportamiento mecánico del material tratado era, prácticamente, insensible al agua, no apreciándose prácticamente colapso alguno, y manteniéndose el valor de los módulos de deformación (E) igual en las ramas “secas” que en los posteriores ciclos tras la inundación (es decir, con el material bajo placa prácticamente saturado).

6. Conclusiones

Las **líneas de alta velocidad ferroviaria** son infraestructuras susceptibles de aplicación de las técnicas de estabilización de suelos con cal. La rigidez de su trazado impone un gran movimiento de tierras que es necesario optimizar y, además, es en este tipo de infraestructuras donde se hace más necesario el garantizar un comportamiento estable de la plataforma durante el período de explotación.

Para ello, es fundamental construir unos rellenos durables, lo cual implica aplicar tratamientos de mejora del terreno en la base y estabilizaciones de suelos que permitan el empleo de los materiales de la traza, sea cuales fueren sus propiedades.

Además, como se ha mostrado, esta técnica puede resultar aplicable, en circunstancias especiales, incluso a la capa de forma, para corregir la plasticidad y poder emplear así suelos con ciertos porcentajes de finos que, de otra forma, no servirían.

Es importante tener en cuenta, para el caso de las estabilizaciones con cal que, aunque la mayoría de los estudios y las especificaciones técnicas las plantean sólo para suelos arcillosos, cualquier suelo con la presencia de minerales puzolánicos mejora sus características geotécnicas cuando es tratado con cal.

En otros países de nuestro entorno las estabilizaciones de suelos con cal se aplican de forma habitual en la construcción de plataformas ferroviarias (Ej.: Francia, Italia, Bélgica, Portugal, etc.).

7. Referencias

1. ADIF. Pliego de Prescripciones Técnicas Tipo para los Proyectos de Plataforma PGP-2008 v.11. Artículo G10U "Tratamiento in situ de suelos con cal".
2. ANCADE. "Manual de Estabilización de suelos con cal". Madrid, 1997.
3. ANCADE y ANTER. "La Estabilización de suelos con cal en carreteras y líneas de alta velocidad". Varias Ponencias. Jornada Técnica SMOPYC-2008. Zaragoza 2008.
4. ANCADE, ANTER e IECA. "Manual de estabilización de suelos con cemento o cal". Madrid, 2008.

5. ANTER, ANCADE e IECA. Jornada Técnica “Estabilización de suelos en obras ferroviarias”. Varias Ponencias. Madrid 2009.
6. ANTER. “Guía de Soluciones para obras de estabilización de suelos, ejecución de suelocemento in situ y reciclado de firmes”. Madrid, 2010.
7. CEMOSA. Jornada Técnica “Estabilización de suelos”. Varias Ponencias. Sevilla 2010.
8. INTEVÍA. “Los suelos marginales en la construcción de Obras Lineales”. Varias Ponencias. Sevilla 2002.
9. INTEVÍA. “Mezclas con Cemento en Explanadas y Firmes”. Varias Ponencias. Madrid, 2004.
10. Junta de Andalucía – GIASA. “Recomendaciones para la redacción de Pliegos de Especificaciones Técnicas Generales para el Tratamiento de los suelos con cal”. Sevilla, 2003.
11. 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.
12. Little, Dallas N. “Handbook for Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime”. USA, 1995.
13. Ministerio de Fomento. Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3). España.
14. Ministerio de Fomento. Pliego de Prescripciones Técnicas Generales de Materiales Ferroviarios (PF). España.
15. Sampedro, A. “Estabilización de suelos en Alta Velocidad Ferroviaria”. Universidad Politécnica de Madrid. Departamento de Ingeniería Civil – Transportes. Madrid, 2006.
16. Sampedro, A. “Innovaciones en las estabilizaciones de suelos con cal”. Ponencia del VIII Congreso Nacional de Firmes. AEC y Junta de Castilla y León. Valladolid, 2008.
17. TRATCICA 2008. “Seminario de Tratamientos de materiales con cal y cemento para Infraestructuras de Transporte. Casos de obras portuguesas”. Varios autores. Facultad de Ingeniería. Universidad de Oporto. Portugal, 2008.

