

Nuevas prescripciones de estabilización de suelos con cal para rellenos de terraplén en líneas de alta velocidad de ADIF

New prescriptions on lime-stabilized soils for high-speed railways embankments of ADIF

Francisco Cabrera Jerónimo (Adif); José Javier Navarro Ugena (Adif); José Estaire Gepp (Cedex);
Maria Santana Ruiz de Arbulo (Cedex) (*)

Resumen

Debido a la limitada disponibilidad de material apto para la construcción de terraplenes para plataforma de alta velocidad, la necesidad de estabilizar in situ determinados materiales con cal está viéndose incrementada. 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 volumétrica, principalmente en función de la humedad (hinchamiento y colapso). El uso de los materiales que se encuentran directamente en la traza de las propias obras o en los préstamos cercanos es recomendable desde el punto de vista económico y medioambiental. ADIF y CEDEX han redactado conjuntamente unas prescripciones sobre el empleo de la cal para la estabilización de suelos en la construcción de terraplenes de plataforma de alta velocidad..

Palabras clave: Infraestructura, normativa, Adif, terraplenes, cal, estabilización de suelos.

Abstract

Due to the limited availability of earth materials for embankments of high speed lines, the lime-stabilized soils system is being become interesting. The cohesive or plastic soils, that contain high clay and limes quantity, present grave problems due their plasticity, low bearing rate and instability (expansion or contraction). The use of the site materials is recommended from the economical and environmental point of view. For this reason, Adif and CEDEX had work together redacting the new prescriptions on lime-stabilized soils for High Speed Railways core embankments.

keywords: Infrastructure, regulations, Adif, embankments, lime, stabilized soils.

* fcabrera@adif.es; javier.navarro@adif.es; jose.estaire@cedex.es; Maria.S.Ruiz@cedex.es

1. Introducción

En la construcción de obras lineales (carreteras y líneas ferroviarias) y cualquier otra que requiera grandes explanaciones, es fundamental minimizar y compensar al máximo posible el movimiento de tierras y materiales. Debido a la limitada disponibilidad de materiales aptos para la construcción de terraplenes, se hace más necesaria la utilización de todos los materiales que se encuentran directamente en la traza de las propias obras, o en préstamos cercanos, sean cuales sean sus propiedades.

Para estos casos, actualmente existen diversas técnicas de tratamiento y aprovechamiento de los materiales disponibles, para reducir su sensibilidad al agua y disminuir, en mayor o menor grado, su sensibilidad a la deformación bajo las cargas del tráfico. Para esto se suelen utilizar ligantes hidráulicos como la cal, que es el caso que se analiza en este artículo.

La adición de cal al suelo provoca diferentes efectos, visualmente se observa que el aspecto del suelo pasa a ser “más granular” y de forma práctica se obtiene una mezcla de mejor “trabajabilidad”. Estos efectos vienen derivados de las reacciones químicas que tienen lugar al mezclar un suelo arcilloso con la cal y el agua. Las propiedades geotécnicas de la mezcla cambian, se reduce rápidamente la plasticidad del suelo y su hinchamiento frente al agua, y aumenta su capacidad portante.

En general, con los suelos arcillosos el tratamiento con cal es una buena solución, pero es imprescindible realizar un plan de ensayos muy exhaustivo, tal y como viene reflejado en las prescripciones que se han redactado. En algunos casos el tratamiento con cal no llega a ser suficiente y entonces sería preciso realizar otro tipo de tratamientos o importar material de préstamos, con el consecuente aumento del coste de la obra.

2. Colaboración ADIF-CEDEX

ADIF y CEDEX firmaron en 2010 una encomienda de colaboración técnica de naturaleza pública y sometida al ordenamiento jurídico general vigente en la Administración Pública. Dadas las especiales características técnicas de los trabajos que se pretende acometer, la singularidad de los instrumentos requeridos para su ejecución y la alta cualificación e independencia exigibles a la Entidad que los debe llevar a cabo, se consideró oportuno que el CEDEX se encargara de la realización de dichos trabajos a través de una encomienda de gestión.

Una de las líneas de actuación está recogida en el proyecto nº 7 titulado “Actualización de los artículos del Pliego de Prescripciones Tipo (PGP) de rellenos y tratamientos con cal”. Los objetivos iniciales fueron:

- Establecer un protocolo de ensayos a realizar para determinar la aptitud de los materiales a emplear en el núcleo y la coronación de rellenos de las líneas de alta velocidad.
- Establecer un protocolo para el estudio del posible aprovechamiento de materiales inicialmente no válidos (según las vigentes prescripciones de ADIF) mediante la adición de cal.
- Revisión y actualización de las actuales prescripciones que figuran en los artículos del PGP.

3. Primeras tareas de revisión bibliográfica y ensayos de laboratorio

3.1. Revisión bibliográfica

La primera parte del trabajo ha consistido en la elaboración del estado del arte, mediante la revisión de la normativa vigente en otras Administraciones Públicas relacionadas con el tratamiento de suelo con cal. Entre ellas destacan el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Carreteras (PG-3), el Manual de estabilización de suelos con cal de GIASA la Junta de Andalucía y otras normas y recomendaciones de la Junta de Castilla y León, Reino Unido, Francia y la asociación nacional de fabricantes de cal (ANCADE).

El análisis de estos pliegos y normativas ha permitido tener una visión global de la metodología empleada en el estudio del tratamiento de suelos con cal.

Gracias a esta revisión, se ha modificado la estructura del pliego de ADIF, se han ajustado algunos valores de los ensayos a obtener en el laboratorio y se han introducido o sugerido nuevos ensayos.

3.2. Selección de tramos de ensayo

La nueva redacción del pliego de suelos tratados con cal se ha fundamentado tanto en la revisión bibliográfica como en los ensayos de laboratorio y los ensayos in situ.

Actualmente, Adif está desarrollando numerosos de proyectos y obras de construcción de nuevas líneas de alta velocidad. Las necesidades de cada trazado son muy particulares, pero el análisis de la problemática debido a la falta de materiales adecuados para la construcción de terraplenes muestra que el empleo de la cal para la mejora de las características geotécnicas es viable en varios tramos.

Tras un primer análisis de los tramos en los que es posible el uso de suelos tratados con cal, debido a diversos factores, como el estado en el que se encontraba la obra, el volumen de material deficitario y las características geotécnicas del suelo a tratar, se decidió centrar el estudio en varios tramos:

- LAV Antequera – Granada, tramo Tocón – Valderrubio: Desmonte de Íllora; el avanzado estado de las obras permitía la elaboración de un estudio específico de laboratorio y de su ejecución en obra. En la siguiente fotografía se observa un terraplén tratado con cal terminado en este tramo.



Imagen 1: Aspecto de un terraplén tratado con cal en el tramo Tocón – Valderrubio en marzo de 2010.

- LAV Antequera – Granada, tramo Tocón – Valderrubio: Peña de los Enamorados; el terreno a tratar presenta singularidades geotécnicas que permite estudiar el comportamiento de suelos problemáticos con la cal. En la siguiente fotografía se observa el aspecto de las arcillas altamente expansivas presentes en el tramo de Peña de los Enamorados y que han sido estudiadas para ser tratadas con cal.



Imagen 2: Aspecto de las arcillas presentes en el tramo de Peña de los Enamorados (Archidona).

- LAV Palencia – León: tramo Becerril de Campos – Río Cea; las características hidrogeológicas y geotécnicas de los materiales permiten comprobar el resultado de los suelos tratados con cal. En la siguiente fotografía se observa un terraplén realizado con las facies Tierra de Campos y que se ha estabilizado con cal.



Imagen 3: Aspecto de un terraplén terminado en el tramo Palencia – León (Tierra de Campos).

Como se ha comentado con anterioridad, la elección de estos tramos ha permitido elaborar una metodología de trabajo en el laboratorio con materiales de muy diferentes características geotécnicas, y estudiar la puesta en obra del tratamiento con la cal. Además, tras la ejecución de los terraplenes se han extraído muestras para su análisis que han permitido determinar el estudio necesario para el control de calidad.

4. Modificaciones del pliego de suelos tratados con cal

4.1. Esquema del nuevo articulado

Las nuevas prescripciones de suelos tratados con cal se han redactado siguiendo el siguiente esquema de trabajo:

- Evaluación de la aptitud del suelo al tratamiento con cal.
- Estudio de la mezcla en el laboratorio y obtención de la dosificación óptima de cal.
- Ejecución de tramos de prueba y verificación.
- Ejecución del terraplén:
 - Preparación de la superficie existente.
 - Disgregación del suelo.
 - Humectación o desecación del suelo, según corresponda.
 - Distribución de la cal.
 - Ejecución de la mezcla de la cal con el suelo.
 - Curado inicial, si es necesario.
 - Compactación.
 - Acabado de la superficie y tratamiento de las juntas de compactación.
 - Curado final y protección superficial
- Control de calidad

Merece la pena destacar que se ha considerado el tratamiento con cal un método para el tratamiento de suelos para su uso en terraplenes y fondos de desmonte, pero también para el secado de suelos con excesiva humedad.

4.2. Evaluación de la aptitud de un suelo a ser tratado con cal

Los suelos a tratar con cal para los usos mencionados anteriormente deben cumplir las condiciones, indicadas en la Tabla I, referentes al número mínimo de muestras a ensayar y a los valores de referencia y extremo que se deben obtener en los ensayos realizados.

Tabla I: ensayos a realizar en el estudio previo de idoneidad del suelo y valores a obtener

Parámetro	Número mínimo de muestras	Valor de referencia	Valor extremo	% ensayos comprendidos entre valor de referencia y extremo
Tamaño máximo	8	$T_{\max} \leq 80 \text{ mm}$	$T_{\max} \leq 100 \text{ mm}$	< 10%
Contenido en finos	8	Finos $\geq 15 \%$	Finos $\geq 10\%$	< 15%
Índice de plasticidad	8	$10 \leq IP \leq 40$	$5 \leq IP < 10$ $40 < IP \leq 45$	< 10%
Contenido en materia orgánica	8	MO $\leq 2\%$	MO $\leq 3\%$	< 15%
Contenido en sulfatos solubles	8	SO ₃ $\leq 0,8\%$	SO ₃ $\leq 1\%$	< 10%

Nota: Valor extremo: valor que no puede ser excedido por ningún ensayo

Es importante resaltar lo novedoso de la inclusión de este tipo de tablas en unas prescripciones técnicas. Esto tiene por objeto facilitar la comprensión del texto y, sobre todo, el cumplimiento de los valores de los ensayos, ya que permite una cierta y comprensible holgura en el caso de que alguna de las muestras resulte fuera de rango.

4.3. Estudio de la mezcla del suelo con la cal en el laboratorio

Es de obligado cumplimiento realizar una campaña de ensayos de laboratorio para establecer la dosificación mínima de cal para cada tipo de suelo. La mezcla del suelo con la cal deberá cumplir las condiciones, indicadas en la Tabla II, referentes al número mínimo de muestras a ensayar y a los valores de referencia y extremo que se pueden obtener en los ensayos indicados.

Tabla II: ensayos a realizar en el estudio previo y valores a obtener en las mezclas suelo-cal

Parámetro	Número mínimo de ensayos	Valor de referencia	Valor extremo	% ensayos comprendidos entre valor de referencia y extremo
Límites de plasticidad	8	Zona verde del gráfico de Figura 1	Zona amarilla del gráfico de Figura 1	< 15 %
Proctor Modificado	8	---	---	---
Índice CBR (para núcleo)	8	CBR \geq 6	CBR \geq 5	< 15 %
Índice CBR (para coronación, espaldones y fondo de desmonte)	8	CBR \geq 12	CBR \geq 10	< 15 %
Colapso de suelos	8	Colapso \leq 1%	Colapso \leq 1,5%	< 15 %
Hinchamiento libre	8	H _{libre} \leq 1%	H _{libre} \leq 1,5%	< 15 %
Curva contenido de cal-pH	8	---	---	---

Nota: Valor extremo: valor que no puede ser excedido por ningún ensayo

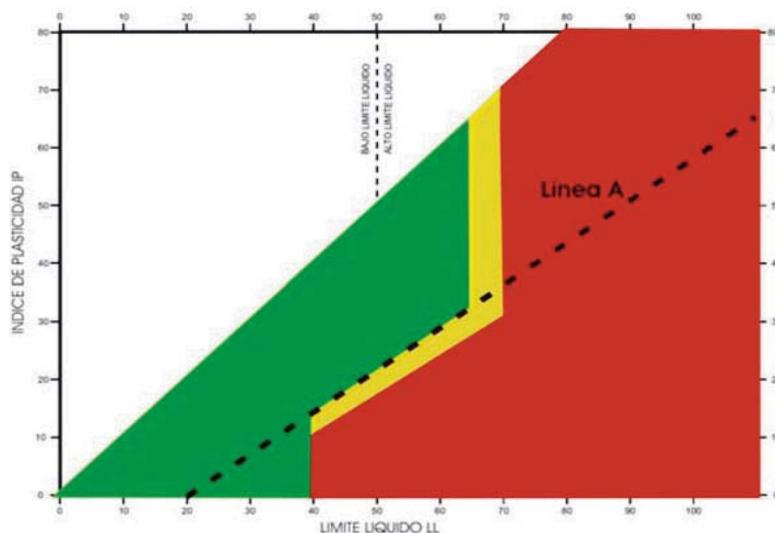


Imagen 4: Gráfico de Casagrande con indicación de los valores límite y extremo

Un aspecto importante en los ensayos de laboratorio es la preparación de las probetas de la mezcla de suelo con cal a ensayar ya que influyen de manera significativa en el resultado de los ensayos. En la nueva redacción del pliego se incluye, de forma precisa, la metodología de preparación de las muestras para cada tipo de ensayo. Ello garantiza la correcta representatividad del tratamiento en el laboratorio.

4.4. Tramos de prueba y tramo de verificación

Se trata de otro aspecto innovador de este artículo de Pliego, ya que incluye la posibilidad de realizar varios tramos de prueba y la obligatoriedad de ejecutar un tramo de verificación antes del comienzo de los trabajos definitivos del tratamiento del suelo con la cal.

- Las dimensiones mínimas de este tramo de verificación y las razones por las que se han establecido se recogen a continuación:
- 100 m de longitud: de esta manera la maquinaria es capaz de alcanzar sin problemas la velocidad de trabajo, en condiciones normales.
- 2,5 veces la anchura de la máquina de compactación: de esta manera se consiguen zonas con y sin solapes lo que permite obtener más información.
- Altura correspondiente a tres tongadas: los ensayos se deberían centrar en la tercera tongada, no teniendo en cuenta las dos primeras tongadas por su cercanía al cimiento y no ser representativas de la mayoría de las tongadas.
- Dadas las dimensiones exigidas al tramo de verificación se ha considerado conveniente incluir la posibilidad de que, con la previa autorización de la Dirección de Obras, este tramo pueda realizarse en la traza y, si supera todos los controles, pueda ser abonado como terraplén definitivo.

4.5. Proceso de ejecución

En el artículo se describen las prescripciones para la ejecución de esta unidad de obra, entre la que destaca la distribución de la cal. La cal viva o apagada se distribuirá uniformemente mediante equipos mecánicos con la dosificación fijada de dos formas posibles:

- Por vía seca, en forma de polvo o granel, mediante una extensión previa sobre la superficie de trabajo, anterior al mezclado con el suelo.
- Por vía húmeda, en forma de lechada de cal hidratada o apagada, elaborada previamente también por equipos mecánicos. La proporción de cal en la lechada será como máximo del 35%.

En cualquier caso, siempre es necesaria la dosificación de cal mediante dosificador volumétrico servodirigido como el que se muestra en la siguiente imagen.



Imagen 4: Mezcla de la cal mediante dosificador servodirigido en el tramo de Venta de Baños (Palencia)

4.6. Control de calidad

Con el objetivo de garantizar la correcta ejecución del tratamiento del suelo con la cal, en el pliego se definen los ensayos a realizar en el control de calidad de la mezcla fabricada. Se han definido dos tipos de lotes:

- Lote tipo 1: constituido por 5.000 m³ de terreno tratado, para cada tipo de suelo, o la cantidad tratada en un día, si ésta es menor que 5.000 m³.
- Lote tipo 2: constituido por 10.000 m³ de terreno tratado, para cada tipo de suelo, o la cantidad tratada en una semana, si ésta es menor que 10.000 m³.

Adicionalmente se realiza un control de la mezcla del suelo con la cal, una vez compactada, y que también se hará por lotes. Este último control correspondería al denominado “lote tipo 3” que está constituido por 5.000 m² de terreno tratado, para cada tipo de suelo, o a la superficie tratada en un día, si ésta es menor que 5.000 m².

5. Conclusiones

El presente artículo expone, de forma resumida, las nuevas prescripciones del Pliego de Prescripciones Tipo para proyectos de plataforma de alta velocidad de Adif (PGP) relacionadas con el tratamiento de suelos con cal. En él se incluyen algunos aspectos novedosos pero, sobre todo, se establece un protocolo de ensayos para el diseño, construcción y control de calidad de los terraplenes y fondos de desmote en los que haya sido necesario estabilizar con cal.

La elaboración de este pliego queda ahora abierta a la puesta en práctica de este procedimiento en algunos tramos de construcción de plataforma para conocer realmente su aplicabilidad y eficacia, aunque el número de ensayos a realizar y la inclusión de la obligatoriedad de realizar un tramo de verificación asegurarán una buena ejecución de la obra.

6.- Agradecimientos

Este trabajo no hubiera sido posible sin la aportación de los miembros de Adif y colaboradores a lo largo de los dos años que duró el proyecto:

Luis Serrano Martín, Mario Robles López, Aitor Fajardo Ballesteros, Raimundo Angosto Pérez, Juan José Encinas Nuevo, Eusebio Nestares, Jesús Miguel Ortega, José Luis Torres-Baptista Cañada, Rodrigo Sánchez Solans, Miguel Rodríguez Plaza, Adelardo Martín de la Vega y Muñoz de Morales, Luis Quero Ruiz, Juan Carlos Monge, Luis Sopeña Mañas (consultor independiente y profesor de la UPM), Ángel Sampedro (consultor independiente y profesor de la UAX).