

ESTABILIZACIÓN CON CAL EN EL TRAMO TOCÓN – VALDERRUBIO (L.A.V. ANTEQUERA – GRANADA).

AUTORES:

- Luis Julián Quero Ruiz (ADIF).
- Aitor Fajardo Ballesteros (ADIF).
- Luis Serrano Martín (ADIF).

1. INTRODUCCIÓN

La construcción del tramo Tocón – Valderrubio, perteneciente a la Línea de Alta Velocidad Antequera – Granada presentaba, la siguiente problemática, que resulta relativamente común en muchas obras:

- Déficit de materiales aprovechables procedentes de la traza.
- Dificultad de encontrar áreas adecuadas para vertedero, debido tanto al volumen necesario como a la distancia de transporte.
- Dificultad de conseguir materiales adecuados procedentes de préstamos próximos o de canteras, en el volumen requerido y a un precio razonable.

A partir de la campaña de ensayos de laboratorio realizada en el desmonte de Íllora y de los diferentes reconocimientos efectuados, se desprendía que los materiales térreos procedentes del mismo, con los que estaba previsto ejecutar los terraplenes, no eran aptos para su aprovechamiento en terraplenes ferroviarios de alta velocidad, ya que no cumplían las especificaciones del Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares de ADIF, debido fundamentalmente a dos causas, o bien el índice CBR era inferior a cinco (5) o el hinchamiento, medido en dicho ensayo, era superior al uno por ciento (1%).

2. PROBLEMÁTICA ESTUDIADA

Como consecuencia de la anterior problemática, se ha intentado conseguir el aprovechamiento de todo el material disponible procedente de la traza, y en concreto, el procedente del mencionado desmonte de Íllora, mediante selección, tratamiento o zonificación.

Previamente a realizar la estabilización del material en obra se realizaron multitud de pruebas en laboratorio con distintos porcentajes de cal -1, 2 y 3 % en peso-. Estos ensayos se realizaron en diferentes laboratorios (Cedex, Euroconsult y Geocisa),

llegando a la conclusión de que añadiendo un 2% de cal las características del suelo mejoraban de forma suficiente, consiguiéndose valores muy superiores a los prescritos en las especificaciones de ADIF, además de una mezcla homogénea.

Como consecuencia de esta estabilización con cal se pretendía obtener los siguientes efectos beneficiosos:

- Disminución notable o anulación de la plasticidad del suelo tratado.
- Aumento de la capacidad portante del suelo tratado con notable aumento del índice CBR.
- Disminución notable o anulación del hinchamiento del suelo tratado.
- Cambio de la granulometría de la mezcla disminuyendo el % que pasa por el tamiz 0,080 UNE.
- Mejora de la “trabajabilidad” en condiciones adversas de los suelos con porcentaje de finos elevado, aumentando su tolerancia al agua, tanto por la capacidad de la cal de rebajar la humedad como por la resistencia al agua del material tratado.

La anterior mejora induce una reducción en los periodos de parada por lluvias, de manera que las condiciones de humedad del suelo original se hacen menos condicionantes.

- Obtención de un material tratado con calidad homogénea a partir de un suelo original muy variable que se encuentra en el límite de las prescripciones de ADIF.
- Incremento de la fiabilidad y durabilidad de las capas estabilizadas ante el tráfico y la climatología, al mejorar su capacidad resistente y reducir su susceptibilidad al agua.
- Mejora de las propiedades estructurales de las capas estabilizadas a lo largo del tiempo, e insensibilización ante cambios de humedad y temperatura.

Estas mejoras han permitido reutilizar los suelos disponibles en la traza, construyendo terraplenes de gran calidad y a su vez respetar el medio ambiente, evitando transportar grandes volúmenes de tierras, tanto de aportación como a vertedero, y eliminando la afección a espacios que serían necesarios para depositar las tierras excedentarias. Asimismo, al restringir el tráfico al interior de la obra, se evita el tráfico en carreteras y caminos, eliminando la producción de polvo y ruido, y el deterioro de

viales que habría que reparar posteriormente, lo que contribuye a reducir los costes sociales.

3. ESTUDIO PREVIO DE VIABILIDAD DEL CEDEX

3.1 Antecedentes

Conscientes de la mencionada problemática existente en el tramo Tocón-Valderrubio de la Línea de Alta Velocidad Bobadilla (Antequera)-Granada, a mediados del año 2008, ya iniciadas las obras, y a instancias de la Dirección de la Línea de Alta Velocidad Sur que las gestiona, se contempló el estudio del tratamiento con cal en este tramo dentro de la Ficha Nº 8: “Análisis de procedimientos de tratamientos con cal de la plataforma ferroviaria de alta velocidad” que se venía redactando en el ámbito del Convenio de Colaboración firmado entre el Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF) y el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) del Ministerio de Fomento.

Este estudio consistió fundamentalmente en la realización de una serie de ensayos de laboratorio con el material con el que se pretendía ejecutar los terraplenes del tramo y en la propuesta de una serie de secciones tipo de los terraplenes y de las actuaciones a llevar a cabo en obra antes de su ejecución. Todo ello editado en un informe previo que permitiera validar la viabilidad de la solución.

3.2 Desarrollo del estudio

El material analizado procedió de dos calicatas excavadas en el desmante de Íllora (Granada) en el tramo Tocón-Valderrubio. Está constituido por margas y limos arcillosos blanquecinos o beige, de edad pliocuaternaria, que forman parte del sustrato subbético. En ocasiones está agregado formando terrones de mayor tamaño (Figura 1).

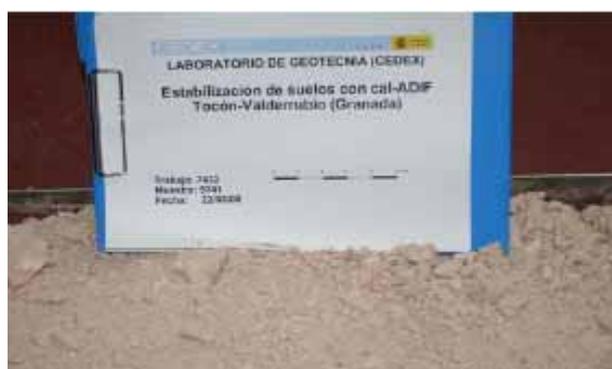


Figura 1. Aspecto general de la muestra estudiada.

El material en estado natural se clasifica como suelo fino, con componente principal de limo arcilloso y secundaria constituida por arena fina. El color es marrón muy pálido y la consistencia es blanda. Presenta una granulometría muy extendida con coeficiente de uniformidad superior a 15. Al ser atacado con ácido clorhídrico produce efervescencia debido a la presencia de carbonatos.

Los resultados de ensayos de laboratorio obtenidos en calicatas del proyecto fueron los siguientes:

- Contenido en finos: 62,7 – 86.3 %
- Límite líquido: 32,4-48,3 %
- Límite plástico: 17-27,6 %
- Índice de plasticidad: 15,4-20,7 %
- Contenido en materia orgánica: 0,37-0,4 %
- Contenido en sulfatos (SO₃): 0,41 – 0,66 %
- Contenido en carbonatos (CaCO₃): 55,04-62,56 %
- Hinchamiento libre: 2,3 %
- Proctor modificado:
- Humedad óptima: 12,3 – 14,6 %
- Densidad seca máxima: 1,98 t/m³
- Índice CBR: 5,6-9,4
- Hinchamiento CBR: 0,47-0,98 %

Adicionalmente se realizaron ensayos de difracción de rayos X a fin de obtener la mineralogía del material. Los difractogramas indican que el material ensayado está compuesto por cuarzo, calcita y arcillas del tipo esmectitas.

Los resultados de los ensayos realizados en fase de proyecto indicaban que el material ensayado cumplía los requisitos establecidos en el PGP-2006 para su uso en rellenos. Sin embargo, posteriores nuevos ensayos realizados en fase de obra, por distintos laboratorios (Geocisa y Euroconsult), proporcionaron resultados fuera de los límites del Pliego tipo de ADIF, con CBR inferiores a 5 o hinchamientos superiores al 1 %, como muestra la tabla comparativa (Figura 2).

MUESTRA	GRANULOMETRÍA			LÍMITES DE ATTERBERG			SULFATOS	PROCTOR MODIFICADO		CBR SUMERGIDO		
	U _{máx} <mm	#0,4	#0,08	LL	LP	IP		D _{máx}	H _{ópt}	100% PM	95% PM	% HINCH
1	20	84,0	75,9	34,7	20,4	14,3	0,00	1,913	15	4,0	3,0	2,15
2	5	86,5	81,0	28,8	12,9	15,9	0,01	1,953	12,6	7,9	5,7	1,95
3	10	62,3	56,0	27,1	14,3	12,8	0,00	2,038	10,2	8,8	7,2	1,42
4	10	88,3	76,0	26,6	12,5	14,1	0,11	1,987	10,9	11,0	8,2	1,90
5	10	72,0	66,7	34,0	16,2	17,8	0,00	1,925	13,4	8,0	5,0	1,38
6	40	45,2	38,5	28,7	15,1	13,6	0,00	2,02	10,8	5,3	3,2	2,61
7	40	65,5	54,2	28,6	16,3	12,3	0,00	2,022	12,1	9,0	6,8	0,81
8	6,3	98,4	92,4	30,0	13,8	16,2	0,09	1,967	11,2	4,3	3,4	2,33

Figura 2. Tabla de resultados obtenidos por el laboratorio de la ACO del tramo, en la fase inicial de la obra.

Para profundizar en el conocimiento del material, se realizaron dos ensayos CBR adicionales aplicando una sobrecarga de 35 kg a la muestra, equivalente a un espesor aproximado de un metro. Se obtuvieron índices CBR de 10,6 y 13,6 e hinchamientos del 0,93 y 0,91 %. Aunque el CBR aumentaba, el hinchamiento seguía quedando demasiado cerca de la restricción del 1 % prescrita en el PGP-2006.

Asimismo, se analizó la expansividad del material natural, mediante un ensayo de hinchamiento libre, obteniéndose un valor del 2,3 %. La presión de hinchamiento puede estimarse en 90–100 kPa, lo que indica que el material, en su estado natural (sin ser tratado con cal), presenta una expansividad que puede calificarse de baja a media que no impide su utilización para la ejecución de rellenos.

A la vista de todo lo anterior se decidió estudiar el comportamiento de este material una vez tratado con distintos porcentajes de cal, analizándose la variación de sus distintas propiedades con el porcentaje de cal, como se describe a continuación.

Variación de la Plasticidad con el porcentaje de cal.

Anteriormente se han indicado los valores de los límites de Atterberg, obtenidos en muestra de suelo natural, que dan un índice de plasticidad entre 15 y 21 %, indicativo de un suelo apto para este tipo de tratamiento al ser superior a 12 e inferior a 40. Se han determinado los límites de Atterberg al mezclar suelo con diferentes porcentajes de cal (1, 2 y 3 % en peso seco del suelo) y con curados de 1 y 7 días. En la Figura 3 se incluye el gráfico de Casagrande con los resultados de plasticidad tanto del suelo

natural como de las muestras tratadas. Puede observarse una reducción cercana al 50 % del índice de plasticidad, que es casi invariable con los distintos porcentajes de cal.

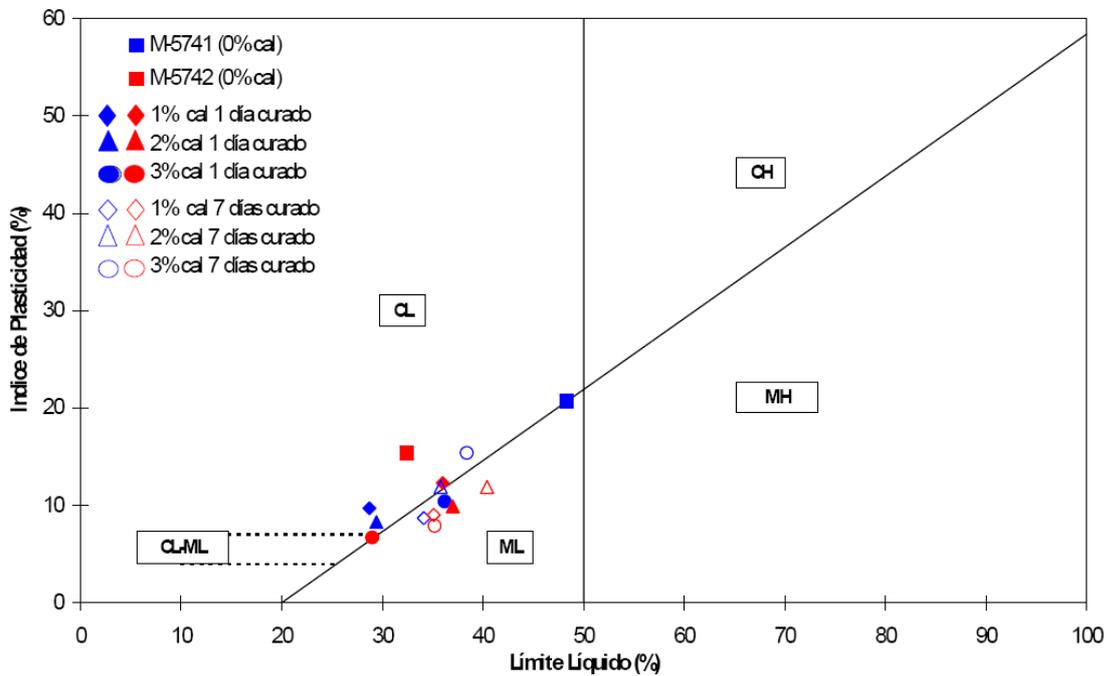


Figura 3. Gráfico de Casagrande del suelo natural y tratado con distintos % de cal curados entre 1 y 7 días.

Variación del Próctor Modificado.

Se han realizado ensayos de compactación Próctor Modificado, para determinar el comportamiento del suelo tratado con diferentes porcentajes de cal. Para el suelo natural se han obtenido valores de densidad seca máxima de 1,98 g/cm³ y de humedad óptima entre 12,3 y 14,6 %.

En una de las muestras no se obtienen resultados concluyentes. La otra muestra presenta el comportamiento típico, descendiendo la densidad seca y aumentando la humedad óptima.

Variación de la capacidad portante (CBR).

La Figura 4 ilustra el efecto, pudiéndose ver que el incremento del CBR es importante, en relación con el incremento de porcentaje de tratamiento con cal.

También se ha medido el hinchamiento en el molde CBR, constatándose que desciende al añadir cal a la mezcla, reduciéndose, en todos los casos, por debajo de 0,3 % y en algunos casos hasta valores inferiores a 0,1 %.

Variación de la resistencia a compresión simple.

Se han realizado ensayos sobre muestras con distinta dosificación de cal y períodos de curado de 1, 7 y 28 días. En los ensayos realizados se ha constatado que, a pesar del poco tiempo de maduración de la mezcla, la resistencia a compresión simple experimenta un importante aumento.

Para un día de curado, el valor máximo se obtiene con una dosificación del 2 % de cal, obteniéndose 1.409 kPa, y continúa incrementándose, llegando a alcanzar 3.400 kPa después de 28 días de curado, para una dosificación del 3 %.

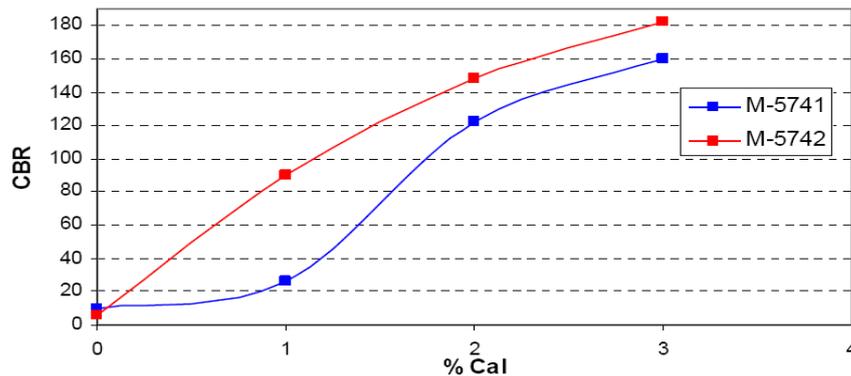


Figura 4. Evolución del CBR al aumentar el porcentaje de cal en la mezcla.

Evaluación de la expansividad.

El análisis de la expansividad del material tratado con cal se ha realizado mediante dos ensayos de presión de hinchamiento. En estos ensayos, una vez determinada dicha presión de hinchamiento, se ha descargado la muestra hasta eliminar completamente la carga, midiendo en cada escalón de carga el hinchamiento producido (Figura 5).

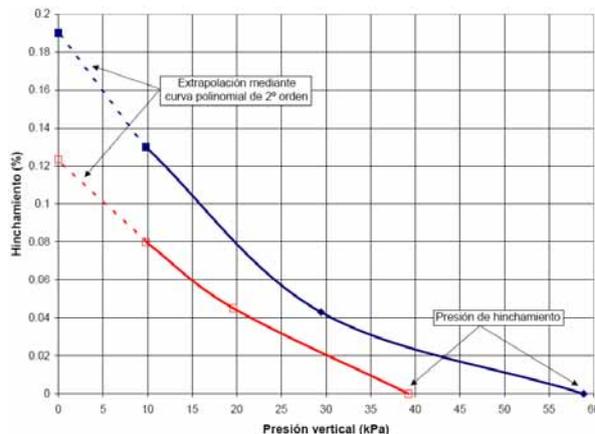


Figura 5. Ensayos de presión de hinchamiento realizados con muestras tratadas con el 2 % de cal.

La presión de hinchamiento medida en cada ensayo ha sido de 40 y 60 kPa. Mediante extrapolación se ha estimado un hinchamiento libre de entre 0,12 y 0,19 %. El análisis de los ensayos indica que el material, una vez tratado con cal, no presenta problemas de expansividad que impidan su utilización.

3.3 Conclusiones obtenidas.

El resultado de los ensayos con el material estabilizado con cal, en una proporción mínima del 1% de cal en peso, permite indicar que este material tratado cumple sobradamente las especificaciones del PGP-2006 de ADIF, por lo que es apto para la ejecución de núcleos de relleno.

Sin embargo en la mayoría de las normativas sobre estabilización de suelos con cal se indica que la proporción mínima que debe utilizarse es del 2 %, con objeto de lograr una buena mezcla entre el suelo y la cal. Por ello, se ha propuesto en los tratamientos del material estudiado una dosificación del 2 %, en peso, de cal.

4. APLICACIÓN PRÁCTICA DE LA ESTABILIZACIÓN CON CAL EN EL TRAMO TOCÓN-VALDERRUBIO

4.1 Tramos de prueba.

Posteriormente, se realizaron tramos de prueba con material estabilizado al 2% y al 3% de cal, para corroborar los resultados obtenidos en laboratorio, tomando muestras antes y después de haber ejecutado el tratamiento. Los resultados obtenidos fueron incluso mejores que los de laboratorio.

4.2 Secciones utilizadas

Los terraplenes se han ejecutado con dos tipos de secciones, según la altura final de los mismos, empleando la técnica del "material encapsulado" para reducir costes (Figuras 6 y 7).

Terraplenes con altura menor de 5 metros (hasta cota superior de coronación):

En la base del terraplén y bajo la coronación se disponen capas de 0,6 m de espesor estabilizadas al 2% de cal. Se disponen espaldones de 4 m de espesor estabilizados también al 2% de cal, envolviendo el material sin tratar. Este último ha de tener hinchamiento menor del 2% y CBR mayor de 5 y colocarse 1 ó 2 puntos por encima de la humedad óptima, para evitar problemas de cambios de volumen al desecarse. El espesor máximo de la zona de núcleo sin estabilizar es de 2,80 m

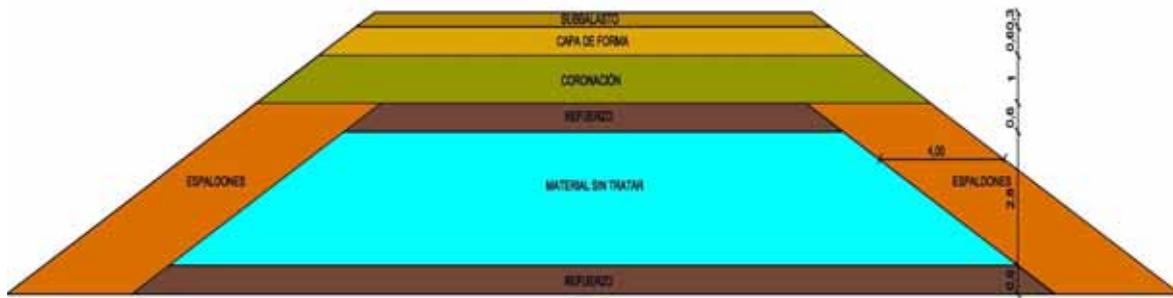


Figura 6. Sección tipo para terraplén de altura menor de 5 m.

Terraplenes con altura mayor de 5 metros:

Se intercalan capas de refuerzo (0,60 m) estabilizadas al 2%, según va subiendo la altura del terraplén, de manera que el espesor de la zona interior sin estabilizar entre capas de refuerzo sea siempre inferior a 2,80 metros. En este caso sólo hizo falta la disposición de una capa intermedia, por la altura de los terraplenes, y siempre cuidando que el menor espesor de material sin estabilizar quede en la parte superior.

También se ha utilizado en algunas zonas el material estabilizado al 3% para la capa de coronación.

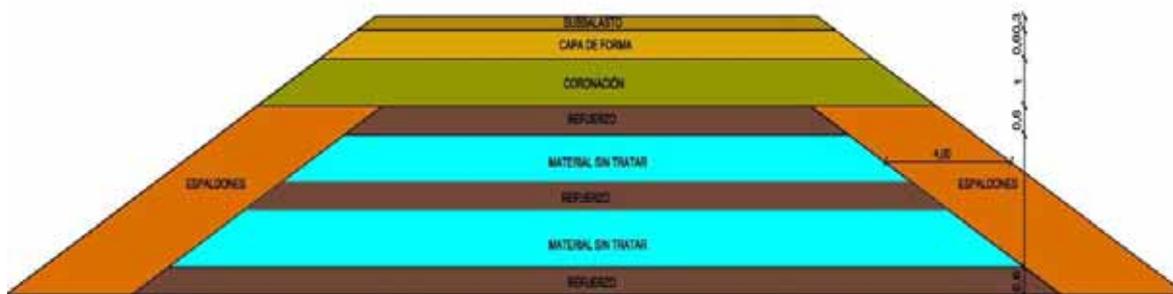


Figura 7. Sección tipo para terraplén de altura mayor de 5 m.

4.3 Procedimiento de ejecución

A continuación se describe el conjunto de labores a realizar para conseguir el suelo tratado con cal, resultante de la mezcla homogénea y uniforme de un suelo con cal, a fin de mejorar las características geotécnicas y de trabajabilidad del mismo. El método constructivo adoptado para esta obra ha sido mezcla "in situ".

Materiales

Cal clase I, cales vivas, de alto contenido en calcio o dolomíticas en grano o micronizadas.

Ejecución

- Preparación de la superficie existente y comprobación de las condiciones de compactación y geometría de la capa subyacente.
- Disgregación del suelo previo al mezclado mediante bull-dozer para evitar la aparición de grumos que impidan la mezcla homogénea con la cal y disminuyan la eficacia del tratamiento.
- Control de la humedad mediante adición de agua por cisterna o desecación del suelo mediante oreo, adición de material seco o mezcla con cal viva según los casos, hasta conseguir la humedad deseada, siempre de forma uniforme.
- Distribución uniforme de la cal con la dosificación fijada en la fórmula de trabajo, mediante extendedora con dosificador volumétrico servodirigido con la velocidad de avance.
- Se ha empleado la vía seca, en forma de polvo a granel, fijando la anchura y el caudal de extendido en función de la dosificación de cal prevista y el espesor de capa a tratar.
- Mezclado del suelo inmediatamente después de la distribución de la cal (< 3 h. desde el extendido), mediante recicladora – estabilizadora. La mezcla deberá conseguir una dispersión homogénea de la cal, que se reconocerá por su color uniforme y la ausencia de grumos.
- Compactación mediante compactador vibratorio mixto, en una sola tongada, de manera continua y uniforme, hasta alcanzar la densidad especificada en el Pliego.
- Refino con motoniveladora, eliminando irregularidades, huellas o discontinuidades, para lo cual se podrá aprobar la realización de una ligera escarificación de la superficie y su posterior recompactación previa adición del agua necesaria.
- Acabado de la superficie. La superficie del suelo tratado con cal se conformará hasta alcanzar las rasantes y perfiles señalados en los planos, con las tolerancias establecidas en el Proyecto para cada capa.

4.4 Resultados obtenidos

En la tabla de la figura 8 se visualiza de forma directa cómo cambian las características de los materiales estabilizados así como los datos de Hinchamiento, CBR, límites de plasticidad, antes y después de ejecutar la estabilización con la cal.

		PK	Indice de Plasticidad	CBR (7 DIAS)	HINCHAMIENTO	ENSAYO PROCTOR	
						Densidad	Humedad
ENSAYO 1	mat origen	9+980	15,4	3,9	1,36	1,83	13,8
	mat tratado	12+900	0	61,2	0	1,77	14,7
ENSAYO 2	mat origen	9+980	12,2	6,2	1,51	1,89	12,5
	mat tratado	13+080	0	75	0	1,82	12,4
ENSAYO 3	mat origen	9+960	13,6	3,2	1,68	1,85	12,3
	mat tratado	13+200	0	74,6	0	1,78	11,1
ENSAYO 4	mat origen	10+040	19,5	3	3,61	1,76	13,9
	mat tratado	13+260	0	68,5	0,29	1,83	13,6
ENSAYO 5	mat origen	10+040	17,7	6,4	2,22	1,88	12,8
	mat tratado	12+980	0	112,1	0,65	1,85	15,3
ENSAYO 6	mat origen	10+040	13,6	2,4	2,59	1,86	12,1
	mat tratado	5+060	0	116,5	0	1,80	16,2
ENSAYO 7	mat origen	10+060	15,5	3,8	2,67	1,87	11,5
	mat tratado	4+760	0	72,5	0,13	1,88	13,7

Figura 8. Resultados comparativos antes y después del tratamiento con cal.

En las figuras 9 y 10 se acompañan dos gráficos ilustrativos del valor del CBR y del hinchamiento antes y después de haberse producido el tratamiento con cal.

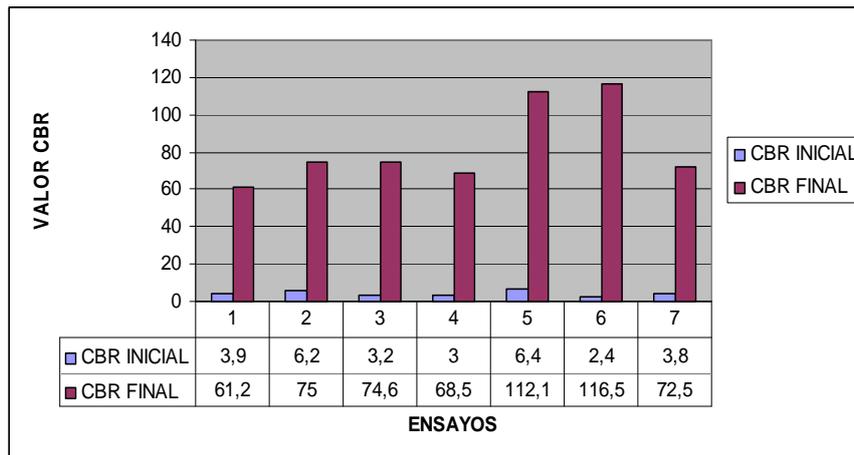


Figura 9. Gráfico comparativo del CBR antes y después del tratamiento con cal.

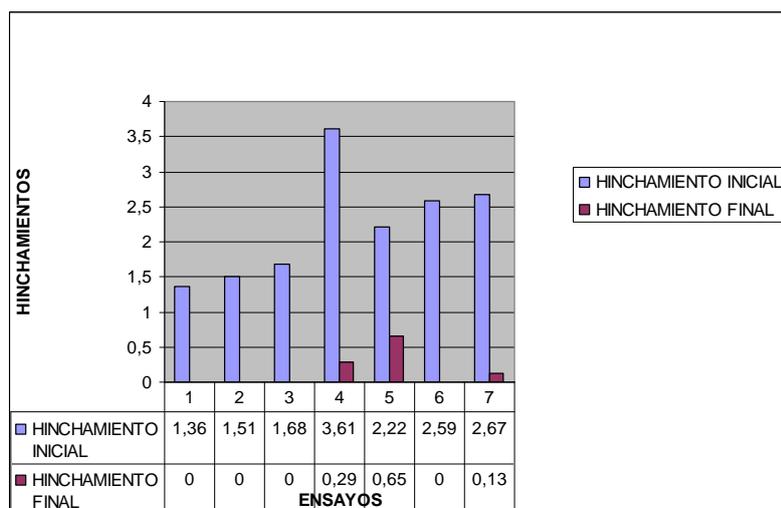


Figura 10. Gráfico comparativo del hinchamiento antes y después del tratamiento con cal.

5. CONCLUSIONES

La estabilización con cal es una herramienta que se encuentra a disposición del Ingeniero en la construcción de plataformas, y que hasta la fecha se ha empleado en múltiples ocasiones en obras de carretera pero de la que existe poca experiencia en obras ferroviarias en España.

Dada la problemática cada vez más generalizada de obtención de materiales adecuados para ejecutar terraplenes y debido a los problemas ambientales y sociales derivados de esta situación, así como los importantes costes económicos que suponen, el Ingeniero siempre debe estudiar la viabilidad de soluciones alternativas como la planteada, que permiten minimizar los problemas y costes mencionados.

A pesar de todo, la estabilización con cal, no puede ser considerada una solución estándar, sino que debe ser estudiada en profundidad previamente a su adopción, evaluando la idoneidad de los materiales para este tratamiento (mejoras obtenidas con el tratamiento, ausencia de yesos en el material a estabilizar, etc) y el coste final de la operación (en el que tiene un gran peso el % de cal a utilizar).

En el caso particular de la obra Tocón – Valderrubio, se puede concluir que la estabilización con cal ha sido una solución técnica muy adecuada, que ha aportado una gran calidad final a la obra, y que ha permitido minimizar los problemas ambientales y sociales mencionados, reduciendo los costes.