

Reciclado de material asimilable a lodo procedente de la excavación de pantallas en la Ampliación del Campo de Vuelos del Aeropuerto de Málaga

Una tecnología pionera, innovadora y respetuosa con el medio ambiente

Recycling of slurry type material from the excavation of retaining
walls in the enlargement of the airfield at Malaga Airport.

Pioneering, innovative and environmentally-friendly technology

José Daniel García Espinel. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Director de Departamento de Implantación e Innovación. Dirección de I+D+i, ACCIONA Infraestructuras.
jgarcia4@acciona.es

Alfonso González Barrios. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Jefe de obra del Departamento de Implantación e innovación. Dirección de I+D+i, ACCIONA Infraestructuras.
agonzalez18@acciona.es

Javier de Miguel Fuentevilla. Ingeniero de Minas
Técnico del grupo de obras subterráneas. Dirección de I+D+i, ACCIONA Infraestructuras. JMiguel4@acciona.es

Faiver Botello Rojas. Ingeniero Civil
Jefe del Grupo de Geotecnia y suelos de la Dirección de I+D+i, ACCIONA Infraestructuras. fbotello@acciona.es

Jorge Gómez Hoyos. Ingeniero de Minas
Jefe del Grupo de Obras Subterráneas de la Dirección de I+D+i, ACCIONA Infraestructuras. jgomez12@acciona.es

Resumen: En la obra de "Ampliación del Campo de Vuelos del Aeropuerto de Málaga", la Dirección de I+D+i de ACCIONA Infraestructuras ha desarrollado y aplicado con éxito la tecnología para poder reciclar un material asimilable a lodo, procedente de la excavación de los muros pantallas. De esta manera se consigue evitar tener que llevar este material a vertedero reutilizándolos para la ejecución del terraplén de ciertas zonas delimitadas del aeropuerto, evitando el fuerte impacto medioambiental que generaría dicho vertedero, reduciendo las molestias al tráfico en el entorno de la obra y disminuyendo las toneladas de CO2 emitidas a la atmósfera al disminuir drásticamente el transporte de camiones entre la obra y los vertederos.

Palabras Clave: Pantallas; Lodos; Cal; I+D; ACCIONA

Abstract: During the construction of the project "Ampliación del Campo de Vuelos del Aeropuerto de Málaga", R&D Division of ACCIONA Infraestructuras has developed and applied successfully a technology that allows to recycle the mud produced during the excavation works for making concrete diaphragm walls. Applying this technology we reach different goals: we can recycle the mud produced and use it to build the embankment of the landing strip of the airport, avoiding the strong environmental problems that produces mud dumps, reduce the traffic of soil transport vehicles around the site and also we decrease the emission of CO2 gases to the atmosphere because of the reduction of travels between the site and the mud dump.

Keywords: Diaphragm walls; Mud; Lime; R&D; ACCIONA

1. Introducción

La obra "Ampliación del campo de vuelos, Obra civil, Aeropuerto de Málaga", que está realizando ACCIONA Infraestructuras para AENA, contempla la

ejecución de una elevada cantidad de pantallas que generaran un gran volumen de material de excavación asimilable a lodos de escasa trabajabilidad por su elevada humedad, descartando su empleo en la construcción de terraplenes.



Fig. 1.
Fotografía aérea de la obra Ampliación del Campo de Vuelo del Aeropuerto de Málaga y área del tratamiento con cal in situ de los lodos de pantallas delimitada por línea amarilla.

El material procedente de la excavación de las pantallas estaba previsto llevarlo a vertedero una vez finalizado la excavación de todos los muros – pantalla y para la ejecución del terraplén de la pista de vuelo estaba planificado aportar materiales de préstamo al no haber suficiente material dentro de la obra.

Desde la Dirección de I+D de ACCIONA infraestructuras, se planteó desarrollar la tecnología de secado de suelos arcillosos con cal para poder aplicarla en el material asimilable a lodo procedente de la excavación de muros – pantallas. Esta actuación se realizaría por primera vez en nuestro país, y permitiría reutilizar y reciclar todo el volumen de lodo de los muros – pantalla.

Los resultados del estudio de viabilidad del tratamiento con cal del material de los muros – pantallas a escala de laboratorio y real confirmaron que el lodo era originalmente inadecuado para su uso en la obra. Sin embargo con una cantidad relativamente reducida aportada de cal se podía convertir en un material apto para su uso como terraplén en ciertas zonas muy específicas de la obra que permitían incorporar un material que finalmente cumplía incluso como adecuado según la clasificación del suelo del PG-3.

2. Antecedentes

2.1. Problemática de la obra

La obra de Ampliación del Campo de Vuelos del aeropuerto de Málaga comprende, la construcción de la nueva pista de vuelo 12-30 y sus obras complementarias (plataforma, rodaduras y edificio S.E.I), así como el soterramiento de la línea de ferrocarril de cercanías Málaga - Fuengirola, tramo Los Prados – N340 conectando la línea con la nueva Terminal.

El gran número de muros pantalla a excavar representaba un gran volumen de material mezclado con lodos bentoníticos que por sus propiedades geotécnicas no era apto como material de construcción para terraplenes dentro de la obra, por su escasa trabajabilidad y alto contenido de humedad. El material asimilable a lodo procedente de la excavación de pantallas se estaba acopiando en una franja externa de la obra cubriendo un volumen de aproximadamente 100.000 m³.

La obra por razones del tipo medioambiental y económico estaba interesada en el empleo y reutili-

zación, dentro de lo posible, de los suelos existentes en la obra, al tratarse de una obra deficitaria en tierras, pero el estado en que se obtenía y acopiaba el material de excavación de las pantallas no dejaba otra opción que su retirada y almacenamiento en vertederos.

Además del problema medioambiental que genera el depósito en vertedero de estos materiales, el transporte de los mismos generaba ya de por sí una afectación importante al medioambiente por las emisiones de los vehículos durante su transporte a varios kilómetros y la posibilidad de derrames o vertidos accidentales de los transportes del material asimilable a lodo en camiones al salir de la obra.

La Dirección de I+D+i contactó con la obra y tras estudiar el problema propuso una alternativa al transporte al vertedero. La opción planteada desde la Dirección de I+D de ACCIONA Infraestructuras, consistió en aplicar la tecnología de secado de suelos arcillosos con cal a los materiales asimilables a lodos procedente de la excavación de muros - pantallas, una alternativa de la que se conoce su aplicación en la construcción de carreteras y que permitiría reutilizar y reciclar todo el volumen de lodos a generar.

La utilización de cal es una práctica tradicional y ampliamente conocida para carreteras en tratamientos de secado de suelos y en la estabilización de los mismos.

En líneas generales la estabilización de suelos arcillosos mejora la trabajabilidad, facilitando su puesta en obra, reduciendo su plasticidad y su naturaleza expansiva y mejora las propiedades mecánicas del suelo tratado.

Tras petición por parte de la obra a la Dirección de I+D+i, se encomendó el estudio integral de la viabilidad del tratamiento con cal del material asimilable a lodos procedente de la excavación de los muros - pantallas a escala de laboratorio. A posteriori se realizaría un tramo de prueba, para demostrar la viabilidad de la implantación de esta tecnología en la obra.

2.2. Aplicaciones previas para tratamiento de secado de lodos con cal en obras subterráneas

Para el desarrollo de este estudio se tomó como partida la experiencia publicada en la revista "Ingeniería civil", "Tratamiento con cal de los materiales procedentes de la excavación con tuneladora de la línea 11 del plan de ampliación del Metro de Madrid (2003-2007)"

que tenía de autores a José María Díaz Retana, Rosa Olive Barrau, Nieves Nieto Ruiz de Zárate, Carlos Oteo Mazo y Jose Daniel García Espinel.

3. Características geológico - geotécnicas del material asimilable a lodo procedente de la excavación de muros - pantalla

3.1. Litologías principales

El trazado del área de estudio se ubica en las facies fluviales y de estuario interiores del río Guadalhorce, situado muy cerca de su desembocadura. La cuenca sedimentaria del bajo Guadalhorce se encuentra delimitada por los materiales pliocenos, de sus bordes y las fallas de margen de las sierras. Los depósitos fluviales asociados al río Guadalhorce son muy importantes, existiendo una gradación de facies detríticas más groseras a mas finas de estos márgenes hacia el eje de la cuenca. Litológicamente los aluviales del Guadalhorce se corresponden con secuencias detríticas muy heterogéneas de gravas, arenas, limos y arcillas, donde aparecen bolsas de fangos orgánicos y arcillas grises asociadas a la antigua desembocadura del estuario y al abandono de canales activos.

3.2. Caracterización del lodo procedente de las pantallas mediante ensayos de laboratorio

Antes de proceder a realizar el tratamiento en obra, fue preciso realizar una campaña de ensayos de laboratorio con objeto de caracterizar el lodo y estudiar los efectos a corto plazo de la cal sobre la humedad del material, estudiar las características de la mezcla resultante en la fabricación de material de relleno y ver si era apto para su empleo en terraplén y/o explanada y determinar la dosificación óptima de cal que obtuviera las condiciones de calidad del PG-3 acordes al tipo de aplicación en obra que se quisiera dar al material resultante tras el tratamiento de secado.

Los ensayos se llevaron a cabo en los laboratorios del centro tecnológico de I+D+i de ACCIONA Infraestructuras S.A., que se encuentra ubicado en Alcobendas (Madrid) y en el laboratorio de autocontrol en obra (Sergeyco). Se realizaron ensayos puntuales complementarios o de contraste, desprendiendo los siguientes resultados:

Fig. 2. Aspecto del lodo tratado con el 2% de cal tras 20 minutos después del mezclado.



• *Ensayos de naturaleza*

El material asimilable a lodo contenía un 88% de finos que pasan por el tamiz UNE 0,08, desconociéndose las cantidades de limos y arcillas. Presentaba un 28,23% de humedad natural y un índice plástico de 14,70.

• *Ensayos de estado*

“Uno de los ensayos mas utilizados en el estudio de los suelos para la construcción de terraplenes corresponde al de compactación Próctor. Este relevante procedimiento de control de compactación de suelos, fue descrito por primera vez por R. R. Proctor del Bureau of Waterworks and Supply (Los Angeles), en 1933, en la revista *Engineering News - Record*, en el artículo titulado “*Fundamental Principles of Soil Compaction*” para el diseño y construcción de presas de materiales sueltos, “*Four Articles on the Design and Construction of Rolled - earth Dams*”.”

En el caso que nos ocupa, y según el ensayo Proctor modificado, el material asimilable a lodo tiene una densidad seca máxima de 1,71 gr/cm³ para una humedad óptima de 16,07%, presentando una curva de campana que denota la sensibilidad del lodo al agua de compactación.

Por otro lado, el material presenta una capacidad portante CBR =1. El índice de colapso determinado es de 0,05%, y con el ensayo de hinchamiento libre se demuestran las características expansivas del material, al obtener un hinchamiento libre de 7,50%

• *Ensayos químicos*

El material tiene un carácter básico con un Ph= 8,75, con un <1 % de materia orgánica, <1 % de sales solubles no existiendo sulfatos solubles en el lodo.

• *Conclusiones de los ensayos de laboratorio*

Los resultados de la caracterización del material en origen lo clasificaban como Inadecuado según el artículo 330 del PG-3, por presentar alta expansividad (7,5% hinchamiento libre) y un CBR=1,00, valor inferior al mínimo necesario para materiales en cimientos y núcleo de terraplén, no presentando aptitudes para ser empleado en terraplén ni explanadas, y además siendo un material que en estado natural no facilitaba su trabajabilidad por su exceso de humedad y alta plasticidad.

Los parámetros geotécnicos del material asimilable a lodo descartaban a priori su empleo en la construcción de estructuras de terraplenes y obligaba a la necesidad de ser llevado a vertedero.

Tabla 1. Variación de la humedad en función del % de cal

Humedad natural : 28.23%		Límite Plástico : 19.2		
Tiempo (h)	Humedad			
	Lodos + 1 % Cal	Lodos + 2 % Cal	Lodos + 3 % Cal	Lodos + 5 % Cal
0,00	28,23	28,23	28,23	28,23
0,25	28,03	28,20	27,89	25,12
2,00	27,65	28,14	26,97	24,24
6,00	27,23	26,71	26,41	24,00
8,00	27,08	26,59	26,02	23,88
24,00	26,53	26,11	25,24	22,88
48,00	25,44	23,81	22,32	19,90
72,00	22,38	22,00	20,90	17,95
168,00	16,88	15,73	13,74	12,60

4. Estudio del comportamiento del lodo tratado con cal viva a corto y largo plazo

Se estudió en esta fase la variación de las propiedades geotécnicas del material asimilable a lodo tratado las primeras dos semanas, obteniendo los siguientes resultados:

4.1. Variación de la humedad en función del tiempo

• *Variación de la humedad en función del tiempo sin adición de cal*

Fue importante conocer la disminución de la humedad con el tiempo del material sin aporte de cal, considerando que todo el material excavado de los

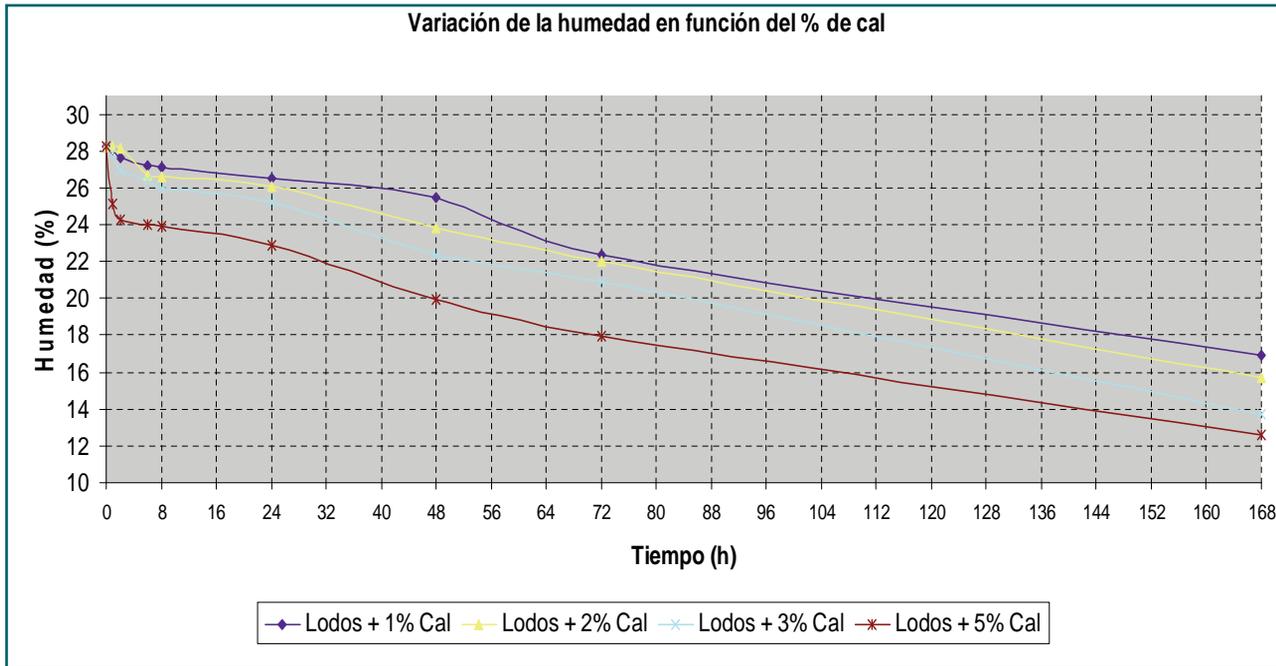


Fig. 3. Gráfico de la variación de la humedad en función del % de cal aplicado.

muros – pantalla antes de reutilizarse estaba preocupado y con el tiempo se estaban oreando con lo que su humedad disminuía, se dejó una muestra en estado natural sin tratar con cal, determinando el grado de secado y midiendo humedades en los periodos de 1,2,6,8,24,48,72 y 168 horas.

• *Variación de la humedad en función del tiempo con adición de cal viva*

Se determinó la evolución de la humedad con el tiempo al ser mezclado el material asimilable a lodo con cal en condiciones ambientales normales. Se realizó para 4 dosificaciones distintas del 1,2,3 y 5%. Los periodos estudiados fueron de 1,2,6,8,24,48,72 y 168 horas.

4.2. Efectos del contenido de la cal sobre la plasticidad del suelo

Mediante las distintas dosificaciones con cal viva sobre el material asimilable a lodo de las pantallas, se procedió a determinar los límites de Atterberg y el índice de plasticidad mostrando la disminución de la plasticidad del lodo con el aumento del % de adición de cal.

La disminución de la plasticidad convierte al material asimilable a lodo en un agregado mas granular, mejorando a corto plazo su trabajabilidad.

Tabla 2. Disminución del Ip en función del % de cal a los 7 días

Dosificación de cal (%)	Índice plástico
0	14,7
1	14,3
2	13,2
3	12,2
5	10,9

Tabla 3. Aumento del C.B.R. según el % de cal

Dosificación de cal (%)	C.B.R
0	1,00
1	14,20
2	21,20
3	33,40
5	39,10

4.3. Efectos de la cal sobre la capacidad portante del suelo (índice CBR)

El índice CBR de los materiales tratados con cal aumenta significativamente, tanto a corto como a largo plazo tal como se puede apreciar en las tabla 2 y 3.

La capacidad portante del suelo va aumentando conforme se incrementa el contenido de cal y se justifi-

Tabla 4. Variación del hinchamiento en endómetro según el % de cal	
Dosificación de cal (%)	Hinchamiento libre (%)
0	7,50
1	2,25
2	1,80
3	1,70
5	0,20

Tabla 5. Parámetros de compactación para distintas dosificaciones de cal		
% Cal	Y _{max}	Wop
0	1,71	16,07
1	1,59	22,00
2	1,55	23,60
3	1,52	26,60
5	1,52	27,30

fica, incluso para un 1% de cal en la mezcla, su aptitud para formar parte en los cimientos y núcleo en terraplén, y a pesar de no ser un suelo tipo adecuado por su contenido en sales solubles, cumpliría con las

condiciones de capacidad de soporte exigidas para su uso en coronación de terraplén

A su vez, se contempla que una mezcla con un 2% de cal puede conseguir adecuadamente la capacidad portante (CBR \geq 6) exigida a un suelo estabilizado tipo 1 (S-EST1), para su hipotético uso en la formación de explanadas, lo cual no fue el caso de esta obra.

4.4. Efectos de la estabilización con cal sobre la colapsabilidad del suelo

Los resultados muestran un descenso hasta valores casi nulos de colapsabilidad de las distintas mezclas lodo - cal, a partir de la dosificación de 1% de cal, definiendo al suelo como expansivo a la vista del hinchamiento para una carga de 0,2 MPa.

4.5. Efectos de la estabilización con cal sobre la expansividad de suelo (hinchamiento libre)

A partir del 1 % de cal viva en la mezcla, se observó que el hinchamiento libre se redujo hasta 2,25 %, entrando dentro de los valores aptos para su empleo en rellenos de terraplenes al ser el valor inferior al 3%,

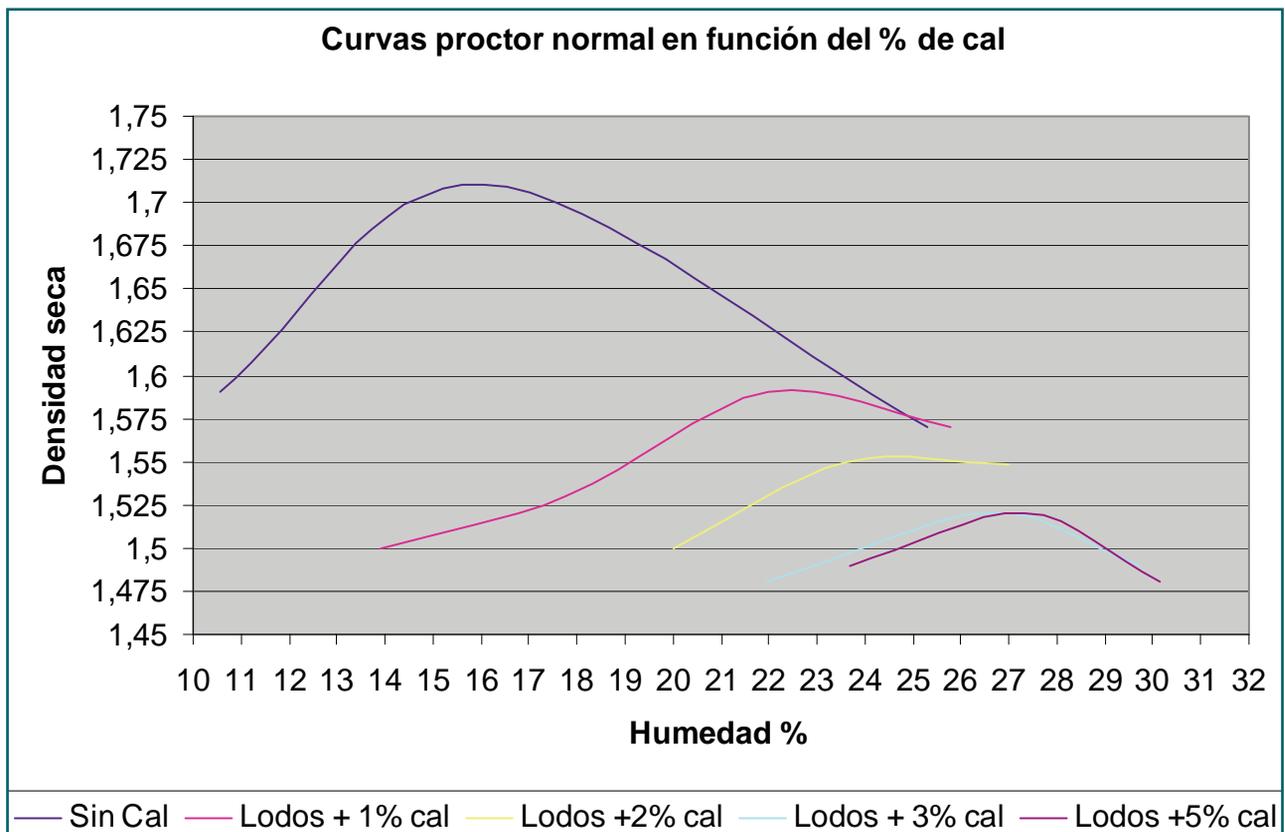


Fig. 4. Curvas Proctor normal en función del % de cal.

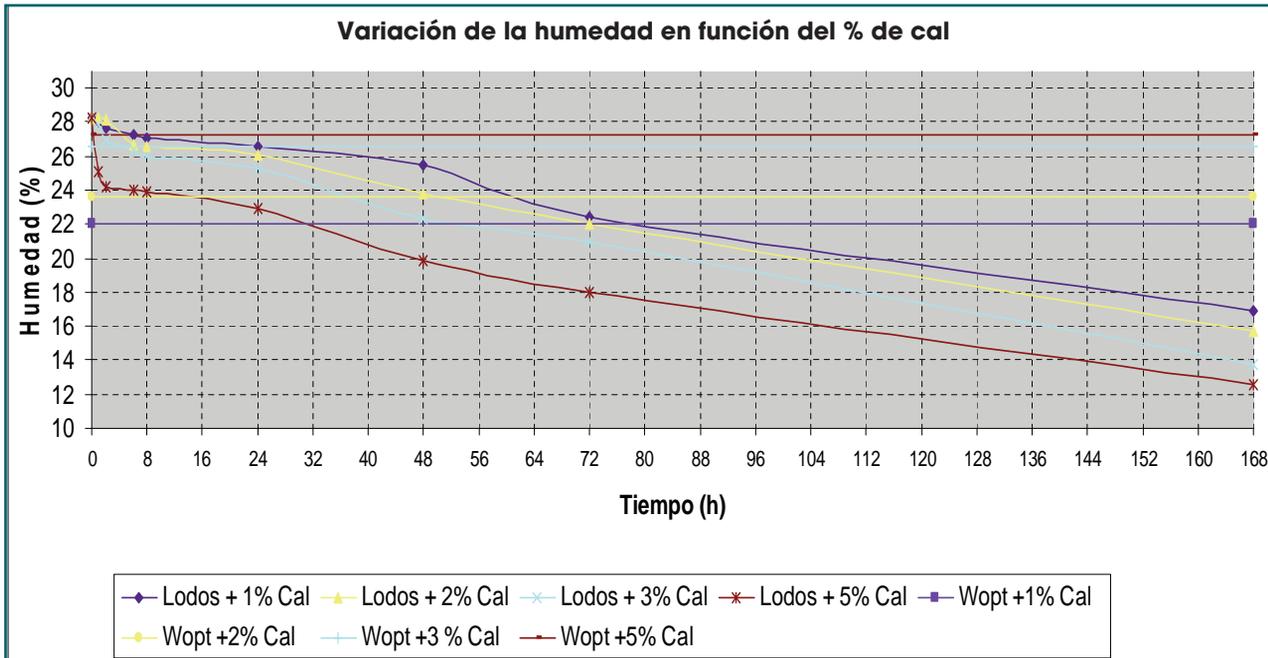


Fig 5. Tiempos de espera entre el tratamiento de secado y su aplicación para terraplén en función del % de cal empleado.

como indica el PG-3 definitivamente se pudo clasificar como **suelo tolerable**. Las mezclas con dosificaciones ascendentes de cal indicaban un descenso gradual del hinchamiento, disminuyendo la susceptibilidad de este lodo a expandirse bajo presencia de agua y carga.

4.6. Efectos de la adición de cal en las condiciones de compactación Proctor

Al mezclar el material asimilable a lodo con cal la densidad seca máxima próctor tiende a reducirse, mientras que la humedad óptima de compactación aumenta. La curva de compactación se hace en general más plana, con lo cual es menor la sensibilidad del material asimilable a lodo tratado con cal al agua de compactación, lo que da lugar a que el control de humedad sea menos crítico para conseguir un estado de máxima compactación, reduciendo asimismo el rango de densidades del material compactado y facilitando la compactación.

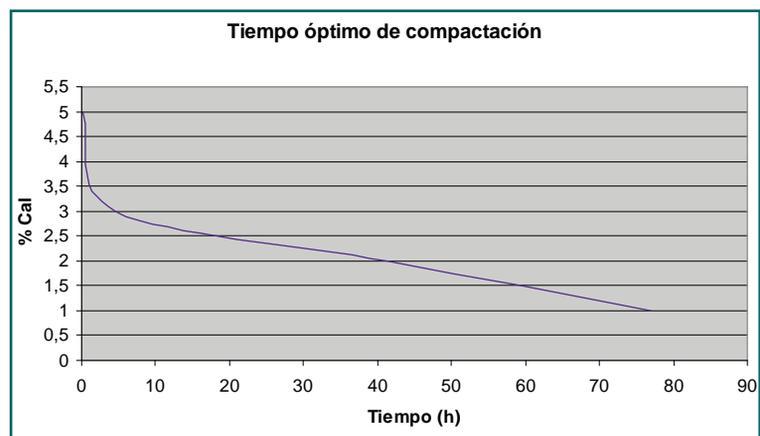
4.7. Determinación del tiempo de compactación en función del contenido de cal en la mezcla

El factor del tiempo necesario para la compactación es el punto clave del análisis realizado, ya que en función de la evolución de las humedades con distintos % de tratamiento con cal a lo largo del tiempo y

Tabla 6. Tiempos de espera entre el tratamiento de secado y su aplicación para terraplén en función del % de cal empleado	
% Cal	T Wopt (horas)
1	77,00
2	51,50
3	4,20
5	0,25

humedad óptima de compactación se puede definir y marcar claramente el tiempo de espera desde la extracción del material asimilable a lodo proveniente de las pantallas hasta su uso en terraplén.

Fig. 6. Curva de diseño del lugar de tratamiento de lodos.



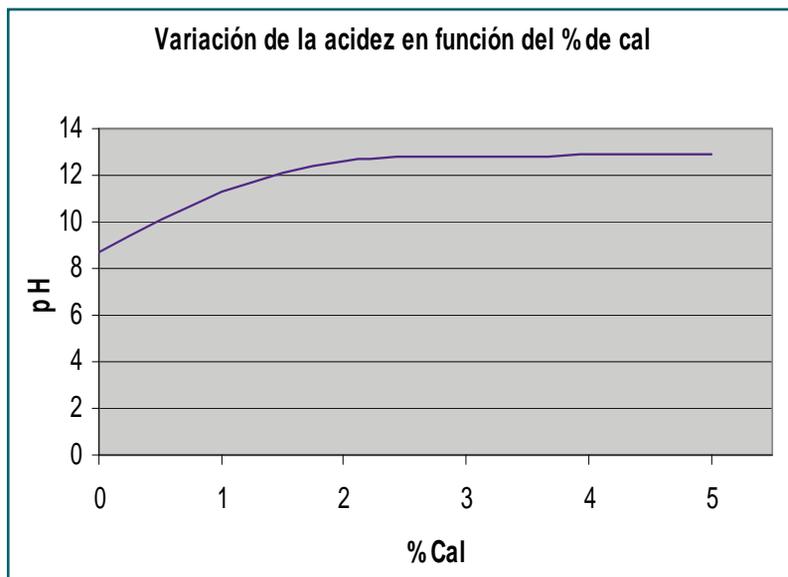
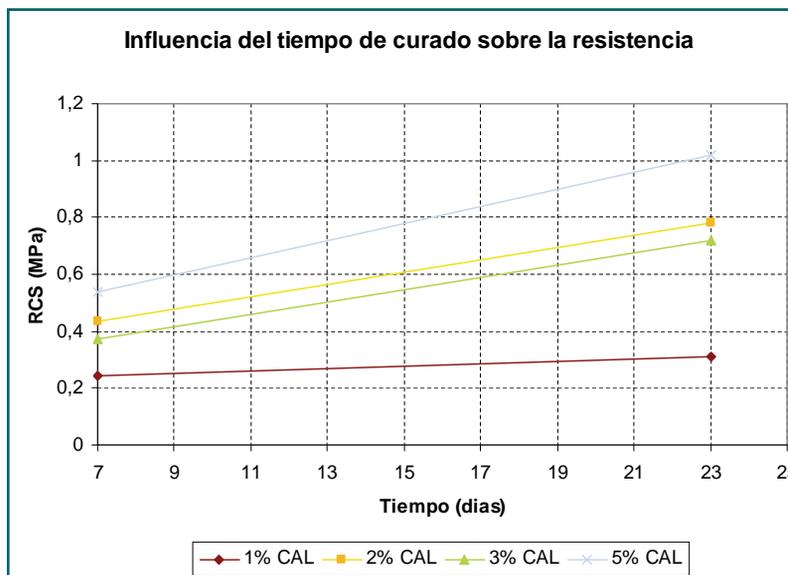


Fig. 7. Variación de la acidez en función del % de cal.

Es importante reseñar que tras el tratamiento del material asimilable a lodo con distintos % de cal la humedad óptima de compactación aumenta, mientras que la densidad máxima disminuye. Por ello se utiliza por un lado la humedad de compactación para definir el tiempo que tiene que discurrir entre la realización del tratamiento de secado hasta su puesta en obra en el terraplén (tabla 6).

Por otro lado la densidad máxima de compactación disminuye en el suelo tratado, lo cual nos marca el valor a utilizar durante el control de calidad de ejecución del terraplén para garantizar la correcta compactación de las capas del terraplén.

Fig. 8. Influencia del tiempo de curado sobre la resistencia a compresión simple del lodo.



Con los datos obtenidos se puede calcular la curva de diseño para el tratamiento del material asimilable a lodo (Fig. 5). En esta curva se reflejan por un lado el % de cal y por otro el tiempo que hace falta esperar entre el tratamiento y su aplicación.

Con esta curva y con el dato de rendimiento de extracción de material se puede obtener el espacio necesario para tratar los m3 de material procedente de la excavación en función de la tasa de tratamiento que se quiera emplear. También puede realizarse a la inversa y utilizar esta curva para en base al espacio disponible en el terraplén, o los rendimientos de las máquinas estabilizadoras y de movimiento de tierras, definir el % de cal a emplear.

En nuestro caso se optó por una tasa de tratamiento con cal del 2,25 % para ajustarse a los rendimientos de producción de material y de tratamiento en el terraplén (24 horas).

4.8 Influencia del Ph en las reacciones de cementación a largo plazo

La adición de cal da lugar a un medio básico necesario para solubilizar la sílice y la alúmina de la arcilla, y proporciona al mismo tiempo los cationes de calcio libre necesarios para la reacción puzolánica, dando lugar a silicatos y aluminatos de calcio hidratados, que son básicamente los mismos compuestos que se producen en la hidratación del cemento convencional.

El resultado final es una cementación progresiva del terreno estabilizado, que puede seguir desarrollándose a lo largo de bastantes años en tanto en cuanto siga manteniéndose un pH elevado y exista calcio libre.

Muchos suelos tienen un pH próximo a la neutralidad y a medida que se aumentan los contenidos de cal de la mezcla, esta se va haciendo más básica, aumentando su pH hasta alcanzar finalmente un valor de 12,50, situación en la que se alcanzan las condiciones empíricas de estabilización máxima. A partir de este momento el pH no cambiaría independientemente del % de cal de la mezcla

El pH aumenta paulatinamente ante contenidos crecientes de cal, observando que a partir de un 2% de cal disminuye la pendiente y la curva se suaviza, lo que indica que se alcanza el efecto estabilizador máximo, no aumentando el pH a pesar de aumentar los contenidos de cal, con lo cual para contenidos mínimos del 2% de cal se asegura la solubilidad de la sílice

y alúmina de los suelos y por consiguiente las reacciones puzolánicas.

4.9. Influencia de los contenidos de cal y del tiempo de curado en la resistencia a compresión simple

El aumento del % de cal en la mezcla produce un aumento en su resistencia a la compresión debido a que se favorece con el medio básico la formación de las reacciones puzolánicas.

A su vez la resistencia aumenta con el tiempo de manera continuada como lo demuestra a los 23 días, produciéndose un aumento de la resistencia de forma progresiva al cabo de los años.

5. Ejecución de un tramo de prueba

Para comprobar la viabilidad del tratamiento de cal de los lodos de muros – pantalla en obra a escala real y contrastar los resultados positivos obtenidos en laboratorio, se decidió la ejecución de un tramo de prueba en la propia obra.

La ubicación del tramo de prueba estaba comprendida entre ejes 5/6, PK 2+200 y 2+300, donde había material acopiado procedente de la excavación de diferentes pantallas, ocupando una superficie aproximada de 2000 m³.

Se acotaron 3 zonas en el tramo de prueba con distintos porcentajes de cal, y se definieron en:

- Tramo 1 (aportación de 1,5 % de cal), tramo 2 (aportación de 2 % de cal) y tramo 3 (aportación de 2,5% de cal).

Los medios materiales empleados, fueron los siguientes. Materiales: aproximadamente 4.000 Kg. de cal viva. Maquinaria: tractor de cadenas con pala cargadora, bulldozer, retroexcavadora de cadenas, motoniveladora y rodillo compactador.

El proceso de ejecución fue el siguiente:

- Inicialmente se realizó el extendido y preparación del material acopiado en la zona donde se realiza la prueba. Posteriormente se delimitó cada uno de los 3 tramos. Una vez extendido el material se inició una nivelación para conseguir aproximar la capa al espesor requerido. Se realizó una escarificación y desterronado del suelo para conseguir una ma-



Fig. 9. Extendido y nivelación.

yor homogeneización de la mezcla y se procedió al extendido y mezclado en cada tramo de la cantidad de cal previamente definida. Finalmente se niveló y compactó.

- El material utilizado en el tramo de prueba no se encontraba en las mismas condiciones que el material ensayado en el laboratorio, ya que aparte de ser distintos materiales sus condiciones de humedad no eran las mismas. La humedad del material de los ensayos de campo era variable entre 11,1% y 19,2% frente a la de los ensayos de laboratorio que era de un 28,23%. Esto se debió a que el material utilizado para los ensayos de laboratorio se obtuvo directamente de la excavación de una

Fig. 10. Aportación de cal y mezclado.





Fig. 11. Nivelación y compactado.

pantalla y el material para el tramo de prueba llevaba un tiempo precopiado en el exterior.

- Adicionalmente el material a tratar proveniente de la excavación de los muros pantalla no era homogéneo, habiendo desde gravas con arenas (en menor porcentaje) a suelos limo-arcillosos, esto nos lleva a tener valores dispares, tanto en humedades como en densidades, siendo difícil de establecer un único proctor de referencia, por lo que se propuso tomar 3 muestras por tramo en función del tipo de terreno.
- Para la realización de la aplicación a nivel de obra se recomendó con objeto de solucionar los problemas de la heterogeneidad del material, la obtención de la densidad máxima de compactación en función del terreno y con un muestreo diario.



Fig. 12. Toma de densidades "in situ".

- Finalmente los resultados del tramo de prueba fueron satisfactorios al confirmarse los valores obtenidos en los ensayos de laboratorio de modo que se dio el visto bueno a la aplicación de la tecnología y se pasó a la siguiente fase que fue su aplicación en obra.

6. Conclusiones tras al ejecución del tramo de prueba

Una vez analizados los resultados de los ensayos de laboratorio y del tramo de prueba se pudo concluir que era posible la aplicación de la tecnología de secado con cal a los lodos procedentes de la excavación de las pantallas de hormigón armado, permitiendo su reutilización en la obra y evitando llevarlos al vertedero.

Para ello la dosificación de cal necesaria se ha de realizar en función del tiempo y del espacio del que se disponga para realizar el tratamiento y poder llegar a la humedad óptima de compactación necesaria para poder hacer el terraplén con los lodos tratados según lo indicado en la gráfica 6 del apartado anterior.

Una vez definidos los porcentajes de aplicación de la cal y el tiempo necesario para su tratamiento se puede utilizar el material resultante en dos posibles aplicaciones:

6.1. Material para terraplenes

Tal como indica la caracterización del material asimilable a lodo, este pasa de ser inadecuado a ser tolerable tras la el tratamiento con cal, principalmente por su granulometría y por el contenido de sales solubles. El CBR del material tras el tratamiento alcanza a partir de 1% de cal un valor de 14,20 y el hinchamiento libre desciende hasta 2,25 por lo que puede ser empleado en cualquier parte del terraplén, aunque es aconsejable no utilizarlo en coronación ya que en caso de que el mezclado no se haga correctamente pueden haber ciertos puntos donde no se consiga el CBR necesario.

Se recomienda una dosificación superior al 2% de cal ya que supera la capacidad portante en todas las zonas del terraplén con un CBR = 21,10, a su vez se alcanza el máximo de basicidad que garantiza producción de reacciones puzolánicas que propician la formación de compuestos del cemento y a largo plazo se alcanzan valores de 1 MPa de RCS.

6.2. Material para explanada

Tal como se indican en los resultados de laboratorio y a escala real se puede observar que es posible utilizar el material una vez tratado con cal en explanadas como un suelo estabilizado tipo 1 (SEST 1), lo cual puede ser interesante de cara a reestudiar la sección de explanada.

De cualquier manera para poder utilizar el lodo tratado en esta aplicación es preciso que se pueda garantizar que la dosificación y el mezclado se hagan perfectamente hasta conseguir un perfecto contacto de la cal con todo el suelo.

7. Implantación en obra de la tecnología de tratamiento con cal de los lodos procedentes de la excavación de muros - pantalla

Las fases de ejecución fueron las siguientes: extendido de lodos, aportación de cal, mezcla, nivelación y compactación. Dada la variabilidad en las características del material era preciso determinar la densidad y humedad óptimas de compactación del material en el tajo, por lo que se dividía en dos fases de trabajo, una primera de aportación y extendido del lodo y otra de aportación de la cal, mezclado, nivelación y compactación. El desfase entre ambas fases era el necesario para la realización del ensayo próctor que nos aportaba el valor de la densidad máxima debido a la heterogeneidad del material empleado.

El material asimilable a lodo aportado procedía en parte directamente de la excavación de las pantallas y en parte de un preacopio conformado durante la fase de realización del estudio de viabilidad realizado por la obra. Esta última fracción, superior a la procedente de la excavación de las pantallas, permitía dar continuidad al tajo.

Tras el extendido del material se tomaba una muestra para la determinación de la densidad óptima de compactación, la cual una vez conocida, permitía la validación de la capa mediante la determinación in situ de la densidad tras las fases de aportación de la cal, mezcla, nivelación y compactación, tal como se determinó en el tramo de prueba.

La aportación de la cal y su mezclado con el lodo se realizaba mediante un tren de reciclado (repartidor de cal tipo "Panien" y recicladora-mezcladora). La nivelación y la compactación se llevaban



a cabo mediante motoniveladora y rodillo vibratorio respectivamente.

Fig. 13. (Arriba y abajo). Detalle de la descarga y vista general del tajo tras la aportación del material.

8. Conclusiones finales. Ventajas del tratamiento con cal del lodo de los muros - pantalla

La implantación de la tecnología de secado del material asimilable a lodo procedente de la excavación de muros - pantalla en la obra de la Ampliación del Aeropuerto de Málaga ha sido una actuación pionera en nuestro país y de suma importancia por la repercusión medioambiental que implica. Las principales ventajas que se han obtenido tras su aplicación son:

- Se ha minimizado el impacto medioambiental que implica la apertura de vertederos para lodos.

Fig. 14. (Arriba y abajo).
Extendido del lodo y toma de muestra "in situ" para determinación de la densidad óptima.



- Se ha revalorizado un volumen aproximado de 100.000 m³ de material asimilable a lodo procedente de la excavación de muros - pantalla transformado un residuo en un material de construcción válido para uso dentro de la propia obra para ejecutar terraplenes.
- Minimización de los riesgos de accidentes de tráfico por pavimento deslizante y molestias generadas a los vecinos y al tráfico que circula en las proximidades de la obra debido a las pérdidas en el transporte del material asimilable a lodo por carretera que se producen hasta vertedero.
- Mejora del tráfico al disminuir la circulación de vehículos alrededor de la obra al eliminar el tránsito de vehículos entre la obra y el vertedero de lodos.
- Disminución del consumo energético y reducción considerable de la emisión de CO₂ a la atmósfera



Fig. 15. (Arriba y abajo). Aporte de cal y mezcla con los lodos.



Fig. 16. (Arriba y abajo). Nivelación y compactación.



debido a la disminución del tráfico generada al tener que llevar a vertedero el material asimilable a lodo generado en las pantallas.

Como se puede comprobar la aplicación de esta tecnología desarrollada en el Centro de I+D+i de ACCIONA ha contribuido de forma notable a remarcar el compromiso de desarrollo y sostenibilidad que tiene

siempre las actuaciones en que interviene ACCIONA, siendo una vez más pioneros en el desarrollo de nuevas tecnologías que nos permitan avanzar más día a día, pero siendo siempre respetuosos con el medio ambiente y nuestro entorno.

9. Agradecimientos

Desde la Dirección de I+D+i de ACCIONA queremos agradecer la continua colaboración y el apoyo obtenido para la implantación de esta tecnología a Araceli María Pajares Ortega y Antonio Arcas Pedregosa del Departamento de Calidad y Medio Ambiente de la UTE Nueva Pista del Aeropuerto de Málaga, así como a los Gerentes de la obra, Huberto José Moreno Lorente y Manuel García Alconchel sin cuyo apoyo y colaboración no hubiera sido posible la aplicación de esta tecnología de forma exitosa en obra. Por último también nos gustaría resaltar de forma notable el trabajo realizado por Ana Neyeloff, Jefe de Servicio de I+D+i de ACCIONA en Andalucía y la colaboración de la empresa CALCINOR. ♦

Referencias:

-Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España. ANCADE. (2002): "Manual de estabilización de suelos con cal". Madrid.
-Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento. (2002): Artículos 200 "Cales para estabilización de suelos" (OM 27/12/99), 330 "Terraplenes" y 512 "Suelos estabilizados in situ" (OC

10/2002) del pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3). 2002.
-Asociación Española de Normalización y Certificación. AENOR. (1996): "UNE-ENV 459-1. Cales para construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad". Madrid.
-Instituto Técnico de la Viabilidad del Transporte. INTEVIA. (2003): "Jornada sobre mezclas con ce-

mento en las infraestructuras de transporte". Madrid.
-Departamento de obras públicas, transportes y comunicaciones. Dirección general de obras públicas. (2002): "Jornada sobre la cal en la mejora y estabilización de suelos". Navarra.
-Little, Dallas N. (1995): "Handbook for Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime" USA.