

EXPERIENCIAS EN ESTABILIZACION CON CAL Y CEMENTO: PROBLEMÁTICA, RENDIMIENTOS, INTERFERENCIAS

D. José María Riera Rupérez

Ingeniero de C., C. y P.
Jefe de Grupo de Obras
CORSAN CORVIAM CONSTRUCCIÓN, S.A.

D. Luis de la Torre Abietar

Ingeniero de C., C. y P.
Departamento de Asistencia Técnica a Obras y Proyectos
CORSAN CORVIAM CONSTRUCCIÓN, S.A.

1. RESUMEN

Mediante esta ponencia se pretenden resaltar los aspectos más significativos a tener en cuenta desde el punto de vista de rendimiento y correcta ejecución de unidades de estabilización o tratamiento de suelos mediante mezclado de cal o cemento.

Básicamente el interés está centrado en grandes obras viales, que es donde estas unidades cobran una relevancia mayor.

Las distintas unidades se tratan de manera diferenciada en función del material (cal o cemento) y la metodología de ejecución seguida (vía seca o vía húmeda). Asimismo se introduce la división entre materiales estabilizados (explanadas y capas de firme) y materiales simplemente tratados (terraplenes)

2. INTRODUCCIÓN

De todos es sabido que, en las grandes obras lineales, el capítulo correspondiente a movimiento de tierras y explanaciones cobra una gran importancia, pudiendo llegar a representar hasta el 40 ó 50% del presupuesto total de la obra. Es fácil de comprender que es de vital importancia que ya desde la fase de proyecto se tengan en cuenta las dificultades inherentes a estas unidades de obra (necesidades de préstamos, vertederos, estabilizaciones).

Por tanto, una buena práctica a la hora de diseñar una obra es pensar en la realización de la misma con medios y materiales que estén al alcance del constructor, ya que este asunto es de vital importancia en la economía y rapidez de ejecución. Asimismo se conseguirá una mayor adecuación ambiental de la obra ya que el volumen de movimiento de tierras generado es mucho menor.

Otro aspecto a tener en cuenta se centra en las dificultades cada vez mayores para conseguir áreas de préstamo, canteras y vertederos, debido a los condicionantes ambientales que son cada vez más influyentes en la definición de las grandes obras. Por tanto se hace cada vez más necesario la utilización de todos los materiales que se encuentren en la propia traza, sean cuales sean sus propiedades.

Los suelos con contenidos importantes en arcillas y limos, con elevadas plasticidades, bajas capacidades portantes y problemas de reactividad a la humedad (retracción e hinchamiento) son abundantes en España y ha sido necesario adecuar la normativa existente para permitir su utilización en determinadas condiciones y tras un estudio específico.

Tras la última revisión de los artículos del PG-3 relativos a rellenos (terraplenes, pedraplenes y rellenos todo uno), existe la posibilidad de utilizar unos tipos determinados de suelos, denominados marginales en su articulado, tras un estudio especial y con un tratamiento previo.

Una posibilidad es el mezclado de estos suelos con un conglomerante, que tiene básicamente dos finalidades:

- Tratamientos de estabilización que suponen una mejora de las características de los materiales hasta conseguir propiedades muy superiores a las iniciales que permitan que el material pueda colocarse en las capas superiores de la plataforma, donde las sollicitaciones son mucho mayores. Se trata de mejoras a largo plazo y progresivas en el tiempo provocadas por reacciones químicas similares a las del fraguado del hormigón. Se requieren, en general, porcentajes de conglomerante superiores al 3%. (el procedimiento específico está recogido en el artículo 512 del PG-3 sobre estabilizaciones de suelos in situ y como se indica en el propio artículo estos materiales están destinados a su uso en explanadas).
- Tratamientos de modificación, en los que se pretenden obtener una mejora que permita utilizar estos materiales marginales en el cuerpo de los terraplenes. Las mejoras que se consiguen son un inmediato aumento de la trabajabilidad y compactabilidad de los suelos básicamente por pérdida de humedad y floculación (cambios físico-químicos). Se usan porcentajes de conglomerante que oscilan entre el 1 y el 3%, según otras normativas y que actualmente no se haya recogido en el PG-3.

El tratamiento de estabilización es un tratamiento en capa, es decir, en espesores como máximo de 20 a 30 cm mientras que el tratamiento de modificación es un tratamiento que abarca varias tongadas y que o bien puede hacerse en todo el cuerpo de la obra de tierra o bien puede zonificarse.

Puede establecerse una primera diferenciación en función del tipo de ligante a emplear: cal o cemento. El empleo de uno u otro depende básicamente de las características tenso deformacionales que se pretenden obtener. Los tratamientos de suelos con cemento son tratamientos en capa, en general reservados a las capas superiores de explanadas, que requieren unas cualidades muy exigentes.

La estabilización de suelos puede hacerse mediante dos procedimientos:

- Mezcla in situ
- Mezcla en central

La estabilización in situ es el método más extendido y puede hacerse por vía húmeda o por vía seca. Supone que la ejecución de la unidad de obra se realiza directamente en el emplazamiento, o bien tratando directamente el fondo de la excavación o bien extendiendo material de préstamo previamente sobre la explanada. Con esta técnica y con la maquinaria disponible en España es posible obtener resultados de muy buena calidad.

Las fases del proceso de estabilización in situ son las siguientes:

- Escarificación del suelo y colocación en capas de espesor compatible con el mezclador
- Distribución de la cal o cemento
- Mezclado del suelo y conglomerante
- Compactación de la mezcla
- Curado, acabado y refino

Estas distintas fases de ejecución se pueden abordar por distintos procedimientos en función de la maquinaria empleada. No obstante, la diferenciación básica en la maquinaria se establece según el tipo de estabilización: por vía seca o por vía húmeda.

En el caso de materiales modificados para uso en terraplenes es más habitual el uso de la vía seca, donde el ajuste de la dosificación y las especificaciones de compactación no son tan importantes y los rendimientos son mucho mayores (del orden del doble que en vía húmeda) lo que se adapta mejor al mayor volumen de obra requerido. La vía húmeda se reserva casi exclusivamente para suelos estabilizados que se utilizan en capas de explanada.

La selección del tipo de **proceso de estabilización** a seguir y la maquinaria dependerá de las especificaciones del proyecto y de la optimización técnico-económica de realización de la unidad de obra. En este sentido hay que indicar que existe una limitación en el artículo 512 del PG-3 referente a estabilización de suelos in situ, que obliga a que, cuando la categoría del tráfico pesado esté comprendida entre T00 y T1 o cuando la superficie a tratar sea superior a 70.000 m² se utilice, para la estabilización, vía húmeda mediante equipos que integren en una única máquina las operaciones de disgregación, dosificación y distribución de cal o cemento y agua y de mezcla.

Cada una de las distintas unidades y cada forma de ejecución tiene particularidades que se deben tener en cuenta en el momento de su ejecución. En este sentido es fundamental conseguir una buena organización de obra que obtenga buenos rendimientos y altas calidades en la unidad de obra terminada.

3. PROCEDIMIENTO DE DOSIFICACIÓN Y EXTENDIDO EN LA ESTABILIZACIÓN: VÍA SECA Y VIA HÚMEDA:

En la vía seca el extendido de la cal o el cemento se realiza directamente en polvo sobre el material a tratar. Las diferencias de procedimiento se establecen en función de la tecnología de la extendidora. El aspecto fundamental a tener en cuenta es el dosificador volumétrico. Existen tres tipos:

- No servodirigido. Es el procedimiento más “artesanal”. Está dotado de una trampilla por la que se vierte el conglomerante en polvo. Es necesario regular previamente la

apertura de la trampilla y junto con la velocidad de avance del equipo medir la cantidad de cal esparcida por metro cuadrado. La dosificación es imprecisa ya que obliga a mantener constante la velocidad del equipo, lo que, en condiciones reales de obra, es difícil de conseguir. También se presentan diferencias de dosificación cuando la cuba está llena o cuando está vacía.

- Servodirigido. Está dotado de un tornillo extractor cuya velocidad de avance está servodirigida por el motor de la extendedora. La cal o cemento se almacena en una tolva separada de la cuba de almacenamiento con lo que se reduce el problema de cambios de dosificación en función del grado de llenado de la misma.
- Servodirigido con control ponderal. Cuenta con un control ponderal que se realiza por medio de unas balanzas electrónicas situadas bajo la cuba. La precisión es mucho mayor.

Para la elección de la extendedora se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Capacidad de las cubas (varían entre 5 y 15 m³).
- Problemas de circulación causados por los suelos no estabilizados, al ser generalmente suelos pegajosos y blandos es muy habitual el uso de maquinaria todo terreno.
- Facilidad de realización de los trayectos silo-obra. En algunos casos puede ser interesante contar con una cuba nodriza para minimizar las distancias de transporte.
- Necesidades de caudal. Los caudales habituales de dosificación varían entre 6 y 30 kg/m² para las máquinas más antiguas y entre 5 y 60 kg/m² para las más modernas.
- Facilidad de regulación de apertura de extendido.
- Facilidad de conducción de los equipos.
- Disponibilidad real y coste de los equipos.



figura 2: Extendedora con dosificador servodirigido con control ponderal para vía seca (fuente SOLTEC)

En la vía húmeda la dosificación de la cal o cemento se realizan en forma de lechada. La puesta en obra se realiza normalmente por medio de una mezcladora de lechada consistente en una unidad remolcada dotada de un silo de cemento o cal y un depósito de agua. La unidad cuenta con una estación motorizada con sistema de alimentación volumétrica de agua y dosificación ponderal de conglomerante. En los equipos más antiguos, la lechada es extendida por medio de una regadora que cuenta con un dosificador servodirigido con la velocidad de avance. Los grandes equipos donde todo el proceso está mecanizado montan una tubería que enlaza directamente con la unidad mezcladora y la inyección de la lechada se realiza directamente sobre la cámara de mezclado.

En teoría, la vía húmeda garantiza un mayor control en la dosificación y por lo tanto una mejor calidad en la unidad ejecutada. Este sistema es el que garantiza un mezclado más homogéneo de la cal con el terreno. No obstante, en la práctica, puede presentar mayores problemas de ejecución puesto que los orificios de la regadera se obturan con rapidez y en este caso no es posible garantizar que los porcentajes de dosificación de lechada coincidan con los teóricos.



figura 3: Ejecución de estabilización por vía húmeda con equipos continuos (fuente SOLTEC)

Hay que indicar que el procedimiento general establecido en el art. 512 del PG-3 para la ejecución de **estabilizaciones** in situ para su uso en explanadas es la vía húmeda. Solamente se permite la vía seca cuando la extensión de suelo a **estabilizar** sea menor de 70.000 m² o cuando sea necesaria una reducción de la humedad natural del suelo. Además, se exige que la maquinaria debe integrar en un único equipo las operaciones de disgregación, dosificación y distribución del conglomerante, humectación y mezcla.

En el caso de la vía húmeda con un único equipo (estabilizadora), el extendido del conglomerante se realiza colocando la máquina mezcladora inmediatamente detrás de la

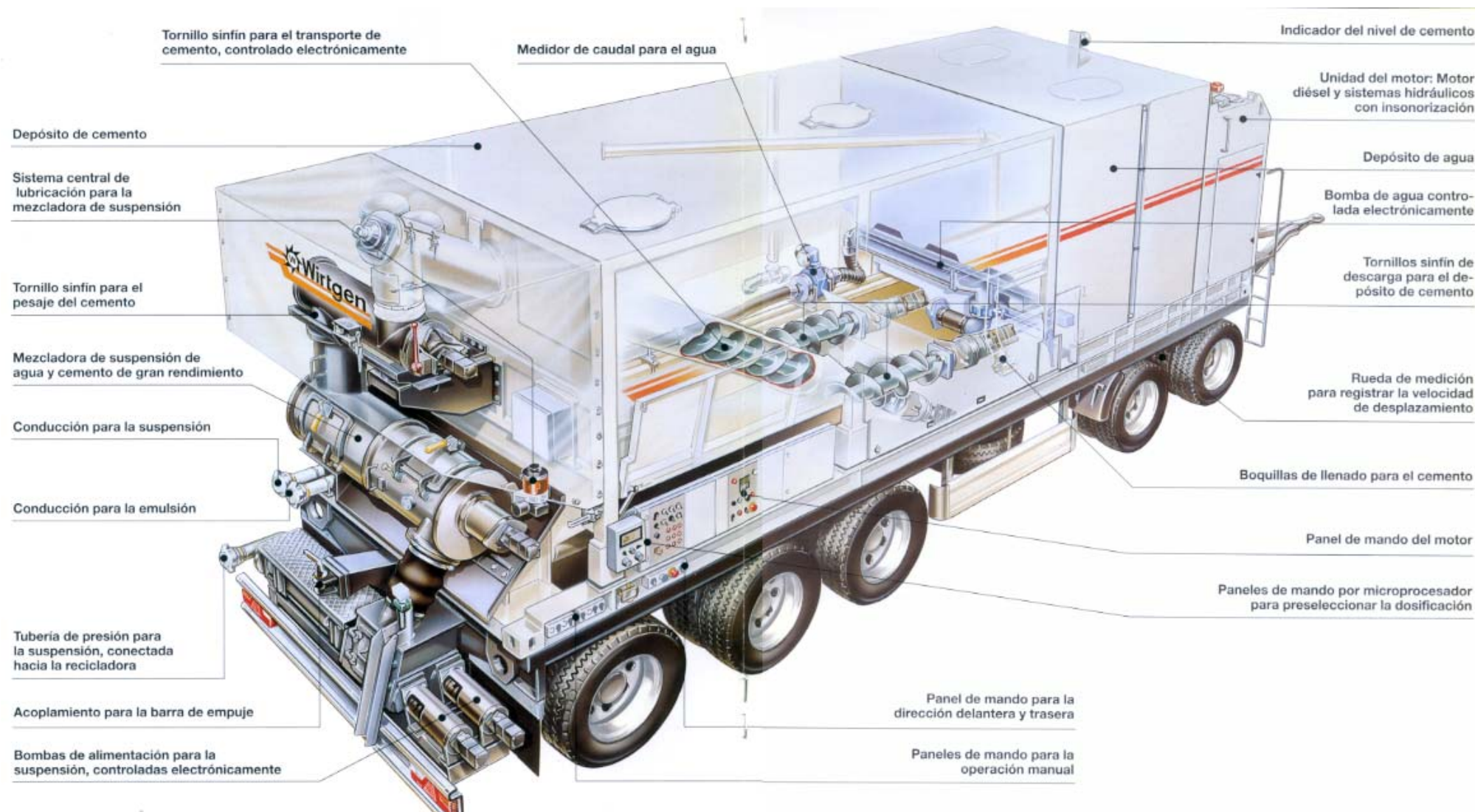


figura 1: Unidad mezcladora de lechada para vía húmeda (fuente SOLTEC)

máquina distribuidora de lechada, conectados con una manguera. La preparación de la lechada se lleva a cabo en el camión, dotado de una tolva de conglomerante, otra de agua, un dosificador para cada material, un mezclador y una bomba conectada a la estabilizadora a través de la manguera de unión. Esta bomba va conectada al microprocesador del estabilizador de manera que la cantidad de lechada que se envía está controlada en función de los parámetros que se fijen, normalmente velocidad de avance de la máquina y profundidad de trabajo, de modo que se asegure una buena distribución de conglomerante y agua. La incorporación de la lechada al suelo se hace mediante inyectores-pulverizadores colocados en la parte superior de la carcasa que envuelve al rotor de la estabilizadora, de forma que se va añadiendo lechada al tiempo que el material es fresado y triturado. Este fresado y trituración del suelo, junto con la mejor dosificación del aditivo permiten obtener una mezcla muy homogénea, siempre conveniente en capas nobles (explanadas). Pero la trituración puede ser contraproducente en terraplenes y rellenos todo uno.

Además de sus propias peculiaridades (problemas con suelos húmedos), a la hora de ejecutar la obra debe interesar conocer que en una estabilización por la vía húmeda se puede obtener un rendimiento de unos 1.000 m³/día, mientras que la estabilización por vía seca rondará los 2.000 a 2.400 m³/día. Como se verá mas adelante, cada método obligará a pensar de manera específica en el suministro de la cal o cemento.

4. PROCEDIMIENTO DE MEZCLADO

El mezclado consiste en integrar el conglomerante en el cuerpo del material a estabilizar. Existen diversos equipos de mezclado en función del grado de finura en la mezcla y homogeneidad que se necesite alcanzar en función de la ubicación de la unidad dentro de la obra (terraplén o capa de explanada). Otro aspecto a tener en cuenta es la profundidad es que el método elegido garantice la profundidad del tratamiento.

Los equipos más habituales son los siguientes:

- Gradas de discos. Solamente sirven los equipos más pesados (4 a 8 t) con radios de gran diámetro (en torno a 1 m). La anchura habitual del tratamiento es de 2 a 3 m y la profundidad no suele superar los 25 cm. Presentan problemas importantes cuando existen bolos en la matriz del suelo que provoquen que se atasquen los discos (para tamaños entre 300 y 500 mm). La disgregación y homogeneización de la mezcla obtenida es pobre por lo que debe restringirse su uso al cuerpo de los terraplenes, proscribiéndose en las capas de explanadas. Los rendimientos obtenidos oscilan entre 100 y 200 m³/h en caso de suelos plásticos con bolos grandes y pueden llegar a 600 m³/h en el caso de suelos limosos.
- Pata de cabra: Se trata de la misma maquinaria empleada en la compactación de suelos arcillosos. Solamente se emplea como mezclador primario para triturar y mezclar la primera capa de suelo. Se utiliza generalmente como tratamiento previo a la pasada de gradas de rejillas, arados de volteo o rotobatores en la mejora o estabilización de arcillas húmedas cuando el mezclado se realiza en dos etapas (mezclado y remezclado) ya que la pegajosidad del suelo y su alto grado de humedad impiden el uso de estabilizadora.
- Gradas de rejillas. Se trata de arados que pueden presentar disposiciones variables en cuanto a forma, ángulos de ataque, separación, etc. A veces también se utilizan las mismas hojas de las motoniveladoras dispuestas en posición de vertedera. Pueden alcanzar mayores profundidades que las gradas de discos (hasta 40 cm) y tratar terrenos más compactos. No obstante los resultados de mezcla son pobres y, por

supuesto, no son aptos para estabilizaciones en explanadas. Los rendimientos obtenidos son algo mejores que en las gradas de discos.

- **Rotobatores.** Se trata de un conjunto de azadas que giran fijadas a un cigüeñal. De esta manera los útiles de corte penetran en el suelo y proyectan el material arrancado contra una carcasa provista de barras mejorando el grado de pulverización. Su profundidad de acción llega hasta los 35 cm, pero producen pobres resultados cuando existen elementos en el suelo superiores a 200 mm en proporción importante. Se emplean de manera idéntica que las gradas de rejillas (su suelo tipo de aplicación es el arcilloso húmedo) pero, dado que las características del mezclado son mucho mejores que las gradas, se han utilizado en suelos estabilizados (capas de explanada). Los rendimientos obtenidos están entre 100 y 300 m³/h con velocidades de avance sobre 1 km/h.



figura 4: Pulvimezclador Wirtgen (fuente Wirtgen)

- Pulvimezcladores (Pulvimixers). Son equipos autopropulsados, que incorporan el elemento mezclador y el tractor en una única unidad. El mezclador está formado por un árbol de eje horizontal provisto de cuchillas. El conjunto gira a una velocidad de unas 200 r.p.m. en el interior de una cámara de mezclado deslizando por la superficie del suelo a estabilizar. La profundidad del tratamiento se regula variando la posición del eje de giro con respecto a la superficie del suelo. La anchura de corte oscila según equipos entre 2 y 2,5 m y la profundidad de mezclado entre 30 y 45 cm aproximadamente, no obstante, la profundidad efectiva es bastante difícil de controlar y solamente puede comprobarse mediante catas. Los equipos más completos incorporan un equipo de inyección directamente a la cámara de mezclado. En la estabilización las cuchillas que se utilizan son del tipo puntas rectas o en forma de L.

Cuando existen elementos gruesos en la matriz del suelo conviene que las puntas sean rectas, para reducir el desgaste. En suelos blandos es mejor utilizar patillas en L puesto que el mezclado se realiza mejor.

Estas máquinas trabajan en condiciones óptimas cuando en los suelos no existan elementos gruesos superiores a 50 mm. Con gruesos mayores, hasta 200 mm pueden seguir trabajando pero habrá que tener en cuenta que el desgaste de las picas será muy elevado.

La calidad de mezclado obtenida con estos equipos es buena. Sin embargo, hay que indicar que mientras que sí suelen lograrse muy buenos resultados de homogeneidad en sentido vertical en sentido horizontal apenas sí se produce mezclado. Por tanto es muy importante una buena distribución del conglomerante y la lechada. Para ello puede ser conveniente realizar alguna pasada previa con pata de cabra o grada que ayude a disgregar el suelo. Los rendimientos teóricos varían entre 400 y 200 m³/h según se realicen 1 ó 2 pasadas en suelos tratados ó 2 a 4 pasadas para la estabilización.

Los rendimientos de mezclado indicados para cada equipo deben tomarse como valores instantáneos. El rendimiento total debe englobar todos los tiempos de parada por cambio de picas, redistribución de tajos, toma de muestras, problemas de avance en suelos blandos, etc. Los rendimientos usuales en mezclado suelen oscilar entre 1.500 y 2.400 m³/día (jornada de 8 horas) para suelos tratados o mejorados y entre 1.000 y 2.000 m³/día para suelos estabilizados.

5. COMPACTACIÓN Y CURADO

La compactación se realiza posteriormente a la nivelación de los materiales tratados o estabilizados con maquinaria específica (bulldozer o motoniveladora).

En principio, los sistemas de compactación para materiales tratados son similares a los de los materiales no tratados, aunque pueden presentarse algunas diferencias entre los sistemas en función del tipo de material (arcilloso o limoso) y la intensidad de tratamiento a conseguir (suelos simplemente modificados para uso en cuerpo de terraplén o suelos estabilizados para uso en capas de explanada).

Para suelos simplemente mejorados y de tipo arcilloso el procedimiento de compactación más utilizado consiste en realizar varias pasadas iniciales con pata de cabra (con pasada de

cuba intermedia), seguido de un rodillo liso. Con la pata de cabra se consigue aumentar la tritución y el mezclado del suelo y con el rodillo liso se pretende la compactación y el sellado de la capa más superior. Este tratamiento es habitual en suelos arcillosos húmedos donde es necesario un doble mezclado de cal .

La ejecución más habitual en este caso es la siguiente:

1er mezclado de cal:

- Extendido de la cal
- Ejecución de regado de agua a máxima presión (apertura máxima de regadera hasta conseguir un ancho de 15 m).
- Inmediatamente después, pasada simple de pata de cabra para lograr un mezclado primario de la cal.
- 2ª pasada de cuba.
- Pasada doble (o dos pasadas simples) de pata de cabra.
- Paso del arado, para conseguir mezclar completamente el material desde el fondo de la capa.

2º mezclado de cal:

- 2º extendido de la cal.
- Regado con una pasada de cuba.
- Pasada simple de pata de cabra.
- 2º regado con cuba.
- Pasada doble de pata de cabra.
- Comprobación de homogeneidad y grado de mezclado de la capa.
- Compactación y cierre de la capa mediante rodillo .

En el caso de explanadas o suelos estabilizados hay que indicar que se exige al menos un 97% de la densidad Próctor Modificado por lo que el proceso de compactación debe ser cuidadoso, dado que el material se debe compactar en una única tongada. En este caso lo habitual es utilizar rodillos lisos vibrantes seguidos de compactadoras de neumáticos. En función del espesor de las capas a compactar puede usarse un rodillo pesado de 20 a 25 t con una carga estática de 50 kg/cm o superior para capas de 25 a 40 cm. Para capas de 15 a 25 cm puede usarse un compactador de unas 17 t y 35 kg/cm de carga estática. Ambos equipos pueden usarse conjuntamente, disponiendo el rodillo más pesado inmediatamente detrás de la estabilizadora y el más ligero tras la motoniveladora de refino.

Para cerrar la capa es aconsejable utilizar un rodillo de neumáticos. El más usado es el indicado en el artículo 512 del PG-3 (carga total superior a 35 t, carga por rueda superior a 5 t y presión de inflado superior a 8 kg/cm²).

La ejecución más habitual en este caso es:

- Una pasada doble de rodillo liso vibrando para alisar y planchar sin provocar desplazamientos de terreno.
- Nivelación con motoniveladora
- Tres a cinco pasadas dobles con rodillo liso vibrando hasta alcanzar la densidad adecuada.
- Tres a cinco pasadas dobles con compactador de neumáticos hasta que se obtenga una superficie bien cerrada.

El número de pasadas final deberá ajustarse en función de los resultados obtenidos en los tramos de prueba. En este sentido hay que tener en cuenta que, en el caso de tratamientos con cal, cuando las dosificaciones son bajas (suelos modificados) el CBR puede bajar una vez que la energía de compactación supera un determinado valor (debido a la aproximación al grado de saturación de la mezcla suelo cal). Por otro lado, cuando las dosificaciones son altas (caso de suelos estabilizados para explanadas), el índice CBR es creciente con la energía de compactación. De ahí que haya que insistir en la elevada importancia que tiene la ejecución de un tramo de prueba previo donde se ajusten todos estos parámetros.

En teoría, en los suelos tratados con cal puede esperarse hasta dos o tres días para realizar la compactación después de la dosificación y el mezclado con cal, lo que no es posible en el caso de estabilizaciones con cemento donde la compactación debe realizarse de manera casi inmediata. No obstante, en ambos casos es conveniente realizar la compactación lo antes posible por las siguientes razones:

- Para evitar pérdidas de humedad.
- Los plazos de trabajabilidad de los materiales estabilizados no son mayores de 2 a 3 horas.
- Dificultades para hacer los solapes entre bandas si el material ha fraguado (los solapes mínimos deben de ser de 15 cm pero pueden ser mayores en caso de necesidades de espacio).
- Problemas de carbonatación de la cal.

Hay que indicar que en el caso de explanadas el período de curado mínimo debe ser de 3 días, para asegurar su endurecimiento antes de extender la capa siguiente, pudiendo llegar a 7 días en caso de condiciones desfavorables de humedad ambiental o en caso de mucho viento. Lo normal es realizar el curado mediante pasadas de cuba (o manual mediante maquinas sulfatadoras agrícolas) y recompactando cuando sea necesario, aunque para obras grandes el PG-3 exige que se haga con una membrana de curado formada por un riego asfáltico. Debe emplearse una emulsión de tipo aniónica con pH mayor de 5 en el caso estabilizaciones con cemento para evitar reacciones con los álcalis, aunque lo más habitual es utilizar emulsiones catiónicas sin ningún problema. Las dotaciones de betún residual no deben ser inferiores a 600 gr/m².

Los tiempos de curado en caso de materiales simplemente modificados para el cuerpo del terraplén pueden ser menores, ya que no es necesario un total endurecimiento de la capa inferior antes de proceder al compactado de la siguiente. No obstante es recomendable esperar al menos 24 horas (aunque con frecuencia se reduce a 6-8 horas).

Estos tiempos de curado pueden resultar una gran limitación en el ritmo de desarrollo de la obra, sobre todo, si se pretende tratar todo el cuerpo de un terraplén, no se adoptan soluciones de tipo sandwich y se opta por estabilización, no conformándose con la simple modificación o mejora de propiedades.

6. PROCEDIMIENTOS DE EJECUCIÓN. INTERFERENCIAS.

Como ya se ha indicado, en el caso de materiales modificados para uso en terraplenes es más habitual el uso de la vía seca, mientras que la vía húmeda se reserva casi exclusivamente para suelos estabilizados que se utilizan en capas de explanada.

En el caso de los terraplenes hay que tener en cuenta en primer lugar las características topográficas de la obra, lo que puede dar lugar a problemas de interferencia con otros tajos (excavación de los desmontes, estructuras) o a graves problemas de acceso de la maquinaria. En este sentido hay que indicar que mientras que la ejecución de los terraplenes no formará parte en general del camino crítico de la obra, sí lo será la explanada. No obstante, si se decide la estabilización total de los terraplenes y además el uso de la vía húmeda, estos pasan frecuentemente a formar parte del camino crítico de la obra.

A continuación se exponen una serie de circunstancias que deben ser tenidas a la hora de diseñar un procedimiento de puesta en obra de estabilización o mejora de suelos:

6.1. Humedad de los suelos

De todos es conocido que el aporte de cal viva produce una disminución de la humedad natural de los suelos. Esto es debido a tres causas:

- Por adición de “suelo seco” (la cal)
- Por consumo de agua necesaria para hidratación de la cal
- Por evaporación causada por el incremento de la temperatura motivada por la reacción de hidratación (exotérmica).

Por este motivo un aporte de un 1% de cal a la masa del suelo puede lograr bajar el contenido de humedad hasta en un 4 ó 5%. Si además se realiza una aireación y escarificado del suelo el porcentaje puede alcanzar un 7%. Este aspecto puede resultar beneficioso en el caso de suelos muy húmedos (arcillas) en el que la cantidad existente de agua puede hacer que el procedimiento de puesta en obra sea similar a la vía húmeda, al mezclarse directamente la cal con el agua del suelo. Este tipo de tratamientos entran más bien dentro de lo que podemos llamar “tratamientos de corrección de humedad” que “tratamientos de mejora”.

No obstante hay que tener en cuenta que en el caso de estabilización por vía húmeda, al estar la cal ya apagada en la lechada esta triple circunstancia no se produce y sí, en cambio, un aporte de agua extra por el propio procedimiento de adición de la cal. Si no es posible secar el suelo antes por escarificado esta circunstancia podría invalidar la solución por vía húmeda.

Por el contrario, en el caso de suelos arcillosos secos, la adición de cal viva por vía seca puede dar lugar a que la humedad se aleje demasiado del óptimo y que no sea fácil aportar toda la humedad necesaria mediante regado. En este caso será preceptiva la utilización de cal apagada (por lo que la reacción de hidratación ya no se produce) añadida por vía seca o bien de estabilización por vía húmeda. En general, para suelos secos, el aporte por vía húmeda puede presentar la ventaja de que la adición de cal y humedad se realizan en operaciones simultáneas, acortando la duración de los tajos y reduciendo las interferencias por presencia de más vehículos en la obra.

En el caso de explanadas con problemas de humedad, que requieran estabilización con cemento puede ser una buena solución la estabilización mixta. Así con una estabilización previa con cal se consigue aumentar la humedad y reducir la densidad óptima, con el efecto añadido de reducir la plasticidad del suelo, lo que puede ayudar a una estabilización posterior con cemento. Si el suelo no está excesivamente húmedo o no está formado por

finos muy plásticos que retienen la humedad, bastará con hacer un aireado previo mediante escarificado hasta obtener una humedad próxima a la humedad próctor (uno o dos puntos menor en caso de estabilización por vía húmeda). Este escarificado previo siempre es recomendable puesto que además ayuda a eliminar los terrones y gruesos en el suelo que pueden dificultar o impedir el proceso.

6.2. Organización de tajos

Los procesos que más limitan el rendimiento de esta unidad de obra son dos:

- Alimentación de conglomerante
- Proceso de mezclado

Aunque la mayor interferencia con el resto de la obra posiblemente sea debido al curado.

Un aspecto que debe preocupar a la hora de programar la ejecución del tajo es que no falle el suministro de conglomerante para evitar paradas. En este sentido es fundamental determinar cuáles son las necesidades punta de las operaciones y programar cuál debe ser entonces la cadencia de suministro. Los consumos de conglomerante han de preverse en función de los rendimientos del equipo. En este sentido hay que indicar que el rendimiento medio en general nunca será superior al 75% del rendimiento punta, no obstante todo el dimensionamiento debe realizarse en función de los consumos punta.

Para ello será importante traer este material desde una cantera que esté lo más cerca posible y que tenga sobrada producción. Es interesante conocer de cuántos hornos de producción se dispone en el caso de la cal, pues se trata de un material del que no es posible hacer grandes acopios y en el caso de contar con un único horno la producción diaria puede no ser suficiente para atender las necesidades de la obra.

La distancia, lógicamente, es un condicionante a tener en cuenta a fin de minimizar el coste transporte necesario y poder contar con capacidad de reacción ante imprevistos: tormentas, averías de la estabilizadora, etc. Otro aspecto a tener en cuenta es el repostaje de combustible de la maquinaria, lógicamente debe hacerse siempre por la noche o antes de comenzar un nuevo tajo.

Una buena práctica es tener un pequeño almacenaje en obra. Un *silo* o *cuba nodriza* podrá llenarse cuando lleguen camiones y el tajo se haya parado por algún contratiempo, y puede permitir que la ejecución de la unidad de obra continúe aún cuando exista algo de retraso en el suministro de la cal o cemento. Es muy importante tener previsto además el tiempo necesario de parada para alimentar los equipos. A este respecto hay que indicar que el llenado de una cuba de cemento o cal puede llevar casi media hora.

En el caso de estabilización por vía seca será la propia extendedora la que se acerque al silo para cargar material, por lo que es aconsejable que este elemento esté lo más centrado que sea posible en el tajo. Si, por el contrario, el procedimiento es por vía húmeda, será necesario disponer de un transporte interno de obra desde el silo hasta la estabilizadora (ya que esta no puede circular libremente con facilidad). Esta circunstancia determinará que disponer un silo nodriza no sea muy rentable y sea mejor dedicar más esfuerzos a conseguir un transporte desde la cantera seguro y fiable. A este respecto es útil saber que existen camiones cisterna con dos motores que pueden desplazarse a la vez que descargan, aunque su disponibilidad es todavía escasa.

Es importante comprobar al final de la jornada que todos los consumos se han ajustado a los prefijados para ajustar el suministro de materiales y al mismo tiempo verificar que las dosificaciones de conglomerante coinciden con las determinadas en la fórmula de trabajo.

El transporte puede ser muy determinante en el caso de utilizar cal apagada, puesto que la densidad de ésta es aproximadamente la mitad de la cal viva. La cal viva además cuenta con un mayor contenido de cal útil que la cal hidratada. Para las cales con un alto contenido en calcio, utilizadas en la estabilización de suelos un 3% en dosificación de cal viva equivale a un 4% de dosificación de cal apagada. Esto obliga, en el caso de la cal hidratada frente a la cal viva, a hacer un uso mucho más intensivo del transporte tanto desde la cantera hasta obra como dentro de la propia de obra. Esto determina que, en general, no suele ser rentable en términos estrictamente económicos el uso de la cal apagada frente a la cal viva. Consideraciones de Seguridad y Salud pueden aconsejar, sin embargo, lo contrario. De hecho el artículo 512 del PG-3 para estabilizaciones de suelos en explanadas exige siempre el uso de cales apagadas, tanto si se va a usar vía húmeda (en cuyo caso no tiene consecuencias ya que la cal se “apaga” o hidrata en la propia lechada) como en el caso, más restringido, de vía seca.

Una vez resueltos los problemas de suministro, el mezclado del conglomerante es el proceso más limitativo de la operación.

La forma de organizar los tajos de extendido y mezclado debe ser necesariamente por calles, ya que la anchura de acción de las máquinas no suele sobrepasar los 2,5 m. La longitud de las calles está limitada en el caso de suelos modificados (terraplenes) porque el proceso, una vez comenzado el extendido del conglomerante, no puede parar hasta finalizar con la pasada del rodillo de cierre de la capa. Todo esto debe hacerse dentro del plazo de trabajabilidad de los materiales que no suele exceder las 4-5 horas. En el caso de las explanadas, además, hay que añadir la circunstancia de que no pueden dejarse juntas frías entre franjas, lo que suele limitar la longitud a unos 500 m.

En el caso de grandes obras, con anchos de explanadas superiores a 10 m la organización del tajo puede hacerse de dos formas distintas:

- Por calles adjuntas largas (de 500 m), empezando por el borde más bajo del perfil transversal y nivelando cada nueva calle a partir de la franja ya estabilizada adjunta. El trabajo siempre se realiza en la dirección de avance y una vez finalizada la calle, la máquina estabilizadora debe retroceder hasta situarse en el perfil transversal de inicio, sobre la franja colindante. Esto se hace así porque al ser ésta la zona que lleva más tiempo estabilizada se corre el peligro de que la trabajabilidad de la mezcla se haya reducido y no sea fácil ejecutar el solape entre franjas.
- Por calles adjuntas cortas (de 100 m). El trabajo se realiza de manera continua, primero en dirección de avance y después dando la vuelta, solapando con las franjas adyacentes hasta completar el ancho total. Antes de pasar al siguiente tramo de 100 m se realiza la nivelación con la motoniveladora y la compactación. La corta longitud de las calles permiten asegurar que todo el proceso se realiza dentro del límite de trabajabilidad del material.

En el proceso de distribución en calles debe tenerse en cuenta que es necesario dejar un solape de al menos 15-20 cm. Si, por la geometría de la plataforma es necesario dejar solapes mayores puede ser aconsejable disminuir el aporte de conglomerante en la franja lateral, a cambio de aumentarlo en el resto (en vía húmeda se suele cerrar uno de los

difusores de lechada permitiendo dosificar en el difusor adyacente el doble de conglomerante).

Hay que tener en cuenta que, en los procesos arranque y parada de las máquinas, se producen un defecto y un exceso de material respecto a la rasante teórica fijada. Estos defectos deben corregirse con la motoniveladora, que debe dejar una superficie lisa antes de la compactación. El material excedente del final del tajo anterior puede servir para compensar el defecto de material del inicio del tajo siguiente.

6.3. Problemas específicos de explanadas

Las características tenso-deformacionales y geométricas exigidas a las explanadas son, lógicamente muy superiores a las del cuerpo de terraplén. Esta circunstancia obliga a que, en el caso de estabilizaciones con cal o con cemento, los procedimientos a seguir hayan de ser mucho más cuidadosos y los controles de calidad más exigentes.

Un aspecto que se debe tener en cuenta siempre es el de la preparación previa de la plataforma (coronación de terraplén o fondo de desmonte) antes de ejecutar la unidad de obra de estabilización. En este sentido existen una serie de conductas de buena práctica que deben ser consideradas.

En primer lugar es aconsejable que las dos últimas tongadas en caso de terraplenes se extiendan en espesores no mayores de 25 cm, con lo que se limita la aparición de gruesos que pueden afectar al proceso de estabilización. Si la capa a estabilizar es de 30 cm, se podrá dejar sin compactar ni humectar la última capa de 25 cm, ya que va a ser levantada para incorporarle el conglomerante o bien en polvo o bien en forma de lechada. No obstante, es importante que la humedad de esta última capa sea lo más parecida posible a la óptima y es fundamental dejar la capa inmediatamente inferior perfectamente terminada.

Es necesario que la última capa esté muy bien rasanteada a la cota de terminación teniendo en cuenta el esponjamiento que se produce en el proceso. Un material tras ser estabilizado gana en volumen. Puede ser normal que una capa de firme de 30 cm de espesor gane entre 1 y 3 cm tras su estabilizado, lo que significará un exceso de material a eliminar.

En el caso de utilizar estabilizadora, hay que saber que queda tras el paso de la máquina es una superficie plana, sensiblemente paralela a la superficie original antes del tratamiento, por lo que, salvo en el caso de peraltes grandes (superiores al 3%) no será preciso repasar la superficie de terminación. En caso de peraltes mayores deberá preverse una motoniveladora detrás de la máquina estabilizadora regularizando el terreno, tomando como referencia la nivelación existente en las calles adyacentes. Por tanto es muy importante que la terminación de la última capa sea lo más exacta posible puesto que si ésta está bien terminada la superficie del material estabilizado también lo estará y por el contrario los errores de una se arrastrarán a la otra, siendo difícil su corrección.

Hay que tener en cuenta que en el caso de firmes y con la estabilización con cemento debe quedar totalmente restringido el tráfico sobre la capa terminada lo que puede suponer algún problema de organización de obra adicional y una disminución de los rendimientos por paradas.

Una ventaja del un tajo de explanada respecto al de núcleo de terraplén es que está completamente desligado de la excavación y extendido del material. Mientras que en el caso

de núcleo de terraplén el tajo de excavación, extendido y estabilizado deben ir enlazados, en el caso de firmes es posible tener extendido todo el material para tratar y pasar la estabilizadora cuando esté disponible.

Es muy importante realizar un control exhaustivo del número de pasadas de las máquinas e implicar adecuadamente a los maquinistas, ya que la monotonía del trabajo puede hacer que se reduzca el número de pasadas, empeorando lógicamente la calidad final de la unidad de obra.

6.4. Otros condicionantes

6.4.1. Control de calidad

El objetivo del control de calidad es garantizar que todas las previsiones y especificaciones impuestas en fase de diseño se cumplen en la ejecución de la obra. Existen dos tipos de controles: controles durante la ejecución y controles sobre la unidad terminada.

Hay que planificar los controles para conseguir que la ejecución de la unidad no se vea condicionada. En el caso de tratamiento de suelos para emplear en terraplenes este asunto cobra vital importancia puesto que una parada para ejecutar un control no solamente afecta a la unidad de estabilizado, si no también al extendido, excavación y transporte de conglomerante. Por este motivo y ya que es necesario validar una capa para poder proseguir con la siguiente, debe garantizarse que el equipo de control y el personal de laboratorio estén siempre disponibles en obra para minimizar las paradas y retrasos. Este proceso es menos crítico en el caso de estabilizaciones de suelos para explanadas puesto que se trata de una única capa, su ejecución es prácticamente independiente del resto de las unidades de obra y además hay que contar con un tiempo necesario de curado que puede aprovecharse para hacer controles.

A parte de los controles específicos establecidos en los pliegos de condiciones (art. 512 del PG-3) es indispensable verificar además los siguientes puntos:

- Control de préstamos. En el caso de que el material sea de aportación (terraplenes) o bien explanadas en que se realiza un extendido previo antes de estabilizar. Es muy importante controlar los sistemas de ejecución de desmontes o préstamos, las direcciones de ataque de excavación y las alturas de banco. Es aconsejable realizar calicatas cada 2.000 m², con una profundidad igual a la máxima altura de banco (unos 4 m), en la que se tomen muestras y se realicen ensayos de granulometría, plasticidad, densidades aparentes, humedad natural, contenido de materia orgánica y sulfatos.
- Control de equipos. Es fundamental comprobar el correcto funcionamiento de la maquinaria, que se realizan las dosificaciones según las previstas, que el mezclado es adecuado y que los parámetros de los equipos de compactación (peso, presión de inflado, amplitud de la vibración, número de pasadas) se ajustan a los teóricos. En el caso de dosificación por vía húmeda es fundamental comprobar todos los días que los orificios de salida de lechada y los inyectores funcionan correctamente y no están obstruidos.
- Control de la profundidad de tratamiento. Es muy importante comprobar que la profundidad efectiva del tratamiento prevista se ajusta a lo obtenido realmente en obra. La medida más fiable es la extracción de testigos sobre el material estabilizado,

pero esto puede ser un proceso lento que además dificulte las operaciones de la maquinaria. La solución más práctica es la apertura de catas periódicas, siguiendo el avance la maquinaria, antes de iniciar la compactación, midiendo la profundidad del material tratado. Aunque a veces es difícil apreciar a simple vista la profundidad del material tratado puede dar una idea a la hora de rectificar la maquinaria. En el caso de la cal existen tinturas de contraste que facilitan la inspección visual de la cata.

6.4.2. Tajos abiertos

Es aconsejable mantener varios tajos abiertos. Es incluso preferible mantener varios tajos de mediano tamaño que uno único de grandes dimensiones. Esta medida posibilita tener capacidad de reacción en caso de que surja un problema o un imprevisto durante la ejecución de la unidad de obra. Por ejemplo, si existe un problema con la calidad del material siempre será posible cambiar la maquinaria de estabilizado al tajo colindante mientras se decide qué medidas tomar. Lógicamente esta es una máxima general para cualquier unidad que debe tener en cuenta un buen jefe de obra.

Es importante lograr una buena coordinación en el caso de que los tajos de extendido de material y estabilizado vayan muy seguidos, evitando interferencias en la maquinaria que hagan que un tajo “ahogue” al otro. Deben habilitarse zonas de paso y deben coordinarse los rendimientos de excavación-extracción, extendido y estabilizado para equilibrar rendimientos. Como se ha indicado antes, es importante disponer de “tajos de reserva”.

6.4.3. Averías

En el caso de la vía húmeda las averías de la maquinaria suelen ser, desgraciadamente, frecuentes, especialmente en las estabilizaciones con cal. Los atascos en los conductos de la lechada son continuos sobre todo si existen paradas. El rendimiento de la vía húmeda está muy sujeto a estas averías. Una buena conservación, personal eficiente y limpieza son importantísimas para un buen rendimiento

6.4.4. Problemas con el material a estabilizar

Lógicamente la dureza del material a estabilizar influirá en el rendimiento de la máquina, pero eso sólo se notará de forma algo apreciable en la estabilización de los fondos de desmonte y con maquinaria de estabilización de poca potencia.

La característica más influyente de material a estabilizar desde el punto de vista del rendimiento del proceso será su abrasividad. Si se tratan materiales abrasivos, el desgaste en las herramientas de corte de la maquinaria será elevado, lo que obligará a intensificar el mantenimiento. Esto puede hacer aconsejable mantener personal adicional encargado de las tareas de revisión y mantenimiento en horas de parada.

Otro aspecto decisivo a tener en cuenta es el grado de homogeneidad conseguido en la unidad de obra terminada. En este sentido, no basta con una dosificación adecuada de conglomerante sino que, además, influye la calidad del amasado realizado por la maquinaria y por supuesto el tipo de material tratado. La homogeneidad viene muy condicionada por la velocidad de avance de la maquinaria y el estado de mantenimiento de la misma (picas, velocidad del rotor, inyectores). Por otro lado, el tipo de material también influye en las resistencias al avance, materiales arcillosos interponen mayor dificultad que los materiales limosos.

La existencia de piedras en la masa del suelo puede dañar los útiles de corte de la maquinaria. El maquinista deberá estar atento a esta circunstancia. En cualquier caso, la presencia de bolos grandes (mayores de 80 mm) puede provocar pérdidas importantes en el rendimiento, condicionando los avances. En algunos casos puede ser recomendable una o varias pasadas previas con grada de rejas, que retire las piedras y evite este problema. Será pues un coste añadido y un proceso adicional que diseñar.

6.4.5. Limitaciones de ejecución. Climatología

El viento puede ser un buen enemigo para la vía seca, por lo que habrá que tenerlo en cuenta en zonas donde este meteoro sea importante. No se podrá extender conglomerante en polvo cuando la velocidad del viento sea superior a 10 m/s.

La solución más frecuente es humedecer previamente la superficie donde se vaya a extender la cal o cemento para conseguir que se adhiera al terreno. No obstante, la capacidad del viento para desecar la superficie del material es muy alta por lo que deben preverse los equipos necesarios para poder pulverizar continuamente una película de agua hasta que se extienda el riego de curado. Este aumento de la humedad no es significativo y no afectará apenas a la unidad terminada ni al proceso de ejecución.

La ejecución en tiempo lluvioso se puede tratar de la misma forma que cualquier otra unidad de obra (por ejemplo aglomerado u hormigones). Si la lluvia es abundante será necesario parar ante la imposibilidad de compactar el material a causa del incremento considerable de humedad por encima de la óptima. En ese momento habrá que sellar la capa para evitar excesos de humedad.

Una capa ya estabilizada y compactada es muy impermeable, por lo que el periodo crítico del proceso será la extensión del material (en el caso de núcleo de terraplén) y el momento de extendido y mezclado del conglomerante.

En cuanto a la temperatura existen limitaciones de ejecución en tiempo frío y en tiempo caluroso. En general no se debe estabilizar cuando la temperatura está por debajo de 5° C ni cuando excede los 35 ° C a la sombra.

La limitación de bajas temperaturas debe aplicarse sobre todo a estabilizaciones con cemento, ya que la ganancia de resistencia será muy débil por debajo de la temperatura indicada. En lo referente a estabilizaciones con cal, la adición de cal viva puede permitir incluso tratar suelos congelados, ya que como se ha indicado, la reacción de hidratación de la cal es muy exotérmica. En algunos casos se ha empleado como solución utilizar agua caliente en el caso de vía húmeda.

En lo que se refiere al calor, el problema es que las altas temperaturas pueden producir una fuerte desecación del material que influirá de manera perniciosa en las reacciones de hidratación. Algunos paliativos del calor pueden ser el mezclado con agua fría en caso de vía húmeda, pulverización constante durante la estabilización y extensión del riego de curado casi inmediatamente después de la estabilización.

En el caso de estabilizaciones con cemento pueden usarse retardadores de fraguado o cementos con altos contenidos en adiciones. En este sentido hay que indicar que no es

buena práctica usar cementos de mayores resistencias a fin de minimizar la dosificación, pues trae problemas de retracción y por tanto de fisuración.

6.4.6. Cercanía y cantidad de agua:

La unidad de obra de estabilizado requiere un continuo suministro de agua. Dependiendo de la humedad natural del terreno, la humedad óptima a alcanzar y el tipo de material variarán los requerimientos de agua. Es, por tanto, esencial, tener estudiadas las necesidades sobre un terraplén de prueba a fin de diseñar un sistema de suministro continuo y fiable que no repercuta en el rendimiento de la unidad. También habrá que estudiar en laboratorio y en el terraplén de prueba la cantidad de agua necesaria para las dosificaciones de conglomerante proyectadas (fórmula de trabajo). Como norma básica se debe considerar que la humedad bajará en dos puntos porcentuales por cada punto en peso de la cal o cemento añadido.

En cuanto a la calidad del agua, no suele controlarse puesto que se utilizan normalmente aguas potables.

6.4.7. Otros factores:

Lógicamente, existen infinidad de factores externos y particulares de cada obra que habrá que tener en cuenta en el diseño y programación de los trabajos de estabilización o tratamiento de suelos. Dependerán de cada obra, pero siempre unos buenos profesionales, un buen equipo de producción, limpieza y preocupación por el trabajo realizado serán un buen fondo donde apoyar un trabajo bien hecho y con calidad.

7. CONCLUSIONES

- Es fundamental lograr una buena organización de obra que consiga buenos rendimientos y calidades de ejecución. Para ello es prioritario definir el tipo de tratamiento a realizar (vía seca o húmeda), la intensidad de dicho tratamiento (estabilización, modificación), las interacciones e interferencias con otras unidades de obra (excavación, extendido) así como los elementos particulares del proceso productivo (tipo de maquinaria, climatología, topografía, etc.)
- Para adecuar el tipo de procedimiento constructivo a seguir en la estabilización es importante conocer que con la vía húmeda se alcanza un rendimiento diario que puede ser del orden de la mitad que en vía seca.
- En el caso de explanadas (vía húmeda) hay que tener en cuenta que los períodos de curado de las capas pueden ser importantes (del orden de 3 a 7 días), lo que condiciona mucho su uso en cuerpo de terraplén. En el caso de tratamientos o modificaciones de propiedades (vía seca) los períodos se acortan bastante (unas 24-72 horas) y en la práctica se trabaja encima de estas capas pasando de 6 a 8 horas de su tratamiento.
- Con la vía húmeda se garantiza en teoría un mejor control en la dosificación de conglomerante, pero presenta problemas de mantenimiento (dosificadores) y de rigidez en los tajos (maquinaria específica no siempre disponible, necesidades de elementos adicionales de transporte). Por tanto, parece más adecuado restringir el uso de vía húmeda a estabilizaciones en explanadas y utilizar vía seca para el resto (terraplenes).

8. BIBLIOGRAFÍA

- Introducción al uso del cemento en explanadas y capas de firme (Carrascón Ortiz, Sergio, 2006)
- Manual de estabilización de suelos con cal (ANCADE, 2005)
- Normativas para el tratamiento con cal de suelos arcillosos (Castanedo Navarro, Francisco J., 2006).
- Recomendaciones para la redacción de pliegos de especificaciones técnicas generales para el tratamiento de los suelos con cal (GIASA, 2003).
- Tratamiento de modificación de suelos arcillosos con cal por vía húmeda (Castanedo Navarro, Francisco J. et al., 2006).
- Tratamiento de suelos con cal (ANCADE, 2005)
- www.firmesecologicossoltec.com
- www.wirtgen.de