



FICHA TÉCNICA

UNIDAD DE SUELO ESTABILIZADO IN SITU

TRABAJOS BITUMINOSOS S.L.U

INDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. NORMATIVA.....	4
3. ESTUDIOS PARA EL TRATAMIENTO.....	5
4. ETAPAS DE LA EJECUCIÓN.....	6
5. MAQUINARIA Y EQUIPOS PARA EL TRATAMIENTO DE SUELOS.....	6
5.1. RECICLADORAS - ESTABILIZADORAS.....	7
5.2. EQUIPOS VÍA SECA.....	8
5.3. EQUIPOS VÍA HÚMEDA.....	10
6. EJECUCIÓN DE LAS OBRAS.....	11
6.1. PREPARACIÓN DE LA OBRA.....	11
6.2. TRAMO DE PRUEBA.....	12
6.3. EJECUCIÓN SUELO ESTABILIZADO IN SITU.....	12
6.4. COMPACTACIÓN.....	13
6.5. REFINO Y NIVELACIÓN.....	14
6.6. CURADO Y PROTECCIÓN SUPERFICIAL.....	14
7. GESTIÓN DE CALIDAD.....	15
8. CONCLUSIONES.....	16
9. REFERENCIAS.....	16

1. INTRODUCCIÓN

Varias son las razones por las que la estabilización de explanadas ha tenido y tiene en España una amplia difusión. Entre ellas, cabe destacar la consecución mediante esta técnica de una buena plataforma de apoyo que colabora estructuralmente con el resto del firme, el permitir circular por terrenos intransitables, reducir la sensibilidad al agua de la explanada y en general una mejora de la durabilidad de todo el firme, incrementándose la resistencia a la fatiga, a la erosión y a los agentes climáticos de todo el conjunto.

Hoy en día, las necesidades funcionales, económicas y ecológicas en la construcción de infraestructuras determinan un mayor uso de suelos estabilizados. Debido a la creciente escasez de materiales naturales de calidad, se busca cada vez más el aprovechamiento de suelos locales, diseñándose un firme económico y duradero.

La normativa vigente recomienda esta técnica para la capa superior en la formación de las explanadas, por razones de seguridad y uniformidad de la capacidad estructural en toda la traza, frente a una aportación directa de suelos sin tratar.

A todo ello se suman importantes ventajas medioambientales al permitir el aprovechamiento de los suelos existentes en la traza, aunque estos sean suelos marginales o inadecuados, evitando también la creación de vertederos.

Los **suelos estabilizados in situ con cemento o con cal**, conocidos y hasta normalizados mucho antes, empezaron a ser la regla más que la excepción no sólo cuando los suelos locales no eran apropiados por su sensibilidad al agua, erosionabilidad, cambios de volumen, etc., sino cuando se deseaba una elevada capacidad de soporte, acorde con la importancia de la vía. Actualmente las propuestas de 1975 han sido refrendadas y puesta al día en las categorías de suelos mejorados con cemento o con cal S-EST 1 y S-EST 2 y de suelos estabilizados S-EST 3 con cemento.

En los años 90, las restricciones ambientales respecto a préstamos y áridos de calidad impulsan con fuerza tanto las explanadas estabilizadas como el reciclado de firmes. Ambos se desarrollan gracias a la disponibilidad de potentes máquinas estabilizadoras-recicladoras y a unos costes competitivos.

La estabilización se puede aplicar en un gran número de proyectos, como son la formación de explanadas para todo tipo de carreteras, realización de caminos rurales y pistas forestales, aparcamientos y explanadas de fábricas, áreas de almacenaje, pistas de rodadura y servicio de aeropuertos, vía ferrocarriles, revestimiento de canales y lagos, estabilización de laderas, recuperación de terrenos contaminados o rellenos estructurales..



2. NORMATIVA

En el artículo 512, Suelos estabilizados in situ del PG-3 se exponen las características exigidas a los suelos para poder ser estabilizados con cemento o cal. Estas se resumen en la siguiente tabla.

Características del suelo	Norma de ensayo	Tipo de estabilización		
		S-EST 1	S-EST 2	S-EST 3
Tamaño máximo (mm)	UNE-EN 933-2	80	80	80
% pasa # 0,080 mm	UNE-EN 933-2	< 50	< 50	< 35
% pasa # 2 mm	UNE-EN 933-2	>20	>20	>20
Límite Líquido (LL)	UNE 103103	-	≤ 40	≤ 40
Índice de Plasticidad (IP)	UNE 103104	≤ 15	≤ 15	≤ 15
% Sulfatos Soluble (Incl. Yeso)	UNE 103201	-	< 1	< 1
% Materia Orgánica	UNE 103204	< 2	< 1	< 1

Aunque además se imponen otros criterios restrictivos como la ausencia de asentamiento en el ensayo de colapso realizado según NLT-254, ni hinchamiento en el ensayo de expansión según UNE 103601, existe una amplia experiencia en Navarra y País Vasco de suelo estabilizado con cemento con rocas evolutivas tipo margas, lutitas, argalitas, limolitas y otras que no cumplen estas prescripciones del PG-3, pero que cumplen el ensayo de hinchamiento acelerado UNE-EN 13.286-49.

Los espesores de las capas estabilizadas para la formación de explanadas recogidos en las distintas normativas suelen ser de 25 ó 30 cm. En algunos casos se han construido capas estabilizadas de 35 y 40 cm, pero ello requiere el empleo de equipos de suficiente potencia y una ejecución muy cuidadosa, a fin de asegurar que se consiguen las densidades especificadas, sobre todo en fondo de capa. Por ello dicha posibilidad no se contempla por el momento en las distintas normativas.

Las definiciones de las estabilizaciones se realiza en relación con unas características mínimas a cierta edad (7 días) para asegurar la capacidad de soporte y unos contenidos mínimos de cemento para asegurar la homogeneidad del mezclado. Realmente las estabilizaciones tipo S-EST1 y S-EST2 se pueden considerar como materiales granulares, por el contrario, el tipo S-EST3 es un material bastante rígido, dotado de una apreciable resistencia mecánica. De ahí que para valorar su características mecánicas se les exija a los dos primeros el ensayo CBR y al tercero el de resistencia a compresión simple. Las especificaciones sobre características mecánicas de estos materiales se muestran en la siguiente tabla.

	CONGLOMERANTE		A 7 días		% Dmáx. P.M.	UNIDAD TERMINADA	
	TIPO	%	CBR	Rcompresión		E _{v2}	DEFLEXIÓN PATRÓN
S-EST 1	Cemento o cal	≥ 2	≥ 6	-	0,97	>60	≤250
S-EST 2	Cemento o cal	≥ 3	≥ 12	-	0,97	>120	≤200
S-EST 3	Cemento	≥ 3	-	≥ 1,5 MPa	0,98	>300	≤125

3. ESTUDIOS PARA EL TRATAMIENTO

Cuando se proyecta estabilizar un suelo es indispensable proceder a un estudio previo cuyo esquema y consistencia dependen de los conocimientos que se tengan sobre el propio suelo y las anteriores experiencias de tratamiento. El objetivo es determinar que tipo de conglomerante a emplear y las dosificaciones a aplicar en función de:

- ✓ Las características del suelo (tipo, clasificación, grado de humedad, etc.)
- ✓ El destino de los materiales tratados (rellenos, explanadas, bases/sub-bases, etc). Para ello es necesario un estudio geotécnico y de las características del suelo lo más preciso posible.
- ✓ Elección y dosificación del conglomerante

De acuerdo con las características del suelo se selecciona el tipo de conglomerante más apropiado para conseguir la capacidad de soporte o la resistencia solicitada.

En la figura 1 se incluye un gráfico orientativo sobre cuando usar cal o cemento, pues aunque esta posibilidad pueda quedar determinada en la normativa donde se fijan unos límites, hay casos de obras en los que, aún habiéndolos rebasado ligeramente, se han obtenido resultados correctos.

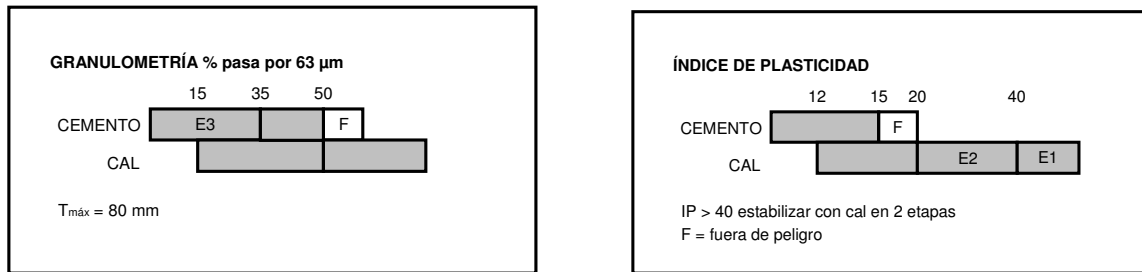


Figura. 1. Gráfico simplificado para determinar el conglomerante

Otra opción que no hay que descartar, es la estabilización mixta con cal y cemento, bien porque el suelo tenga mucha humedad y requiera previamente un secado, o bien porque contenga finos muy plásticos sobre los que no se consigue obtener resistencias con la acción del cemento. Con un 1-2% de cal se reduce la plasticidad, aumentando la humedad óptima de compactación y disminuyendo la densidad máxima del suelo, y tras un período de maduración, con un 3-4% de cemento se pueden lograr las resistencias especificadas para obtener una explanada de calidad.

Definido el conglomerante, se realizan los ensayos de dosificación necesarios para conocer la cantidad del mismo necesaria. Para ello se realiza el ensayo Proctor Modificado, con cada contenido de cemento, que nos facilita la humedad óptima y la densidad máxima, obteniéndose el valor del índice CBR y, en el caso de explanada E3 en la que se exige una resistencia de 1,5 MPa a la edad de 7 días, se confeccionan probetas para romper a la edad exigida.

Lo que se persigue con estos ensayos es definir la fórmula de trabajo en la que habrá que indicar la dosificación de cemento, la humedad del suelo en el momento de la mezcla, la humedad de compactación y el valor mínimo de la densidad a obtener.



4. ETAPAS DE LA EJECUCIÓN

Las operaciones a realizar en la estabilización in situ son en general las siguientes:

- Preparación del suelo al menos en tres aspectos básicos: Granulometría (escarificado, disgregación y retirada de gruesos), humedad (humectación o secado) y nivelación.
- Distribución del conglomerante: Según como se realice, se diferencia entre estabilizado por vía seca (el cemento se extiende en polvo sobre la superficie de la capa a estabilizar) o por vía húmeda (se incorpora como lechada al suelo dentro de la estabilizadora).
- Mezclado: Un adecuado proceso de mezclado, con la humedad apropiada para asegurar una buena homogeneidad del suelo estabilizado en todo el espesor requerido, es muy importante para lograr un aprovechamiento óptimo de esta unidad.
- Compactación inicial: Tras el mezclado se realizan varios ciclos de compactación con rodillo vibrando a su máxima amplitud para compactar bien el fondo de la capa.
- Refino o nivelación: Posteriormente se lleva a cabo un refino con la motoniveladora para obtener la rasante.
- Compactación final: Se realiza con un rodillo liso hasta obtener la densidad especificada.
- Curado y/o protección superficial: El curado se puede realizar manteniendo la superficie húmeda mediante un riego con agua pulverizada, o bien extendiendo una emulsión bituminosa de rotura rápida y baja viscosidad con una dotación mayor de 300 gr/m² de betún residual. Para poder soportar el paso inmediato de los vehículos sin que se produzcan deformaciones importantes que puedan perjudicar su comportamiento posterior, el suelo estabilizado con cemento debe tener un esqueleto mineral con estabilidad suficiente. Para la estimación de la misma, se emplea el índice de capacidad de soporte inmediata (norma UNE-EN 13286-47), que debe ser como mínimo igual a 50 para poder permitir la apertura a la circulación. En este caso se puede proteger con un riego de curado arenado con una gravilla 3/6, aplicada con una dotación 2-4 l/m².

5. MAQUINARIA Y EQUIPOS PARA EL TRATAMIENTO DE SUELOS.

La maquinaria a emplear en el tratamiento de suelos debe ajustarse al tipo de tratamiento, a las especificaciones técnicas a satisfacer por el mismo, a las condicionantes medioambientales, así como a la situación geográfica y climatológica de la obra.

Es fundamental realizar un adecuado mantenimiento de los equipos, que permitan optimizar sus características. Para ello, además, los equipos deben estar siempre perfectamente calibrados.

Antes de proceder a estabilizar el suelo puede ser necesaria algunas operaciones previas encaminadas a la preparación del material a ser tratado con cemento o cal.

Escarificar el suelo para facilitar su aireación, esponjamiento o secado; disgregación de suelos cohesivos, para permitir el correcto mezclado; retirada de partículas gruesas en suelos con tamaño superior al admisible, son algunas de las posibles actuaciones que tenemos que tener en cuenta antes de proceder a estabilizar el suelo.

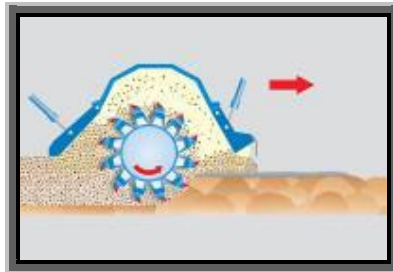
No podemos olvidar que las máquinas recicladoras – estabilizadoras no son trituradoras de material y pueden ocasionar un elevado consumo de material de desgaste e incluso provocar alguna avería que produciría un elevado coste en la unidad.

Para ello existen diferentes métodos y maquinaria preparadas para estas funciones, como pueden ser las cribas y desprededoras, o en el caso, de tener puntualmente alguna piedra mayor del tamaño permitido, se puede optar por utilizar el ripper de dientes múltiples montados sobre una motoniveladora para escarificar el material y retirar el árido grueso.

Como ya hemos comentado anteriormente, en el caso de la estabilización “in situ” existen dos procedimientos de humectación del suelo y distribución del conglomerante, por vía seca y vía húmeda.

5.1. RECICLADORAS - ESTABILIZADORAS

Los equipos modernos de mezclado in situ modernos disponen todos de un mezclador tipo pulvimezclador situado en la parte central de la máquina y dotado de cámara de mezclado y rotor.



La cámara de mezclado puede tener barras de impacto en su zona delantera (en el sentido del avance), para reducción de partículas gruesas, una o dos compuertas de apertura regulable, así como un sistema de difusores para la distribución de agua, lechada o aditivos de líquidos.

El ancho del rotor determina el ancho de trabajo, habitualmente 2,44 m, y su diámetro, con y sin los útiles de disgregación y mezcla, determinará la profundidad máxima de mezcla, que en los equipos modernos varía entre 35 y 50 cm.

Los elementos de desgaste del rotor son las picas, portapicas, brazos y bases, siendo necesario su cambio en función de la abrasividad y granulometría del suelo.

El sentido de giro del rotor es contrario al sentido del giro de las ruedas motrices, de esta manera, permite una mayor finura de disgregación y homogeneidad de la mezcla.

La velocidad de giro del rotor (revoluciones por minuto) y la velocidad de los extremos de los útiles condicionan el rendimiento. Estos equipos incorporan varias velocidades, que se seleccionan desde la cabina en función de la resistencia del material a estabilizar y/o de la cantidad de lechada o agua aportar.

Estos equipos pueden llegar a profundidades de 500 mm, aunque el espesor lo limita la capacidad de compactación de los compactadores habituales para suelos granulares.

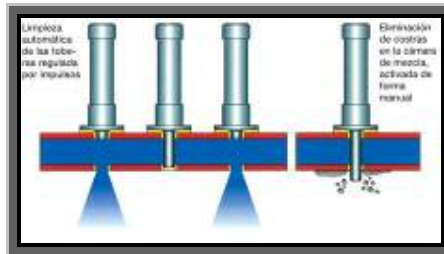
Las cámaras de mezcla están dotadas de una o dos compuertas de apertura regulable manualmente o hidráulicamente. La compuerta posterior en el sentido de avance de la máquina regula la altura de salida del material y el tiempo que éste permanece en la cámara de mezcla.

Las características del sistema de dosificación de aditivos líquidos consiste en un sistema de bombeo que envía el líquido a una barra con 16 difusores situada en la cámara de mezcla.



El equipo está gobernado por un microprocesador que el operador programa desde la cabina. Desde este puede controlar la apertura y cierre de cada inyector de manera individual para la ejecución de los solapes en bandas, así se ajusta el ancho del tratamiento simplemente cerrando los difusores que no sean necesarios y se disminuyen las pérdidas por solapa y la sobredosificación en estas zonas.

Los inyectores poseen un sistema automático de limpieza para evitar que se obstruyan y así no dejar ninguna banda sin dosificar.



Tienen incorporado un caudalímetro para la regulación del caudal que, además, está ligado a la velocidad del avance del equipo.

Una característica importante de este equipo es la información de la que dispone el operador en cabina y de la forma en la que ésta es presentada. La información debe ser completa, clara y útil para facilitar la labor del operador y así, optimizar el rendimiento.

Así mismo, es importante la ergonomía del puesto de operación. La visibilidad es de igual forma fundamental para garantizar un trabajo adecuado.

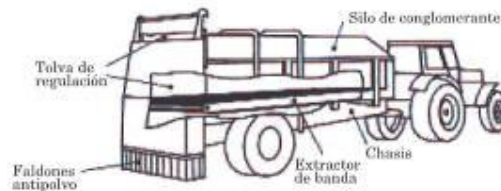
5.2. EQUIPOS VÍA SECA

El procedimiento conocido como vía seca, el conglomerante es distribuido sobre el suelo generalmente mediante equipos distribuidos en una operación previa al mezclado.

El sistema de dosificación empleado es normalmente volumétrico, en general a través de un elemento dosificador constituido por un tambor alveolar, o simplemente a través del sistema de transferencia del conglomerante desde el depósito, que pueden ser uno o dos tornillos sinfín, una o más bandas transportadoras, o un sistema de transporte neumático. El dispositivo, por tanto, controla el caudal del conglomerante repartido y su funcionamiento puede estar ligado a la velocidad del avance de la máquina.

Estos equipos disponen de un sistema de dosificación que incluye una tolva menor de regulación, situada directamente antes de un tambor alveolar encargado de la dosificación del polvo. El sistema se encarga de que el nivel de esta tolva permanezca aproximadamente constante de manera que el funcionamiento del elemento dosificador no se vea afectado por variaciones de volumen de cemento o cal en el depósito.

Este elemento puede estar a la vez dividido en comportamientos o esclusas, de manera que se pueda variar el ancho de reparto.



Para reparto del material en el ancho de trabajo suelen incluir un tornillo sinfín. El ancho de reparto se regula mediante la apertura de compuertas situadas bajo el sinfín. Poseen un alimentador de banda metálica, con apertura de una trampilla situada sobre la banda que determina, junto con la velocidad de la cinta, el caudal dosificado.

La posibilidad de regular el ancho de reparto es muy importante puesto que permite minimizar los solapes en la distribución del conglomerante.

Estos equipos incorporan los siguientes elementos, que son de gran utilidad para facilitar la labor del operador del distribuidor, así como para controlar el trabajo realizado:

- Dispositivo indicador de la dosificación
- Indicador del nivel en el depósito, con aviso de máximo y mínimo
- Dispositivo de medida de la cantidad de conglomerante extendido:
- En peso
- En volumen
- Sistema de guía para el extendido de calles paralelas

Estos equipos disponen de los siguientes dispositivos antipolvo:

- Filtros para evitar la formación de polvo durante la carga, o durante el funcionamiento normal de los distribuidores.
- Sistema de pulverización de agua a la salida del dosificador, con depósito y rampa de pulverización para supresión de polvo
- Faldones a la salida del elemento dosificador

La capacidad del depósito de estos distribuidores suele ser de 12 m³, remolcados mediante tractores agrícolas.

Conviene tener presente la diferente densidad aparente de los distintos conglomerantes, que en primera aproximación es:

- Cemento: 1,1 t/m³
- Cal viva: 0,9 t/m³
- Cal apagada: 0,45 t/m³

La humectación del material en la vía seca se puede realizar de dos formas:

- ✓ Riego de agua sobre la superficie a tratar mediante cisterna de agua tradicional antes de la distribución del cemento o la cal. En algunos casos, dependiendo del tipo de material, es conveniente escarificar previamente el suelo.
- ✓ Los equipos modernos de estabilización incluyen un sistema de dosificación e inyección e inyección de aditivos líquidos en la cámara de mezcla. Estos sistemas cuentan con una bomba volumétrica que a través de un caudalímetro regula la cantidad exacta, profundidad de

tratamiento y densidad del suelo. Para ello, la cisterna de agua se acopla a la estabilizadora produciéndose el avance de ambos de forma simultánea, unida a ella mediante una manguera larga.



La incorporación de agua directamente a la cámara de mezcla proporciona dos ventajas respecto al primer sistema. Por una parte, se controla perfectamente la cantidad de agua añadida por unidad de volumen y, por otra, se garantiza una distribución homogénea del agua dentro de la masa del suelo al producirse dicha distribución homogénea del agua dentro de la masa del suelo al producirse dicha distribución en el momento en el que el suelo se encuentra totalmente disgregado en la cámara de mezcla.

En este último caso, es imprescindible tener en cuenta la necesidad de al menos dos cisternas de agua, dependiendo de la lejanía del canon de agua y del tiempo estimado de cada suministro.

5.3. EQUIPOS VÍA HÚMEDA

Cuando el tratamiento a realizar admita la aportación de una cantidad mínima de agua al suelo, se puede inyectar el ligante y el agua conjuntamente en forma de lechada directamente a la cámara de mezclado.

Este equipo de fabricación de lechada se acopla a los de mezclado y avanzan simultáneamente con ellos. Disponen de dos silos para el conglomerante con capacidad suficiente para transferir el cemento a la cal del suministro que nos transportan a obra, entre 25 a 28 Tn, un depósito de agua de 10.000 litros y un mezclador de tipo centrífugo para fabricar la lechada, fabricándola en peso, a través de un tornillo sinfín pesador, mientras que el agua es volumétrica. Una vez fabricada la lechada, mediante una bomba regulada por un microprocesador que ajusta el caudal de lechada a la velocidad de desplazamiento instantánea del equipo, se inyecta directamente al sistema de difusión situado en la cámara de la máquina de mezclado.



Dosificador vía húmeda – WM1000

Ventajas

- ✓ Al tratarse de una adición líquida que se produce directamente en la cámara de mezcla evitamos pérdidas de conglomerante por la acción del viento.
- ✓ Equipos indicados en obras con restricciones medioambientales a la emisión de polvo

Desventajas

- ✓ No es posible utilizar este sistema cuando la humedad del suelo se encuentra próxima a la óptima de trabajo.
- ✓ Reducción de rendimientos, al estar la operación de mezcla ligada a la de reparto.

Para decidir si el extendido del conglomerante ha de realizarse por vía seca o húmeda es necesario tener en cuenta una serie de factores: Época del año, tipo de suelo, configuración y tamaño de la obra, condiciones de tráfico local o de obra, etc.

6. EJECUCIÓN DE LAS OBRAS

Las operaciones a realizar en la ejecución de los tratamientos in situ son habitualmente las siguientes:

- Preparación del suelo
- Distribución del conglomerante
- Mezclado
- Compactación inicial
- Refino o nivelación
- Compactación final
- Curado o protección superficial

De acuerdo con el tipo de obra y los equipos disponibles, algunas de las operaciones anteriores pueden agruparse o realizarse conjuntamente.

6.1. PREPARACIÓN DE LA OBRA

Es importante señalar que la ejecución general de las explanaciones debe ser especialmente cuidadosa cuando las condiciones climatológicas sean adversas y haya riesgo de precipitaciones.

En la ejecución del movimiento de tierras es necesario ir formando adecuadamente la pendiente transversal y la rasante longitudinal de la infraestructura con el objeto de garantizar el correcto desagüe de la plataforma, debiendo evitarse cualquier irregularidad que pueda retener el agua.

La preparación del suelo tiene como objetivo fundamental homogenizar la fracción a estabilizar que puede ser muy variable según los suelos existentes, facilitando además la acción de los equipos de mezclado.

Antes de empezar las operaciones propias de preparación del suelo, es necesario tener disponible el mismo. Para ello, si se trata de la estabilización del suelo existente y hay materia orgánica en superficie, debe retirarse ésta previamente a la nivelación. Por otro lado en las zonas en terraplén se deberá proceder a la aportación del material, procedente de algún desmonte de la traza o bien de préstamos. En este último caso, el suelo probablemente será mucho más homogéneo y de mejores características, por lo que la dosificación de conglomerante a emplear será presumiblemente inferior a la empleada en otras zonas de la traza.

Así, la obra debe tramificarse, de acuerdo a los materiales disponibles, en zonas homogéneas lo suficientemente extensas para optimizar el proceso sin llegar a confundir a los operarios.

Las etapas que incluye la preparación del suelo son:

- ✓ Escarificado y disgregación
- ✓ Aireación o humectación para conseguir la humedad óptima
- ✓ Nivelación

Es muy importante nivelar el terreno de acuerdo con la rasante de la explanada, dejándolo preparado para el extendido y mezclado con el conglomerante. Esta nivelación previa permite aprovechar al máximo el material y agilizar la terminación de la capa, al evitarse los ajustes de rasante del material estabilizado durante su plazo de trabajabilidad. En este sentido, se recomienda compactar el suelo al 95% de la densidad máxima del ensayo Proctor Modificado, nivelándolo con la misma tolerancia que se prescribe para el material estabilizado.

6.2. TRAMO DE PRUEBA

Antes de iniciar la obra, se debería realizar un tramo de prueba con la fórmula de trabajo seleccionada, a fin de corroborar su factibilidad de puesta en obra y compactación y para verificar, mediante tomas de muestras del material, la conformidad con las condiciones especificadas de humedad, profundidad de capa estabilizada, granulometría del material disgregado, dosificación de conglomerante y uniformidad en la dosificación, así como todos los demás requisitos exigidos.

En dicho tramo de prueba se deben definir la composición y forma de actuación de los equipos de compactación, fijando:

- ✓ Modo de empleo de cada rodillo
- ✓ Número de pasadas
- ✓ Recorridos de los rodillos
- ✓ Orden de intervención de los mismos

Además se debe establecer la relación entre el número de pasadas y la densidad alcanzada para cada compactador y para el conjunto del equipo de compactación. También puede servir para establecer la correlación entre los métodos de control de la humedad y densidad in situ establecidos en el Pliego y otros métodos rápidos de control que se vayan a emplear, como la sonda nuclear.

6.3. EJECUCIÓN SUELO ESTABILIZADO IN SITU

El proceso de ejecución del suelo estabilizado suele ser por calles de unos 100 a 150 metro lineales, cubriendo la cantidad de cemento que viene a obra en cada cisterna, realizando el mezclado solapando con las franjas colindantes, hasta completar el ancho de la explanada. Mientras se finaliza el mezclado de cada carril se incorpora el compactador para ir cerrando la capa mezclada con el objetivo de no perder la humedad de la mezcla y conseguir la primera compactación requerida según el Proctor Modificado. Una vez acabado todo el ancho se procede al refino con motoniveladora y a la compactación final.

En el caso de emplearse cemento, todas estas operaciones deben terminarse dentro del plazo de trabajabilidad del material.

En ambos casos, las bandas se deben solapar suficientemente (15-20 cm) para no dejar materiales sin mezclar en los bordes de las mismas.

La homogeneidad de la mezcla y el rendimiento obtenidos dependen de diversos parámetros que se deben coordinar correctamente como son la velocidad de avance de la maquinaria y la velocidad de giro del rotor.

El rendimiento puede variar mucho dependiendo de los equipos empleados, del espesor a estabilizar y de las características del suelo a tratar.

Evidentemente la naturaleza del terreno tiene una gran influencia: cuanto más duros sean los materiales y más grandes su tamaño, menor será el rendimiento por la dificultad en el avance y el mayor desgaste de picas y portapicas.

6.4. COMPACTACIÓN

Una correcta compactación tiene una gran influencia en la calidad final.

La densidad mínima exigida es el 97% de la densidad máxima Proctor Modificado para S-EST 1 (95% si la capa no es coronación), y el 98% para S-EST 2 y S-EST 3. Estos valores corresponden a la densidad media en el conjunto del espesor de la capa.

Dado que el material se debe compactar en una única tongada, se debe disponer de equipos de compactación capaces de conseguir la densidad especificada.

Es usual utilizar un compactador pesado de 18 t de peso con carga estática sobre generatriz de 500 N/cm o superior, para capas de 25 a 40 cm, y algo menos pesados, con carga estática del orden de 350 N/cm, para capas entre 15 y 25 cm.

Ambos compactadores se pueden utilizar también conjuntamente disponiendo el más pesado tras el equipo de estabilización y el segundo (normalmente de un peso del orden de 14-17 t) para completar la compactación tras el refino con motoniveladora.



Es muy importante mentalizar adecuadamente al maquinista de la importancia de su trabajo, pues la monotonía del mismo puede dar lugar a que se reduzca el número de pasadas y la compactación de algunas zonas.

Los conductores de los compactadores han de conocer:

- ✓ Momento en el que deben de intervenir
- ✓ Velocidad de trabajo de su compactador
- ✓ Parámetros de trabajo (Frecuencia y amplitud de la vibración)
- ✓ Número de pasadas que tiene que realizar

Durante la compactación se debe efectuar un control continuo de la densidad alcanzada y de la humedad mediante el uso de equipos rápidos como la sonda nuclear. De esta forma se pueden detectar anomalías en el proceso y corregir sus causas.

6.5. REFINO Y NIVELACIÓN

Dado que los defectos de regularidad se deben suplir con la capa superior, mucho más cara y cuyo espesor medio se verá incrementado al aumentar las irregularidades de la explanada para conservar en cualquier punto el espesor mínimo definido en proyecto, se debe realizar un refino con motoniveladora.

Para ello, tras una primera compactación inicial hasta alcanzar una densidad del orden del 90-92 % de la máxima del Proctor Modificado, se procede a la nivelación de la capa, eliminando preferentemente el material en vez de compensar las partes baja aportando material de las altas.

El refino debe realizarse de forma rápida y siempre dentro del plazo de trabajabilidad del material estabilizado.



En los suelos estabilizados con cal no se produce ningún fraguado hidráulico y, por lo tanto, no tienen un plazo de trabajabilidad como tal. Este permite una mayor flexibilidad en la organización del proceso de ejecución.

Al ser una operación que depende de la habilidad del maquinista, para lograr buenos resultados son interesantes las motoniveladoras dotadas de equipos auxiliares de nivelación con sistema 3D, guiadas desde una estación total por radio.

6.6. CURADO Y PROTECCIÓN SUPERFICIAL

En el caso de las estabilizaciones con cemento, el Pliego PG-3 prescribe un riego de curado con emulsión de betún residual de 300 g/m². En obras de poca importancia y en condiciones que no favorezcan la desecación, el riego con emulsión puede sustituirse con un curado continuo con agua para asegurar en la capa estabilizada una humedad adecuada durante al menos una semana. En el caso de tener que abrir esta capa al tráfico de obra, no se debe permitir el paso de vehículos ligeros durante los tres primeros días, ni de pesados en los siete primeros. Si no se pueden respetar estos plazos, se debe proteger el riego de curado mediante el extendido de un árido de protección 3/6 con dotación de 2 – 4 l/m². Además, se debe comprobar que el tráfico no provoca un deterioro superficial importante en la capa estabilizada. Esta debe limpiarse bien antes de extender la capa superior.

En las estabilizaciones con cal se recomienda, o bien cubrir con la capa siguiente o bien mantener la humedad de la capa mediante riegos de agua.

Independientemente del curado, siempre que se produzca una desecación superficial por altas temperaturas, sol o viento, se debe humedecer la superficie mediante la pulverización de agua.

7. GESTIÓN DE CALIDAD

El concepto de calidad de cualquier tipo de unidad de obra y, en particular, el de una estabilización de suelos, marca la mayor o menor adecuación del producto final a su funcionalidad durante el periodo de explotación de la carretera.

La calidad de la obra, en cualquier caso, está íntimamente ligada con la calidad requerida, la cual viene fijada por unos requisitos que se deben alcanzar dentro de unos límites prefijados, generalmente en el pliego de prescripciones técnicas particulares del proyecto.

Para conseguir estos requisitos no sólo se deben emplear unos materiales adecuados, sino que esto debe complementarse con los correspondientes equipos de fabricación y puesta en obra. Además es necesario disponer de una estructura de personal que sea capaz de poner en marcha y llevar a buen término las operaciones necesarias. Es decir, deben existir unos procedimientos de producción eficaces.

Dentro de este proceso es preciso efectuar las verificaciones oportunas que nos indiquen que la obra terminada cumple las prescripciones especificadas.

La gestión de calidad comienza por establecer unas especificaciones para todos los elementos que intervienen en el proceso, es decir:

- ✓ Materiales
- ✓ Estudios y ensayos previos
- ✓ Equipos u procesos, tanto de fabricación como de puesta en obra
- ✓ Ejecución
- ✓ Obra terminada

En las especificaciones deben abarcar todos los aspectos que intervienen en el proceso de una estabilización, que son:

- ✓ Los conglomerantes
- ✓ Los suelos que se van a estabilizar
- ✓ Eventuales adiciones o aditivos
- ✓ Finalmente, se deberán fijar las especificaciones del material final producido en el tratamiento

Las especificaciones de la unidad terminada definen los valores a conseguir de los diferentes parámetros.

Así, el PG-3 prescribe, en función del tipo de suelo estabilizado, S-EST 1, S-EST 2 y S-EST3, unos valores mínimos de contenido de conglomerante, de índice CBR a los 7 días, de la resistencia a compresión simple y de la densidad, así como especifica que el suelo estabilizado no presentará ni hinchamiento ni colapso.

La normativa del Ministerio de Fomento exige la medida de los módulos de deformación de la explanada, ya sea mediante el empleo de la placa de carga estática (UNE 103808) o dinámica (UNE 103807), o bien de deflexiones.

El control de los parámetros de una estabilización se realiza, como en el resto de unidades de obra, por muestreo. Se hará una estructura de la unidad de obra donde se definan y asignen códigos a los lotes a ejecutar. El lote debe ser homogéneo con respecto a los materiales que lo constituyen, con objeto de que su muestreo sea correcto y cumpla las condiciones estadísticas.

Los criterios para decidir el tamaño de los lotes son muy variados, pudiéndose establecer, considerando siempre lo realmente ejecutado por el contratista de manera homogénea:

- ✓ En función del ritmo de producción de la estabilización, como lo realizado en un día o una semana
- ✓ Por volumen o superficie: Por ejemplo, 500 m³, o bien 1.500 m²

Las tomas que se tomen deben ser aleatorias y representativas del lote, con objeto de que definan con fiabilidad su homogeneidad y cualidades.

En la unidad de obra de estabilización, los parámetros más interesantes para controlar son:

- ✓ Índice de Plasticidad
- ✓ Índice CBR (a distintas edades)
- ✓ Resistencia a compresión simple
- ✓ Hinchamiento
- ✓ Reducción de finos
- ✓ Compactación (densidad y humedad)
- ✓ Homogeneidad de la tongada (pH, contenido de conglomerante)



8. CONCLUSIONES

La estabilización de suelos para mejorar las características y permitir su aprovechamiento es una técnica moderna, económica y sostenible.

La incorporación de la misma a la normativa vigente ha facilitado su desarrollo en todo el territorio nacional, siendo actualmente una solución ampliamente contrastada por sus ventajas técnicas, económicas y medioambientales.

Es importante realizar los estudios necesarios que permitan la correcta elección del conglomerante a utilizar, pues de ello depende la obtención de los resultados esperados.

Hay que tener en cuenta que los suelos y materiales disponibles, en cada proyecto u obra, serán diversos. Por lo tanto, debe realizarse un estudio que analice todos los tipos de suelos y materiales susceptibles de ser estabilizados.

Debido a ello, será frecuente que se tengan suelos aptos para cal, suelos aptos para cemento, y suelos aptos para estabilizaciones mixtas.

Esta técnica permite la reutilización de los suelos de la traza y el empleo y valorización de residuos en la construcción de firmes en general.

Ello ha hecho que se estén aplicando en la construcción de cualquier parte de nuestra infraestructuras, además de las prescritas en el PG-3, en tratamientos de mejora de terrenos, en tratamientos medioambientales, etc.

9. REFERENCIAS

- Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes PG-3, artículo 512: "Suelos estabilizados in situ". O.C. 10/2002, de 30 de septiembre. Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento.
- Manual de estabilizaciones de suelos con cemento o cal. ANCADE, ANTER, IECA. Madrid 2008
- Ponencias VIII Congreso Nacional de Firmes. Junta de Castilla y León (Valladolid, 2008)
- Ponencias de caracterización de zahorras, suelos estabilizados y materiales tratados con cemento para firmes de carreteras. Intevla, Ministerio de Fomento y CEDEX (Madrid, 2004)