

MANUAL DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CEMENTO O CAL



MANUAL DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CEMENTO O CAL



DIRECCIÓN TÉCNICA Y SUPERVISIÓN

Carlos Jofré (IECA)
Carlos Kraemer (U.P.V.)

SECRETARÍA

Carlos Jofré (IECA)
Ángel Sampedro (consultor)
Miguel López-Bachiller (ANTER)

COMITÉ DE REDACCIÓN

Manuel Atienza (GIASA)
Jesús Díaz Minguela (IECA)
José Antonio Fernández Cuenca (consultor)
Luis Garrido (Ayesa)
Carlos Jofré (IECA)
Carlos Kraemer (U.P.V.)
Miguel López-Bachiller (ANTER)
José María Navarro (consultor)
Rafael Rueda (IECA)
Manuel Salas (CEMOSA)
Ángel Sampedro (consultor)
Pilar Segura (Dragados S.A.)
María José Sierra (GIASA)
Manuel Vera (IECA)

COLABORADORES

Rafael Fernández Aller (ANCADE)
José Gascón y Marín (FCC)
Eduardo Herrero (ANCADE)
Ramón Villamil (Dragados S.A.)

ACRÓNIMOS DE EMPRESAS E INSTITUCIONES

IECA
ANCADE

ANTER

U.P.V.
GIASA
CEMOSA
Ayesa

Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones
Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y
Derivados de España
Asociación Nacional Técnica de Estabilizados de Suelos y
Reciclado de Firmes
Universidad Politécnica de Valencia
Gestión de Infraestructuras de Andalucía, S.A.
Centro de Estudios de Materiales y Control de Obra, S.A.
Agua y Estructuras, S.A.

Editado por:
Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA)
José Abascal, 53 - 2º
28003 Madrid

Diseño y maquetación:
Vaquero Servicios de Publicaciones, S.L.

I.S.B.N.: 978-84-89702-23-3

PRESENTACIÓN

Aunque hace ya más de 50 años que en España empezaron a estabilizarse en algunos caminos agrícolas los suelos de los mismos, su aplicación masiva en carreteras y aeropuertos de nuestro país sólo data de mediados de la década final del siglo XX, gracias al empleo de las modernas estabilizadoras. Estos potentes equipos son muy eficaces en la mezcla in situ del suelo con cemento o cal, consiguiendo obtener, con un rendimiento muy elevado, capas de gran espesor con un material uniforme. También han contribuido a este acelerado desarrollo las restricciones ambientales respecto al empleo de suelos de fuera de la traza de las obras y la necesidad de cimientos de firme más resistentes para un tráfico pesado.

La experiencia ha confirmado el interés de disponer de unas explanadas poco sensibles a la humedad y con una resistencia suficiente para soportar el tráfico de obra sin erosiones o deformaciones. Sin embargo, muchos suelos naturales son de calidad mediocre, por lo que su aprovechamiento sólo es posible mediante su mejora o estabilización con cemento o cal para conseguir una elevada capacidad de soporte.

Esta técnica, aplicada desde hace años en autopistas y autovías, se ha generalizado hoy a todo tipo de obras.

El Manual tiene por objetivo ayudar a proyectistas y constructores que tengan que utilizar suelos estabilizados. A los primeros se les informa con detalle de las características de estos materiales, de las prescripciones técnicas que hay que cumplir, de las posibilidades de su empleo y de cómo proyectarlos. A los segundos se les guía a través de la maquinaria a utilizar, y de los métodos de ejecución. Se contempla asimismo la elección del conglomerante más adecuado en función de la naturaleza del suelo y de la capacidad de soporte buscada. Se examinan en detalle los procedimientos de gestión de la calidad, que cobran un especial interés en este tipo de obras, caracterizadas en general por unos rendimientos muy elevados. Se han incluido también capítulos referentes a la seguridad y a la protección medioambiental, así como a consideraciones económicas, todos ellos de gran importancia práctica.

Hay que destacar que no sólo se ha intentado una síntesis de los conocimientos técnicos actuales en la materia, sino la incorporación en lo posible de la práctica de obra, generalmente no recogida por la bibliografía.

El Manual se ha redactado de acuerdo con las siguientes premisas:

- sencillez y concisión, para facilitar la lectura y la adopción clara de decisiones, explicando en lo posible las justificaciones pertinentes
- inclusión únicamente de los procedimientos avalados por la práctica
- planteamiento general, válido para todas las Administraciones y obras de diversa índole.

El Manual es el resultado de una fructífera colaboración entre el Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), la Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España (ANCADE) y la Asociación Nacional Técnica de Estabilizados de Suelos y Reciclados de Firmes (ANTER). Tanto IECA como ANCADE cuentan con una larga tradición en la elaboración de documentos técnicos y tienen como uno de sus objetivos básicos la transferencia de tecnología, herramienta im-

prescindible para la modernización de la ingeniería y la mejora de la calidad. Por su parte, ANTER es una Asociación de creación más reciente que las dos anteriores, pero en la que muchos de sus miembros poseen una gran experiencia en la ejecución de estabilizaciones, la cual se ha tratado de incorporar a esta obra. Junto con los técnicos de IECA, de ANCADE y de ANTER ha participado un grupo de profesionales relevantes de universidades, Administraciones, empresas constructoras y laboratorios de control de calidad, que han aportado sus profundos conocimientos sobre el tema.

Las tres Asociaciones quieren agradecer a la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento el apoyo que siempre han recibido de la misma para la redacción de este manual.

IECA, ANCADE y ANTER confían en realizar con el presente documento una contribución significativa al desarrollo de la técnica de carreteras en España.

Juan Carlos López Agüí
Director General
IECA

Rafael Fernández Aller
Director General
ANCADE

Miguel López-Bachiller
Presidente
ANTER

ÍNDICE

1	TRATAMIENTOS: MODIFICACIÓN Y ESTABILIZACIÓN DE SUELOS	1
1.1	Modificación y estabilización de suelos	1
1.2	Tipos de tratamiento y campos de aplicación	2
1.2.1	<i>Aspectos generales</i>	2
1.2.2	<i>Secado de suelos para su uso en terraplenes y desmontes</i>	4
1.2.3	<i>Suelos mejorados para su empleo en núcleos de terraplén</i>	4
1.2.4	<i>Suelos mejorados o estabilizados para capas de asiento de firmes</i>	5
1.2.5	<i>Otros ejemplos de utilización</i>	6
1.3	Ventajas de los suelos estabilizados	8
1.3.1	<i>Ventajas técnicas</i>	8
1.3.2	<i>Ventajas económicas y ambientales</i>	8
1.3.3	<i>Limitaciones</i>	9
1.4	Desarrollo de la técnica	9
1.4.1	<i>Inicio de la técnica</i>	9
1.4.2	<i>Desarrollo de la técnica en España</i>	11
1.4.3	<i>Normativa española</i>	13
2	MATERIALES BÁSICOS	15
2.1	Suelos	15
2.1.1	<i>Características generales</i>	15
2.1.2	<i>Clasificación</i>	16
2.1.3	<i>Suelos en terraplenes y explanadas</i>	17
2.1.4	<i>Suelos en capas estabilizadas de explanadas</i>	18
2.2	Cales	20
2.3	Cemento	22
2.3.1	<i>Designación de los cementos españoles</i>	23
2.3.2	<i>Cementos más adecuados</i>	23
2.4	Agua	25
2.5	Aditivos	26
2.6	Emulsiones para riegos de curado	27
3	ACCIONES SOBRE LOS SUELOS	29
3.1	Efectos de la cal	29
3.1.1	<i>Mejora por modificación inmediata</i>	29

3.1.2	<i>Efectos a largo plazo</i>	32
3.2	Efectos de la incorporación del cemento	34
3.2.1	<i>Mejora por modificación inmediata</i>	34
3.2.2	<i>Efectos a medio y largo plazo</i>	35
3.3	Efectos de la adición conjunta de cal y cemento en dos etapas	36
3.4	Propiedades de los suelos estabilizados con cal	37
3.4.1	<i>Granulometría</i>	37
3.4.2	<i>Plasticidad</i>	37
3.4.3	<i>Capacidad de soporte</i>	37
3.4.4	<i>Estabilidad volumétrica</i>	41
3.4.5	<i>Resistencia a compresión</i>	41
3.4.6	<i>Resistencia frente a la acción del agua</i>	43
3.4.7	<i>Permeabilidad</i>	43
3.4.8	<i>Resistencia a los ciclos de hielo-deshielo</i>	44
3.5	Propiedades de los suelos estabilizados con cemento	44
3.5.1	<i>Naturaleza de los suelos estabilizados con cemento</i>	44
3.5.2	<i>Propiedades en estado fresco</i>	46
3.5.3	<i>Propiedades físicas y mecánicas</i>	48
3.5.4	<i>Durabilidad</i>	58
4	MÉTODOS DE DOSIFICACIÓN	61
4.1	Tratamientos con cal	61
4.1.1	<i>Preparación de las probetas y ensayos</i>	61
4.1.2	<i>Porcentaje mínimo de cal</i>	62
4.1.3	<i>Porcentaje óptimo de cal</i>	64
4.2	Tratamientos con cemento	65
4.2.1	<i>Introducción</i>	65
4.2.2	<i>Determinaciones previas</i>	66
4.2.3	<i>Dosificación</i>	66
4.2.4	<i>Dosificación basada en la durabilidad</i>	76
4.2.5	<i>Otros ensayos de caracterización mecánica</i>	76
5	MAQUINARIA Y EQUIPOS PARA EL TRATAMIENTO DE SUELOS	79
5.1	Introducción	79
5.2	Almacenamiento del conglomerante	79
5.2.1	<i>Silos fijos</i>	80
5.2.2	<i>Silos remolcables</i>	81
5.3	Preparación del suelo	82
5.3.1	<i>Cribas y máquinas despedregadoras</i>	82
5.3.2	<i>Maquinaria para la disgregación, escarificación o aireación del suelo</i>	84
5.4	Humectación y distribución del conglomerante	85

5.4.1	<i>Equipos para la distribución del conglomerante por vía seca</i>	85
5.4.2	<i>Equipos para la distribución del conglomerante por vía húmeda</i>	93
5.5	Mezcla in situ	95
5.5.1	<i>Maquinaria de origen agrícola</i>	96
5.5.2	<i>Equipos específicos de obra civil - Estabilizadores de suelos</i>	97
5.6	Compactación	104
5.6.1	<i>Rodillo estático tipo pata de cabra</i>	104
5.6.2	<i>Rodillo vibratorio liso</i>	106
5.6.3	<i>Rodillo vibratorio pata de cabra</i>	108
5.6.4	<i>Compactador de neumáticos</i>	108
5.7	Refino de la superficie	109
5.8	Curado y protección	111
5.9	Tratamiento en central	111
5.9.1	<i>Centrales de fabricación</i>	112
5.9.2	<i>Transporte</i>	113
5.9.3	<i>Extendido</i>	113
6	EJECUCIÓN DE LAS OBRAS	115
6.1	Planteamiento general	115
6.1.1	<i>Tratamiento de suelos en terraplenes y fondos de desmonte</i>	115
6.1.2	<i>Estabilización de las capas de apoyo del firme</i>	115
6.1.3	<i>Etapas</i>	117
6.1.4	<i>Consideraciones prácticas</i>	118
6.2	Secado de suelos	118
6.2.1	<i>Introducción</i>	118
6.2.2	<i>Técnicas de ejecución</i>	120
6.3	Tratamiento y estabilización de los suelos en la construcción de terraplenes y fondos de desmonte	122
6.3.1	<i>Introducción</i>	122
6.3.2	<i>Técnicas de ejecución</i>	123
6.4	Estabilización de capas del cimientto del firme	130
6.4.1	<i>Técnicas de ejecución</i>	130
6.4.2	<i>Limitaciones a la ejecución</i>	143
6.5	Guía práctica de identificación de problemas	144
7	GESTIÓN DE LA CALIDAD	147
7.1	Introducción	147
7.2	Especificaciones a considerar en el PAC para los tratamientos en formación de terraplenes	149
7.2.1	<i>Establecimiento de las especificaciones de los materiales</i>	149

7.2.2	<i>Establecimiento de las especificaciones del proceso de ejecución</i>	151
7.3	Especificaciones de los tratamientos en formación de explanadas . . .	152
7.3.1	<i>Establecimiento de las especificaciones de los materiales</i>	152
7.3.2	<i>Suelos aptos para estabilizar para la formación de las explanadas</i>	155
7.3.3	<i>Características de los suelos una vez estabilizados para formación de explanadas</i>	156
7.3.4	<i>Establecimiento de las especificaciones del proceso de ejecución</i>	157
7.4	Elaboración del Plan de Aseguramiento de la Calidad	158
7.4.1	<i>Estructuración y división en lotes</i>	159
7.4.2	<i>Especificaciones Técnicas de Compra y Fichas de Recepción</i> .	160
7.4.3	<i>Procedimiento técnico de ejecución de la estabilización</i>	161
7.4.4	<i>Plan de Puntos de Inspección y Fichas de Inspección</i>	161
7.5	Control y verificación de equipos	170
7.6	Detección y tratamiento de las no conformidades y medidas correctivas	170
7.7	Análisis de resultados	171
8	PREVENCIÓN DE RIESGOS LABORALES	173
8.1	Identificación de riesgos	173
8.1.1	<i>Del proceso de ejecución</i>	173
8.1.2	<i>Exposición a agentes físicos o químicos</i>	173
8.2	Equipos y medios auxiliares	174
8.2.1	<i>Maquinaria</i>	174
8.2.2	<i>Elementos de protección colectiva</i>	174
8.2.3	<i>Equipos de protección individual (EPI)</i>	174
8.3	Procedimiento de trabajo	175
8.3.1	<i>Actuaciones previas</i>	175
8.3.2	<i>Ejecución</i>	175
8.4	Estabilización con cal	176
8.4.1	<i>Indicaciones generales</i>	176
8.4.2	<i>Protección personal</i>	177
8.4.3	<i>Manipulación y almacenamiento</i>	178
8.4.4	<i>Información toxicológica. Síntomas</i>	179
8.5	Estabilización con cemento	179
8.5.1	<i>Indicaciones generales</i>	179
8.5.2	<i>Protección personal</i>	180
8.5.3	<i>Manipulación y almacenamiento</i>	181
8.5.4	<i>Información toxicológica. Síntomas</i>	181
8.6	Normativa aplicable	182

9	PROYECTO DE EXPLANADAS ESTABILIZADAS	183
9.1	Planteamiento general	183
9.2	Normativa del Ministerio de Fomento	183
9.3	Normativas autonómicas	187
9.3.1	<i>Recomendaciones de proyecto y construcción de firmes y pavimentos de la Junta de Castilla y León</i>	<i>187</i>
9.3.2	<i>Instrucción para el Diseño de Firmes de la Red de Carreteras de Andalucía</i>	<i>189</i>
9.3.3	<i>Otras normativas autonómicas</i>	<i>190</i>
9.4	Estudio global del diseño del firme y la explanada conjuntamente ...	190
10	ESTUDIO ECONÓMICO	193
10.1	Introducción	193
10.2	Costes de los distintos elementos que influyen en la estabilización (valoraciones en euros, 2007)	193
10.3	Ejemplo (precios en euros, 2007)	196
10.4	Algunas consideraciones prácticas para mejorar los rendimientos ...	199
10.4.1	<i>Organización de la obra</i>	<i>199</i>
10.4.2	<i>Suministro del conglomerante</i>	<i>199</i>
10.4.3	<i>Suministro de agua</i>	<i>200</i>
10.4.4	<i>Solapes</i>	<i>200</i>
10.4.5	<i>Desgastes</i>	<i>201</i>
10.4.6	<i>Maquinaria auxiliar</i>	<i>201</i>

TRATAMIENTOS: MODIFICACIÓN Y ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

1

1.1 Modificación y estabilización de suelos

Por razones medioambientales y económicas, en las obras de infraestructura del transporte (carreteras, ferrocarriles, puertos, aeropuertos) es recomendable hacer uso de la mayor cantidad posible de suelos presentes en la propia obra tanto en los rellenos de terraplenes como en su coronación y fondos de desmante, donde las exigencias de calidad son superiores por estar más cerca de las cargas de tráfico. Con frecuencia sin embargo, los suelos no tienen las características adecuadas.

Para estos casos se dispone actualmente de diferentes productos para el tratamiento de los suelos con objeto de facilitar e incluso permitir su puesta en obra, reducir su sensibilidad al agua y aumentar en mayor o menor grado su resistencia a la deformación bajo cargas. Los más empleados son los siguientes conglomerantes: cementos, en general con adiciones, y cales aéreas. Ambos pueden usarse tanto en polvo como en forma de lechada. Se mezclan con el suelo, generalmente in situ, se compactan enérgicamente y se curan. También pueden emplearse algunos ligantes bituminosos y ciertos productos químicos, pero su uso actual es mucho más reducido, entre otras razones por su coste.

Los cementos, al fraguar e hidratarse los silicatos y aluminatos cálcicos anhidros, producen uniones entre las partículas del suelo, disminuyendo su sensibilidad al agua y, en función del contenido de conglomerante, pueden aumentar considerablemente la resistencia a la deformación del suelo estabilizado y ofrecer una cierta resistencia a la tracción. Son adecuados para tratar tanto los suelos granulares como los de grano fino, salvo que sean muy plásticos o se encuentren muy húmedos. En este caso puede ser conveniente un tratamiento previo con cal o su estabilización con cal.

Las cales aéreas producen al mezclarse con un suelo fino arcilloso una reacción rápida de floculación e intercambio iónico, con formación de grumos friables. Con una pequeña adición de cal, el aspecto del suelo pasa a ser “granular”, más fácil de manejar. Las reacciones químicas reducen rápidamente la plasticidad del suelo y su hinchamiento, mejoran su compactabilidad y aumentan su capacidad de so-

porte. Después se inicia una reacción puzolánica lenta, que se acelera con la temperatura, con formación de silicatos y aluminatos cálcicos hidratados. La resistencia mecánica va aumentando con el tiempo y la temperatura, conforme estos compuestos químicos, al igual que en el caso de los cementos, van creando puentes de unión entre las partículas del suelo.

Con suelos arcillosos plásticos, lo idóneo es el tratamiento con cal. La resistencia mecánica a largo plazo es función del tipo de suelo y puede ser insuficiente. En este caso, una posible solución es un tratamiento doble, primero con cal y luego con cemento.

Hay que señalar algunas limitaciones que afectan a la estabilización de los suelos con contenidos elevados de materia orgánica o de ciertas sales, como los sulfatos. En el primer caso puede llegar a detenerse la formación de los compuestos cementantes o inhibir la reacción de la cal y la superficie de los minerales de la arcilla, y en el segundo pueden producirse las conocidas reacciones expansivas debidas a la formación de ettringita. Por el contrario, otras sales, como los carbonatos, pueden favorecer la actuación de los cementos.

En resumen, el tipo de suelo y su estado hídrico, las condiciones climáticas prevalentes y las prestaciones deseadas son los factores principales para seleccionar el conglomerante más apropiado. En los casos dudosos, el estudio de laboratorio marcará las diferencias.

1.2 Tipos de tratamiento y campos de aplicación

1.2.1 Aspectos generales

Según los objetivos del tratamiento, se suele distinguir entre suelos mejorados y suelos estabilizados.

1. Los suelos mejorados se refieren generalmente a suelos de grano fino, plásticos y a veces con humedades naturales excesivas, que presentan dificultades de compactación, expansividad, sensibilidad al agua o a la helada, baja capacidad de soporte, etc. y que son tratados con cal.

Con este tipo de tratamiento se persigue fundamentalmente modificar sus características a corto plazo, pasando a ser suelos utilizables.

El objetivo de la modificación puede ser uno o varios de los siguientes:

- secar zonas húmedas para facilitar su compactación
- proporcionar una plataforma de trabajo estable
- preparar el suelo para un tratamiento posterior (por ejemplo con cemento)

La cantidad necesaria de cal, generalmente baja, es función de la naturaleza y humedad del suelo.

La limitada resistencia mecánica que se consigue limita su empleo a las capas de coronación de terraplén o de fondos de desmonte en la formación de explanadas de firmes para tráficos medios o ligeros, o bien bajo una capa de coronación de explanada de mayor capacidad de soporte con tráfico pesado. Tienen también aplicación en rellenos con suelos cohesivos muy húmedos, que de otro modo no podrían utilizarse, así como en emplazamientos especiales como trasdoses de obras de fábrica y rellenos de zanjas.

2. Con los suelos estabilizados se persigue fundamentalmente un aumento de su capacidad de soporte y una disminución de su sensibilidad frente al agua y otras condiciones medioambientales desfavorables, así como en muchos casos un incremento de su resistencia mecánica. Si la fracción granular del suelo es importante, un porcentaje moderado de conglomerante es suficiente para obtener un material insensible al agua, estable y capaz de resistir a largo plazo las deformaciones producidas por el tráfico.

☞ *Para estabilizar un suelo, el conglomerante empleado debe ser cemento si el suelo es poco plástico, mientras que si es fino y cohesivo debe utilizarse cal aérea, aunque en ocasiones puede convenir un tratamiento mixto, primero con cal para restar plasticidad y después con cemento, para aumentar la capacidad de soporte o alcanzar resistencias.*

En este caso, la contribución estructural de una capa estabilizada como apoyo del firme es notable, y a ello se debe su mayor empleo en explanadas de infraestructuras bajo tráfico pesado.

Por otra parte, los suelos granulares con finos y plasticidad limitados son excelentes materiales para la ejecución de capas de suelocemento en firmes semirrígidos.



Figura 1.1 Estabilización con cal



Figura 1.2 Estabilización con cemento



Figura 1.3 Equipo atascado en suelo con exceso de humedad



Figura 1.4 Extensión de cal para secado de suelo húmedo

Esta categoría superior de los suelos estabilizados requiere ya una mayor homogeneidad de la mezcla (en general, fabricada en central) y tiene una resistencia a la tracción más elevada. Para estos materiales, puede consultarse el “Manual de firmes con capas tratadas con cemento” (IECA-CEDEX,2003).

1.2.2 Secado de suelos para su uso en terraplenes y desmontes

Cuando los suelos tienen una humedad natural excesiva, es decir, con un contenido muy superior a la humedad óptima en el ensayo Proctor, resulta muy difícil su compactación, obligando a interrumpir la ejecución, o a complejas operaciones de secado. Ello da lugar a una ralentización de los movimientos de tierras, con una disminución de los rendimientos y, en muchos casos, a una imposibilidad de alcanzar el grado de compactación deseado. Los suelos finos y plásticos son los que con más frecuencia presentan este problema, particularmente en épocas de lluvia, por ser muy sensibles al agua y no tener capacidad de drenaje.

Para resolver este problema puede emplearse una pequeña dotación de cal viva en polvo, la cual, al tiempo que seca el suelo por hidratación, mejora su trabajabilidad por las reacciones inmediatas de floculación de la cal con el suelo. De esta forma, el aporte de un 1% de cal viva puede disminuir el con-

tenido de humedad del suelo en un 4-5%. Si a ello se suma el efecto de aireación y volteo de un material procedente de un desmonte o préstamo, el valor de la disminución puede llegar a alcanzar hasta un 7%.

Este tratamiento se puede aplicar también para poner en obra suelos superficialmente helados en invierno, pues la reacción exotérmica de la cal al apagarse genera un calor suficiente para derretir muchas partículas de hielo y reducir inmediatamente el exceso de humedad, permitiendo su compactación. Esto es válido para cualquier tipo de suelo.

1.2.3 Suelos mejorados para su empleo en núcleos de terraplén

El tratamiento en núcleos de terraplén se aplica principalmente para la utilización de suelos cohesivos con humedades naturales elevadas o bien de suelos marginales, cuyo transporte a vertedero se evita. De otro modo su empleo no sería posible con las técnicas habituales de ejecución. Por otra parte podrían presentarse riesgos de inestabilidad por asientos diferenciales o por roturas por esfuerzo cor-

tante debidas a las presiones intersticiales creadas durante la ejecución o a la inclinación excesiva de taludes. Tan importantes son estas consideraciones técnicas como las económicas ligadas a las demoras y bajos rendimientos de la maquinaria de ejecución.

Para conseguir la trabajabilidad deseada se emplea cal, con la dotación mínima necesaria (próxima al 1%), de modo que los vehículos de transporte de las tierras no formen surcos de profundidad superior a unos 10 cm. Este tratamiento sirve también para reducir los eventuales cambios de volumen y aumentar la estabilidad de los rellenos.

Otras aplicaciones particulares son las siguientes:

- para reducir la heterogeneidad de materiales procedentes de vertederos
- para la estabilización de lodos producidos por tuneladoras
- para el relleno de zonas de difícil acceso, como trasdoses de obras de fábrica o zanjas, con el objeto de suplir las probables deficiencias de compactación
- para ensanches de calzada
- en la cimentación de núcleos sujetos a inundación
- para permitir una mayor inclinación de los taludes

1.2.4 Suelos mejorados o estabilizados para capas de asiento de firmes

Tanto durante la ejecución, como en el comportamiento ulterior del firme en servicio, el cimientado juega un papel relevante, que en ciertos casos puede llevar incluso a la ruina del firme, al menos de forma local y especialmente en combinación con el agua. Por ello, parece oportuno conocer su constitución, funciones y las características de los suelos como materiales de construcción.

Puede definirse como cimientado del firme al conjunto de suelos y otros materiales que se encuentran bajo el mismo. La explanada es la superficie del cimientado, sobre la cual se apoya el firme. Las cargas del tráfico, fundamentalmente verticales, producen un estado tensodeformacional de intensidad decreciente con la profundidad, llegando muy aminoradas a la explanada gracias a la distribución proporcionada por las capas del firme. A partir de ahí, las tensiones y deformaciones siguen disminuyendo, de forma que a una profundidad de 1,5 - 2 m son ya prácticamente inapreciables.

Las capas superiores del cimientado o capas de asiento del firme tienen por ello la mayor responsabilidad en el trabajo conjunto de la estructura firme – cimientado, por lo que con frecuencia están formadas por suelos de aportación o por la estabilización de los existentes. Estas capas constituyen la coronación sobre el núcleo de los terraplenes y el fondo de los desmontes. Debajo está el terreno natural subyacente.

Las capas de asiento constituyen así una transición entre el terreno natural y el firme, con un doble objetivo:

A corto plazo, es decir de forma inmediata, durante la construcción de un firme nuevo, tienen las siguientes funciones:

- proteger el terreno natural de los efectos de las cargas del tráfico
- permitir la circulación del tráfico de obra y de la maquinaria de construcción de las capas del firme
- establecer una calidad de nivelación suficiente para asegurar la adecuada regularidad superficial de las capas del firme, en particular de la capa de rodadura, así como los espesores de las capas
- aportar la capacidad de soporte necesaria para la compactación de las capas superiores.

A largo plazo, es decir con el firme en servicio, tienen una importante función estructural:

- homogeneizar el apoyo y aumentar la capacidad de soporte del cimiento, y también
- insensibilizarlo respecto a la humedad, bien por la aportación de suelos granulares o por la estabilización con cal o cemento de los suelos existentes.

En suma, se desea conseguir una estabilidad satisfactoria de la obra en servicio, con unas deformaciones tolerables. En particular hay que evitar los cambios de volumen, así como los fenómenos de erosión.

Sin embargo, con frecuencia no se dispone en la traza de suelos naturales que tengan las características requeridas, por lo que si la explanada ha de tener una capacidad de soporte suficiente, es necesario al menos mejorarlos del modo antes indicado. En vías para tráfico pesado suele ser conveniente disponer de una explanada de elevada capacidad de soporte, la cual requiere ya de al menos una última capa de suelo estabilizado con cemento, que mejora significativamente el comportamiento del firme, y en particular su resistencia a la fatiga, permitiendo al mismo tiempo reducir los espesores de las capas del mismo.

En estas capas de asiento de firmes se emplean suelos mejorados o estabilizados con cal o cemento y donde sea necesario estabilizaciones mixtas con cal y cemento. Su ejecución debe realizarse siguiendo las recomendaciones expuestas en este Manual.

1.2.5 Otros ejemplos de utilización

Entre las aplicaciones distintas de las explanadas o terraplenes, pueden mencionarse las siguientes:



Figura 1. 5 Estabilización de la cimentación de una estructura

Cuñas de transición en trasdoses de estructuras

Una aplicación ya muy conocida de la estabilización con cemento en rellenos localizados es el “bloque técnico” o cuña de transición en los trasdoses de las estructuras de las líneas ferroviarias de alta velocidad. Se trata de un relleno con material granular limpio y bien graduado tratado con cemento.

Las cuñas se componen de una primera parte, adyacente al trasdós, de material granular tratado, y una segunda parte de material granular sin tratar.

En bastantes obras la mezcla se ejecuta in situ, adoptando ciertas medidas para garantizar que el material adyacente al estribo quede bien mezclado con el cemento.

En varias estructuras y pasos bajo pistas de aeropuerto construidas en los últimos años, el relleno de los trasdoses se ha ejecutado alternando capas de suelo estabilizado con cemento con otras de suelo seleccionado.

Rellenos en zonas inundables

También es posible emplear suelos estabilizados para rellenar los espacios dejados por la eliminación de los fangos existentes.

Suelos contaminados

La estabilización permite evitar la formación de lixiviados en suelos contaminados con un gran número de elementos químicos. El material tratado se puede dejar en el mismo lugar o trasladarse a vertedero, aunque en ningún caso se deben producir migraciones de los compuestos indeseables. El conglomerante inmoviliza los contaminantes mediante el incremento del pH del suelo, con lo que los hace inertes, insolubiliza y encapsula, y además puede producir cambios químicos en los mismos.

Hay una serie de contaminantes inorgánicos con los que se ha demostrado la efectividad del método, como son metales pesados, amianto, materiales radioactivos, ácidos inorgánicos, oxidantes y reductores. Con materiales orgánicos no se poseen datos suficientes, aunque se cree que puede ser una buena solución en bastantes situaciones.

Las técnicas de tratamiento son variadas: se puede realizar el mezclado in situ y dejar el material en el lugar, cuando el espesor contaminado es pequeño, o una vez estabilizada una capa, proceder a su carga, transporte y colocación en el punto de acopio. También se puede montar una planta en el lugar contaminado y transportar el material una vez tratado. Lo que no es recomendable es transportar el material contaminado sin haber sido tratado previamente.

Dependiendo del tipo y cantidad de contaminante y de las características del suelo, los porcentajes de conglomerante pueden variar desde el 3% hasta valores más elevados.

1.3 Ventajas de los suelos estabilizados

1.3.1 Ventajas técnicas

Entre las ventajas técnicas pueden citarse:

- permiten el empleo de los suelos de la traza, mejorando sus características hasta el grado deseado
- proporcionan una elevada capacidad de soporte a la explanada, con lo que aumenta la vida de servicio del firme
- aseguran la estabilidad de la explanada, tanto por su insensibilidad al agua y a la helada, evitando así cambios de volumen por hinchamiento o retracción, como por su resistencia a la erosión
- disminuyen las tracciones en las capas del firme, aumentando con ello su vida útil
- pueden permitir el paso inmediato del tráfico de obra.

1.3.2 Ventajas económicas y ambientales

Entre ellas pueden destacarse las siguientes:

- un mayor empleo de suelos y otros materiales de la traza, a veces de características iniciales inadecuadas. Esto es particularmente interesante por las restricciones actuales para el uso de préstamos y vertederos. En ocasiones incluso no existen suelos aprovechables a una distancia aceptable
- un ahorro en el transporte de materiales
- un acortamiento de los plazos de ejecución, dado que el proceso de incorporación del conglomerante y de mezcla del suelo con el mismo se realiza con equipos específicos de alto rendimiento
- la obtención de cimientos de firme de mayor capacidad de soporte permite un ahorro en las capas de firme, tanto en su constitución como en su ejecución.

Aunque las ventajas ambientales están ligadas a las económicas, las primeras van cobrando preponderancia y tienen que ser atendidas con prioridad.

1.3.3 Limitaciones

Las más significativas están relacionadas con elevados contenidos en los suelos de sulfatos solubles y en materia orgánica.

En el primer caso, la formación de ettringita, muy expansiva, puede llegar a romper las capas ya extendidas y compactadas cuando el contenido de sulfatos solubles es superior al 1%.

La materia orgánica puede inhibir el fraguado y endurecimiento de la mezcla, aunque con una mayor dotación de conglomerante se puede llegar a eliminar este efecto. Otros compuestos del suelo, poco frecuentes, como son los fosfatos, nitratos y cloruros pueden afectar al fraguado del cemento.

 *La estabilización de suelos requiere unos estudios previos más detallados de las características principales y de la homogeneidad de los suelos a tratar, así como de ensayos de laboratorio para su dosificación. En general, la dotación de conglomerante suele ser reducida y el sobre coste queda compensado por las ventajas que aporta el tratamiento. Entre las limitaciones más significativas hay que señalar los elevados contenidos de los suelos en sulfatos solubles y en materia orgánica, así como la presencia de elementos de tamaño superior a 10 cm.*

1.4 Desarrollo de la técnica

1.4.1 Inicio de la técnica

Desde los albores de la Historia, se han utilizado la cal y sus mezclas con puzolanas naturales para la estabilización de suelos cohesivos en diferentes obras públicas, primero en China (pirámides de Shaanxi hace unos 5000 años) e India, y después durante el Imperio Romano en vías de comunicación y obras hidráulicas. En el



Figura 1.6 Equipo antiguo para estabilizaciones

siglo XIX se realizaron grandes avances en la producción de otros conglomerantes distintos de las cales, como los cementos pórtland artificiales, y en los procedimientos constructivos. El desarrollo de nuevas redes viarias para vehículos automóviles tanto en Estados Unidos como en Europa durante el periodo 1900-1930 propició una serie de experimentos que mostraron claramente las posibilidades de aprovechamiento de los suelos existentes, modificados en mayor o menor grado por la adición de alguno de estos productos, y la subsiguiente mezcla y compactación.

El desarrollo tecnológico actual tuvo sin embargo una decisiva primera fase en el periodo 1930-1950. Para ello fueron necesarios muchos estudios de laboratorio para definir unos métodos de ensayo y observar la incidencia de las diferentes variables que intervienen en los resultados. La gran variabilidad de los suelos naturales constituía un reto adicional. Hubo que construir y seguir el comportamiento de varios tramos de ensayo, hasta llegar a sistematizar el diseño, definir la ejecución más adecuada, con una maquinaria en constante desarrollo, y finalmente establecer unas primeras especificaciones técnicas.

Fueron pioneros en este periodo Estados Unidos (hay que destacar la labor de la Portland Cement Association y de la National Lime Association) y algunos países europeos. Las necesidades militares de la 2ª Guerra Mundial, particularmente en la construcción rápida de aeropuertos, propiciaron más avances técnicos y una extensión del uso de los suelos estabilizados en muchos países involucrados en el conflicto.

En los años 50, con la reconstrucción e iniciación de importantes infraestructuras de transporte, comenzó una segunda fase en la que la estabilización de suelos era ya una técnica moderna establecida. También se extendió su uso a vías secundarias y de baja intensidad de tráfico.

Desde mediados de los años 70 las circunstancias han cambiado considerablemente, tanto por la acuciante protección del medio ambiente como por el encarecimiento de la energía y la agresividad creciente del tráfico pesado, lo que ha obligado al empleo de explanadas de mayor capacidad de soporte y de mayor fiabilidad.

El uso de las estabilizaciones de suelos se ha ido generalizando debido a la disponibilidad de modernas máquinas estabilizadoras-recicladoras de gran potencia,

rendimiento, profundidad de tratamiento y mezcla en una pasada, junto a nuevas distribuidoras del conglomerante y a los compactadores pesados vibrantes, que han revolucionado la construcción. Así, en Francia, se disponía ya en 1988 de unos 150 equipos de estabilización.

En esta tercera fase se han puesto al día los diseños del cimiento de los firmes por su incidencia en el comportamiento a largo plazo y en los costes globales. Los suelos estabilizados ofrecen unas posibilidades de ejecución menos dependientes de la meteorología, facilitan la puesta en obra de las capas del firme y, en suma, reducen los riesgos que pueden mermar la calidad deseada.

1.4.2 Desarrollo de la técnica en España

Aparte de algunas aplicaciones tempranas de carácter puntual, se puede destacar la labor del Instituto Nacional de Colonización (posteriormente IRYDA), que inició en 1963 un programa de construcción de caminos en las zonas regables de varias provincias, de los que se estabilizaron más de 250 km. Se deseaba conseguir explanadas de buena capacidad de soporte mediante mejora o estabilización de suelos in situ con cemento en un espesor de 15 cm, que era la máxima profundidad eficaz de los equipos entonces disponibles, formados por rotoarados agrícolas de varias fresas verticales o bien mezcladoras autopropulsadas rotativas.

En esa época, tanto el Instituto Eduardo Torroja como el Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo (hoy Centro de Estudios del Transporte del CEDEX), estudiaron en laboratorio estos materiales, poniendo a punto los ensayos para la dosificación y control de las mezclas.

Hasta mediados de los años 90, las estabilizaciones de explanadas fueron esporádicas: Tramo de Ensayo de la CN-II (1963), la variante de Torrejón (1968) también en la CN-II, 20 km de la Autopista de Navarra (1974), 15 km de la CN-I en Boceguillas (1985), etc.

No obstante, fue a partir de entonces, cuando la estabilización de los suelos existentes en la traza comenzó a ser una alternativa seriamente considerada frente a la opción de sustituir dichos suelos por otros de mayor calidad, difíciles de encontrar en muchas zonas de España.

Así, en el año 1996 se realizó la estabilización de la explanada de varios tramos de la Autovía León-Burgos (Autovía del Camino de Santiago), con una superficie total próxima al millón de metros cuadrados, a los que hay que sumar otros 800.000 m² en tramos



Figura 1.7 Camino agrícola de suelocemento ejecutado in situ por el Instituto Nacional de Colonización

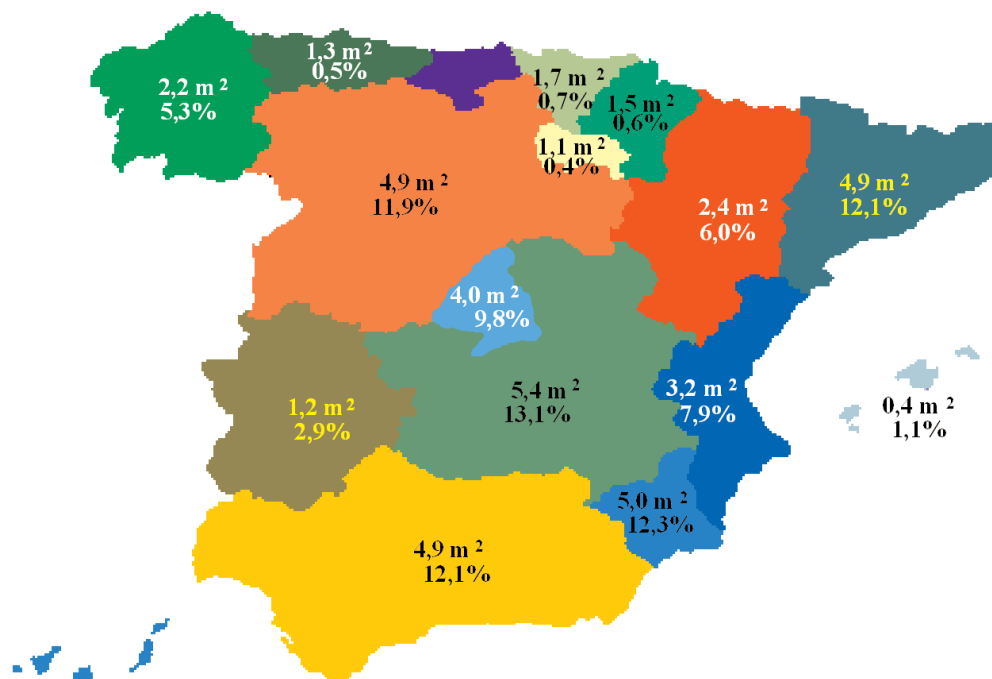


Figura 1.8 Superficie (10^6 m^2) de explanadas estabilizadas con cemento en España en el periodo 2006 a 2007

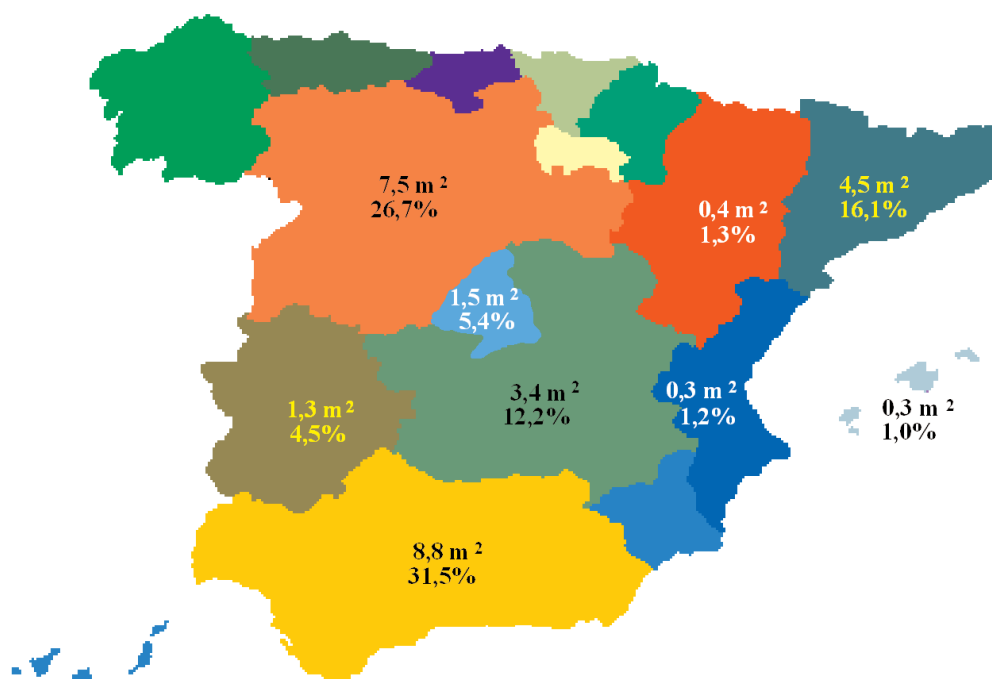


Figura 1.9 Superficie (10^6 m^2) de explanadas estabilizadas con cal en España en el periodo 2006 a 2007

construidos posteriormente. En los años siguientes se estabilizaron los terrenos de apoyo de varios tramos de autovía, como la del Noroeste (Madrid–La Coruña) en la provincia de León, 1.510.000 m²; la Autovía de las Rías Bajas (Madrid–Vigo), 1.400.000 m², también a su paso por la provincia de León; la Autovía de Castilla N-620, 1.880.000 m² en la provincia de Salamanca; o la Autovía de la Plata, más de un millón de m² en Badajoz.

A estas vías principales incluidas en el Plan de Autovías hay que sumar otro gran número de actuaciones en carreteras autonómicas o provinciales, con una superficie total de más de 26 millones de metros cuadrados estabilizados (2001).

En 2006 se disponía de más de 80 equipos de estabilización con los que se trataron del orden de 10 millones de m³ de suelo, lo que en capas de 25 ó 30 cm supone una superficie superior a 35 millones de m².

1.4.3 Normativa española

Aunque en 1965 se disponía ya de unas especificaciones para los suelos estabilizados, su aplicación a obras fue muy escasa.

Realmente fue en las Normas 6.1 IC de firmes flexibles y 6.2 IC de firmes rígidos de 1975 (Dirección General de Carreteras del entonces Ministerio de Obras Públicas) cuando se hizo una primera clasificación de explanadas en tres categorías: E1, E2 y E3 con índices CBR superiores a 5, 10 y 20 respectivamente.

Las estabilizaciones de suelos se normalizaron dentro del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes PG-3 de 1975 en los artículos 510 “Suelos estabilizados in situ con cal” y 511 “Suelos estabilizados con cemento”, en los cuales el primero contemplaba unos suelos mejorados o estabilizados por adición y mezcla con cal para su empleo en explanadas, en tanto que el segundo se refería a suelos mezclados con cemento en central o in situ a fin de obtener un suelo estabilizado con una resistencia mecánica mínima a los 7 días, exigida desde entonces a las capas superiores de los cimientos del firme que han de aportar una elevada capacidad de soporte a la explanada. Los espesores del tratamiento de los suelos en aquella época eran de sólo 15 cm, manifiestamente insuficientes, pero la maquinaria entonces disponible para la escarificación y mezcla in situ no permitía una mayor profundidad.

Esta normativa del Ministerio se mantuvo también en la revisión de 1989, pero pronto se evidenciaron sus limitaciones en las importantes obras emprendidas en la siguiente década.

Es por ello que en las Recomendaciones de Proyecto y Construcción de Firmes y Pavimentos de la Junta de Castilla y León de 1996, ante el uso generalizado de esta técnica se normalizaron unos espesores mayores de estabilización, variando desde 25 hasta 40 cm. Posteriormente la Junta de Andalucía también normalizó su uso en la Instrucción de Firmes de 1999, y en el caso concreto de la cal, con las

Recomendaciones para la Redacción de Pliegos de Prescripciones Técnicas Generales para el Tratamiento de los Suelos con Cal de 2003.

En el año 2000 y por la Orden Circular 326/00 se modificaron muchos artículos del PG-3/75 en materia de geotecnia vial, y entre ellos el Art. 330 “Terraplenes”, en el que se dio entrada al empleo de suelos marginales, eventualmente mejorados.

Con posterioridad, en la Norma 6.1 IC “Secciones de firme” (2003) se revisó la tabla de formación de explanadas, fijando para los diferentes tipos de suelos naturales o estabilizados el espesor mínimo de las capas que pueden constituir el cimiento de los firmes. Los suelos estabilizados in situ con cemento o con cal han de satisfacer las especificaciones del Art.512 “Suelos estabilizados in situ” del PG-3/04. Las capas estabilizadas tienen ya un espesor mínimo de 25 cm, con un espesor total en varias capas que puede llegar a los 80 cm. Para cada una de las tres categorías de explanada, se establece un valor mínimo del módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga E_{V2} . Hay que destacar que la estabilización con cemento de la capa superior es obligatoria cuando la explanada es de categoría E3.

A partir de 2003, la normativa de las Autonomías también se ha ido actualizando (Castilla y León, en 2004; Andalucía, en 2007), mientras que en otros casos se ha publicado por primera vez (País Vasco, en 2006 y Comunidad Valenciana, en 2009).

MATERIALES BÁSICOS

2

2.1 Suelos

2.1.1 Características generales

Los materiales a estabilizar con cal o con cemento no deben contener materia orgánica, sulfatos, sulfuros, fosfatos, nitratos, cloruros u otros compuestos químicos en cantidades perjudiciales. En caso de que se utilice cemento, no deben afectar al fraguado de éste, ni presentar reactividad potencial con los álcalis del cemento.

☞ *En las especificaciones se suelen establecer algunas limitaciones a las características de los suelos para que al estabilizarlos resulte un material con unas características técnicas adecuadas y económicamente admisibles.*

Granulometría

Suele limitarse el tamaño máximo (80 mm) para evitar segregaciones y dificultades de compactación y nivelación, así como para evitar las complicaciones que para la maquinaria supone la presencia de piedras de mayor tamaño. También se limita el porcentaje de finos (partículas inferiores a 0,063 mm) para posibilitar la mezcla y, en el caso del cemento, evitar la necesidad de aportar un alto contenido de conglomerante:

- < 35 % (S-EST3) y 50 % (S-EST1 y S-EST2) en el caso de estabilización con cemento
- > 15 % si es con cal.

En general, conviene disponer de un porcentaje mínimo de finos para facilitar la compactación.

Composición química

Se limita el contenido de materia orgánica, de sulfatos y de sales solubles; en el primer caso, para evitar el retraso o falta de fra-



Figura 2.1 Ensayo de azul de metileno

guado y endurecimiento del material, y en los otros, para que no se produzcan reacciones expansivas que puedan comprometer la estabilidad volumétrica del material estabilizado o bien pérdidas de resistencia del mismo.

No obstante, hay que advertir que los límites fijados en las especificaciones son en ocasiones demasiado conservadores. En el caso de ser superados de una manera no excesiva, se deberían realizar ensayos para determinar de forma precisa la aptitud del suelo para ser estabilizado. En ocasiones es suficiente aumentar ligeramente la dotación de conglomerante.

Plasticidad

Para las estabilizaciones con cemento, el índice de plasticidad debería ser inferior a 15. Con cal, no debería ser inferior a 12. Se desea evitar con ello problemas en el mezclado y extendido del material, al tiempo que se indica el conglomerante más idóneo, en función de la plasticidad del suelo.

En las estabilizaciones con cemento, cuando el índice de plasticidad sea superior al indicado, se puede ejecutar un tratamiento previo con cal (mínimo 1 %).

2.1.2 Clasificación

Según el artículo 330 del PG-3 (2004), los suelos para terraplenes se clasifican según lo indicado en la Tabla 2.1. También se admiten materiales procedentes de procesos industriales, siempre que sean estables.

Tabla 2.1 Clasificación de suelos para terraplenes y explanadas (Pliego PG-3)

SELECCIONADOS		ADECUADOS	TOLERABLES	MARGINALES	
< 0,2 %		< 1 %	< 2 %	apdo. 330.4.4.5	Materia orgánica
< 0,2 %		< 0,2 %	Yeso < 5 % Otras < 1 %	apdo. 330.4.4.3 apdo. 330.4.4.4	Sales solubles
-----		-----	< 3 %	< 5 % apdo. 330.4.4.2	Hinchamiento libre
-----		-----	< 1 %	apdo. 330.4.4.1	Asiento en ensayo de colapso
≤ 100		≤ 100	-----	-----	Tamaño máximo (mm)
(*) # 0,4 ≤ 15 %	# 2 < 80 %	# 2 < 80 %	-----	-----	Otras condiciones granulométricas
	# 0,4 < 75 %				
	< 25 %	< 35 %	-----	-----	Finos (# 0,08)
	IP < 10 LL < 30	Según gráfico adjunto			Plasticidad

(*) En caso de cumplir la condición indicada se está exento del resto de las comprobaciones de granulometría y plasticidad

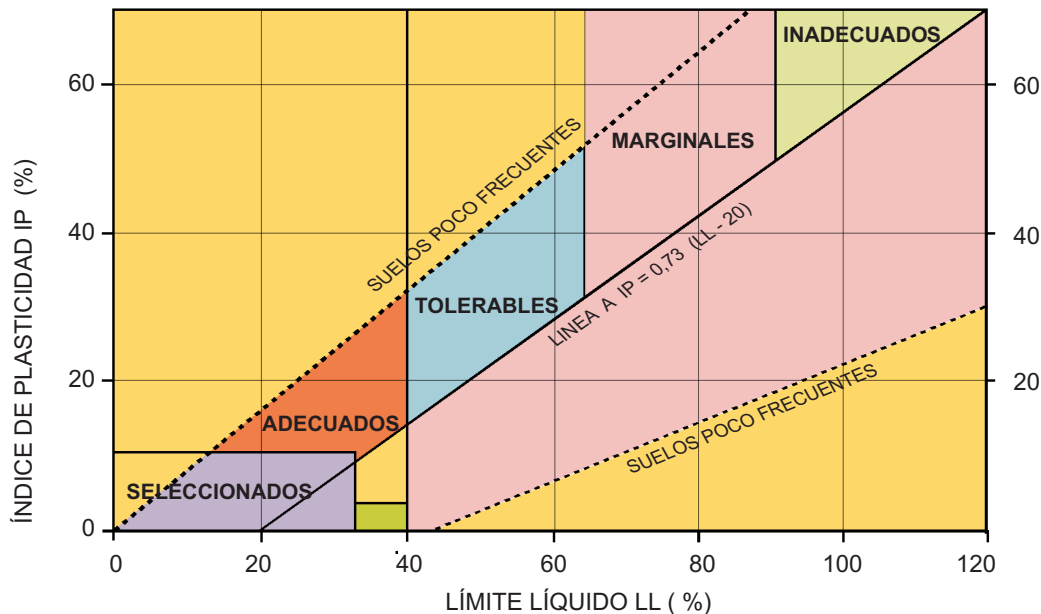


Figura 2.2 Criterios de clasificación de suelos según su plasticidad

Por otra parte, todos los suelos para terraplenes deberán cumplir alguna de las dos condiciones granulométricas siguientes:

- cernido o material que pasa por el tamiz 20 UNE mayor que el 70 %
- cernido o material que pasa por el tamiz 0,080 UNE mayor o igual que el 35 %.

Son suelos inadecuados los que no se pueden incluir en las categorías anteriores y además:

- las turbas y otros suelos que contengan materiales perecederos u orgánicos, tales como tocones, ramas, etc.
- los que pueden ser insalubres para las actividades que sobre los mismos se desarrollen.

Esta misma clasificación se emplea para los suelos sin tratar a utilizar en fondos de desmonte.

En principio, todos los suelos que cumplan las condiciones indicadas en el apartado 2.1.1 pueden ser estabilizados con cemento o con cal.

2.1.3 Suelos en terraplenes y explanadas

El mencionado artículo 330 del PG-3 (2004) indica también qué tipos de suelos sin tratar pueden emplearse en las distintas zonas de los terraplenes (Tabla 2.2).

Tabla 2.2 Posibilidades de empleo de suelos en las distintas zonas de los terraplenes

ZONA DEL TERRAPLÉN	CORONACIÓN	NÚCLEO	CIMIENTO
Tipo de suelo	Seleccionados Adecuados	Seleccionados Adecuados Tolerables	Seleccionados Adecuados Tolerables
CBR	≥ 5	≥ 3	≥ 3
Otras condiciones	No pueden usarse suelos expansivos o colapsables	El empleo de suelos marginales o de CBR < 3 precisa un estudio especial	

La mejora y/o estabilización tienen como fundamento conseguir que determinados suelos, tras el tratamiento, sean aceptables para un uso en la obra para el que de forma natural no lo serían, por sus características.

Las normativas de firmes no sólo prescriben las calidades necesarias de los materiales, sino que además, para determinados casos, exigen que sean estabilizados, para la conformación de las explanadas.

2.1.4 Suelos en capas estabilizadas de explanadas

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. Éstas se resumen en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 – Prescripciones de los suelos a utilizar en estabilizaciones

			S-EST1	S-EST2	S-EST3
Granulometría	Tamaño máximo		80 mm		
	Suelo con cal	Pase 63 μm	≥ 15		-----
	Suelo con cemento	Pase 63 μm	< 50		< 35
		Pase 2 mm	> 20		
Plasticidad	Suelo con cal	IP	≥ 12	≥ 12 y ≤ 40	-----
	Suelo con cemento	LL	-----	≤ 40	
		IP	≤ 15		
% Materia orgánica			< 2	< 1	
% Sulfatos solubles			< 1		

De acuerdo con dichas prescripciones, en la Tabla 2.4 se relacionan las determinaciones previas que hay que realizar y las normas de ensayo que se deben utilizar para ello.

Tabla 2.4 - Determinaciones previas a realizar sobre los suelos

DETERMINACIÓN	NORMA
Granulometría	UNE-EN 933-1
Límite líquido	UNE 103103
Límite plástico	UNE 103104
Contenido de materia orgánica	UNE 103204
Contenido de sulfatos solubles	UNE-EN 1744-1
Lixiviación	NLT-326
Reactividad potencial con los álcalis del cemento	UNE 146507-1
Efecto del agua sobre la resistencia a la cohesión ⁽¹⁾	NLT-312
Asiento en el ensayo de colapso	UNE 103406
Hinchamiento en edómetro	UNE 103601

⁽¹⁾ Cuando se quiera estimar cómo afecta el contenido de sulfatos del material granular a las características mecánicas de la mezcla con cemento. Esta comprobación no está especificada en el PG-3.

☞ *Las prescripciones anteriores pueden resultar excesivamente restrictivas en algunos casos, por lo que antes de descartar la posibilidad de estabilización de un determinado suelo se recomienda realizar los ensayos oportunos al producto terminado.*



Figura 2.3 Determinación del límite líquido



Figura 2.4 Horno de cal

2.2 Cales

Las cales a emplear en la construcción (edificación y obra civil) vienen definidas en la Norma UNE-EN 459-1 “Cales para la construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad”.

Se trata de una norma europea armonizada, por lo que las cales empleadas en la construcción (y como caso particular la estabilización de suelos) deben poseer el marcado CE. Dicha norma se complementa con las dos siguientes:

- UNE-EN 459-2 “Cales para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo”.
- UNE-EN 459-3 “Cales para la construcción. Parte 3: Evaluación de la conformidad”.

La citada Norma UNE-EN 459-1 contempla distintos tipos de cales, entre los que los más importantes son los siguientes:

- cales aéreas: cales que se componen principalmente de óxido e hidróxido de calcio y magnesio, los cuales endurecen lentamente al aire por la acción del CO_2 de la atmósfera. No presentan propiedades hidráulicas, es decir, no endurecen con el agua y se obtienen a partir de rocas calizas con contenidos en carbonatos superiores al 95 %.
- cales hidráulicas: a diferencia de las cales aéreas, endurecen en contacto con el agua. Se obtienen a partir de calizas que contienen arcillas (sílice y alúmina). Durante la calcinación y la posterior hidratación se forman silicatos y aluminatos cálcicos que son los que confieren las propiedades hidráulicas.

Según el contenido de óxido de magnesio, las cales aéreas se dividen en cálcicas (CL), cuando su contenido de MgO es inferior al 5 %, y dolomíticas (DL), cuando dicho contenido es superior al 5 %. La denominación se completa mediante una cifra (90, 80 ...) que indica el contenido mínimo de la suma de CaO y MgO . A las abreviaturas anteriores se les añade la letra Q o S según se trate de cales vivas o hidratadas (apagadas), respectivamente.

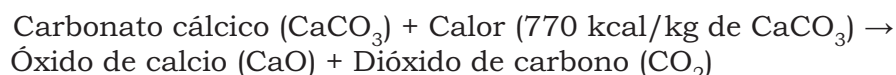
Con ello, por ejemplo, la cal cálcica 90, en forma de cal viva, se identifica por:

EN 459-1 CL 90-Q

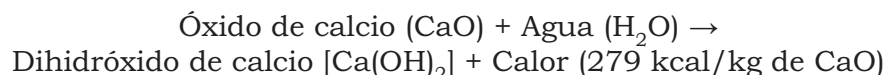
Las cales para tratamiento de suelos, además de la norma UNE-EN 459-1, deben cumplir las prescripciones complementarias de la norma UNE 80502:2003 “Cales vivas o hidratadas utilizadas en la mejora y/o estabilización de suelos”. De acuerdo con esta última, solamente se admiten para estas aplicaciones cales aéreas vivas CL 90-Q o CL 80-Q o bien cales aéreas apagadas CL 90-S o CL 80-S, pues son las que actúan más eficazmente sobre los elementos arcillosos, por liberar rápidamente más iones Ca^{++} , responsables de la floculación de las partículas de arcilla y por elevar el pH del suelo a valores en torno al 12,5 para producir la reacción puzolánica causante del incremento de la resistencia mecánica a largo plazo.

Por otra parte, deben cumplir lo establecido en el artículo 200 “Cales para estabilización de suelos” del PG-3.

La cal aérea se obtiene a partir de rocas calizas, compuestas mayoritariamente por carbonato cálcico (CaCO_3). Mediante la calcinación de la caliza, previamente machacada y clasificada, a unos 950 – 1.000 °C en un horno industrial especial, se logra la descomposición del carbonato cálcico según la siguiente reacción química:



Posteriormente, el óxido de calcio o cal viva (CaO) se puede combinar con agua en un proceso industrial controlado de hidratación, para dar lugar al dihidróxido de calcio o cal apagada o hidratada [Ca(OH)_2]:



La cal puede utilizarse en polvo o bien en forma de lechada, que es una suspensión de cal apagada en agua. Su empleo en tratamiento de suelos permite, por un lado, evitar el polvo producido durante el extendido de la cal y, por otro, controlar mejor la humedad de los suelos secos.

Esta suspensión no debe contener una proporción de cal mayor del 35 % en masa, pues en caso contrario, pueden obturarse los conductos y válvulas de la maquinaria empleada.

 *Para la estabilización de suelos se deben emplear cales aéreas, que son las que actúan sobre los suelos arcillosos.*

Además del contenido en óxidos de calcio y de magnesio (este último debe ser inferior al 5 % en las cales CL), para asegurar la calidad de la cal utilizada en el tratamiento deben analizarse los siguientes parámetros:

– Contenido de dióxido de carbono (CO_2)

Permite evaluar la presencia de otros componentes minoritarios de las cales, como son los carbonatos cálcico y magnésico. Dicho contenido, en el punto de fabricación, debe ser inferior al 5 % en masa.

– *Finura de molido*

Es una característica importante en la medida que interviene en las condiciones de almacenamiento, transporte y mezcla con el suelo. El apagado o hidratación de la cal viva con agua da lugar, además, a una autopulverización muy fina, incluso micronizada, del producto. Por otra parte, la finura puede intervenir en la reactividad de la cal.

La finura de la cal se evalúa mediante un análisis granulométrico. Más del 98 % de las partículas deben ser inferiores a 0,2 mm.

– *Reactividad de la cal*

Esta característica es muy importante debido a un doble motivo. Por un lado, refleja la calidad de la cal en cuanto a su capacidad de reacción, indicando que las reacciones buscadas se producirán de forma rápida. Y por otro, cuando se emplee para el secado de suelos húmedos, permite estimar su eficacia para este tratamiento.

El ensayo se realiza sobre la cal viva (Q), y permite medir la rapidez de reacción de ésta con el agua. Se evalúa midiendo el tiempo que se tarda en alcanzar una temperatura de 60 °C al agitar una muestra de cal viva en agua.

Dicho tiempo debe ser inferior a 15 minutos, siendo tanto más reactiva la cal cuanto menor sea el mismo.

2.3 Cemento

El cemento, mezclado íntimamente con el suelo, proporciona a la mezcla la resistencia mecánica o la capacidad de soporte exigida y mejora tanto su durabilidad, entendiendo por tal la resistencia a los agentes físicos y químicos agresivos, como la estabilidad dimensional.



Figura 2.5 Fábrica de cemento

Los cementos pórtland se obtienen por molturación conjunta de su clinker, de adiciones activas, en su caso, y de la cantidad adecuada de un regulador de fraguado, normalmente piedra de yeso natural. El clinker es el producto resultante de calcinar mezclas de calizas y arcillas preparadas adecuadamente, hasta conseguir la combinación prácticamente total de sus componentes. Los principales componentes del clinker son el silicato tricálcico (SC_3), el silicato bicálcico (SC_2), el aluminato tricálcico (AC_3) y el ferritoaluminato tetracálcico (C_4AF), a los que hay que añadir otros componentes secundarios. Algunos de ellos, como el silicato y aluminato tricálcico, presentan un calor de hidratación, una velocidad de fraguado y una resistencia inicial elevadas.

En general, los cementos pórtland sin adiciones no suelen utilizarse en estabilizaciones, siendo lo más habitual recurrir a cementos con cenizas volantes, escorias de horno alto u otros tipos de adiciones puzolánicas o con hidraulicidad latente.

2.3.1. Designación de los cementos españoles

Los cementos españoles para estas aplicaciones se rigen en la actualidad por el artículo 202 del PG-3 y la Instrucción para la Recepción de Cementos (véase Tabla 2.5), basada en las normas UNE. En ella se recogen una gran variedad de tipos de cemento, por lo que su elección dependerá en muchos casos de la disponibilidad en la zona, además de las prestaciones de cada tipo.

2.3.2 Cementos más adecuados

En los suelos estabilizados con cemento el tipo de conglomerante tiene una importancia menor en comparación con la dosificación del mismo o la densidad alcanzada en la compactación. Es posible utilizar la gran mayoría de los cementos comercializados en España, por lo que, como ya se ha mencionado, en muchos casos su elección dependerá de la disponibilidad y precio de los mismos. No obstante, algunas recomendaciones de tipo práctico pueden mejorar ciertos aspectos.

Los cementos más adecuados para estas unidades de obra son los que presentan las siguientes propiedades:

- inicio y final de fraguado suficientemente largos, de forma que se tenga un elevado plazo de trabajabilidad
- moderado calor de hidratación, para limitar los efectos de la fisuración por retracción (ancho de fisuras y distancia entre las mismas), principalmente en épocas calurosas
- desarrollo lento de resistencias y módulos de rigidez a edades tempranas, recuper ndolas a largo plazo. Con ello se consigue limitar el efecto de la retracción y los fenómenos iniciales de fatiga inducidos por las cargas del tráfico.

Tabla 2.5 Tipos de cementos

Tipo de cemento	Designación		Composición porcentual (proporción en masa) ⁽¹⁾						
			Componentes principales ⁽²⁾						Componentes minoritarios
			Clinker K	Escoria de horno alto S	Humo de sílice D ⁽³⁾	Puzolana ⁽⁴⁾	Cenizas volantes ⁽⁵⁾	Caliza ⁽⁶⁾	
CEM I	Cemento pórtland	CEM I	95-100	----	----	----	----	----	0-5
CEM II	Cemento pórtland con escoria	CEM II/A-S CEM II/B-S	80-94 65-79	6-20 21-35	----	----	----	----	0-5 0-5
	Cemento pórtland con humo de sílice	CEM II/A-D	90-94	----	6-10	----	----	----	0-5
	Cemento pórtland con puzolana ⁽⁷⁾	CEM II/A-P CEM II/B-P	80-94 65-79	----	----	6-20 21-35	----	----	0-5 0-5
	Cemento pórtland con ceniza volante ⁽⁸⁾	CEM II/A-V CEM II/B-V	80-94 65-79	----	----	----	6-20 21-35	----	0-5 0-5
	Cemento pórtland con caliza ⁽⁹⁾	CEM II/A-L CEM II/B-L	80-94 65-79	----	----	----	----	6-20 21-35	0-5 0-5
	Cemento pórtland mixto ⁽¹⁰⁾	CEM II/A-M CEM II/B-M	80-94 65-79	6-20 21-35					0-5 0-5
	Cemento de horno alto	CEM III/A CEM III/B CEM III/C	35-64 20-34 5-19	36-65 66-80 81-95	----	----	----	----	0-5 0-5 0-5
CEM IV	Cemento puzolánico ⁽¹⁰⁾	CEM IV/A CEM IV/B	65-89 45-64	----	11 - 35 36 - 55			----	0-5 0-5
CEM V	Cemento compuesto ⁽¹⁰⁾	CEM V/A CEM V/B	40-64 20-38	18-30 31-50	----	18-30 ⁽¹¹⁾ 31-50		----	0-5 0-5
ESP VI	Cemento para usos especiales	ESP VI-1	25-55	45-75 ⁽¹²⁾					0-5

- (1) Los valores de la tabla se refieren a la suma de los componentes principales y minoritarios (núcleo de cemento, entendiéndose por tal el clinker y las adiciones, con exclusión del sulfato de calcio regulador de fraguado y de los aditivos).
- (2) Se incluyen también en las Normas cementos pórtland con esquistos calcinados (CEM II/A-T y CEM II/B-T), con los mismos límites en el contenido de adición (esquistos) que en los restantes cementos CEM II, aunque por el momento no se fabrican en España.
- (3) La proporción de humo de sílice se limita al 10 por 100.
- (4) Se admiten dos tipos de puzolana: la natural, P, y la natural calcinada, Q.
- (5) Se admiten dos tipos de cenizas volantes: las silíceas, V, y las calcáreas, W.
- (6) Se admiten dos tipos de caliza: la L, con un contenido de carbono orgánico total (TOC) inferior al 0,50% en masa, y la LL, en la que el TOC debe ser inferior al 0,20% en masa.
- (7) Están normalizados también los cementos CEM II/A-Q y CEM II/B-Q, en los que se utiliza puzolana natural calcinada (Q).
- (8) Están normalizados también los cementos CEM II/A-W y CEM II/B-W, en los que se utilizan cenizas volantes calcáreas (W).
- (9) Están normalizados también los cementos CEM II/A-LL y CEM II/B-LL, en los que se utilizan caliza del tipo LL.
- (10) Los componentes principales distintos del clinker deberán ser declarados en la designación del cemento.
- (11) No podrán utilizarse cenizas volantes calcáreas (W).
- (12) Podrán emplearse en estos cementos escorias de horno alto (S), puzolanas naturales (P) y cenizas volantes silíceas (V), de forma que el conjunto de las mismas quede dentro de los límites indicados en la Tabla. El contenido de puzolana natural no superará el 40%.

Los cementos que más se aproximan a las cualidades anteriores son aquellos con mayor contenido de adiciones activas (escorias de horno alto, puzolanas naturales y cenizas volantes principalmente), como pueden ser los tipos CEM III, CEM IV, CEM V o ESP VI. En general, se debe procurar emplear cementos de clase resistente media o baja (32,5 N o, en el caso de los cementos especiales ESP, también la 22,5), dejando los de clase superior para situaciones especiales, como puede ser una puesta en obra en tiempo frío.

 *Los cementos más adecuados para estabilizar suelos son los que tienen un elevado plazo de trabajabilidad, un moderado calor de hidratación para limitar los efectos de la fisuración por retracción y un desarrollo lento de resistencias y módulos de rigidez a edades tempranas, recuperándolas a largo plazo.*

Los cementos que más se aproximan a las cualidades anteriores son aquellos con mayor contenido de adiciones activas, como pueden ser los tipos CEM III, CEM IV, CEM V o ESP VI.

No se deben emplear cementos de aluminato de calcio, ni mezclas de cemento con adiciones que no hayan sido realizadas en la fábrica de cemento.

Si la capa estabilizada se tiene que disponer sobre terrenos yesíferos o que contengan sulfato de magnesio, es conveniente aislarla y, en cualquier caso, utilizar cementos resistentes a los sulfatos o con alto contenido de adiciones (ceniza volante, escoria de horno alto o puzolana).

El principio de fraguado del cemento, determinado según la norma UNE-EN 196-3, no ha de tener lugar antes de las dos horas. No obstante, si la extensión se realiza con temperatura ambiente superior a 30°C, el principio de fraguado, determinado según dicha norma, pero realizando los ensayos a una temperatura de 40 ± 2 °C, no ha de tener lugar antes de una hora.

Es conveniente destacar que tanto en Francia como en Alemania se emplean frecuentemente en estabilizaciones los denominados conglomerantes hidráulicos para carreteras. Se trata de productos preparados en fábrica, con un contenido reducido de clinker e incluso sin clinker, y que suelen presentar un fraguado muy lento, lo que hace que sea posible obtener fácilmente plazos de trabajabilidad del orden de 10 h.

2.4 Agua

El agua debe cumplir las mismas prescripciones fijadas para su empleo en hormigones y morteros (Instrucción EHE y Art. 280 del PG-3).

Un índice útil de carácter general sobre la aptitud de un agua es su potabilidad. No obstante, algunas aguas manifiestamente insalubres pueden ser también utilizadas: aguas bombeadas de minas (que no sean de carbón), algunas de residuos industriales, aguas pantanosas, aguas depuradas con cloro, etc. En cualquier caso, deben cumplirse las condiciones señaladas en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6 Características de las aguas para el tratamiento de suelos

CARACTERÍSTICAS	LIMITACIÓN	CAUSA DE LA LIMITACIÓN
pH	≥ 5	Alteraciones en el fraguado y endurecimiento. Disminución de resistencias y de durabilidad.
Sustancias disueltas	≤ 15 g/l	Pérdida de resistencias mecánicas. Fenómenos expansivos a largo plazo.
Contenido en sulfatos	$\text{SO}_4^{2-} \leq 1$ g/l*	Alteraciones en el fraguado y endurecimiento. Pérdidas de resistencia. Merma importante de la durabilidad.
Hidratos de carbono	No debe apreciarse	Impide el fraguado o produce alteraciones en el mismo y en el endurecimiento
Sustancias orgánicas solubles en éter	≤ 15 g/l	Graves alteraciones del fraguado y/o endurecimiento. Fuertes caídas de resistencias.

(*) Cuando se utilicen cementos resistentes a sulfatos el límite de ión sulfato se puede elevar hasta la cifra de 5 g/l.

No conviene emplear aguas cuyo pH sea inferior a 5, ni las que contengan aceites, grasas, hidratos de carbono o materias sólidas en suspensión (limos o arcillas).

En general se pueden utilizar, tanto en el amasado como en el curado, todas las aguas que hayan sido sancionadas por la práctica como aceptables.

En la Tabla 2.7 se indican las normas de ensayo que deben utilizarse para la comprobación de los requisitos anteriores.

Tabla 2.7 Relación de ensayos a realizar sobre el agua

DETERMINACIÓN	NORMA
Contenido total de sustancias solubles en agua	UNE 83957
Contenido total de sulfatos	UNE 83956
Determinación cualitativa de hidratos de carbono	UNE 7132
Determinación de la acidez de las aguas	UNE 83992
Aceites y grasas contenidos en el agua	UNE 7235

2.5 Aditivos

Los aditivos de más interés en las estabilizaciones son los retardadores de fraguado. Se trata de productos cuya función es retrasar el fraguado (principio y final) del cemento, con el consiguiente aumento del plazo de trabajabilidad.

Los retardadores de fraguado producen por lo general una disminución de las resistencias mecánicas a corta edad, que se recuperan hasta alcanzar los valores normales.

El plazo de trabajabilidad para una determinada temperatura depende de una serie de características de la misma: tipo de cemento, suelo utilizado, contenido de cemento y de agua, tipo de aditivo y dosis empleada. Por ello, la eficacia de estos aditivos está ligada a todos estos factores.

Resulta recomendable trabajar con retardadores a cualquier temperatura ambiente, especialmente si éstas son elevadas, por la flexibilidad que proporcionan a las operaciones de compactación.

Los aditivos deben cumplir las prescripciones de la Norma UNE-EN 934.

2.6 Emulsiones para riegos de curado

Las emulsiones más adecuadas para los riegos de curado son las fluidas y de rotura rápida, con el objeto de poder conseguir un buen reparto con poca dotación y facilitar un sellado rápido de la superficie. Se suelen emplear emulsiones ECR-1.

Las emulsiones deben cumplir las prescripciones del artículo 532 del PG-3.



Figura 2.6 Suelo estabilizado protegido con emulsión y sin ella

ACCIONES SOBRE LOS SUELOS



3.1 Efectos de la cal

La incorporación de la cal, viva o apagada, a un suelo provoca dos tipos de acciones:

- mejora por modificación inmediata, que tiene lugar desde el momento en que se mezcla el suelo con la cal. Su duración puede ir desde algunos minutos hasta unas pocas horas
- estabilización a largo plazo, que prosigue durante varios meses, o incluso algunos años, después de la incorporación de la cal al suelo.

☞ *La incorporación de la cal a un suelo arcilloso provoca tanto mejoras a corto plazo, que se producen entre algunos minutos y unas pocas horas, como un efecto de estabilización a largo plazo, que se prolonga durante varios meses e incluso algunos años.*

3.1.1 Mejora por modificación inmediata

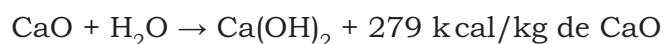
Afecta a la humedad del suelo y a sus propiedades geotécnicas, mejorando su trabajabilidad y su comportamiento frente al agua.

Modificaciones del estado hídrico

Estas modificaciones dependen de la forma en que se encuentra la cal (viva, apagada, lechada) y del porcentaje aplicado.

En el caso de emplearse cal viva, ésta provoca un descenso inmediato de la humedad del suelo por el efecto combinado de los tres procesos siguientes:

- hidratación de la cal viva, ya explicada en el capítulo 2.2, según la reacción:



- evaporación de una cierta cantidad de agua, producida por el calor desprendido en la hidratación de la cal viva (279 kcal/kg de cal viva). Esta reacción es muy exotérmica (el calor generado por la hidratación de un kg de cal viva permite calentar 2,79 kg de agua de 0° C a 100° C).
- aporte de materia seca (cal en polvo, por vía seca), que reduce la relación peso de agua/peso de sólido, es decir, la humedad del material resultante.

La importancia relativa de estos tres fenómenos depende de numerosos factores.

En general puede decirse que el descenso total de la humedad natural provocado por la incorporación de cal viva al suelo es aproximadamente del 3- 4 % por cada 1 % de cal viva mezclada.

Dado que el tratamiento en obra se realiza a menudo en condiciones atmosféricas que favorecen la evaporación, la reducción de la humedad natural resulta muchas veces superior a la provocada exclusivamente por la adición de la cal viva. En estas condiciones, si los efectos señalados se provocan aprovechando la aireación y volteo de materiales, pueden producirse en las obras pérdidas de humedad que llegan al 5-8 %.

Esta desecación, que se produce fundamentalmente durante la fase de mezclado, puede ser necesaria en el caso de suelos (de cualquier tipo) demasiado húmedos, en los que mediante este secado se consigue su puesta en obra.

Por el contrario, en el caso de que los suelos presenten humedades cercanas a la óptima de compactación, o incluso menores, esta desecación deberá ser compensada con un aporte de humedad complementario mediante riego, con objeto de mantener o conseguir la humedad óptima. Esta aportación de agua deberá tener en cuenta también la necesaria para la hidratación de la cal viva. La cantidad de agua a añadir es del orden del 30 % del peso de la cal incorporada.

Además, en el caso de suelos muy húmedos y en condiciones de temperaturas bajas, que se producen en invierno en obras de carreteras de montaña, se puede presentar el problema añadido de la congelación del agua.

La mezcla del suelo con cal viva permite, debido a la conjunción de los efectos anteriormente señalados, elevar la temperatura del mismo, fundiendo el hielo y reduciendo el exceso de humedad. En estas condiciones extremas, los porcentajes necesarios de cal viva son mayores de lo habitual.

En el caso de utilizarse cal apagada, ésta actúa sobre la humedad, pero únicamente como consecuencia del aporte de materia seca, es decir, mediante el tercer proceso antes señalado.

Por lo tanto, la disminución total sólo es del orden del 0,3 % de humedad del suelo por cada 1% de cal apagada aportada.

Cuando se aplica la cal por vía húmeda, es decir, en forma de lechada de cal, se incorpora al suelo una mezcla de agua y cal en suspensión en un porcentaje aproximado del 30 % en masa.

En este caso se produce, por el contrario, un aumento de la humedad natural que será función de su concentración (masa de cal por litro de agua) y de la cantidad mezclada con el suelo.

Debido a ello, en el caso de trabajar sobre suelos con humedades naturales excesivas, o próximas a la humedad óptima de compactación, debe aplicarse el tratamiento por vía seca (cal viva o apagada en polvo), con objeto de no añadir más humedad al suelo y dificultar con ello su puesta en obra.

☞ *Cuando se quiera tratar suelos con humedades naturales excesivas, superiores a la humedad óptima de compactación, debe aplicarse el tratamiento por vía seca (cal viva o apagada en polvo), con el objeto de no añadir más humedad al suelo y dificultar su puesta en obra.*

Modificaciones de las características de la fracción arcillosa del suelo

Desde el mismo momento en que se incorpora a un suelo arcilloso, la cal provoca un intercambio iónico de los cationes que estabilizan la estructura laminar de las arcillas. Como consecuencia de ello aparecen fuerzas de unión (fuerzas de Van der Waals) que dan lugar a su floculación. Estos efectos se traducen, desde el punto de vista geotécnico, en:

- una elevación importante del límite plástico del suelo sin modificación significativa de su límite líquido, lo cual se traduce en una reducción importante del índice de plasticidad. El suelo pierde su carácter pegajoso y pasa a tener un aspecto granular, mejorando sus características geotécnicas. En este estado, resulta más fácil su puesta en obra: extracción, carga, transporte, descarga, extendido, compactación, etc.

☞ *Cuando se mezcla en obra un suelo arcilloso con cal viva o apagada, se modifica de forma inmediata el comportamiento del suelo. Éste pasa bruscamente de un estado plástico, es decir, deformable y viscoso, a un estado sólido, es decir, más rígido y friable.*

- como consecuencia de este descenso de la plasticidad se produce también una mejora de la estabilidad volumétrica del suelo, reduciendo e incluso llegando a anular su eventual expansividad. Es frecuente que los suelos arcillosos sean muy expansivos, hinchándose ante la presencia de agua y disminuyendo su volumen hasta el estado inicial cuando ésta desaparece
- un incremento de la resistencia a esfuerzo cortante del suelo. Se produce al mismo tiempo que el cambio de estado anteriormente descrito y se traduce en una mejora inmediata de su capacidad de soporte.

Esto puede apreciarse en la mejora que se obtiene tanto en la capacidad de soporte inmediata del material como en el índice CBR.

- una modificación de las características de compactación del suelo. La curva Proctor del suelo tratado se sitúa debajo y a la derecha de la del suelo natural sin tratar, con una forma más plana. Dicho de otra manera, el tratamiento con cal reduce el valor máximo de la densidad aparente seca que puede alcanzarse para una energía de compactación específica y aumenta el valor de la humedad que permite obtenerla.

Esta tendencia se observa cualquiera que sea la energía de compactación aplicada, y es tanto más marcada cuanto más arcilloso es el suelo.

Esta ligera reducción de la densidad no debe interpretarse como un inconveniente. Por el contrario, las ventajas son evidentes, al ser más fácil alcanzar la densidad máxima y permitir trabajar con contenidos más elevados de humedad del suelo.

3.1.2 Efectos a largo plazo

La estabilización propiamente dicha consiste en una mejora a largo plazo (meses/años) por cementación, en función de la temperatura ambiente y de la naturaleza del suelo, aumentando progresivamente la capacidad de soporte y la resistencia mecánica del mismo, a la vez que hace insensible la capa estabilizada al agua y a los ciclos hielo-deshielo como consecuencia de la disminución de la permeabilidad.

Al elevar la cal el pH del suelo estabilizado hasta valores de 12,5, se libera sílice y alúmina de la arcilla que reaccionan con los iones calcio procedentes de la cal, formando silicatos y aluminatos cálcicos hidratados que, como en el caso de los cementos, incrementan la resistencia mecánica. Esta reacción de tipo puzolánico es lenta pero progresiva con el tiempo.

El mecanismo de estabilización es mucho más complejo que el de modificación, debido a las dos variables que influyen en su desarrollo: por un lado, su desarrollo en el tiempo, y por otro, la reacción cal-arcilla.

Las reacciones puzolánicas se producen entre la cal y los minerales arcillosos presentes en el suelo, cuando su proporción es significativa. El principio de la acción puzolánica se basa en la posibilidad de disolución, en un medio de pH elevado (superior a 12), de la sílice, la alúmina, y los óxidos de hierro presentes en los minerales arcillosos bajo formas cristalinas más o menos alteradas.

Estos elementos en solución reaccionan a continuación con el ión calcio de la cal para formar silicatos tricálcicos y bicálcicos, aluminatos tricálcicos y ferritoaluminatos cálcicos que precipitan y fraguan en presencia de agua, creando así enlaces de la misma naturaleza que los producidos por los conglomerantes hidráulicos.

Sin embargo, dado que las velocidades de solubilización de los componentes de la fracción arcillosa de un suelo son netamente inferiores a las que existen en presencia de materiales puzolánicos tradicionales (escorias, puzolanas, cenizas volantes, etc.), los fenómenos de cementación se desarrollan, en general, muy lentamente (varios meses, o incluso años, en las condiciones climáticas españolas medias).

Los factores que intervienen en la cinética del proceso de endurecimiento de las mezclas suelo-cal son los siguientes:

– la temperatura ambiente

Varios estudios han demostrado la importancia de este factor. Las resistencias alcanzadas al cabo de un año para una mezcla suelo-cal en condiciones de conservación a 20 °C pueden ser obtenidas a menudo en menos de 30 días si la temperatura de conservación es del orden de 40 °C.

Por el contrario, el proceso de endurecimiento se ralentiza cuando la temperatura desciende por debajo de 5 °C, y se detiene cuando es inferior a 0 °C, aunque mientras el pH del suelo se mantenga por encima de 11 continúa en cuanto la temperatura se eleva de nuevo. Es muy importante tener en cuenta este aspecto si el tratamiento se aplica para la construcción de explanadas y capas de firme que están sujetas a ciclos de hielo y deshielo durante su construcción.

Salvo casos particulares (suelos arcillosos muy reactivos a la cal, tratamiento con cal viva, etc.), no es recomendable construir una capa de coronación o de firme con suelo tratado con cal en aquellas obras que puedan verse sometidas a largos de helada.

– la cantidad y naturaleza (mineralogía) de la fracción arcillosa presente en el suelo

Cuanto más elevada sea esta cantidad y más se alteren las estructuras cristalinas de los minerales arcillosos afectados (esmeclitas, montmorillonitas), más rápida será la disolución de la sílice y de la alúmina y más importantes serán las cristalizaciones (en la medida en que estén disponibles las cantidades de cal y de agua libre necesarias).

No obstante, hay que señalar que algunos suelos, aunque se definan como arcillosos en el sentido geotécnico habitual (por el valor de su Índice de plasticidad o cualquier otro indicador), no producen reacciones puzolánicas (por ejemplo, arcillas sericitosas con alto contenido de mica procedentes de la alteración de esquistos).

Lo mismo sucede cuando el suelo contiene algunos componentes en exceso que alteren las condiciones químicas: materia orgánica, carbonatos, etc. En todos estos casos, suele ser suficiente hacer un estudio geotécnico para ver si se producen o no mejoras por acción de la cal sobre el suelo.

– el estado hídrico del suelo

La presencia en el suelo de una cantidad suficiente de agua libre es indispensable, en primer lugar, para asegurar la ionización con pH elevado del medio necesaria para la solubilización y, en segundo lugar, para la hidratación de los compuestos que lleva a la cementación de las partículas granulares.

Por todo ello, los valores de las características mecánicas esperables a largo plazo para las mezclas suelo-cal varían mucho de un suelo a otro, y son difícilmente evaluables con precisión en la fase de estudios, dado que los plazos necesarios y las condiciones de ejecución resultan difícilmente previsibles en esta etapa (época del año en que se llevan a cabo las obras, técnicas y medios de ejecución, etc.).

 *Por otra parte, al contrario de lo que sucede con los conglomerantes hidráulicos, existe una dosificación máxima de cal (que es función de la cantidad máxima "consumible" por la arcilla presente en el suelo), más allá de la cual las características mecánicas no pueden aumentar más e incluso corren el riesgo de empeorar, ya que la cal no consumida supone un polvo mineral que aumenta la sensibilidad al agua del material.*

3.2 Efectos de la incorporación del cemento

Al igual que con la cal, se puede distinguir igualmente entre efectos inmediatos y efectos a largo plazo, si bien con el cemento son estos últimos los que se buscan preferentemente.

3.2.1 Mejora por modificación inmediata

Modificaciones del estado hídrico

Los efectos inmediatos se refieren principalmente al estado hídrico del suelo, que sufre un secado por el hecho de la adición de una cierta cantidad de materia seca y, en menor medida, de la pérdida de agua consumida en la hidratación del conglomerante. Este secado, según las dotaciones aplicadas, varía teóricamente, entre el 0,3 y el 0,5 % del contenido de agua por punto porcentual de conglomerante, si bien en estos valores no se tiene en cuenta la evaporación que, al igual que con la cal, puede producirse en el transcurso de la mezcla in situ.

Modificación de las características de la fracción arcillosa del suelo

En algunos países se emplean conglomerantes especiales para carreteras con un fuerte contenido de cal (viva o apagada), que pueden dar lugar a la floculación inmediata de las partículas arcillosas, al igual que ocurre con la cal (pero sin ser ni tan rápida, ni tan intensa). Para suelos finos y con plasticidad elevada, el tratamiento mixto, primero con cal y luego con cemento, es la solución más adecuada.

3.2.2 Efectos a medio y largo plazo

Resultan del fraguado y endurecimiento del conglomerante, los cuales proporcionan a los suelos tratados una resistencia mecánica que puede ser predominante en su comportamiento. El valor de esta resistencia varía ampliamente y es función, principalmente, del tipo de conglomerante y de la dosificación del mismo.

Puede considerarse que el fraguado se desarrolla en tres etapas. La duración de cada una de ellas depende de la naturaleza de cada conglomerante y de la temperatura de la mezcla.

- la primera etapa es la del comienzo del fraguado. Comprende el tiempo necesario para disolver y precipitar en forma de gel los silicoferroaluminatos de calcio en el agua libre del suelo. Este tiempo que corresponde al plazo de trabajabilidad, puede variar entre 2, 24 o más horas después de la fabricación de la mezcla. Dicho plazo es muy importante en las operaciones de tratamiento de suelos, puesto que fija un límite máximo a las operaciones de puesta en obra
- la segunda etapa corresponde al desarrollo de la cristalización del gel y por tanto de la rigidización de la mezcla que provoca el fraguado propiamente dicho. Se extiende desde algunos días en los conglomerantes con una proporción importante de clinker hasta algunas semanas en los de fraguado lento, como es el caso de algunos conglomerantes especiales para carreteras.
- finalmente, una vez completado el fraguado, es decir, después de la formación de la casi totalidad de los ferrosilicoaluminatos hidratados, hay un periodo durante el cual continúan creciendo las resistencias mecánicas. En climas templados su duración puede variar, siempre dependiendo de la naturaleza de los conglomerantes, entre algunas semanas y varios meses.

Se puede considerar que el fraguado de los conglomerantes hidráulicos se interrumpe una vez que la temperatura de la mezcla desciende por debajo de cero grados centígrados, lo que puede llevar en algunos casos a tener que repetir el tratamiento.

Los efectos a largo plazo de la incorporación del cemento son diferentes según se trate de suelos granulares o de suelos finos. En los primeros, la acción cementante es similar a la que se produce en el hormigón vibrado, con la diferencia de que el conglomerante no rellena completamente los huecos del esqueleto granular. En las arenas, la cementación se produce únicamente en los puntos de contacto entre granos. Cuanto más continua sea la granulometría, más reducidos serán los huecos entre partículas, más numerosas y de mayor tamaño las zonas de contacto entre ellas y más eficaz el efecto cementante. Por el contrario, las arenas monogranulares, como las de playa, requieren una dotación elevada de cemento para ser estabilizadas.

En los suelos finos (arcillosos y limosos con plasticidad no elevada), la hidratación del cemento crea unos enlaces resistentes entre las partículas, formando una ma-

triz que envuelve a las mismas. Esta matriz tiene una estructura de panal de la cual depende la resistencia de la mezcla, puesto que las aglomeraciones de partículas dentro de las “celdas” tienen una resistencia muy reducida y contribuyen muy poco a la del conjunto. La matriz fija las partículas, de forma que ya no pueden deslizar las unas sobre las otras. Es decir, el cemento reduce la plasticidad y aumenta la resistencia a esfuerzos cortantes. El efecto químico de superficie del cemento reduce la afinidad por el agua y con ello la capacidad de retención de la misma de los suelos arcillosos. Debido a esta menor afinidad por el agua y a la resistencia de la matriz, los cambios de volumen (hinchamientos) provocados por la absorción de agua y los efectos de la congelación y el deshielo disminuyen notablemente.

 *La incorporación de cemento en cantidad suficiente a un suelo permite obtener un material con una resistencia mecánica apreciable a corto-medio plazo. La dotación mínima de conglomerante depende del tipo de suelo, siendo los más adecuados los de tipo granular con finos poco plásticos.*

Conviene tener en cuenta que para que el suelo tratado desarrolle una resistencia mecánica apreciable a corta edad debe incorporarse al mismo un contenido mínimo de cemento que depende del tipo de suelo, y por debajo del cual solamente es razonable esperar que se produzcan efectos de mejora de la capacidad de soporte y de disminución de la sensibilidad al agua.

En cualquier tipo de suelo, se obtiene el máximo partido del proceso cementante cuando la compactación se realiza adecuadamente, con un contenido de humedad que facilite tanto dicha operación como la hidratación del cemento.

3.3 Efectos de la adición conjunta de cal y cemento en dos etapas

En el caso de que los suelos a tratar con cemento presenten una humedad o una plasticidad excesivas, la corrección previa mediante un tratamiento con una dosis moderada de cal permite optimizar la acción del cemento sobre dichos suelos. Este proceso se denomina estabilización mixta.

 *En los suelos con una humedad o una plasticidad excesivas, la corrección previa mediante un tratamiento con una dosis moderada de cal permite optimizar la acción del cemento sobre los mismos.*

En el caso de suelos, sean del tipo que sean, con exceso de humedad natural, la adición previa de un porcentaje reducido de cal permite disminuir la misma hasta los valores aconsejables para su posterior tratamiento con cemento, debido a los efectos antes señalados.

Por otro lado, en suelos ligeramente plásticos, su mezcla previa con pequeños porcentajes de cal, del orden del 1 - 1,5 %, permite su modificación inmediata, antes explicada, y así poder optimizar después las acciones del cemento sobre el suelo, reduciendo su dosificación inicial necesaria, y evitando los riesgos que esto conlleva.

En cualquiera de los dos casos, con el objeto de aprovechar al máximo la acción previa de la cal, la mezcla deberá realizarse en dos etapas. En una primera, se mezclará el suelo con la cal, mientras que el cemento no deberá incorporarse hasta que hayan transcurrido algunas horas.

Una vez realizado el pretratamiento con cal, los efectos del cemento son similares a los que se obtienen cuando se mezcla el mismo con suelos con poco finos.

3.4 Propiedades de los suelos estabilizados con cal

Mediante el tratamiento de los suelos arcillosos con cal se logra una reducción de su plasticidad, una disminución de su hinchamiento potencial y un aumento de su capacidad de soporte.

Además, a través de los procesos analizados en el apartado 3.1 del presente Manual, se logra mejorar sus características resistentes y sus propiedades geotécnicas, y con ello su durabilidad y sus prestaciones durante su vida útil.

A continuación se describen más en detalle las propiedades de las mezclas de suelos arcillosos y cal de mayor interés en las obras de infraestructura.

3.4.1 Granulometría

Una de las primeras acciones de la cal con los suelos es la floculación o aglomeración de las partículas de arcilla en otras más gruesas. Dicha transformación granulométrica de las fracciones arcilla puede estimarse mediante la disminución del porcentaje de finos del suelo.

En la fig. 3.1 se presenta un ejemplo de la modificación del porcentaje de finos de un suelo arcilloso tras su tratamiento con distintos porcentajes de cal.

3.4.2 Plasticidad

Uno de los efectos más importantes de la cal en un suelo es el de cambiar apreciablemente su plasticidad. Con suelos de baja plasticidad ($IP < 15$) aumentan tanto el LL como el LP y también, muy ligeramente, su IP; en cambio, en los suelos de plasticidad media y elevada ($IP > 15$) disminuye el IP.

En la fig. 3.2 puede verse un ejemplo de las modificaciones experimentadas en los límites de Atterberg de un suelo arcilloso al mezclarlo con distintos porcentajes de cal.

3.4.3 Capacidad de soporte

Los suelos arcillosos suelen tener una capacidad de soporte baja. Por el contrario, una vez estabilizados con cal y en función del porcentaje de esta última, los valores

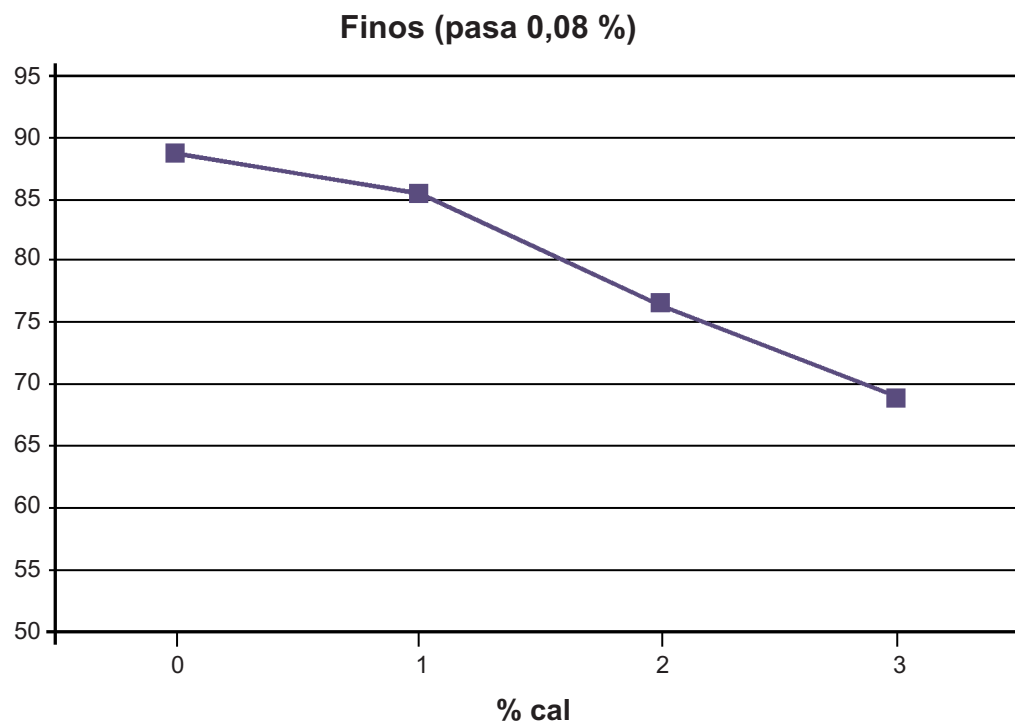


Figura 3.1 Ejemplo de la disminución del contenido de finos al aumentar el porcentaje de cal en un suelo

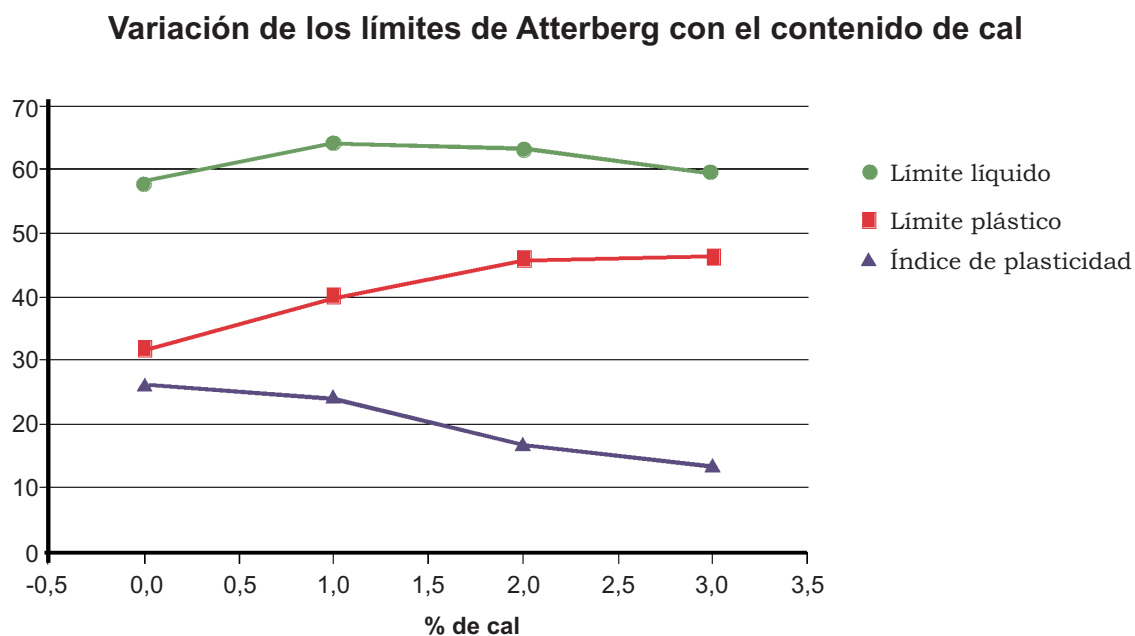


Figura 3.2 Ejemplo de variación de los límites de Atterberg con el contenido de cal

obtenidos pueden llegar a ser con frecuencia superiores a los de muchos suelos naturales seleccionados. En la fig. 3.3 puede verse un ejemplo de variación del índice CBR con el contenido de cal.

El índice CBR de los suelos estabilizados con cal es la principal característica prescrita en los Pliegos de Prescripciones Técnicas, siendo, en algunos de ellos, el único parámetro incluido en los mismos. En algunos países también se especifica el índice de capacidad de soporte inmediata, cuya determinación puede llevarse a cabo mediante el método incluido en la norma EN 13286-47.

El índice CBR se utiliza en las obras de estabilización de suelos con cal como ensayo de dosificación y de control. En el segundo caso ello conlleva la necesidad de disponer lo más pronto posible de resultados para evitar paralizaciones de obra. Con este objeto es recomendable confeccionar en laboratorio probetas en molde CBR en iguales condiciones de humedad y compactación (idéntico número de golpes), que se ensayan a 1, 4 y 7 días de edad. De esta forma es posible tomar decisiones a solamente un día de edad. En la fig. 3.4 se muestran los resultados obtenidos en una obra de autovía.

✎ *Es conveniente obtener en laboratorio correlaciones entre los valores del índice CBR a 1, 4 y 7 días, a fin de poder evaluar lo más pronto posible en obra la eficacia del tratamiento.*

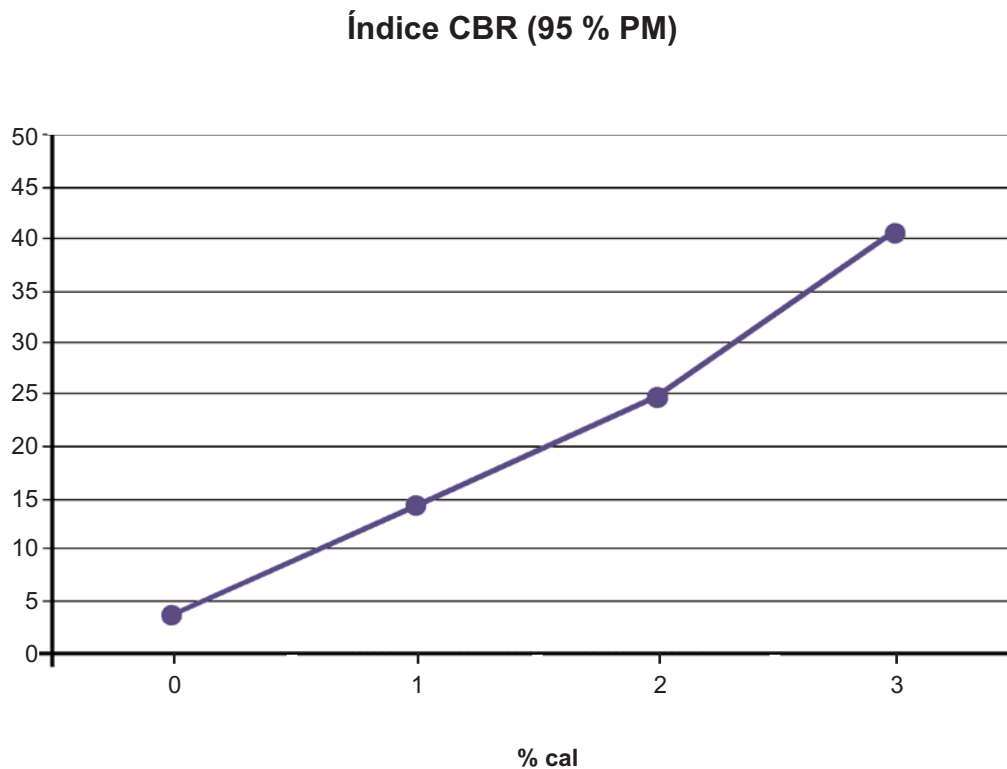


Figura 3.3 Ejemplo de evolución del índice CBR con diferentes porcentajes de cal

RELACIÓN ENTRE LOS ÍNDICES C.B.R. A 1, 4 Y 7 DÍAS EN TERRAPLENES ESTABILIZADOS CON CAL

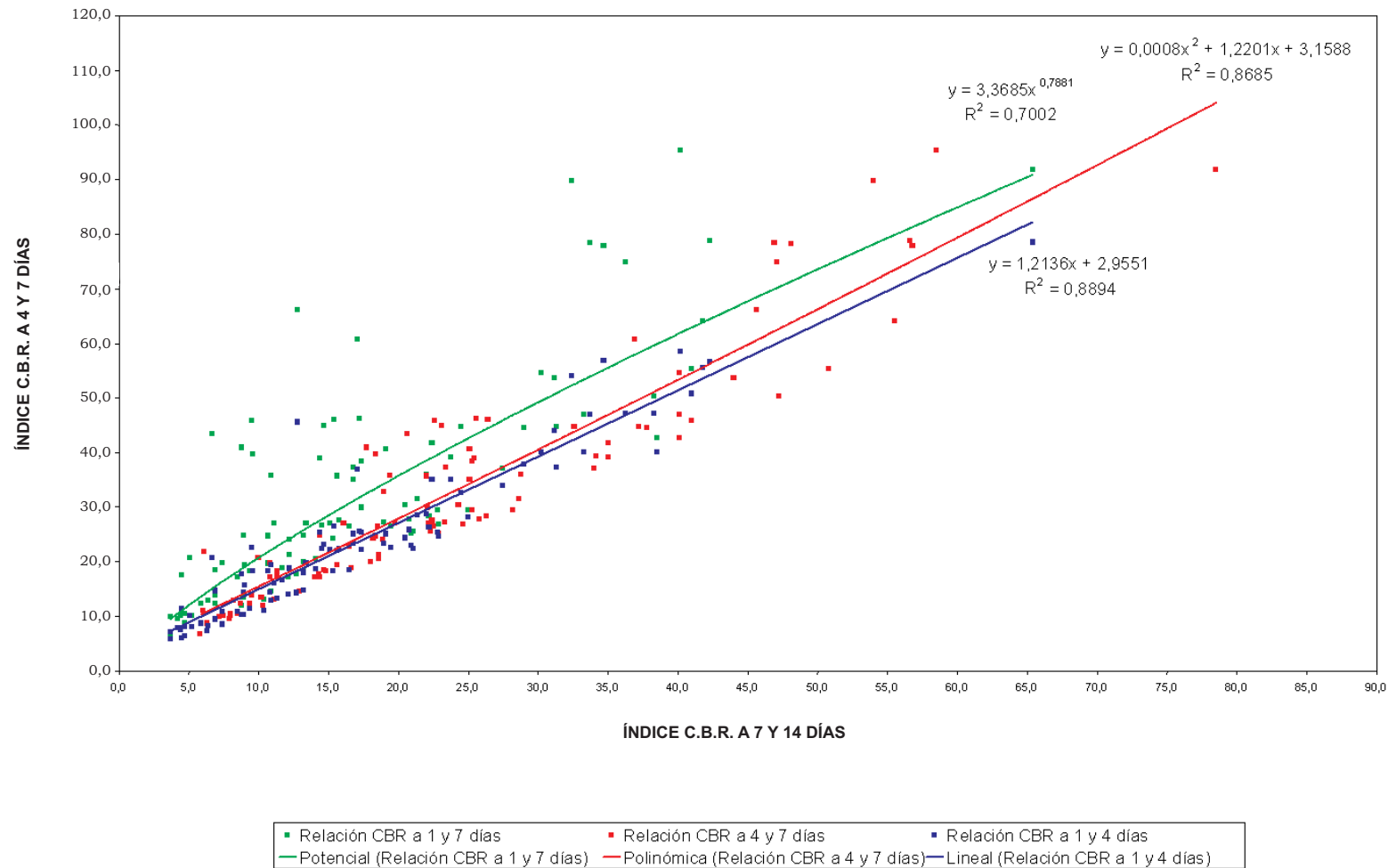


Figura 3.4 Ejemplo de evolución del índice CBR a 1, 4 y 7 días.

3.4.4 Estabilidad volumétrica

Una de las razones para estabilizar algunos suelos es que presenten unos valores de hinchamiento peligrosos, que supongan riesgos de movimientos de la capa una vez construida la infraestructura. La mezcla con cal puede reducir e, incluso, eliminar estos hinchamientos como consecuencia de la disminución de la plasticidad.

En la fig. 3.5 se ha representado un ejemplo de incremento de la estabilidad volumétrica de un suelo, evaluada mediante el ensayo de hinchamiento libre en edómetro, al ir aumentando la dotación de cal, mientras que en la fig. 3.6 puede verse la variación de dicho parámetro a lo largo de una obra, antes y después de estabilizar con cal.

☞ *Con respecto al material de partida, los suelos tratados con cal tienen un menor contenido de finos, por efecto de la floculación de las partículas, un índice de plasticidad menor, un hinchamiento más reducido y una mayor capacidad de soporte.*

3.4.5 Resistencia a compresión

La resistencia a compresión de los suelos estabilizados con cal depende mucho del tipo de suelo. Mientras en algunos casos no se aprecia prácticamente aumento de resistencias, en otros se alcanzan a los 6 meses valores similares a los que se exigen a 7 días de edad a los suelos estabilizados con cemento para explanadas (fig.3.7).

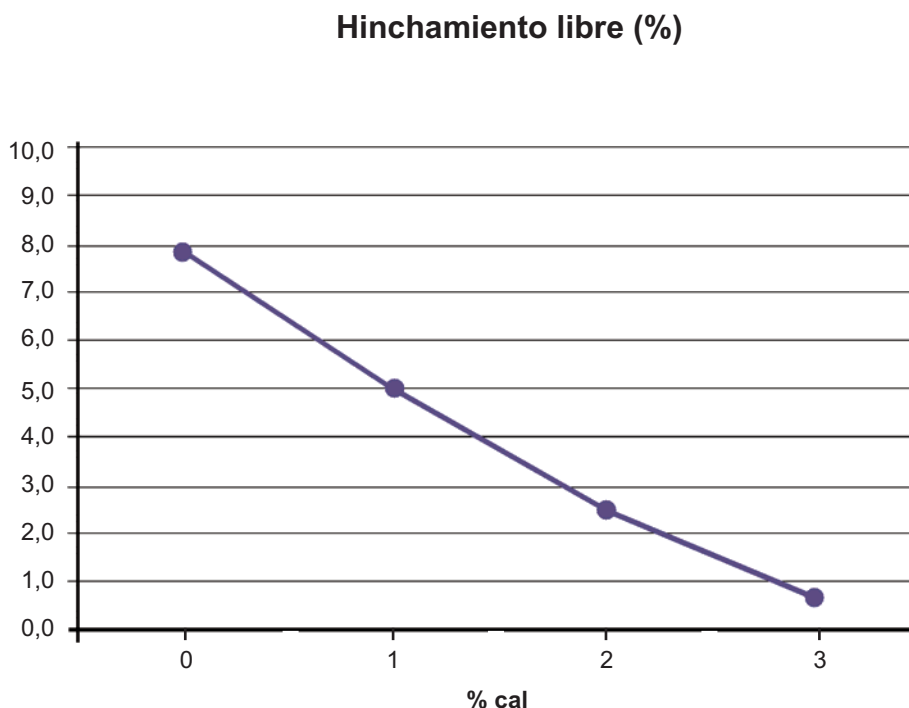


Figura 3.5 Ejemplo de variación del hinchamiento libre de un suelo con el contenido de cal

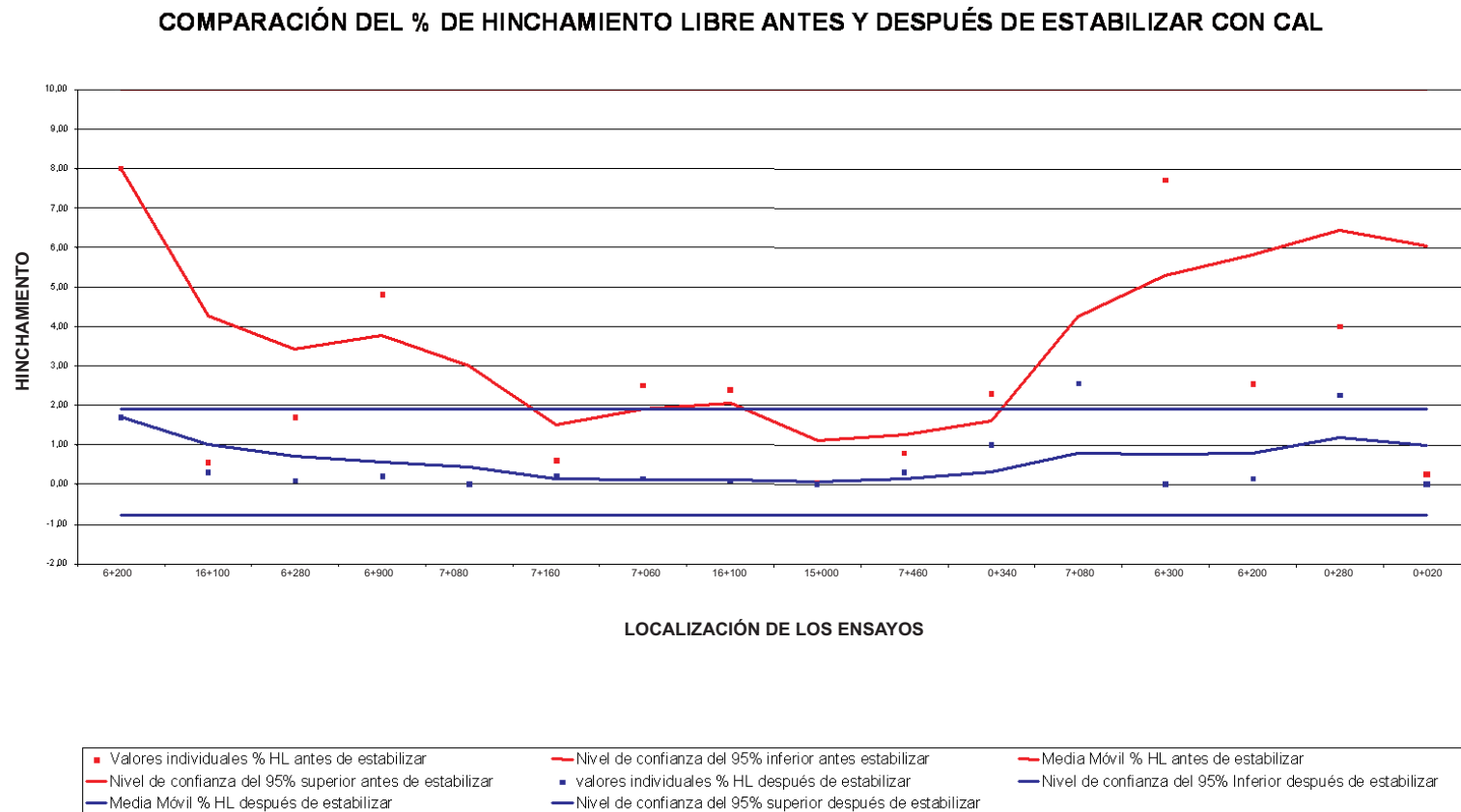


Figura 3.6 Comparación del hinchamiento antes y después de estabilizar con cal

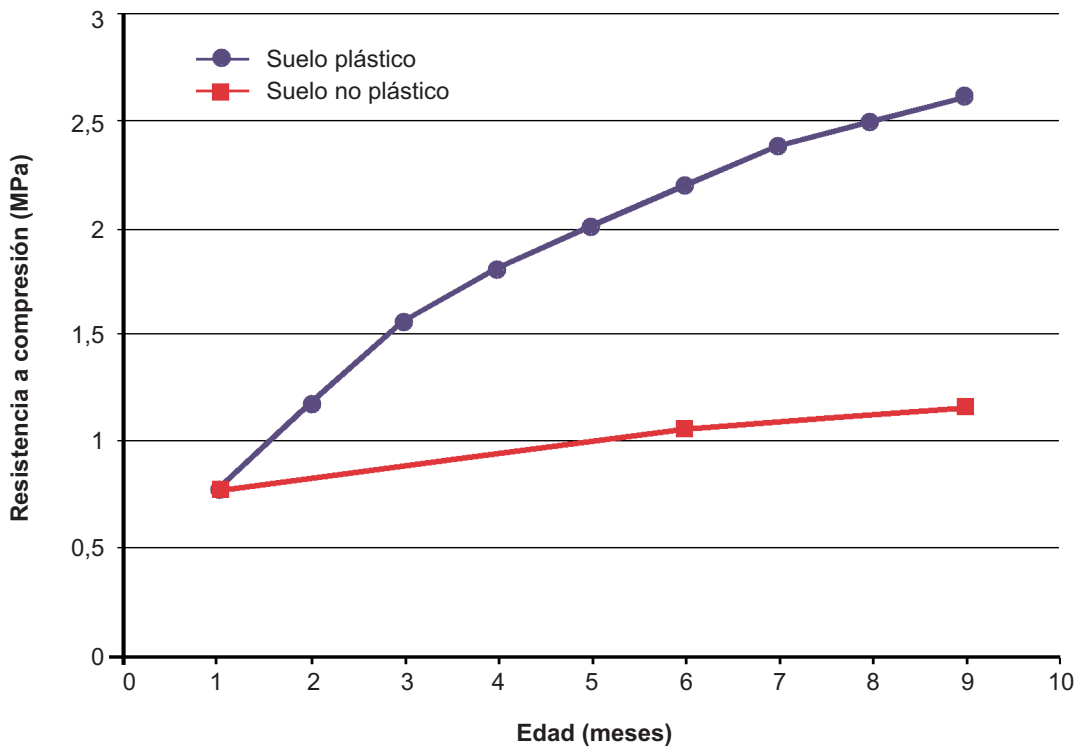


Figura 3.7 Ejemplos de evolución de la resistencia a compresión de suelos tratados con cal

3.4.6 Resistencia frente a la acción del agua

Los suelos tratados con cal disminuyen su susceptibilidad al agua gracias tanto a los efectos de mejora inmediata como a los de estabilización a largo plazo.

Éste es un factor fundamental en el mejor comportamiento que demuestran las capas tratadas frente a las de materiales sin tratar en iguales condiciones de servicio.

3.4.7 Permeabilidad

La evolución de la permeabilidad de los suelos arcillosos tratados con cal presenta dos etapas distintas. De forma inmediata, tras el mezclado, durante el proceso de modificación, el suelo pasa de arcilloso a arenoso lo cual supone un aumento de la permeabilidad.

Pero una vez transcurrido un cierto plazo, a medida que se desarrollan las reacciones puzolánicas y se forman los enlaces entre partículas del suelo, éste se va cerrando, volviendo a reducirse su permeabilidad hasta los valores iniciales o, incluso, menores. Con ello, el suelo tratado con cal resulta finalmente igual de impermeable o más que el original. Este efecto depende del grado de estabilización propiamente dicha que se alcance con el tratamiento.

3.4.8 Resistencia a los ciclos de hielo-deshielo

Las capas tratadas con cal presentan una mejor resistencia frente a los ciclos de hielo-deshielo. Dicha resistencia se consigue principalmente tras las reacciones puzolánicas, pues los productos resultantes de las mismas son los que confieren al suelo esta propiedad. No obstante, en España este aspecto no es relevante.

3.5 Propiedades de los suelos estabilizados con cemento

3.5.1 Naturaleza de los suelos estabilizados con cemento

Como ya se ha mencionado en el capítulo 1 de este Manual, los suelos estabilizados con cemento pueden clasificarse, de acuerdo con las propiedades de la mezcla resultante, en los siguientes tipos:

- los suelos mejorados con cemento, en los que se añade a un suelo, una vez disgregado en su caso, una cantidad de cemento relativamente baja, a fin de mejorar algunas de sus características (por ejemplo, su susceptibilidad a los cambios de humedad), y que después del tratamiento siguen constituyendo un material suelto. Respecto a la clasificación de suelos estabilizados del PG3 corresponderían a los denominados S-EST 1 y S-EST 2
- los suelos estabilizados con cemento, en los que el producto final, después del fraguado del cemento, es un material, con una cierta resistencia mecánica. Los materiales de este tipo corresponderían a los S-EST 3 (a los que se pide una resistencia a compresión a 7 días de 1,5 MPa) o bien a los suelos estabilizados con cemento para subbases y bases (resistencia a compresión a 7 días de 2,5 MPa). Estos últimos no son objeto del presente Manual, aunque la mayoría de los conceptos son igualmente aplicables. De forma específica, han sido considerados en el “Manual de firmes con capas tratadas con cemento” del CEDEX y el IECA.

La principal diferencia entre los suelos estabilizados con cemento para explanadas y los utilizados en capas de firme radica en el contenido más elevado de cemento de los segundos, lo que se traduce en una superior resistencia mecánica y en una mayor homogeneidad.

Varias características de estos materiales los diferencian de las mezclas con otros agentes estabilizadores:

comportamiento en estado fresco: el proceso de puesta en obra de los suelos estabilizados con cemento, es decir, el conjunto de operaciones entre la mezcla del suelo con el conglomerante y el agua y el final de su compactación, debe realizarse dentro del llamado plazo de trabajabilidad. A medida que se va desarrollando el proceso de hidratación del conglomerante, empiezan a formarse enlaces cristalinos entre las partículas del suelo, los cuales pueden ser destruidos, sin posibilidad de regenerarse, por los esfuerzos originados por la compactación. En consecuencia, ésta debe completarse antes de que se haya formado un número demasiado elevado de enlaces cuya rotura perjudicaría de forma apreciable el

comportamiento posterior del material. El intervalo máximo dentro del cual deben efectuarse las operaciones de compactación es lo que se denomina plazo de trabajabilidad. Este concepto no debe confundirse con el tiempo de fraguado del conglomerante, que lógicamente es uno de los parámetros que lo influyen, pero no el único; la naturaleza del suelo, el contenido de agua o la temperatura de la obra son también otros factores a tener en cuenta. Asimismo no hay que pensar que una vez transcurrido el plazo de trabajabilidad, la mezcla no pueda ser compactada, al menos durante un cierto tiempo; pero se corre el peligro de romper una gran cantidad de enlaces, con una significativa caída posterior de las resistencias mecánicas; y por otra parte, a medida que se va rigidizando el material, más difícil resulta su compactación

estabilidad inmediata: la posibilidad de apertura inmediata a la circulación una vez compactada la mezcla depende del tipo de suelo, aumentando con el porcentaje de elementos gruesos. Ello es debido a que a medida que crece el mismo, la estabilidad que adquiere el esqueleto mineral es cada vez mayor, con lo que las deformaciones originadas por los vehículos no son suficientes para romper los enlaces entre las partículas. Con ello no se interrumpe el proceso de ganancia de resistencias mecánicas, responsable del comportamiento a largo plazo del material

capacidad de reparto de cargas: la capacidad de reparto de cargas a las capas inferiores del cimiento del firme y de disminución de las tensiones en este último dependen asimismo de la naturaleza del suelo (cuanto mayor sea la proporción de elementos granulares, más elevado será el módulo de elasticidad) y del contenido de cemento

dependencia de las resistencias mecánicas frente al grado de compactación alcanzado: a título de ejemplo, un descenso del 5 % en la densidad realmente obtenida puede traducirse en una disminución del 25 % en las resistencias mecánicas. Por ello, en todos estos materiales es esencial que, durante su puesta en obra, el proceso de compactación se realice de forma eficaz

☞ *Se obtiene el máximo partido del fraguado y endurecimiento cuando la mezcla se compacta adecuadamente y con un contenido de humedad que facilite la densificación del material.*

evolución de resistencias: en suelos estabilizados con cemento en las que se exigen resistencias, éstas tienen un desarrollo rápido, alcanzando ya a edades tempranas unos valores apreciables. Ésta es una diferencia fundamental frente a las mezclas tratadas con otros tipos de conglomerantes de fraguado y endurecimiento más lento (escorias de alto horno, cenizas volantes, puzolana, algunos conglomerantes hidráulicos para carreteras), cuyas resistencias a 7 días son muy pequeñas. La curva de evolución depende del contenido de adiciones activas del cemento utilizado: cuanto mayor es éste, mayor es la relación entre las resistencias a 7 y 90 ó 180 días. A un año las resistencias pueden considerarse estabilizadas

- comportamiento a fatiga: la curva de fatiga de los suelos estabilizados con cemento tiene una pendiente muy reducida. Ello se traduce en que una pequeña

disminución de las tensiones, provocada por ejemplo por un ligero sobreespesor, aumenta mucho el número de repeticiones admisibles, y en consecuencia la durabilidad de la capa tratada; por el contrario, un débil aumento de las tensiones, debido por ejemplo a una pequeña merma de espesor, trae consigo una fuerte reducción en dicha durabilidad;

- fisuración por retracción térmica: debido a su rigidez, con módulos de elasticidad en algunas ocasiones elevados, y a su coeficiente de dilatación térmica (del orden de $10^{-7}/^{\circ}\text{C}$), las tensiones que se originan en un suelo estabilizado con cemento como consecuencia de las variaciones de temperatura pueden llegar a rebasar las de rotura del material en el período en que la explanada se encuentra al descubierto, antes de comenzar a extender las capas del firme. En consecuencia, la fisuración a intervalos más o menos regulares de los suelos estabilizados con cemento es un hecho inherente a su naturaleza, y no debe ser atribuida en general a fallos de ejecución de los mismos. Por otra parte, y debido al gran espesor del firme, estas fisuras no se reflejan en general en la superficie. Por ello no es preciso recurrir a la prefisuración de las capas estabilizadas de las explanadas;

- resistencia a la abrasión: los suelos estabilizados con cemento tienen unas características de resistencia a la abrasión que los hacen inadecuados para soportar el paso frecuente de vehículos pesados sobre los mismos sin que se produzcan importantes desgastes. Por ello, en el caso de que deban soportar un tráfico de obra importante, debe disponerse encima de ellos un tratamiento superficial o como mínimo una capa de árido de cobertura sobre el riego de curado.

En los apartados siguientes se desarrollan de forma más detallada algunos de los puntos anteriores.

3.5.2 Propiedades en estado fresco

Plazo de trabajabilidad

Ya se ha mencionado que el plazo de trabajabilidad es un parámetro muy importante, tanto en lo que se refiere a la puesta en obra de este tipo de materiales como en su comportamiento a largo plazo. Para su determinación, el método más sencillo consiste en realizar ensayos de compactación diferida, confeccionando probetas después de haber dejado transcurrir un tiempo cada vez mayor a partir de la mezcla de los componentes y determinando la densidad de las mismas. Se admite que el plazo de trabajabilidad es aquel en el que se produce una caída de dos puntos porcentuales con relación a la densidad obtenida nada más fabricar el material (fig. 3.8). En laboratorio se puede recurrir también a la medición del tiempo de paso de los ultrasonidos a través de una probeta recién compactada. A medida que se van desarrollando las reacciones de hidratación del conglomerante el material se va rigidizando y disminuye dicho tiempo de paso. Se considera que se ha alcanzado el final del plazo de trabajabilidad cuando dicho tiempo de paso disminuye al 60 % del inicial (fig. 3.9). Ambos tipos de ensayos son objeto de la Norma UNE-EN 13286-45.

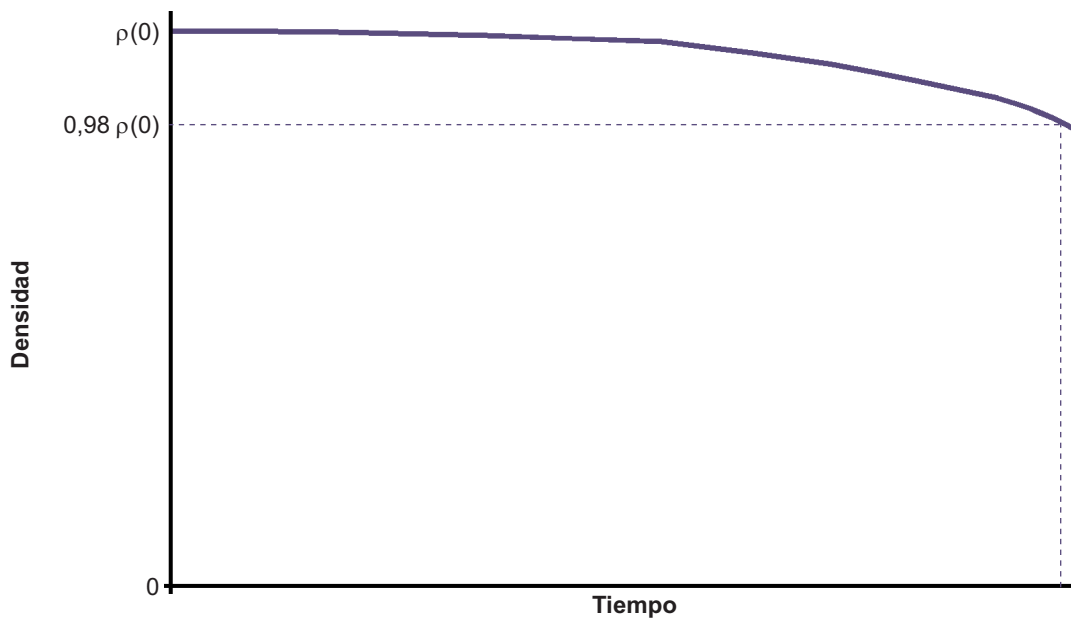


Figura 3.8 Determinación del plazo de trabajabilidad por el método de compactación diferida (norma UNE-EN 13286-45)

Los plazos de trabajabilidad a alcanzar dependen del tipo de obra. En el artículo 512 del Pliego PG-3 se prescriben a este respecto los plazos mínimos indicados en la Tabla 3.1.

Para alcanzar estos valores es preciso recurrir en ocasiones al empleo de un retardador de fraguado, determinándose la dosis del mismo en función del plazo a alcanzar. Normalmente se trata de dosificaciones muy reducidas, del orden del 4 por mil en peso del cemento, que se incorpora al agua de amasado. Hay que destacar, no obstante, que el plazo de trabajabilidad depende mucho de la temperatura ambiente. Puede estimarse que, a igualdad de las restantes condiciones, el plazo de trabajabilidad a 10 °C es el doble del obtenido a 20 °C, y éste a su vez doble del obtenido a 40 °C. Por ello, los ensayos deben realizarse a la temperatura media ambiente prevista entre las once y las catorce horas.

En principio no se impone ningún plazo máximo de trabajabilidad; no obstante, por encima de las 48 horas se corre peligro de que no se produzca el fraguado del conglomerante.

Tabla 3.1 Plazos mínimos de trabajabilidad en función del tipo de obra

Tipo de obra	Plazo mínimo (horas)
Anchura completa	2
Por franjas	3

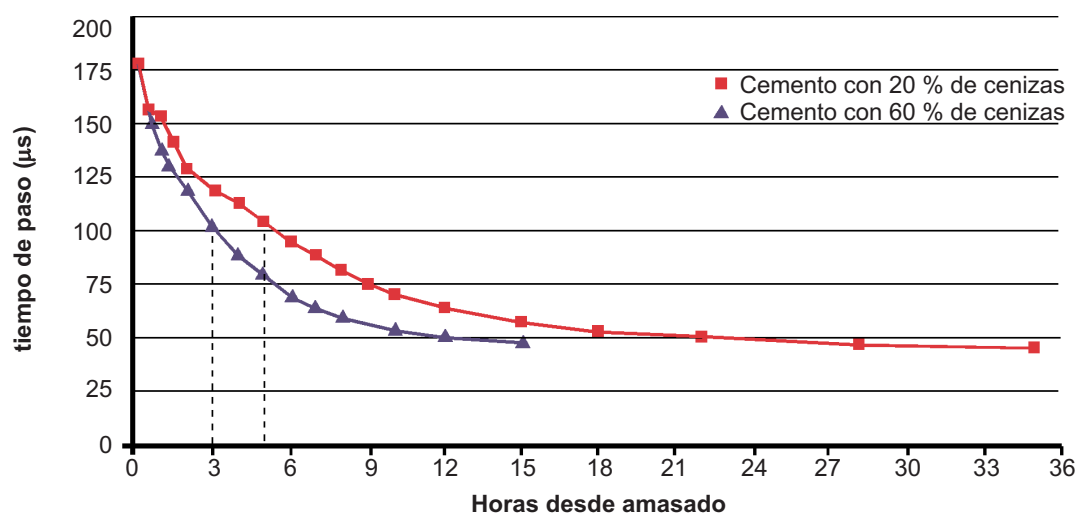


Figura 3.9. Plazo de trabajabilidad: variación del tiempo de paso de los ultrasonidos (norma UNE-EN 13286-45)



La compactación de la mezcla debe finalizar antes de que transcurra el plazo de trabajabilidad, ya que después resulta muy difícil y además se puede dañar, de forma irreversible, la capa de suelo estabilizado con cemento.

Estabilidad inmediata

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, una vez compactado, debe tener un esqueleto mineral con una estabilidad suficiente. Para la estimación de la misma se utiliza el denominado índice de capacidad de soporte inmediata, el cual se determina sometiendo una probeta recién compactada a un ensayo de penetración con la prensa CBR, sin imbibición y sin ninguna sobrecarga anular. El valor CBR, obtenido en estas condiciones, es el índice de capacidad de soporte inmediata, y debe ser al menos igual o superior a 50 para poder permitir la apertura a la circulación. El ensayo se encuentra regulado por la Norma UNE-EN 13286-47.

El índice de capacidad de soporte inmediata también es un indicador de la posibilidad de circular los equipos de obra sobre el material. Este último es muy inestable si dicho índice es inferior a 25. Para valores comprendidos entre 25 y 50, el comportamiento del material es muy variable dependiendo de las condiciones de ejecución.

3.5.3 Propiedades físicas y mecánicas

Densidad

Al igual que en los suelos, los materiales tratados con cemento tienen una curva densidad seca-humedad, antes de la hidratación del conglomerante, que se ob-

tiene aplicando una energía de compactación normalizada a distintas muestras del mismo material de partida en las que se va variando su contenido de humedad. Dicha curva suele tener una forma aproximadamente parabólica, con una densidad máxima para un contenido de humedad que se denomina humedad óptima (fig. 3.10). Dependiendo de la energía aplicada se obtienen diferentes curvas, las cuales tienden asintóticamente a la denominada curva de saturación del material (fig. 3.11), la cual relaciona la densidad seca con la humedad cuando el volumen de huecos de aire es nulo.

Los tres métodos de ensayo más usuales para obtener una curva humedad – densidad son los siguientes:

- ensayo Proctor normal (Norma UNE 103501)
- ensayo Proctor modificado (Norma UNE-EN 13286-2)
- ensayo de compactación con martillo vibrador (Norma UNE-EN 13286-4)

Tanto en el ensayo Proctor normal como en el modificado se deja caer una maza de características normalizadas desde una altura fija un cierto número de veces en cada una de las capas en las que se compacta el material. Por el contrario, en el ensayo con martillo vibrador éste se aplica durante un tiempo fijo en cada una de las capas.

La energía que se suministra al material es 4,5 veces superior en el método Proctor modificado en comparación con la del normal. Por ello la densidad máxima Proctor normal es inferior a la del Proctor modificado, mientras que la humedad óptima es

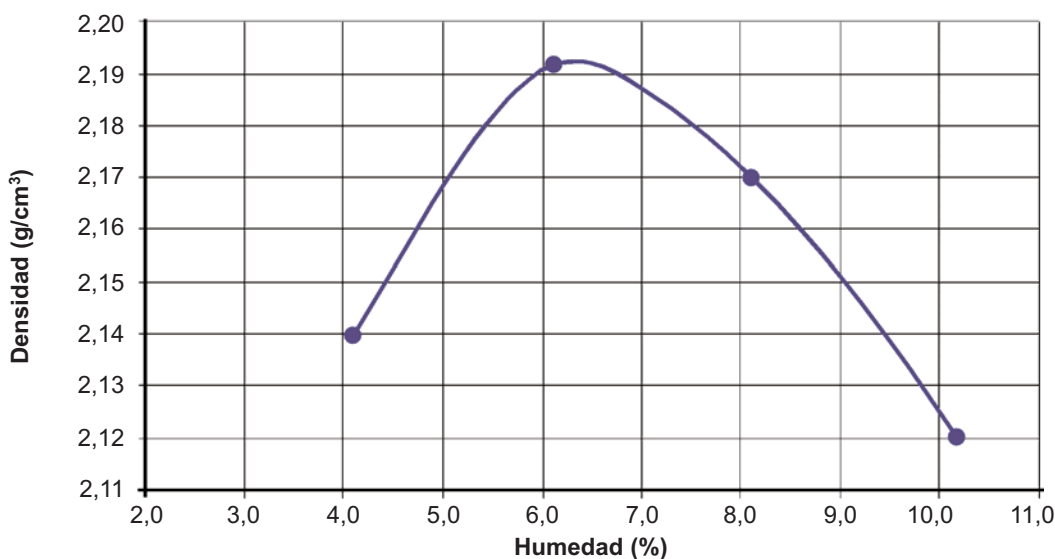


Figura 3.10 Curva humedad-densidad obtenida en un ensayo Proctor modificado (norma UNE-EN 13286-2)

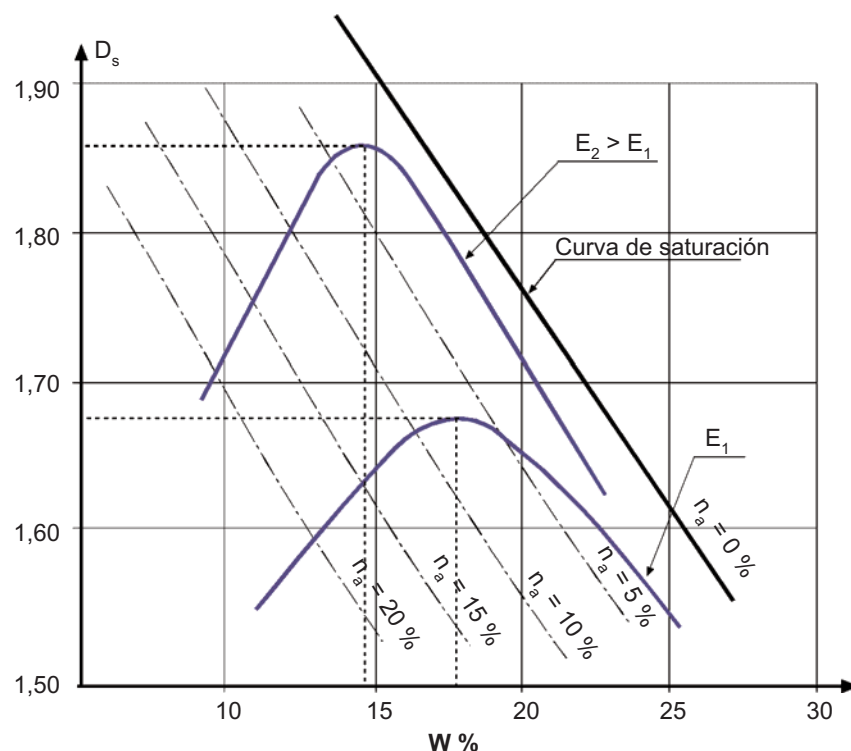


Figura 3.11 Variación de las curvas de humedad-densidad con la energía de compactación

superior. Por el contrario, en los suelos la comparación entre las densidades obtenidas con el método Proctor modificado y el martillo vibrador no presenta una tendencia tan clara, dependiendo los resultados del tipo de suelo, aunque en general se obtienen valores similares.

Los métodos anteriores se utilizan asimismo para confeccionar probetas tanto para la determinación del contenido de conglomerante como para el control de resistencias. Ya se ha mencionado la gran dependencia entre estas últimas y la densidad. Por ello es importante especificar el sistema de fabricación de las probetas.

En general, los valores de la densidad máxima y la humedad óptima de un material sin tratar no presentan grandes diferencias con respecto a los que se obtienen después de añadir el cemento. En los suelos estabilizados con cemento, el efecto floculante del cemento tiende a producir un aumento de la humedad óptima y una reducción de la densidad máxima; pero, por otra parte, el mayor peso específico del cemento con relación al suelo se traduce en un aumento de la densidad. El mayor o menor predominio de estas dos acciones contrapuestas varía con el tipo de suelo. Así, en las arenas y suelos arenosos suele producirse un aumento de la densidad, mientras que ésta, por el contrario, se reduce en los limos. En las arcillas las variaciones son muy pequeñas. En lo que se refiere

a la humedad óptima, suele disminuir en las arcillas e incrementarse en los limos; en las arenas y suelos arenosos los cambios son de poca importancia.

De acuerdo con el tipo de suelo estabilizado in situ, las densidades exigidas en el Pliego PG-3, con respecto a la densidad máxima Proctor modificado, son las siguientes:

S-EST1 $\geq 95 \%$ (97 % en coronación de explanadas E1)

S-EST2 $\geq 97 \%$

S-EST3 $\geq 98 \%$

Permeabilidad

Los suelos estabilizados con cemento tienen coeficientes de permeabilidad que suelen situarse entre $1,7 \cdot 10^{-7}$ y 10^{-9} m/s. Los valores más reducidos corresponden normalmente a suelos con un porcentaje importante de partículas arcillosas. En comparación con la del suelo de partida, la permeabilidad disminuye notablemente al mezclarlos con cemento en el caso de suelos granulares, mientras que por el contrario puede aumentar en algún caso si se trata de suelos arcillosos o limosos. En general, cuanto mayor es el contenido de cemento, menor es la permeabilidad, a igualdad del resto de factores.

La permeabilidad se determina midiendo el tiempo que tarda una cierta cantidad de agua en atravesar verticalmente una probeta en la cual se han impermeabilizado sus paredes laterales mediante algún sistema (resina epoxi, lámina de caucho a presión, etc.). Existen permeámetros de carga constante (en los que la altura de columna de agua sobre la probeta es constante) y de carga variable. La norma UNE 103403 regula la determinación de la permeabilidad de una muestra de suelo mediante el método de carga constante.

Resistencias mecánicas

Las resistencias mecánicas de los suelos estabilizados con cemento dependen fundamentalmente de los siguientes factores:

- el contenido de cemento
- la densidad alcanzada en la compactación
- la humedad de la mezcla
- la naturaleza del suelo
- la edad del material
- las temperaturas a las que se ha visto sometido

Las resistencias mecánicas suelen determinarse habitualmente mediante ensayos de compresión (sobre probeta cilíndrica, de acuerdo con la Norma UNE-EN 13286-41) o de tracción indirecta (ensayo brasileño), siguiendo la Norma UNE-EN 13286-42. Se han puesto a punto distintos dispositivos para confeccionar probetas prismáticas permitiendo realizar ensayos de flexotracción (ver por ejemplo Norma ASTM D1632), aunque se han utilizado en general únicamente en estudios de laboratorio, y no para control de obra. En Francia, las resistencias se determinan mediante ensayos de tracción directa, realizadas sobre unas probetas cilíndricas especiales con los extremos ensanchados (Norma UNE-EN 13286-40).

Solamente en el caso de los suelos estabilizados con cemento para explanadas (S-EST 3) se especifican resistencias a compresión, las cuales deben ser superiores a 1,5 MPa a 7 días

Correlaciones entre distintos tipos de resistencia

Las capas tratadas con cemento trabajan a flexión al paso de las cargas de tráfico. En consecuencia, es la resistencia a flexotracción de estos materiales la que presenta un mayor interés para el proyecto estructural de los firmes. No obstante, la dificultad para confeccionar probetas prismáticas para ser ensayadas a flexotracción da lugar a que dicha resistencia sea estimada en general a partir de resultados de otros tipos de ensayos: compresión o tracción indirecta, llevados a cabo sobre probetas cilíndricas; o bien, como ya se ha indicado, mediante probetas cilíndricas con los extremos ensanchados en el caso de recurrirse a ensayos de tracción directa.

Como correlaciones entre los distintos tipos de resistencia, en suelos con una fuerte proporción de elementos granulares pueden adoptarse en principio algunas de las admitidas normalmente para los hormigones vibrados, como por ejemplo:

entre la resistencia media a compresión σ_c y la resistencia media a tracción indirecta σ_{ti} :

$$\sigma_{ti} = 0,278 \cdot (\sigma_c)^{2/3}$$

entre la resistencia media a compresión σ_c y la resistencia media a flexotracción σ_f :

$$\sigma_f = 0,464 \cdot (\sigma_c)^{2/3}$$

En estas fórmulas debe entrarse con los valores de las resistencias expresados en MPa.

En lo que se refiere a la resistencia a tracción directa, suele considerarse que es del orden de un 80 a un 90 % de la de tracción indirecta.

En las mezclas con cemento con predominio de finos es usual considerar que la resistencia a flexotracción es del orden de un 20 a un 30 % de la resistencia a compresión.

Influencia del contenido de cemento

En los suelos estabilizados con cemento, las dotaciones de cemento varían ampliamente según el tipo de suelo que se utilice. Aunque en principio cualquier suelo puede emplearse para la fabricación de una mezcla con cemento, los altos contenidos de conglomerante que se precisan cuando el contenido de finos plásticos es muy elevado y las mayores dificultades de mezclado aconsejan restringir los tratamientos con cemento a los suelos cumpliendo con las siguientes condiciones:

- límite líquido inferior a 40 en los S-EST2 y S-EST3
- índice de plasticidad inferior a 15
- cernido ponderal por el tamiz UNE 2 mm superior al 20 %
- cernido ponderal por el tamiz UNE 0,063 mm no superior al 35 % (50 % en los S-EST1 y S-EST2)

El contenido de cemento tiene una gran importancia en la resistencia alcanzada: la humedad óptima de compactación suele ser similar a la del suelo sin tratar, y se ve poco afectada por las variaciones en la dotación de conglomerante. Con ello, al aumentar esta última, se disminuye la relación agua / cemento. A efectos indicativos pueden adoptarse la siguiente correlación entre la resistencia a compresión R_{c7} a 7 días, en MPa, y el contenido de cemento:

$$R_{c7} = a \cdot (\% \text{ cemento})$$

expresión en la que “a” es un coeficiente cuyo valor suele variar entre 0,6 y 1 en suelos granulares, y entre 0,3 y 0,6 en suelos cohesivos.

Influencia del contenido de agua

Al ir aumentando el contenido de agua de una mezcla con cemento entran en juego dos factores contrapuestos: por una parte se aumenta la relación agua / cemento, lo que tiende a disminuir las resistencias mecánicas; pero por otra parte, y hasta alcanzar la humedad óptima, se aumenta la densidad, lo que, como ya se ha mencionado, tiene una gran influencia en la resistencia. Como resultado de ello, las mayores resistencias suelen obtenerse, para una energía de compactación dada, con contenidos de humedad comprendidos entre el óptimo y dicho porcentaje disminuido en un punto porcentual.

Influencia de la densidad en la resistencia

Ya se ha mencionado en varias ocasiones que la resistencia mecánica depende en gran medida de la densidad realmente alcanzada. En las mezclas con cemento, un incremento de la densidad en $0,01 \text{ t/m}^3$ puede suponer entre 0,065 y 0,11 MPa de aumento de la resistencia a compresión.

Ello da lugar a frecuentes distorsiones entre los valores de laboratorio, sobre probetas compactadas normalmente al 100 % de la densidad máxima Proctor modificado, y los obtenidos realmente en obra, en donde se especifica para los S-EST3 una densidad del 98 % como media, pudiendo descender dicho valor al 95 % en el fondo de capa. Por ello, los ensayos para la determinación del contenido de cemento necesario para alcanzar las resistencias especificadas deben realizarse sobre probetas fabricadas con la densidad exigida en obra.

Influencia del tipo de suelo empleado

Para alcanzar una cierta resistencia, las zahorras y arenas limpias y bien graduadas requieren un contenido de cemento sensiblemente menor que los suelos limosos y arcillosos. Los mejores resultados se obtienen en general cuantos menos finos contiene el suelo, puesto que entonces es menor la superficie del mismo y, por tanto, más resistente la matriz de pasta que rodea a las partículas de suelo. Por otra parte, cuanto más fino es el suelo, la humedad óptima suele ser mayor.

El fundamento de los tratamientos mixtos con cal y cemento que se emplean en ocasiones en el caso de suelos finos reside en estas consideraciones: la cal flocula las partículas arcillosas, formando unos gránulos con una superficie más reducida, lo que permite obtener luego un mejor partido de las propiedades aglomerantes del cemento.

Otro factor que influye en la resistencia es la granulometría del suelo. Cuanto mayor sea la compacidad del material, es decir la relación entre su volumen real y su volumen aparente, menor será el volumen de huecos a rellenar con la pasta de cemento. Por ello, las arenas monogranulares, como las de playa, requieren una gran cantidad de conglomerante, debido a la falta de compacidad de su esqueleto mineral.

Finalmente, hay que indicar la importancia de que en el material a tratar no haya sustancias tales como sulfatos (yesos), sulfuros (piritas) o materia orgánica que puedan perjudicar el fraguado del conglomerante.

Evolución de las resistencias con el tiempo

La curva de evolución depende del contenido de adiciones activas del cemento utilizado: cuanto mayor es éste, mayor es la relación entre las resistencias a 7, 90 ó 360 días. Empleando cementos con un 35 % de cenizas (CEM II) es usual en los suelos granulares tratados con cemento que la relación entre las resistencias a 7 y 90 días sea del orden del 60 %; valor que desciende al 50 % con un contenido de adiciones del orden del 50 % (CEM III, IV y V, así como los ESP VI). Para las arenas tratadas con cemento, en Francia se adopta como valor medio que la resistencia a 90 días es un 93 % de la alcanzada a 1 año.

En el caso de los suelos tratados con cemento se han encontrado correlaciones del tipo:

$$\sigma_{cd} = \sigma_{cd0} + K \cdot \log (d/d_0)$$

expresión en la que:

d	edad en días
d_0	edad de referencia en días
σ_c	resistencia a compresión a la edad especificada (MPa)
K	$\left. \begin{array}{l} 0,5 \cdot C \text{ (suelos granulares)} \\ 0,07 \cdot C \text{ (suelos cohesivos)} \end{array} \right\} \text{ siendo C el contenido de cemento (\%)}$

Influencia del curado acelerado

Como es sabido, la resistencia de un material tratado con cemento aumenta al ir progresando las reacciones de hidratación del conglomerante. A su vez, el ritmo de desarrollo de estas últimas se incrementa con la temperatura. De ello se deduce que la resistencia de estos materiales puede expresarse como una función del tiempo y la temperatura.

Esta influencia de la temperatura, bien conocida en los hormigones vibrados, es también muy importante en los materiales tratados con cemento. A título de ejemplo, en algunos suelos estabilizados con cemento se ha encontrado que la resistencia a compresión a 7 días se incrementaba entre un 2 y un 2,5 % por °C de aumento de temperatura, cuando ésta se encontraba en el entorno de los 25 °C.

Basándose en esta influencia de la madurez en la evolución de las resistencias se han puesto a punto algunos ensayos de curado acelerado mediante los cuales se trata de estimar la resistencia del material a una cierta edad a partir de ensayos a edades más reducidas.

En cualquier caso, dichos métodos sirven para estimar razonablemente, según los casos, la resistencia a 7, 28 ó 90 días, a partir de unas correlaciones que deben establecerse previamente en cada obra; pero no deben considerarse un sustituto de los métodos de control tradicionales. Su principal interés radica en la facilidad para detectar posibles anomalías en el desarrollo de resistencias, y poder así adoptar las medidas correctoras necesarias antes de que se haya construido una gran longitud de capa tratada o, incluso, de que esté ya finalizada.

Módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson

La determinación de las tensiones y deformaciones provocadas por las cargas de tráfico puede abordarse mediante distintos procedimientos, entre los cuales los más frecuentemente utilizados son los modelos multicapa y el método de elementos finitos, suponiendo que los materiales tienen un comportamiento elástico lineal. Los parámetros para caracterizarlos son el módulo de elasticidad E y el coeficiente de Poisson ν .

El módulo de elasticidad de una capa de un firme o explanada indica su capacidad de reparto de tensiones tanto en las capas por debajo de la misma, en caso de existir, como a la explanada. A igualdad de espesor, cuanto mayor es dicho módulo, las

deflexiones que se originan son más reducidas y uniformes, sin valores máximos acusados bajo los puntos de aplicación de las cargas.

Los materiales tratados con cemento tienen un comportamiento elástico marcadamente lineal, al menos hasta alcanzar un porcentaje importante de su tensión de rotura. En consecuencia, el módulo de elasticidad de los mismos puede considerarse prácticamente constante en el rango de tensiones dentro del cual suelen trabajar.

El módulo de elasticidad puede determinarse de dos formas:

- mediante ensayos estáticos, obteniendo la curva tensión–deformación del material. La Norma UNE-EN 13286-43 regula los métodos para evaluar el módulo en ensayos de compresión, tracción directa o tracción indirecta. En los tres casos, una probeta se somete a un esfuerzo creciente, y mediante dispositivos adecuados (bandas extensométricas, captadores inductivos, etc.) se van registrando las deformaciones que se producen en dos generatrices opuestas. El módulo de elasticidad se determina mediante la fórmula:

$$E = \frac{\Delta_{\sigma}}{\Delta_{\varepsilon}}$$

en donde Δ_{σ} y Δ_{ε} son respectivamente los incrementos de tensión y de deformación unitaria que se producen en dos puntos suficientemente alejados de la parte lineal de la curva tensión–deformación. Mediante este método se obtiene el denominado módulo de elasticidad estático

- el módulo de elasticidad también puede determinarse mediante ensayos dinámicos, sometiendo una probeta del material a ensayar a una serie de impulsos ultrasónicos y midiendo el tiempo que tardan en recorrer un espacio fijo situado entre el emisor que genera el tren de impulsos y un captador o receptor que los recoge. La medida del tiempo se realiza electrónicamente. La Norma UNE-EN 12504-4, en la cual se especifican los detalles de la determinación de la velocidad de propagación de los impulsos electrónicos en probetas de hormigón vibrado, puede ser de aplicación igualmente a materiales tratados con cemento. Mediante distintas fórmulas que dependen del tipo de onda aplicada puede estimarse el módulo de elasticidad dinámico en función de dicha velocidad, la densidad del material y su coeficiente de Poisson.

El principal interés de la determinación del módulo de elasticidad dinámico radica en que se trata de un ensayo no destructivo, sin los efectos de microfisuración asociados al ensayo estático que se producen al ir aumentando la carga de la probeta. Por ello, proporciona una información muy valiosa para estudiar, por ejemplo, los efectos de un ataque químico o bien de una serie de ciclos de congelación–deshielo. Por otra parte, se trata de un ensayo de realización relativamente fácil.

Debido al comportamiento eminentemente elástico de las mezclas con cemento (al menos hasta un 60–70 % de su carga final de rotura), no hay diferencias notables entre sus módulos de elasticidad estático y dinámico, si bien el cociente entre ambos es siempre menor que la unidad. Dichas diferencias suelen aumentar al crecer la resistencia del material.

En el caso de los suelos estabilizados con cemento, las correlaciones entre la resistencia mecánica y el módulo de elasticidad son lógicamente más dispersas que en los suelos cemento y gravas cemento, debido a las grandes diferencias que pueden existir entre los materiales de partida. Lo que si puede afirmarse, a igualdad de resistencia, es que cuanto mayor es el contenido de partículas arcillosas y menor el de elementos granulares, tanto más reducido es el módulo de elasticidad.

A efectos de cálculo se recomiendan los siguientes valores del módulo de elasticidad a un año:

S-EST1	200 MPa
S-EST2	300 MPa
S-EST3	2000 MPa

Otro parámetro que interviene en el cálculo analítico de firmes es el coeficiente de Poisson. Como es sabido, cuando se aplica una carga unidireccional a una probeta de un material elástico se produce una deformación longitudinal en la dirección de la carga y, al mismo tiempo, una deformación lateral de signo opuesto. El valor absoluto del cociente entre la deformación lateral unitaria y la deformación longitudinal unitaria se conoce como coeficiente de Poisson. Al igual que el módulo de elasticidad puede determinarse de forma estática o dinámica.

En los suelos estabilizados con cemento con un porcentaje apreciable de grava suele adoptarse para el coeficiente de Poisson un valor de 0,25. Con suelos más finos el valor del coeficiente aumenta: entre 0,25 y 0,30 con suelos limosos y entre 0,30 y 0,35 para arcillosos. No obstante, hay que indicar que la influencia del coeficiente de Poisson en el valor de las tensiones provocadas por las cargas es bastante reducida.

Comportamiento a fatiga

En las explanadas cuya capa superior está constituida por un suelo estabilizado S-EST3 no se producen en la misma tracciones por flexión, por lo que no son de esperar fenómenos de fatiga.

Propiedades térmicas

Las propiedades térmicas de los suelos estabilizados con cemento (coeficiente de dilatación, conductividad térmica, calor específico ...) no tienen en general un gran interés cuando se emplean en explanadas, puesto que las variaciones de temperatura que se producen en las mismas suelen ser poco importantes, debido al efecto amortiguador que ejercen en este sentido las capas del firme.

Cambios dimensionales

Retracción

En los suelos cohesivos, su mezcla con cemento disminuye su retracción, porque la matriz de cemento tiende a coartar el movimiento del suelo, si bien el cemento

no contrarresta en su totalidad la retracción originada por las pérdidas de humedad. Dicha disminución de la retracción es tanto más importante cuanto mayor es el contenido de cemento. Por el contrario, la incorporación de cemento a los suelos granulares no cohesivos que por sí tienen una retracción muy reducida o prácticamente nula se traduce en un ligero aumento de la misma, que no tiene ninguna importancia a efectos prácticos.

Hinchamiento

Habitualmente, en los materiales y suelos granulares no cohesivos no se producen cambios dimensionales apreciables por las variaciones en el contenido de humedad. En cambio, los suelos arcillosos con su contenido óptimo de humedad y compactados a su densidad máxima experimentan hinchamientos al aumentar el contenido de humedad mientras que por el contrario sufren una retracción al disminuir la misma. Si se compactan con contenidos de humedad superiores al óptimo, el hinchamiento es menor y la retracción es mayor; mientras que si la humedad de compactación es inferior a la óptima, el hinchamiento es mayor y la retracción es menor. La incorporación de cemento a este tipo de suelos reduce los cambios de volumen provocados por las variaciones de humedad a valores de un cuarto a un medio de los originales, porque la matriz de cemento tiende a coartar los movimientos del suelo. La disminución de los mismos aumenta al crecer el contenido de cemento.

La mezcla con cemento también reduce las dilataciones por efecto de las heladas en los suelos susceptibles a las mismas.

El artículo 512 del Pliego PG3 exige que el suelo a estabilizar no presente asiento en el ensayo de colapso realizado según la norma UNE 103406, ni hinchamiento en el ensayo de expansión en edómetro según la norma UNE 103601. De no ser así, se ha de comprobar que desaparecen en el suelo estabilizado en ensayos realizados a las veinticuatro horas (24 h) de su mezcla con el conglomerante. Si a esta edad siguiera presentando hinchamiento o colapso se repetirán los ensayos a los tres días (3 d) o a los siete días (7 d).

Las prescripciones francesas son menos exigentes a este respecto, admitiéndose que un suelo puede ser tratado si después de un ensayo de curado acelerado (7 días en agua a 40 °C), realizado según la norma UNE-EN 13286-49, el hinchamiento de una probeta conservada en estas condiciones no es superior al 5 %. Para valores mayores deben realizarse estudios especiales. Mediante dicho ensayo se evalúa no solamente el cambio de volumen del suelo en sí, sino también el provocado por eventuales hinchamientos ettringíticos. La interpretación de este ensayo puede ser completada mediante ensayos de tracción indirecta, debiendo obtenerse un valor igual a superior a 0,2 MPa.

3.5.4 Durabilidad

Comportamiento frente a heladas y ciclos de humedad-sequedad

El fraguado y primer endurecimiento de los materiales tratados con cemento pueden verse retrasados e incluso detenidos cuando los mismos tienen lugar en pe-

riodo de heladas, debido, entre otras causas, a la acción expansiva del agua intersticial, que impide la evolución normal de estos procesos. En algunos casos, la formación de hielo puede dar lugar a una descompactación del material. No obstante, salvo en estas circunstancias, el proceso de fraguado se continua desarrollando normalmente una vez que la temperatura alcanza valores normales.

Debido a estos problemas potenciales, en épocas frías lo mejor es suspender la puesta en obra cuando se prevean bajas temperaturas, siendo lo más deseable que la temperatura de la superficie de la capa tratada no baje de 2 °C durante las primeras 72 horas. En caso de que, por la programación de las obras, sea necesario continuar las mismas, habrá que adoptar las precauciones usuales (calentamiento del agua, protección de las superficies ejecutadas, etc.). Al contrario que lo que es recomendable durante el resto del año, es conveniente utilizar en estos casos cementos con el mayor contenido posible de clinker.

Comportamiento frente a ambientes agresivos

En los terrenos y aguas subterráneas con yeso u otros sulfatos (de sodio, magnesio o potasio) puede producirse un ataque de los mismos a las mezclas con cemento. Dicho ataque puede ser de varias formas, pero el más peligroso se produce al reaccionar los sulfatos con el aluminato tricálcico que se forma durante la hidratación del cemento, lo que da lugar a cristales de sulfoaluminato tricálcico hidratado, también conocido como ettringita. Esta reacción es muy expansiva y puede llevar a la desintegración de la capa tratada con cemento. La rapidez y la importancia de estos ataques aumentan a medida que se incrementan tanto la concentración de los sulfatos en las aguas subterráneas o en el propio suelo como la temperatura.

Los efectos de los ataques de los sulfatos, que son tanto menores cuanto más compacta e impermeable es la mezcla, pueden también reducirse empleando cementos SR resistentes a los sulfatos, los cuales deben cumplir con las especificaciones de la norma UNE 80303 “Cementos resistentes a los sulfatos y al agua de mar”. En dichos cementos se limitan tanto el contenido de aluminato tricálcico C_3A como la suma de aluminato tricálcico C_3A y de ferritoaluminato tetracálcico C_4AF . El C_3A debe ser inferior a un valor que, según el tipo de cemento, varía entre el 5 y el 8 %; mientras que la suma de C_3A y C_4AF no debe superar el 22 % en los cementos tipo I, y el 25 % en los restantes casos. Se imponen asimismo algunas condiciones a los materiales puzolánicos que formen parte de los mismos. Los cementos de horno alto CEM III/B, caracterizados por tener un contenido de escorias de horno alto entre el 65 y el 80 % son siempre resistentes a los sulfatos.

A este respecto, en el artículo 512 del PG-3 se prescribe que si el contenido de sulfatos solubles (SO_3) en el suelo que se vaya a estabilizar, determinado según la norma UNE 103201, fuera superior al 0,5 % en masa, deberá emplearse un cemento resistente a los sulfatos y aislar adecuadamente la capa de suelo estabilizado de las obras de paso de hormigón. Por otra parte, dicho contenido de sulfatos solubles deberá ser inferior al 1 % en masa.

No obstante, en algunas ocasiones el conjunto de suelo con alto contenido de sulfatos - cemento sulforresistente puede dar lugar a ettringita o thaumasita. En ambos

casos, el daño que se produce es enorme y la solución normalmente muy costosa, por lo que se requiere un estudio especial cuando la presencia de sulfatos solubles es superior al 1 % en peso en el suelo.

 *Habida cuenta de que el empleo de suelos con alto contenido de sulfatos suele dar lugar a grandes y costosos fracasos en las obras, no hay muchas referencias disponibles sobre este tema.*

MÉTODOS DE DOSIFICACIÓN

4

Es fundamental, para optimizar el tratamiento de cualquier material, establecer previamente la fórmula de trabajo con el conglomerante elegido. Dicha fórmula depende del tipo de suelo, del material que se quiere conseguir después de la estabilización y de las especificaciones que se deban cumplir en cada situación.

4. 1 Tratamientos con cal

En el caso de los tratamientos con cal, sus aplicaciones son muy variadas, por lo que no hay una metodología única para su dosificación. Siempre hay que tener en cuenta los siguientes principios o conceptos:

- en primer lugar, el porcentaje necesario de cal dependerá de cuáles son los objetivos: secado, modificación o estabilización. En determinados casos se buscarán varios de estos objetivos a la vez y, por lo tanto, habrá que diseñar la fórmula de trabajo que logre alcanzarlos. Dicho porcentaje siempre debe especificarse sobre masa de suelo seco.
- en segundo lugar, el porcentaje mínimo de cal dependerá de las exigencias para la capa tratada: terraplenes y desmontes, formación de explanadas, etc.

4.1.1 Preparación de las probetas y ensayos

Es fundamental especificar desde un principio si la cal empleada es viva o apagada. Si bien es indistinto emplear una u otra, es conveniente, por su mayor estabilidad, el empleo de cal apagada, pues es más sencilla de manipular y almacenar en los laboratorios. El hecho de emplear uno u otro tipo de cal no implica que luego, en obra, deba emplearse la misma.

La mezcla del suelo con la cal para fabricar las probetas ha de realizarse primero en seco, hasta lograr un material de aspecto homogéneo, para, a continuación, añadir la humedad necesaria y volver a amasarlos.

Una vez mezclados así el suelo y la cal, debe dejarse transcurrir un periodo mínimo de una hora para que la cal actúe adecuadamente sobre el suelo y puedan evaluarse realmente sus efectos. En caso de emplear cal viva, es necesario asegurarse de que ésta ha quedado apagada una vez que se ha mezclado con el suelo. El tiempo de reposo del material debe ser algo mayor que cuando se emplea cal apagada.

Posteriormente, se prepararán las probetas necesarias para los ensayos a realizar conforme a las especificaciones marcadas por la normativa vigente para la realización de los mismos.

En el caso de la determinación de parámetros resistentes, es importante realizar una adecuada densificación de las probetas, pues pequeñas variaciones en la densidad pueden tener una gran influencia.

Los resultados obtenidos dependen de las reacciones químicas entre el ión calcio de la cal y los compuestos químicos contenidos en las partículas arcillosas del suelo ya descritas en este Manual. El desarrollo de dichas reacciones varía con el porcentaje de cal, la temperatura, el tiempo transcurrido y las condiciones de humedad durante el mismo. Por ello, en las normas se definen las condiciones para preparar las probetas y realizar los ensayos. Para garantizar las mismas, es fundamental recubrir con plástico fuerte o doble las probetas una vez fabricadas, y conservarlas en lugares con humedades y temperaturas controladas.

4.1.2 Porcentaje mínimo de cal

El porcentaje mínimo de cal será aquel que permita cumplir al suelo tratado con cal las exigencias necesarias para poder ser empleado en la capa de que se trate. Por lo tanto, este porcentaje será función del tipo de capa que se esté diseñando y de los objetivos que, de forma conjunta o separada, se estén buscando en cada caso.

Secado de suelos excesivamente húmedos

En este caso, el porcentaje necesario de cal viva será aquel que logre reducir la humedad del suelo hasta valores cercanos a la óptima de compactación.

Como ya se ha dicho, este efecto depende de los factores ambientales de la obra que, además, pueden ser muy variables de unos días a otros, lo cual, exige un control y reajuste diario directo in situ.

Dado que las condiciones de soleamiento, humedad ambiente y viento son muy diferentes en obra que en laboratorio, una vez fijado un porcentaje de cal a emplear es necesario comprobar que esta dotación es suficiente para el objetivo previsto. La evaluación de la humedad final conseguida después de la mezcla del suelo con la cal debe realizarse mediante secado en estufa, ya que se ha observado que el gammaden-símetro nuclear proporciona en algunos casos resultados sin la precisión requerida.

Porcentajes por debajo del 1 % no suelen ser efectivos, ya que existe el riesgo de posibles deficiencias tanto en el extendido como en la envuelta.

Modificación de suelos para capas de cimiento de firme

En este caso, el porcentaje a aplicar de cal viva o apagada será el necesario para modificar las características geotécnicas de los suelos hasta los valores exigidos para la capa de que se trate: fondos de desmonte, cimiento, núcleo y espaldones de terraplenes, etc.

Para ello, se analizarán muestras del suelo con distintos porcentajes de cal, a fin de determinar la dotación que permita alcanzar los valores exigidos en cuanto a CBR, índice de plasticidad, hinchamiento, etc.

Estabilización de suelos para capas de coronación

Como en el caso anterior, el porcentaje necesario de cal viva o apagada vendrá dado por las exigencias del tipo de suelo estabilizado a conseguir. En este sentido, en el artículo 512 “Suelos estabilizados in situ” del PG-3 se definen dos tipos de suelos estabilizados in situ con cal, en función de su índice CBR (Tabla 4.1).

Tabla 4.1 – Tipos de suelos estabilizados con cal (PG-3)

Tipo de suelo estabilizado	S-EST1	S-EST2
Porcentaje mínimo de cal	2 %	3 %
Índice CBR a 7 días	≥ 6	≥ 12

Se fija un porcentaje mínimo del 2 ó el 3 %, según el tipo de suelo, con objeto de garantizar una cierta homogeneidad del contenido de cal en todos los puntos de la capa tras el mezclado.

A partir de este valor mínimo, la dotación de cal necesaria será aquella que permita obtener una capacidad de soporte del suelo que viene fijada por el valor del índice CBR a 7 días, según la norma UNE- EN 13286-47, indicados en la Tabla 4.1.

Con frecuencia, con estos porcentajes mínimos suelen cumplirse de forma casi inmediata los requisitos del PG-3. Por otra parte, los valores obtenidos a 7 días son todavía mayores. Debido a ello, cuando sea necesario tomar una decisión rápida puede ser aconsejable realizar el ensayo a 1 día, y posteriormente contrastarlo con el ensayo habitual a 7 días.

 *No es inusual que las dotaciones mínimas de cal especificadas permitan cumplir los requisitos en cuanto a capacidad de soporte casi inmediatamente. En estos casos puede ser de utilidad realizar ensayos a 1 día, para poder adoptar decisiones rápidas en obra en caso necesario.*

Como ya se ha dicho, en muchas ocasiones se necesitarán cumplir varios objetivos simultáneamente. En estos casos, deberá emplearse el porcentaje de cal, viva o apagada, que permita conseguir todos los valores requeridos.

4.1.3 Porcentaje óptimo de cal

Frente a estas dotaciones mínimas, el diseño de un tratamiento con el porcentaje óptimo de cal puede aplicarse a cualquiera de los casos anteriores y a otros no contemplados hasta ahora, partiendo de la idea de que este porcentaje es el que permite aprovechar al máximo los efectos de la cal sobre el suelo a tratar, con un sobrecoste mínimo con respecto a los anteriores planteamientos. El incremento del porcentaje de cal necesario no es comparable con el resto de costes implicados.

De esta forma, se logrará un material con unas propiedades geotécnicas y resistentes adecuadas, que no sólo cumpla las especificaciones necesarias sino que, además, tenga unas prestaciones y durabilidad aún mejores.

a) Secado

El efecto de secado depende de la cal empleada y de las condiciones de la obra. El método a seguir, por tanto, ha de ser empírico, es decir, se deberán realizar tramos de prueba con distintos porcentajes de cal viva (de 1,0 al 3,0 %) para comprobar, dos o tres horas más tarde, con cual de ellos se obtiene la humedad óptima.

Como dato inicial puede tomarse el criterio ya comentado de que un 1 % de cal en peso reduce la humedad del material entre un 3 % y un 5 %, aunque en ocasiones se han llegado a conseguir reducciones superiores.

Además, al mezclar el suelo con la cal, se produce también una modificación inmediata, de tal forma que la nueva curva Proctor se desplaza ligeramente hacia abajo y hacia la derecha, aumentando por lo tanto la humedad óptima de compactación. Como consecuencia, esta humedad estará más próxima a la del suelo que se pretende secar.

El diseño y control de la ejecución de esta aplicación ha de estar basado en el día a día y llevarse a cabo a pie de obra, pues depende, fundamentalmente, de las condiciones climatológicas del lugar, que pueden ser muy variables y difíciles de predecir.

Con temperaturas muy bajas, el agua del suelo puede encontrarse en estado sólido, es decir, en forma de hielo. En este caso, la dotación de cal viva ha de ser la necesaria para fundirlo, por efecto de la reacción exotérmica de hidratación, y reducir, además, la humedad hasta los valores prescritos.

b) Modificación

En este caso, el porcentaje óptimo de cal será aquel que logre sobre el suelo de partida, de forma conjunta:

- reducir, e incluso anular, su índice de plasticidad
- disminuir, e incluso anular, su hinchamiento potencial. A este respecto, son

más aconsejables, por el tipo de suelos en que se suele realizar este tratamiento, los datos basados en el ensayo de hinchamiento libre

- e incrementar de forma apreciable el índice CBR del suelo, o cualquier otro que evalúe su capacidad de soporte.

La forma de evaluar estos tres parámetros consiste en elaborar gráficas con la evolución de los mismos para distintos porcentajes de cal, siendo el óptimo aquel a partir del cual dejan de apreciarse de forma notable los efectos de la misma.

La evolución de estos parámetros también es importante para poder detectar el riesgo de sobredosificación. El hecho de que a partir de un determinado porcentaje de cal no sólo no se produjera una mejora clara sino que, por el contrario, se observase un empeoramiento de alguno de ellos, alertaría de dicha posibilidad. En este caso, parte de la cal no encuentra una fracción arcillosa con la que reaccionar y, por su propia constitución, perjudica al material resultante, obteniéndose peores resultados en la caracterización.

4.2 Tratamientos con cemento

4.2.1 Introducción

La dosificación de un suelo estabilizado con cemento para una explanada tiene como objetivo obtener la combinación óptima de cemento, suelo, agua, y en su caso, aditivos, que cumpla las especificaciones técnicas fijadas sobre sus características en estado fresco y endurecido. La dosificación debe tener en cuenta además las condiciones de ejecución, especialmente la trabajabilidad, la calidad pretendida y la economía de la obra.

Propiedades de la mezcla

Las propiedades fundamentales que se buscan en los suelos estabilizados con cemento son:

- una capacidad de soporte adecuada, evaluada a través del índice CBR, en el caso de los suelos estabilizados S-EST1 y S-EST2
- una resistencia mecánica correcta, en el caso de los suelos estabilizados S-EST3
- en todos los casos, una durabilidad suficiente: estabilidad química y volumétrica, y resistencia a la meteorización.

Estas propiedades se deben mantener para pequeñas variaciones de los componentes. Además, la mezcla debe ser trabajable durante un tiempo suficiente y fácilmente compactable. Junto a estas características se pueden perseguir otras, como la de permitir una circulación inmediata, que dependerán de las condiciones propias de la obra.

Datos de partida

La dosificación de un suelo estabilizado con cemento tiene como base de partida:

- el conocimiento de los materiales disponibles: suelos, cementos, agua y, en su caso, aditivos.
- las especificaciones de los Pliegos de Prescripciones Técnicas, en las que se definen las características que debe cumplir el material tanto en estado fresco como endurecido.

Fases de la dosificación

La dosificación de los suelos estabilizados con cemento comprende varias fases:

- definición y caracterización de los materiales que componen el suelo estabilizado con cemento
- determinación en laboratorio de la fórmula de trabajo con las proporciones de los distintos materiales
- comprobación y ajuste de la fórmula de trabajo en obra.

4.2.2 Determinaciones previas

Previamente a la dosificación, se debe comprobar que los materiales que se van a utilizar cumplen las especificaciones de los Pliegos de Prescripciones Técnicas aplicables a la obra. Las características que en general deben cumplir los materiales de partida vienen recogidas en el capítulo 2.

En lo que se refiere al cemento, y salvo que éste se encuentre en posesión de un Sello o Marca de Calidad oficialmente reconocidos, se deben realizar los ensayos dispuestos en la vigente Instrucción para la recepción de cementos o normativa que la sustituya.

4.2.3 Dosificación

El procedimiento de dosificación consta de las siguientes fases:

- determinación del contenido óptimo de agua
- dosificación del conglomerante
- dosificación del retardador de fraguado, en su caso

Determinación del contenido óptimo de agua

En los suelos estabilizados con cemento el agua tiene dos misiones fundamentales:

- hidratar el cemento
- facilitar la compactación de la mezcla.

Para la primera de ellas se necesita únicamente una pequeña cantidad de agua, del orden del 2 %, por lo que la humedad de la mezcla viene siempre determinada por la necesaria para la compactación. El objetivo de esta fase de la dosificación es, por tanto, hallar el contenido óptimo de agua para la compactación de una mezcla cuya dotación de cemento se ha estimado aproximadamente para que se obtenga con la misma el índice CBR o la resistencia especificada. Como porcentaje de cemento de partida, en el caso de exigirse únicamente un determinado CBR (S-EST1 y S-EST2), se adoptará el valor mínimo del 2 – 3 % indicado en el PG-3; mientras que a efectos de conseguir resistencias mecánicas (S-EST3) se pueden adoptar los indicados en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 - Porcentajes de cemento recomendados para predosificaciones de suelos estabilizados S-EST3

Material	% Cemento inicial
Zahorras y suelos granulares	3 ⁽¹⁾
Suelos con finos cohesivos	5

⁽¹⁾ Mínimo admitido en el Pliego PG-3

Como el contenido final de cemento, definido por los ensayos de CBR o de resistencia, será probablemente distinto al estimado en la determinación inicial del contenido óptimo de agua, habría que realizar un nuevo ensayo de compactación al final del proceso y una comprobación del índice CBR o de la resistencia. Hay que mencionar a este respecto que, a igualdad del resto de factores, una variación en algún punto porcentual del contenido de cemento tiene una influencia muy limitada en el valor de la humedad óptima. En consecuencia, no se considera necesario en general repetir posteriormente el ensayo de compactación.

El ensayo de referencia para determinar la humedad óptima es el Proctor modificado según la UNE-EN 13286-2 (fig. 4.1).

Es importante volver a determinar el contenido de humedad de las muestras después de la compactación (norma NLT-102), ya que la humedad de la probeta (humedad retenida) puede diferir de la humedad inicial (humedad añadida). Ello es debido a que durante la compactación puede ser expulsada parte del agua (fig. 4. 2).

Aunque el ensayo Proctor modificado es el que se emplea como referencia, se admite también la compactación con martillo vibrante (UNE-EN 13286-4). El ensayo se realiza en 3 tongadas y con un tiempo por cada capa que se determina por calibración con el Proctor modificado, a fin de obtener una densidad máxima aproximadamente igual en ambos ensayos.

☞ *El coeficiente de calibración entre la compactación con maza Proctor y con martillo vibrante varía con el tipo de material, por lo que no es válido adoptar el obtenido en obras anteriores, a menos que los materiales utilizados sean muy similares.*



Figura 4.1 Compactación Proctor modificado

Este método presenta ventajas frente al de la maza Proctor, tales como un fácil traslado, lo que es muy importante para su utilización en obra, una realización más sencilla y una mayor rapidez de ejecución. Su principal inconveniente es la variabilidad de sus resultados si la presión que es necesario ejercer sobre las tongadas al compactar el material se confía exclusivamente al operario. Este problema se resuelve no obstante con la utilización de una sobrecarga adecuada acoplada al martillo, montándose el conjunto sobre un bastidor provisto de guías para poder aplicarlo sobre la masa a compactar (fig 4.3).

☞ *El ensayo Proctor modificado es, actualmente, el procedimiento más aceptado y que se toma como referencia en los suelos estabilizados con cemento, si bien en el control de obra suele sustituirse por el martillo vibrante debido a su comodidad de utilización.*

Generalmente el porcentaje de agua de compactación que se fija en la fórmula de trabajo es el que corresponde a la humedad óptima retenida en el ensayo Proctor modificado. No obstante, algunos técnicos prefieren reducir ligeramente (en general medio punto) el contenido de agua respecto a dicho óptimo teniendo en cuenta dos consideraciones:

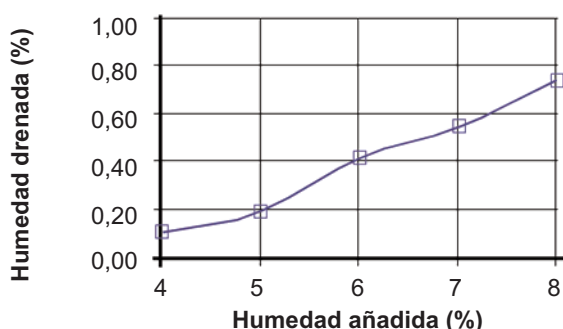


Figura 4.2 Humedad expulsada durante el proceso de compactación Proctor Modificado de un suelo estabilizado con cemento

- las resistencias máximas se suelen obtener para contenidos de humedad entre medio punto y un punto porcentual (-0,5 % y -1 %) inferiores al del óptimo Proctor modificado
- si se selecciona el contenido óptimo, las tolerancias de los Pliegos de Prescripciones pueden llevar a que se fabriquen materiales con contenidos de agua en el lado húmedo de la curva Proctor, lo que puede producir caídas de resistencia.

Por otro lado, se debe tener en cuenta que la fabricación de suelos estabilizados con cemento en el lado seco, siguiendo el criterio señalado, va en perjuicio de la trabajabilidad del material, por lo

que lo más adecuado es que la decisión final sobre el contenido de agua se base en un estudio de la sensibilidad al mismo, no sólo de la densidad y resistencia, sino también de la trabajabilidad y en los resultados obtenidos en el tramo de ensayo. En caso de que se utilicen retardadores de fraguado, generalmente se puede fijar un contenido de agua ligeramente por debajo del óptimo sin problemas de trabajabilidad.

Dosificación del conglomerante

Una vez definida la humedad óptima de compactación, la dosificación del conglomerante se obtiene por medio de ensayos de CBR o de resistencia a compresión.

Esta fase tiene a su vez varias etapas:

- fabricación y curado de las probetas
- realización de los ensayos de determinación del índice CBR (suelos estabilizados S-EST1 ó S-EST2) o de resistencia a compresión (S-EST3) a la edad especificada
- primer tanteo del contenido de conglomerante
- comprobación de la sensibilidad de la dosificación
- ajuste final del contenido de conglomerante.

a) Fabricación y curado de las probetas

El índice CBR o la resistencia a compresión, dependiendo del tipo de suelo estabilizado, se deben determinar sobre series de probetas (tres como mínimo por cada dotación de cemento elegida) fabricadas y compactadas en laboratorio con el contenido óptimo de agua de compactación y la densidad mínima exigida en obra. Para la fabricación de probetas con una densidad seca previamente establecida se puede utilizar el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 13286-51, o bien estimar mediante tanteos la energía (en número de golpes por capa) que se debe aplicar en el ensayo Proctor modificado para obtener la densidad requerida.

☞ *Es muy importante que en los ensayos de laboratorio las muestras se compacten con la misma densidad exigida en obra.*

El curado de las probetas se lleva a cabo preferentemente en cámara húmeda o, si no fuera posible, mediante otros procedimientos tales como su introducción en bolsas de



Figura 4.3 Martillo vibrante montado en soporte

plástico selladas. Si se realizan en cámara húmeda se suelen introducir las probetas el primer día con el molde de fabricación, y después de 24 h (o más tarde si no han adquirido resistencia) se retiran del molde prosiguiendo el curado hasta la fecha fijada.

b) Realización de los ensayos de obtención del índice CBR o de la resistencia a compresión a la edad especificada

b.1 Índice CBR (suelos estabilizados S-EST1 y S-EST2)

Como ya se ha mencionado, con los suelos estabilizados S-EST1 y S-EST2 no se persigue en principio la obtención de una determinada resistencia mecánica, sino únicamente una mejora de la capacidad de soporte. Ésta se evalúa mediante el ensayo CBR (norma UNE-EN 13286-47), en el que el suelo se somete a la penetración de un vástago cilíndrico a una velocidad constante.

Se recomienda una sobrecarga de unos 20 kg para llevar a cabo el ensayo.

El Pliego PG-3 prescribe que los ensayos se realicen a 7 días sobre probetas compactadas con la densidad especificada en la fórmula de trabajo.

b.2 Resistencia mecánica (suelos estabilizados S-EST3)

Antes de ser ensayadas a compresión, las probetas deberán refrentarse por las dos caras siguiendo el procedimiento indicado en la norma UNE 12390-3.

El ensayo prescrito en las especificaciones técnicas es el ensayo de compresión simple (norma UNE-EN 13286-41).

Los valores de resistencia a compresión exigidos en el Pliego PG-3 están referidos a probetas tipo CBR sin disco espaciador (152,4 mm de diámetro interior y 177,8 mm de altura).

La resistencia mínima a 7 días en los suelos estabilizados con cemento S-EST3 es igual a 1,5 MPa (artículo 512 del PG-3).

c) Selección del contenido de cemento

c.1 Suelos estabilizados S-EST1 y S-EST2

Una vez realizados los ensayos de CBR a la edad especificada, se representan en un gráfico los valores del mismo en función del contenido de cemento. Se elegirá este último teniendo en cuenta que:

- debe superar un porcentaje mínimo del 2 %, para garantizar un reparto adecuado del cemento en la masa de la mezcla
- debe permitir obtener el valor del índice CBR especificado, con la densidad de referencia exigida realmente en obra (95% de la máxima PM para los S-EST1 y 97 % para los S-EST2)

- para tener en cuenta las dispersiones de los equipos de obra se recomienda incrementar en medio punto porcentual el valor obtenido en laboratorio.

c.2 Suelos estabilizados S-EST3

Una vez realizados los ensayos de rotura a la edad especificada, se representan en un gráfico los valores de las resistencias en función del contenido de cemento (fig. 4.4). Se elegirá un contenido de cemento teniendo en cuenta que:

- debe superar un valor mínimo del 3 % en masa del suelo seco, para garantizar una adecuada durabilidad del producto
- ha de permitir obtener la resistencia mínima especificada en los Pliegos, con la densidad de referencia exigida realmente en obra (98 % de la máxima PM).

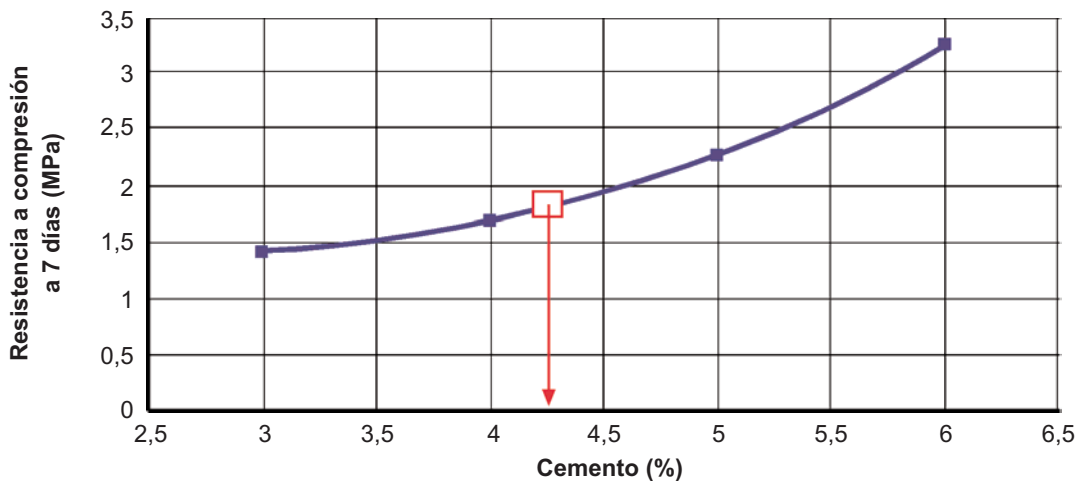


Figura 4.4 Determinación del contenido de cemento para un suelo estabilizado S-EST3 (resistencia a compresión a 7 días > 1,5 MPa). Se ha escogido el porcentaje de cemento que proporciona una resistencia un 20 % superior a la mínima especificada

👉 Es recomendable escoger un contenido de cemento que proporcione una resistencia algo superior a la mínima especificada (entre un 15 y un 20 %) para tener en cuenta las caídas de resistencia que se pudieran dar en obra a causa de las tolerancias: menor contenido de cemento, mayor humedad de compactación, etc. Este factor corrector se puede ajustar posteriormente a la vista de la sensibilidad del material frente a los cambios en la dosificación.

d) Sensibilidad de la dosificación

Una vez fijado el contenido de cemento, se debe analizar la sensibilidad de la mezcla frente a pequeñas variaciones en los siguientes parámetros:

- la densidad de compactación: con la dosificación elegida se varía la energía de compactación para obtener probetas compactadas entre 3 puntos porcentuales

por debajo y 2 puntos porcentuales por encima de la densidad especificada (por ejemplo, en un S-EST3, entre el 95 y el 100 % de la densidad máxima Proctor modificado). Posteriormente, se halla el índice CBR o la resistencia a rotura, según sea el caso, y se representa en un gráfico la variación del parámetro especificado con respecto a la densidad (fig. 4.5).

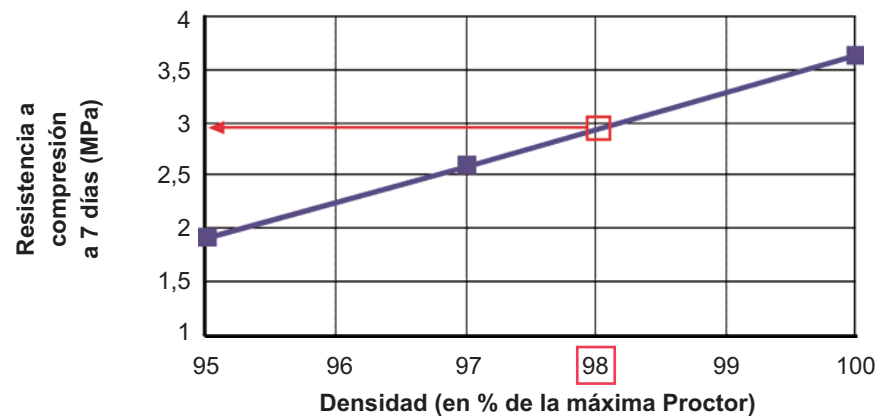


Figura 4.5 Variación de la resistencia a compresión con la densidad de compactación para un suelo estabilizado (5,7% de cemento y humedad óptima PM). Se comprueba que con la densidad mínima de obra se alcanza la resistencia mínima especificada.

- la humedad de compactación: se varía la humedad de compactación con respecto a la óptima PM (-1% a +0,5 %) (fig. 4.6).

Se comprueba que con ligeras variaciones de la humedad se sigue superando la resistencia mínima especificada.

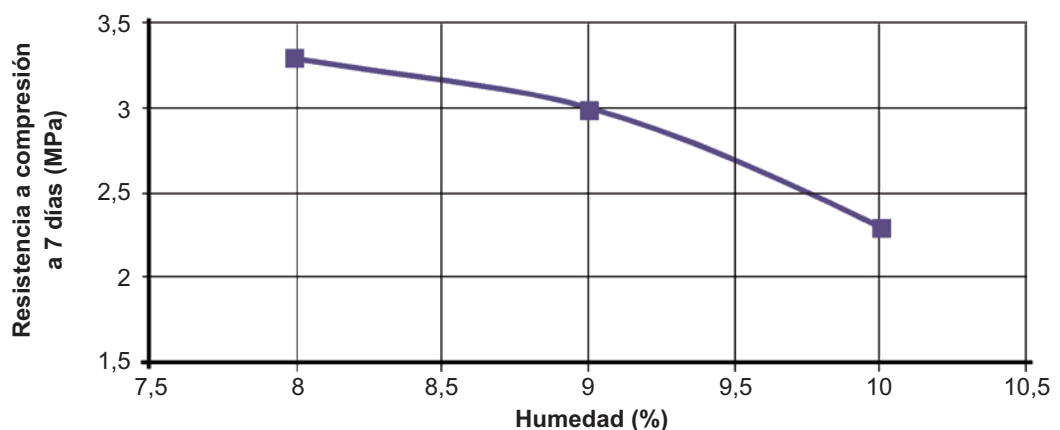


Figura 4.6 Variación de la resistencia a compresión con la humedad de compactación para un suelo estabilizado (5,7 % de cemento y densidad PM)

Determinación del plazo de trabajabilidad

El plazo de trabajabilidad de un suelo estabilizado con cemento se define como el tiempo transcurrido a partir de la finalización del proceso de mezclado del material, con las temperaturas que van a prevalecer en obra, durante el cual el fraguado producido es muy escaso, de tal manera que es posible efectuar la compactación del material sin merma apreciable de sus propiedades mecánicas finales.

El método más sencillo para su determinación es el ensayo de compactación diferida (norma UNE-EN 13286-45). Básicamente, consiste en confeccionar varias probetas con la dosificación elegida, según el procedimiento de compactación referido y determinar sus densidades a edades crecientes a partir del momento de la mezcla de los componentes. Se considera que el plazo de trabajabilidad viene dado por el tiempo transcurrido desde la mezcla de los componentes hasta que se produce una caída de dos puntos porcentuales (2 %) con relación a la densidad máxima obtenida tras fabricar el material. El ensayo se puede hacer a varias temperaturas y se debe indicar siempre, junto con el resultado de plazo de trabajabilidad, la temperatura de conservación de los componentes, previamente al ensayo, y la de realización del ensayo (fig. 4.7).

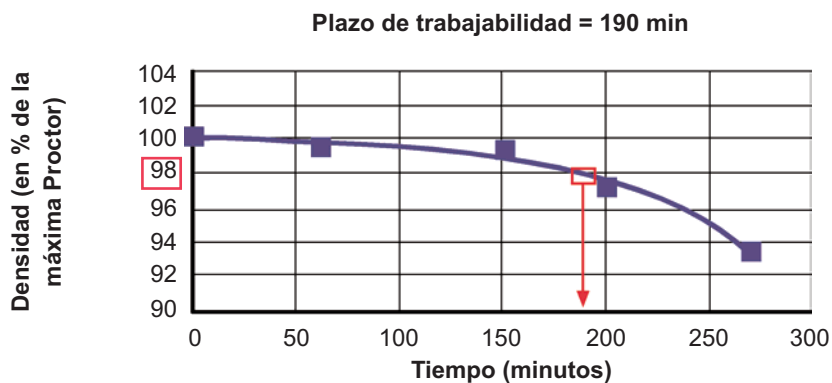


Figura 4.7 Determinación del plazo de trabajabilidad de una mezcla con cemento mediante el ensayo de compactación diferida a una temperatura de 30 °C

✎ *Es importante preparar la muestra en laboratorio especificando una temperatura de conservación de la mezcla igual a la temperatura media del aire en las horas más calurosas del día, normalmente entre las 12 y las 15 horas, estimada para el emplazamiento de la obra en la época de la construcción.*

Existe otro procedimiento de ensayo, también incluido en la norma UNE-EN 13286-45, basado en la medición del tiempo de paso de ultrasonidos a través de una probeta recién compactada. A medida que se van desarrollando las reacciones de hidratación del conglomerante y el material va endureciendo, disminuye dicho tiempo de paso. Se considera que se ha alcanzado el final del plazo de trabajabilidad cuando el tiempo de paso disminuye en un 60 % con respecto al inicial.

Los plazos de trabajabilidad indicados en la Tabla 4.3 se consideran recomendables para una correcta compactación y densificación del material. Para obtener estos plazos puede ser necesaria la utilización de retardadores de fraguado.

Tabla 4.3. Plazos de trabajabilidad recomendados para una correcta puesta en obra de suelos estabilizados con cemento

Tipo de obra	Plazo mínimo (min.)
Ancho completo	120
Por franjas	180

Se debe comprobar que se cumplen estos valores incluso con el contenido de humedad óptima menos la tolerancia ($h_{opt}-1\%$). Es recomendable, no obstante disponer de tiempos de trabajabilidad superiores al mínimo absoluto.

Otras comprobaciones: colapso e hinchamiento

En el Pliego PG-3 se prescribe que el suelo estabilizado no presente asiento en el ensayo de colapso realizado según la norma UNE 103406, ni hinchamiento en el ensayo de expansión según la UNE 103601. Si el suelo que se vaya a estabilizar presentara hinchamiento o colapso en los ensayos mencionados, se comprobará que éste desaparece en el suelo estabilizado en ensayos realizados a las veinticuatro horas de su mezcla con el conglomerante. Si a esta edad siguiera presentando hinchamiento o colapso se repetirán los ensayos a los tres días o a los siete días.

Como ya se ha mencionado, la exigencia de que el suelo no presente ningún hinchamiento puede ser excesivamente restrictiva. Las prescripciones francesas permiten un hinchamiento hasta del 5 % tras someter a las probetas de suelo estabilizado a un ensayo de curado acelerado (norma UNE EN 13286-49).

Ajuste final de la dosificación

Finalmente la dosificación se debe ajustar de forma que:

- para la densidad de referencia exigida en obra, se obtenga, según el caso, el índice CBR o la resistencia mínima a compresión prescrita para la mezcla. De no ser así, habría que aumentar o disminuir el contenido de cemento
- para pequeñas variaciones en el contenido de humedad (-1% ; $+0,5\%$), el índice CBR o la resistencia del material no sea inferior al valor prescrito y el plazo de trabajabilidad sea superior al mínimo especificado.

En el caso de los suelos estabilizados S-EST3, una vez ajustados los contenidos finales de agua y de cemento es conveniente llevar a cabo ensayos de resistencia a medio o largo plazo (28 ó 90 días) para comprobar que no se produce una evolución anómala de resistencias. Esto resulta imprescindible cuando se utilicen retardadores de fraguado, ya que pueden afectar a la evolución de la resistencia del material a largo plazo.

Fórmula de trabajo

Una vez realizados en laboratorio los ensayos anteriores se define la fórmula de trabajo, la cual debe incluir los siguientes aspectos:

- la dosificación mínima de conglomerante, indicando su tipo y clase resistente referida a la masa total de suelo seco y, en su caso, por metro cuadrado (m²) de superficie
- el contenido de humedad, según la Norma UNE 103300, del suelo inmediatamente antes de su mezcla con el cemento, y el de la mezcla en el momento de su compactación
- la compacidad a obtener, mediante el valor mínimo de la densidad
- en su caso, el contenido de retardador de fraguado.

Es deseable, por otro lado, que el responsable técnico de la obra disponga del estudio de laboratorio o, al menos, de la siguiente información:

- origen de los materiales ensayados
- características de los materiales
- el índice CBR a siete días o la resistencia a compresión simple a la misma edad, según el tipo de suelo estabilizado
- el plazo de trabajabilidad
- las curvas de la dosificación en laboratorio (Proctor modificado e índice CBR o resistencia a compresión, dependiendo del tipo de suelo estabilizado).

Ajuste de la fórmula de trabajo en obra

Los equipos que lleven a cabo la incorporación del conglomerante y del agua y la mezcla de éstos con el suelo se deben calibrar para comprobar que el material fabricado con los mismos permite obtener el índice CBR o la resistencia especificada y, en su caso, realizar los ajustes necesarios.

Aunque pueda pensarse que con la fórmula de laboratorio las densidades y las resistencias de la mezcla en obra deberían ser iguales, en la práctica se pueden dar diferencias por distintas causas:

- diferentes capacidades de amasado entre los equipos de mezclado en laboratorio y los de obra
- degradaciones del suelo (formación de finos) durante los procesos de disgregación y mezcla
- variaciones importantes en la granulometría del suelo disgregado (mayor contenido de gruesos) respecto a la utilizada en laboratorio.

- distintos tiempos para la absorción de agua por el suelo.

Esta verificación se debe considerar como la segunda fase del proceso de dosificación. Si una vez realizados los ajustes se producen variaciones importantes en las resistencias de obra frente a las de laboratorio se deben analizar los motivos.

4.2.4 Dosificación basada en la durabilidad

Algunos países (fundamentalmente en algunos estados americanos del norte) con inviernos muy fríos recurren a criterios de durabilidad para la dosificación de suelos estabilizados con cemento en lugar de utilizar criterios de resistencia mecánica. Este método se basa en la realización de ensayos de congelación/deshielo y de humedad/sequedad (NLT-302 y NLT-303) en los que se evalúa la pérdida de peso que experimenta una serie de probetas, previamente saturadas de agua, con una edad inicial de 7 días, tras haber sido sometidas a alguno de dichos ensayos y ser cepilladas al final del mismo.

En España se utilizaron estos procedimientos en las primeras obras con sueloce-mento pero se abandonaron por varias razones:

- se han obtenido mezclas de adecuada durabilidad con las especificaciones sobre resistencias de suelos estabilizados con cemento establecidas en la normativa (resistencia a compresión a 7 días no inferior a 1,5 MPa para explanadas)
- tanto el ensayo de humedad – sequedad como el de congelación – deshielo fueron concebidos para condiciones climáticas muy distintas a las usuales en España
- se requiere cerca de un mes para su realización
- los contenidos de cemento obtenidos mediante estos métodos se consideran excesivos para las condiciones españolas.

4.2.5 Otros ensayos de caracterización mecánica

Índice de capacidad de soporte inmediata

En caso de que vaya a circular tráfico, incluso el de obra, inmediatamente después de finalizada la compactación, la mezcla debe poseer una adecuada estabilidad para que no se produzcan deformaciones importantes que puedan perjudicar su comportamiento posterior. Dicha estabilidad, que depende fundamentalmente de su esqueleto mineral, se evalúa mediante el denominado índice de capacidad de soporte inmediata, que se determina sometiendo una probeta, recién compactada, a un ensayo de penetración con la prensa CBR (fig. 4.8), sin inmersión en agua y sin ninguna sobrecarga anular (norma UNE-EN 13286-47). El índice CBR obtenido en estas condiciones es el índice de capacidad de soporte inmediata, el cual debe ser

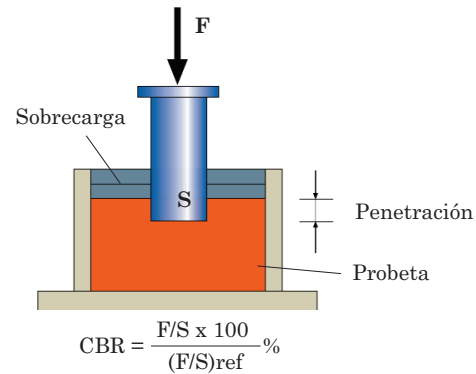


Figura 4.8 Ensayo CBR.

igual o mayor que 40 (preferiblemente por encima de 60). Estos valores son más fáciles de alcanzar cuando el suelo contiene un porcentaje importante de elementos granulares (zahorras) que cuando se tratan suelos finos o arenas de baja capacidad de soporte.

Resistencia a tracción directa e indirecta

En algunos países se caracterizan los materiales tratados con cemento mediante la resistencia a tracción directa (norma UNE-EN 13286-40), utilizando unas probetas cilíndricas especiales con los extremos ensanchados. Sobre estos ensayos no se cuenta con experiencia en España.

Otro ensayo para evaluar la resistencia a rotura del material es el ensayo de tracción indirecta (fig. 4.9), también conocido como ensayo brasileño (UNE- EN 13286-42).

Módulo de elasticidad

La caracterización en laboratorio del módulo de elasticidad de estos materiales, pese a no ser habitual, puede resultar de interés en alguna ocasión, como por ejemplo para el dimensiona-

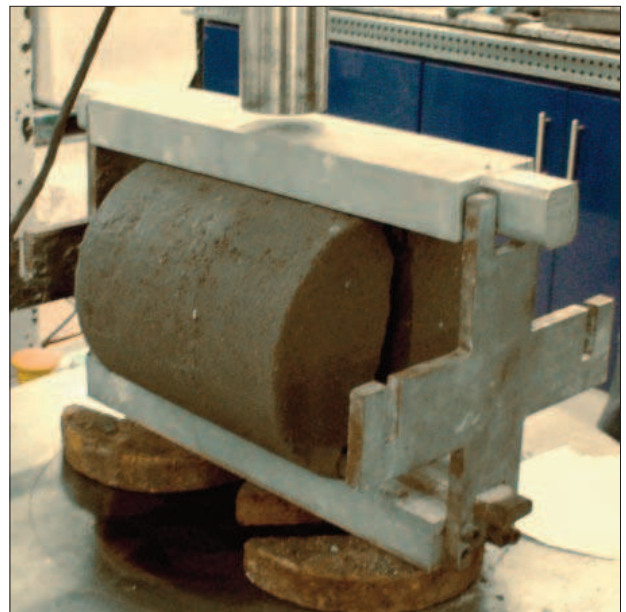


Figura 4.9 Ensayo de tracción indirecta

miento analítico de la explanada. Los ensayos pueden ser estáticos o dinámicos, aunque los resultados con ambos son distintos, siendo lo más adecuado reproducir en el laboratorio el efecto dinámico de las cargas. La medida del módulo (norma UNE-EN 13286-43) se puede hacer tanto en compresión como en tracción directa o indirecta.



Figura 4.10 Realización de ensayo de tracción indirecta para la determinación del módulo de elasticidad

MAQUINARIA Y EQUIPOS PARA EL TRATAMIENTO DE SUELOS



5.1 Introducción

En este capítulo se describe la maquinaria y equipos que se emplean habitualmente en las diferentes operaciones que constituyen los tratamientos de mejora o estabilización de suelos con cal o cemento. En el desarrollo del tema no se han considerado las operaciones de extendido y, en su caso, refino previos de la tongada o capa a tratar, que son operaciones propias del movimiento de tierras. Sí se hace referencia al refino final de la superficie, que en algunos casos puede presentar ciertos condicionantes propios de estos tratamientos.

Por otra parte, aunque se mencionan brevemente las centrales de mezcla y los correspondientes equipos de transporte y extendido, el capítulo se centra preferentemente en los equipos necesarios para la ejecución in situ de los diferentes tratamientos. Este procedimiento es el que mejor se adapta al tipo de trabajo a realizar y es, por lo tanto, el más utilizado.

En cualquier caso, la maquinaria a emplear en el tratamiento de suelos debe ajustarse al tipo de tratamiento, a las especificaciones técnicas a satisfacer por el mismo, así como a la programación y a los condicionantes medioambientales de la obra.

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

5.2. Almacenamiento del conglomerante

El almacenamiento de la cal o el cemento en la obra es función de:

- el tipo de obra
- las condiciones de suministro

- las producciones previstas.

En general el suministro del conglomerante en obras de cierta importancia es a granel, en cisternas de aproximadamente 25 m³, aunque en aplicaciones menores puede ser conveniente emplear el conglomerante en sacos y distribuirlo manualmente sobre el suelo.

En obras concentradas en un área determinada, como pueden ser pistas o plataformas de aeropuertos, estacionamientos o urbanizaciones, en caso de ser necesario el almacenamiento del conglomerante, suele ser más práctico hacerlo en silos fijos, verticales u horizontales.

En el caso de obras lineales puede resultar más interesante el empleo de silos horizontales remolcables, de fácil instalación y traslado en función de la localización del tajo. Se limita así la pérdida de rendimiento derivada de incrementos en los tiempos de desplazamiento del elemento de distribución hasta el punto de carga, y se evita la necesidad de disponer de un acceso transitable a la zona de obras.

Para garantizar un trabajo sin interrupciones y facilitar la operación de las cisternas de suministro, en obras de cierta importancia es recomendable disponer de capacidad de almacenamiento del conglomerante para al menos un día de trabajo. A la hora de dimensionar la capacidad de almacenamiento se deben tener en cuenta también las diferentes densidades aparentes de los distintos conglomerantes, la cal viva, la cal hidratada o el cemento. Hay que considerar asimismo los plazos máximos de almacenamiento del conglomerante.

5.2.1 Silos fijos

Los silos fijos (fig. 5.1) pueden ser horizontales o verticales. Los primeros tienen menores necesidades de cimentación. Los segundos ocupan menos espacio y son más fáciles de vaciar.

Los silos son, en general, de acero al carbono, acero inoxidable o aluminio, monolíticos o formados por paneles desmontables. Los primeros tienen un montaje más rápido, mientras que los segundos se transportan con mayor facilidad.

La carga del cemento o la cal al silo desde la cisterna se produce por vía neumática de baja presión (0,2 MPa). La alimentación a la maquinaria de obra será por gravedad ó neumática.

Será necesario prever el suministro de aire comprimido o energía eléctrica para el funcionamiento del silo, así como la cimentación necesaria.

Los silos deberán contar preferentemente con los siguientes elementos:

- Orificios de acceso e inspección, dotados de un sistema de cierre que permita evitar accidentes en caso de apertura con el silo presurizado.

- Filtros de aire durante las operaciones de llenado y descarga.
- Manómetro.
- Válvulas de seguridad de cierre neumático en los conductos de entrada y salida, que garanticen la estanqueidad de la operación.
- Válvulas para liberación de presión.
- Indicadores de nivel de llenado (por ejemplo, máximo, medio y mínimo).
- Sistemas para evitar la formación de bóvedas, como sistemas de fluidificación por aireación o vibración internos.
- Sistemas que permitan el control de filtros, válvulas y demás equipos auxiliares.



Figura 5.1 Silo vertical fijo

👉 *Estos elementos permiten una operación más segura y eficiente de los silos. Si no se dispone de alguno de ellos deberán incrementarse, en consecuencia, las inspecciones.*

Los silos deben ser completamente estancos y permitir el acceso e inspección a sus diferentes elementos en condiciones de seguridad (escaleras, barandillas, pasarelas).

5.2.2 Silos remolcables

Los silos remolcables (fig. 5.2) son semi-remolques similares a las cisternas de transporte por carretera pero con menores limitaciones de carga, es decir, con mayor capacidad. Permiten su rápida instalación y traslado a medida que se desplaza el tajo en obras de carácter lineal.

Para su traslado generalmente deben estar vacíos; se enganchan a una cabeza tractora y, una vez en el lugar de destino, se apoyan en patas retráctiles, que pueden ser accionadas mediante bomba hidráulica.

Los elementos auxiliares son básicamente los mismos que en el caso de los silos fijos.

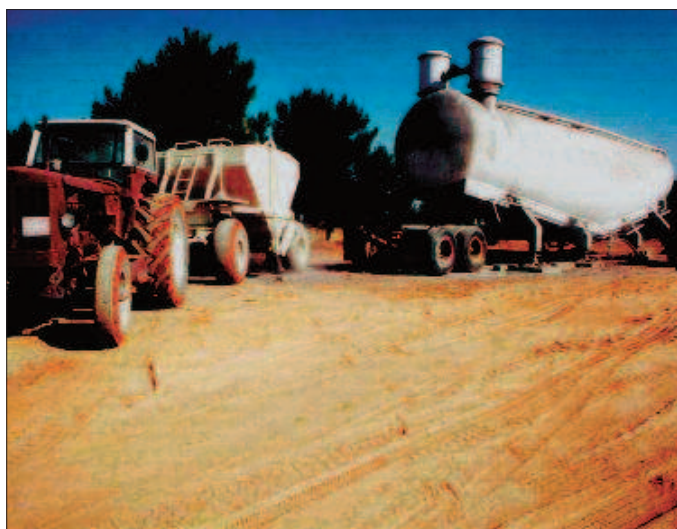


Figura 5.2 Silo remolcable

5.3 Preparación del suelo

Antes de proceder a la distribución del conglomerante y su mezclado con el suelo pueden ser necesarias algunas operaciones previas encaminadas a preparar este convenientemente para dicho tratamiento. Estas operaciones son:

- retirada de partículas gruesas en suelos con tamaño máximo superior al admisible
- disgregación de suelos cohesivos, para permitir el correcto mezclado posterior con el conglomerante
- escarificación del suelo para facilitar su aireación, esponjamiento o secado, o bien para facilitar la humectación del material o la labor del equipo de mezclado.

5.3.1 Cribas y máquinas despedregadoras

El tamaño máximo de los suelos se puede ajustar a los requerimientos mediante un corte granulométrico, en caso de que el material de origen supere el tamaño permitido por las especificaciones o el aceptable para el correcto funcionamiento de la máquina mezcladora. Para ello, se recurre en algunos casos al escarificado del material y extracción manual de las piedras de mayor tamaño. Sin embargo, dada la baja eficiencia de la extracción manual, en ocasiones es necesario realizar un corte granulométrico más eficaz. Atendiendo a criterios económicos, y dependiendo de la proporción de sobretamaños que tenga el material de origen se pueden emplear dos métodos:

- despedregadoras si el porcentaje de sobretamaños es inferior aproximadamente al 5-10 %
- cribas si dicho porcentaje es superior al 5-10 %.



Figura 5.3 Despedregadora

Despedregadoras

Las despedregadoras (fig 5.3) son máquinas de origen agrícola, remolcadas por tractores, que eliminan los tamaños gruesos de los suelos previamente extendidos para formar la capa o tongada. La máquina corta por el tamaño requerido, y con un sistema de paletas o cangilones recoge los sobretamaños y los deposita en una tolva; la potencia necesaria le es suministrada desde el tractor. Cuando la tolva está llena, la despedregadora se traslada hasta una zona de vertedero donde es vaciada mediante un sistema hidráulico. Esta operación es la que limita el rendimiento de estas máquinas.

Pueden ser necesarias varias pasadas, y no son efectivas en espesores superiores a 15 cm. Incluso con ese espesor, pueden quedar algunas piedras grandes, por lo que son menos eficientes que el cribado del material.

Cribas

Las cribas se pueden clasificar en fijas o móviles. Las fijas se pueden clasificar a su vez en estáticas o vibrantes. Las cribas móviles por su parte se pueden subdividir en móviles sobre orugas y móviles sobre ruedas.

Las cribas fijas estáticas (fig. 5.4) están formadas por barrotes longitudinales con la suficiente separación entre ellos para hacer el corte al tamaño deseado. Estas cribas se pueden alimentar con retroexcavadora, pala cargadora frontal e incluso camión basculante. Tienen el inconveniente de su poco rendimiento y de rechazar mucho suelo útil.

Las cribas fijas vibrantes (fig. 5.5) llevan asociadas otras máquinas para su funcionamiento. El equipo de cribado está compuesto por una tolva de alimentación, un alimentador, una cinta transportadora que lleva el material de la tolva a la criba, la criba vibrante, y cintas transportadoras del material cribado y, eventualmente, del rechazo.

Las cribas móviles se pueden definir como equipos compactos, y autónomos, montados sobre orugas o ruedas en los cuales la máquina principal es una criba vibrante. Las plantas de cribado móviles, únicamente necesitan las siguientes operaciones: arranque, carga a la planta y carga y acopiado de lo procesado. Al situarse en las proximidades del tajo de excavación, precisan menos maquinaria móvil que las cribas fijas.

Por otra parte, las cribas móviles no tienen costes de instalación o éstos son muy pequeños. Están diseñadas para poder transportarse de una obra a otra fácilmente, con su propio equipo de ruedas o sobre góndola.

Las cribas móviles sobre ruedas tienen parte del inconveniente, al igual que las fijas, de necesitar un transporte del material a procesar desde la zona de excavación a la zona de instalación, pues su movilidad no es suficiente como para seguir el movimiento del frente de excavación en sus avances, lo que si se consigue con las cribas móviles sobre orugas. En cualquier caso, las cribas móviles sobre ruedas aventajan a las fijas en que sus costes de instalación son muy pequeños, por lo que se pueden hacer muchos cambios de ubicación,



Figura 5.4 Cribón fijo estático



Figura 5.5 Criba fija vibrante con tolva de alimentación

acercándose al frente de excavación, y minimizando el transporte del material a procesar.

La criba móvil mas sencilla consta de un cribón vibrante y una cinta transportadora del material procesado, y todo sobre ruedas (fig. 5.6). En la zona de excavación, el arranque carga y transporte a la criba se realiza mediante una pala cargadora.



Figura 5.6 Criba sobre ruedas con alimentador de vaivén

Otras cribas constan, además de lo anterior, de una tolva con su alimentador de vaivén. El material es arrancado y transportado mediante un tractor, u otro sistema, y se alimenta a la planta mediante una retroexcavadora. Esta criba admite tamaños gruesos hasta de material excavado mediante voladuras.

Otras máquinas más complicadas incorporan también una parrilla en la tolva de alimentación para eliminar tamaños muy gruesos (>150 mm) perjudiciales para el resto de las máquinas. Estas plantas están diseñadas para fabricar áridos aunque pueden hacer el cribado de suelos.

Las cribas móviles sobre orugas (fig. 5.7) son similares a las anteriores pero se mueven junto con la máquina de excavación en el avance del frente, por lo que son el complemento ideal para cribar los materiales provenientes de prestamos, graveras y canteras, fabricando el todo uno para estabilizar. Dada la simplicidad de operaciones el coste de este cribado es mínimo con estos equipos.

5.3.2 Maquinaria para la disgregación, escarificación o aireación del suelo



Figura 5.7 Criba vibrante sobre orugas con cinta transportadora de salida

Los equipos a emplear para la realización de estas operaciones son los habituales para el movimiento de tierras. Es frecuente la utilización de ripper de dientes múltiples montados sobre una motoniveladora (fig. 5.8) o de un tractor de cadenas de mediana potencia (130 – 200 kW). Se pueden utilizar también máquinas de origen agrícola, como gradas de rejas o discos, o bien rastrillos o desterronadores arrastrados por un tractor.

En aquellos casos en los que el elevado grado de cohesión del suelo dificulte su disgregación con los medios descritos, esta operación se puede realizar mediante

máquinas de tipo rotavator agrícola, o estabilizadoras como las que se describen mas adelante, que pueden ser las mismas que las empleadas para la posterior mezcla del suelo con el conglomerante.

Por ejemplo, para el tratamiento con cal de suelos muy cohesivos, puede ser necesario dividir el tratamiento en dos etapas. En la primera de ellas se añade la cantidad de cal viva necesaria para permitir la correcta disgregación del suelo y, posteriormente, se finaliza el tratamiento en una segunda etapa.



Figura 5.8 Escarificación del suelo con ripper de niveladora para facilitar su humectación

5.4 Humectación y distribución del conglomerante

Además de la mezcla en central, poco utilizada en estabilizaciones, hay otros dos procedimientos de humectación del suelo y distribución del conglomerante:

- in situ por vía seca
- in situ por vía húmeda

A continuación se exponen los equipos necesarios en los procedimientos de ejecución in situ, que son los más habituales en este tipo de trabajos.

En efecto, los equipos disponibles en la actualidad para la distribución del conglomerante y el agua, la mezcla con el suelo y el refino final de la superficie permiten obtener resultados que satisfacen sin problema la mayoría de las especificaciones técnicas aplicables a las unidades de tratamiento de suelos, tanto en lo que se refiere a la homogeneidad de la mezcla como en lo referente al refino final de la superficie.

Las técnicas de estabilización in situ proporcionan altos rendimientos, son más sencillas y requieren menos logística que la fabricación del material en central, que requiere además su transporte a la obra y posterior extendido y compactación con los medios habituales para capas tratadas con cemento.

La estabilización in situ permite además el manejo de materiales muy cohesivos, lo cual resulta muy complicado, si no imposible, en las centrales de fabricación.

5.4.1 Equipos para la distribución del conglomerante por vía seca

En el procedimiento conocido como vía seca, el conglomerante es distribuido sobre el suelo generalmente mediante equipos distribuidores en una operación previa a la de mezclado. En ocasiones puede ser necesario el manejo del conglomerante en sacos y su distribución manual sobre el suelo.

Humectación del suelo

La humectación del material se puede realizar de dos formas:

- riego de agua sobre la superficie a tratar mediante cisterna de agua tradicional (fig. 5.9) antes de la distribución del cemento o la cal. En estos casos es conveniente escarificar previamente el suelo. Mediante este sistema es difícil controlar la dotación de agua, y la mezcla de ésta con el suelo puede ser heterogénea
- los equipos modernos de estabilización incluyen un sistema de dosificación 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, en este caso de agua, dependiendo de la velocidad de avance, anchura de trabajo, profundidad del tratamiento y densidad del suelo. Para ello,



Figura 5.9 Humectación con cisterna

la cisterna de agua se acopla a la estabilizadora produciéndose el avance de ambos de forma simultánea, aunque también la cuba puede avanzar paralelamente a la estabilizadora, unida a ella mediante una manguera larga.

La incorporación de agua directamente a la cámara de mezcla (fig. 5.10) 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 en el momento en el que el suelo se encuentra totalmente disgregado en la cámara de mezcla.

Sin embargo, hay un incremento del coste total del estabilizado, que puede ser del orden del 10 o 15 %, ya que la eficiencia de las cubas de agua disminuye notablemente.



Figura 5.10 Cuba de agua acoplada a la estabilizadora en trabajo por vía seca

Dosificadores de conglomerante por vía seca

Se trata de equipos automotores o remolcados (fig. 5.11), cuya función

es la de repartir de forma homogénea sobre el suelo una cantidad de conglomerante prefijada. Las características del equipo determinan la precisión que puede alcanzar en el reparto.

El equipo distribuidor del conglomerante se deberá seleccionar de manera que satisfaga la precisión en el reparto exigible en cada tipo de tratamiento.



Figura 5.11 Distribuidor remolcado de conglomerante por vía seca en el momento de la carga desde la cisterna de transporte

Control de la dosificación

La dosificación del material pulverulento sobre el suelo puede ser:

- volumétrica, independiente de la velocidad. La precisión en el reparto queda condicionada por la regularidad de la velocidad de avance del equipo, aunque puede ser suficiente para tratamientos de secado o mejora de suelos para rellenos
- volumétrica, proporcional a la velocidad de avance del distribuidor. Éste es el tipo más usual en España
- volumétrica, proporcional a la velocidad de avance y con corrección ponderal discontinua.

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 ó dos tornillos sinfin, una o más bandas transportadoras, o un sistema de transporte neumático. El dispositivo, por tanto, controla el caudal del conglomerante repartido y, como ya se ha mencionado, su funcionamiento puede estar ligado a la velocidad de avance de la máquina. Si no es así, la dosificación esparcida dependerá de la velocidad de avance del distribuidor.

Cuando el equipo no dispone de un sistema de autopesado, es necesario calibrar la cantidad en peso dosificada por unidad de superficie mediante la realización de ensayos tradicionales de control de dosificación real. Estos ensayos consisten en la realización de pesadas periódicas del conglomerante recogido en bandejas de superficie conocida dispuestos en el suelo antes del paso de la máquina. También es posible controlar, por pesaje en báscula de la máquina antes y después del reparto, el peso de conglomerante distribuido sobre la superficie cubierta.

Por su parte, en el sistema de dosificación volumétrica con control ponderal discontinuo, el conjunto del silo y el dosificador se apoya sobre el chasis por intermedio de células de carga. De este modo se puede conocer la cantidad en peso de conglomerante distribuido sobre una superficie conocida. Para ello es necesario que el equipo esté detenido, y así determinar con precisión la diferencia de peso de con-

glomerante en el depósito cuando realiza un pequeño avance. Conocida esta diferencia de peso y la superficie cubierta, el sistema determina el error cometido respecto a la dosificación teórica y efectúa la corrección necesaria.

Sistema de propulsión

En función del sistema de propulsión (fig. 5.12), los distribuidores pueden ser:

- remolcados por tractor
- autopropulsados.
- transportados sobre chasis de remolque articulado o camión.

Configuración de los distintos tipos de distribuidores

Los repartidores más simples, constan únicamente de una tolva remolcada con un elemento dosificador en su parte inferior. Para obras de importancia, es preciso disponer de mayor capacidad de carga para reducir los tiempos muertos y de mayor precisión y homogeneidad en el reparto, lo cual introduce más elementos en el equipo.

En la fig. 5.12 puede verse esquemas de diversos tipos de repartidores con indicación de sus elementos mecánicos más importantes.

Transporte del conglomerante en polvo desde el depósito

El sistema de transporte del conglomerante desde el depósito al sistema de dosificación o reparto puede ser alguno o una combinación de los siguientes:

- transporte por gravedad:
 - con fluidificación por aire
 - sin fluidificación
- transporte mecánico:
 - banda transportadora metálica o de caucho
 - tornillo sinfín.

La descarga directa del conglomerante desde la cisterna transportadora al suelo lleva consigo riesgos no controlados y mantiene las válvulas de seguridad de sobrepresión trabajando permanentemente. Ello obliga a la cisterna a funcionar con una presión para la cual no está fabricada, por lo que se desaconseja su utilización.

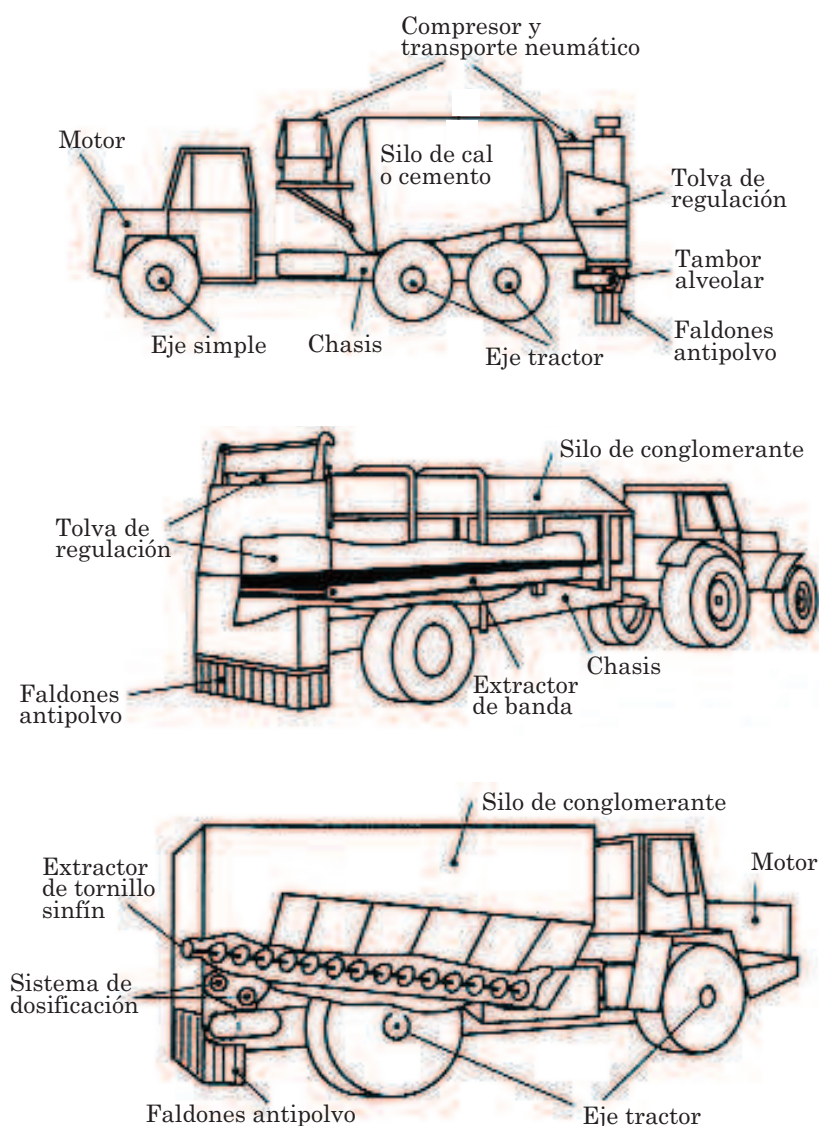


Figura 5.12 Repartidores de conglomerante

Dosificación del conglomerante

Algunos 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 compartimentos o esclusas, de manera que se pueda variar el ancho de reparto.

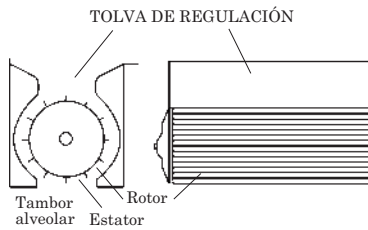


Figura 5.13 Esquema de tambor alveolar



Figura 5.14 Tambor alveolar y faldones antipolvo

En equipos más sencillos no existe un sistema dosificador y los propios elementos de transporte del ligante son a la vez dosificadores. Para el reparto del material en el ancho de trabajo suelen incluir un tornillo sinfin. El ancho de reparto en algunos equipos se regula mediante la apertura de compuertas situadas bajo el sinfin.

En los equipos con alimentador de banda metálica, la apertura de una trampilla situada sobre la banda 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.

Elementos de operación y control principales

Estos equipos pueden incorporar 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.

Aquellos equipos que dispongan de sistema de dosificación volumétrica con control ponderal discontinuo, pueden contar con los siguientes elementos:

- dispositivo de medida de la superficie tratada, función de la distancia avanzada y el ancho de reparto
- procesador para el cálculo de la dosificación real aplicada, a partir de los datos anteriores
- automatismo de autocorrección de la dosificación, ligado al cálculo de la dosificación real
- registro de parámetros de dosificación
- sistema de archivo o impresión de datos.

Dispositivos antipolvo

Entre los mismos pueden mencionarse los siguientes:

- 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.

Existen también equipos que reúnen en una sola máquina el elemento distribuidor del ligante y la cámara de mezcla. Estos equipos, que se describen más adelante, se han desarrollado para evitar emisiones de polvo.

Características más importantes de los distribuidores

En los párrafos anteriores se han enumerado los diferentes elementos y sistemas que componen los equipos de distribución sobre el suelo del conglomerante. A continuación se detallan las características de estos elementos y sistemas que tienen una mayor influencia sobre la función de reparto del conglomerante, y que por lo tanto resultaran fundamentales a la hora de seleccionar un distribuidor u otro.

Capacidad del depósito

Cuanto mayor sea la capacidad del depósito mayor será el tiempo entre paradas para recargar y, por lo tanto, mayor será el rendimiento del equipo.

La capacidad de estos distribuidores oscila entre 4 m³ en los más simples, hasta 16 m³ o más. Casi todos los utilizados en España se remolcan mediante tractores agrícolas, que para los repartidores grandes deben tener una potencia de al menos 110 Kw.

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.

Ancho de reparto

Como se ha mencionado, en la mayoría de los equipos el ancho de reparto es modulable por tramos independientes (por ejemplo, de 30 ó 60 cm), centrados o no según el equipo, lo que permite minimizar los solapes en el reparto del conglomerante.

Precisión y homogeneidad en la distribución

La precisión tanto longitudinal como transversal se mide en función del coeficiente de variación. Para ello se realizan ensayos de pesadas periódicas del conglomerante recogido en bandejas de superficie conocida y dispuestos en el suelo antes del paso del repartidor, en dirección longitudinal o transversal, según corresponda. El coeficiente de variación será la relación en porcentaje entre la desviación estándar y la media de, al menos, 20 determinaciones.

En Francia, en función de los valores obtenidos para el coeficiente de variación longitudinal (CVL) y para el transversal (CVT) así como de la posibilidad o no de modular el ancho de reparto, se obtiene una calificación. De acuerdo con dicha calificación, el distribuidor podrá ser utilizado en trabajos de mayor o menor precisión.

Para su utilización en mejora de suelos (terraplenes), es suficiente con una calificación de 1, limitando el CVL al 15 %, mientras que para explanadas es necesaria al menos una calificación de 2.

También es importante limitar la diferencia entre el valor medio obtenido y el objetivo. Se admiten diferencias de entre el 5 y el 10 % en función del tipo de tratamiento.

Tabla 5.1 Criterios de calificación de los distribuidores de conglomerante

Criterio	Calificación		
	3	2	1
Homogeneidad longitudinal del reparto del ligante	$CVL \leq 5 \%$	$5 < CVL \leq 10 \%$	$CVL > 10 \%$
Homogeneidad transversal del reparto del ligante	$CVT \leq 10 \%$	$10 < CVT \leq 20 \%$	$CVT > 20 \%$
Posibilidad de modificar el ancho de trabajo	SÍ	NO	

CVT: coeficiente de variación transversal

CVL: coeficiente de variación longitudinal

Dotación máxima y mínima

La dotación máxima de conglomerante (kg/m^2) que el distribuidor sea capaz de repartir en una sola pasada y con la precisión requerida determinará, junto con la capacidad del depósito, el rendimiento del equipo y, generalmente, de la operación. Este volumen dependerá de la velocidad de trabajo, del ancho de reparto y de la capacidad del elemento dosificador.

Para dosificaciones de ligante elevadas, por encima del 4 ó 5 %, se recomienda la distribución (y correspondiente mezclado) en dos pasadas, lo cual reducirá considerablemente el rendimiento. El motivo fundamental es que con una dosificación alta, el conglomerante puede tener un espesor tal que puede ser desplazado por la estabilizadora. En una capa de 30 cm y con una dotación del 5 %, se necesitan unos 30 kg/m², o un espesor de unos 3 cm de cemento o cal viva, y el doble con cal apagada.

En cuanto a la dotación mínima, se ha trabajado correctamente con dosificaciones de cal de tan solo el 1 %, o incluso menos, cuando se trata solamente del secado del suelo.

Maniobrabilidad y pendiente longitudinal máxima admisible (en ascenso y descenso)

En condiciones del terreno adversas, habituales especialmente en los tratamientos con cal, el equipo debe ser capaz de desplazarse sin que se vea afectada la precisión en la dosificación.

Por otra parte, en obras con limitación de espacio y multiplicidad de obstáculos, como por ejemplo en urbanizaciones, se debe seleccionar el equipo teniendo en cuenta esta limitación.

5.4.2 Equipos para la distribución del conglomerante por 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 suspensión o lechada directamente a la cámara de mezclado, o esparcir la lechada directamente sobre el suelo, previa escarificación del mismo.

Para ello es posible, en el caso de la cal, fabricar la lechada en obra por medio de equipos que permiten realizar la hidratación de cal viva y preparar emulsiones de cal hidratada, con el porcentaje de sólidos requerido. Se trata de depósitos del volumen necesario para el tratamiento del material que puede transportar una cisterna de suministro, unas 25 t. La cal se descarga por vía neumática al depósito por debajo del nivel del agua, lo cual evita en todo momento la formación de polvo y permite una total hidratación, en el caso de la cal viva. El rendimiento de estos equipos es de 25 ó 32,5 t/h, en función de que se maneje cal hidratada ó cal viva.

Para la fabricación de lechada a partir de cal hidratada es posible disponer también de mezcladores fijos o sobre camión en los cuales la mezcla se realiza mediante sistemas de agitación neumática y recirculación, o bien sistemas de mezcla en línea con agua a presión.

Una vez fabricada la lechada, mediante cisternas capaces de bombearla con el caudal necesario, se inyecta a la cámara de mezclado. La lechada, para poder ser bombeada, no debe contener más de un 40 % de sólidos. Es recomendable incorporar un sistema que incluya un caudalímetro y un procesador que regule el caudal a la velocidad de avance del equipo.

Otro sistema, más habitual en España, es el empleo de equipos de fabricación de lechada de cal o cemento que se acoplan a los de mezclado y avanzan simultáneamente con ellos.

Estos equipos de fabricación y dosificación de lechada disponen de un depósito de agua y de un silo para el cemento o la cal (fig.5.15). La dosificación del conglomerante al mezclador de tipo centrífugo para fabricar la lechada se realiza en peso, a través de un tornillo sinfín pesador, mientras que la del 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. Para la correcta selección de estos equipos es importante conocer los siguientes datos:

- capacidad del depósito de agua
- capacidad del silo de conglomerante, teniendo en cuenta la densidad aparente del mismo
- tiempo necesario para la recarga
- capacidad máxima y mínima de dosificación de lechada
- proporción mínima de agua en la lechada para el correcto funcionamiento del equipo. En general se pueden manejar proporciones en volumen del 40 % de sólidos. Una vez más se deben tener en cuenta las diferentes densidades de los distintos conglomerantes.

La utilización de estos equipos permite obtener algunas ventajas respecto a la dosificación por vía seca:



Figura 5.15 Equipo de estabilización por vía húmeda con depósito para conglomerante de 25 m³

- dosificación más precisa del agua y el conglomerante
- al tratarse de una adición líquida que se produce directamente en la cámara de mezcla en el momento en el que el suelo está totalmente suelto, la envuelta es mejor y más uniforme
- se puede ajustar el ancho del tratamiento simplemente cerrando los difusores que no sean necesarios. Se disminuyen así las pérdidas por solape y la sobredosificación en estas zonas
- se evitan pérdidas de conglomerante por la acción del viento
- por el mismo motivo estos equipos estarán muy indicados en obras con restricciones medioambientales a la emisión de polvo.



Figura 5.16 Detalle de los elementos de dosificación, mezcla y bombeo

Como desventajas se pueden citar las siguientes:

- mayor coste al incorporarse equipos más caros al proceso
- reducción de rendimientos, al estar la operación de mezcla ligada a la de reparto
- no es posible emplear este sistema cuando la humedad del suelo se encuentra próxima a la óptima de trabajo.

5.5 Mezcla in situ

Un mezclador in situ es una máquina automotriz, remolcada o transportada destinada a pulverizar, triturar, airear, homogeneizar y esponjar un suelo y a mezclarlo mas o menos íntimamente con uno o más materiales de aportación (líquidos, granulados o pulverulentos), en este caso cal o cemento y agua.

Los equipos de mezcla empleados en la mejora y tratamiento de suelos se pueden clasificar en tres grupos en función del principio de accionamiento del útil de mezcla

- útiles fijados a la máquina (por ejemplo, ripper, hoja de motoniveladora, vertederas o rejas, etc.)
- útiles cuyo accionamiento se produce por tracción y fricción con el suelo (por ejemplo, gradas de discos)
- útiles cuyo accionamiento es producido por un motor (por ejemplo, rotavator agrícola o las estabilizadoras modernas con rotor y cámara de mezcla).

En función de su origen, los mezcladores pueden dividirse también como se indica a continuación:

- maquinaria de origen agrícola, con útiles fijos como vertederas, rejas, gradas de discos, o bien móviles, como el rotavator agrícola
- maquinaria de obra civil diseñada específicamente para el tratamiento de suelos.

La maquinaria de origen agrícola, si bien ha sido ampliamente utilizada, no garantiza la obtención de una mezcla con la calidad requerida para explanadas. Por ello su empleo en estos casos ha de limitarse a obras de tamaño muy reducido, debiendo recurrirse en general a equipos concebidos expresamente para el tratamiento de suelos.

Por otra parte, hay que tener en cuenta siempre la gran diferencia en rendimientos entre los equipos agrícolas y los de obra civil. Ello suele llevar generalmente a que el uso de estos últimos sea más económico.

5.5.1 Maquinaria de origen agrícola

Aun cuando ya existían algunos equipos diseñados específicamente para estabilización de suelos en los años 50, 60 y 70 del pasado siglo, la mayor parte de estos trabajos se realizaba con equipos procedentes de la agricultura. Su uso ha llegado hasta fechas recientes, a pesar de la ya mencionada baja calidad de mezcla conseguida en muchos casos.

Los tres equipos agrícolas mas utilizados en el tratamiento de suelos han sido los siguientes:

- gradas de discos: formadas por un número variable de discos con forma de casquete esférico, situados sobre uno o más ejes. Son arrastradas por un tractor. Al incidir sobre el suelo por su lado cóncavo producen un volteo y mezclado, aunque suele ser necesario un arado previo del suelo.

La profundidad de trabajo no supera los 20 cm con discos de 1 m de diámetro, aun utilizando tractores potentes y bajas velocidades.

La calidad de la mezcla, efectuando cuatro pasadas, puede ser adecuada para la mejora o secado de suelos en rellenos, pero insuficiente para explanadas.

- arados de reja: arado convencional, con 3 a 6 cuchillas de corte y placas vertederas, remolcado por tractores de 100 a 200 kW.

Permiten trabajar con espesores de mezclado superiores a los de la grada, pero la calidad del mezclado es inferior, debido al número menor de rejas que de discos. Hay que dar generalmente doble número de pasadas.

- rotavator agrícola: puede considerarse como el antecesor de las estabilizadoras de primera generación (pulvimixer).

Consta de un eje horizontal, acoplado a la toma de fuerza del tractor, con unos discos dotados de cuchillas en forma de L, orientadas alternativamente hacia uno u otro lado. Los más utilizados en España tienen anchos de trabajo entre 2 y 2,5 m, con un eje provisto de 42 a 54 cuchillas.

El espesor máximo de mezclado difícilmente alcanza los 15 cm, aun lastrando el equipo y trabajando a muy baja velocidad.

Aunque durante bastantes años se ha usado para la estabilización de suelos, solamente se han obtenido buenos resultados cuando se ha operado correctamente dando al menos dos pasadas de mezclado.

5.5.2 Equipos específicos de obra civil – Estabilizadores de suelos

Esta exposición se centra en aquellos equipos de obra civil específicamente diseñados para el tratamiento de suelos. Además de éstos, en ocasiones se utilizan motoniveladoras o rodillos del tipo pata de cabra para operaciones de mezclado que no requieran gran homogeneidad.

Tipo y concepción de los equipos de mezclado in situ

Se distinguen los siguientes dos tipos en función de su concepción:

- rotor trasero: el dispositivo de mezcla se encuentra situado en la parte posterior de la máquina (fig. 5.17). Son los primeros equipos diseñados para la estabilización de suelos, derivados de los rotavator agrícolas
- rotor central: el dispositivo de mezcla se sitúa en la parte central de la máquina, entre sus dos ejes. A este grupo corresponden todas las máquinas modernas específicamente diseñadas para estabilización de alto rendimiento. La posición central del rotor, permite un mejor control de la profundidad de trabajo.

Este grupo se puede dividir a su vez en aquellas máquinas en las cuales el motor se sitúa sobre el eje delantero (fig. 5.18) o delante de él, y aquellas en las cuales el motor se sitúa sobre el rotor.



Figura 5.17 Estabilizadora tipo pulvimezclador

Características de la cámara de mezclado y el rotor

Los equipos 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 (fig. 5.20). La cámara de mezclado puede tener barras de impacto en su zona delantera (en el sentido de 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 líquidos.



Figura 5.18 Máquina con el rotor centrado entre ambos ejes y motor sobre un eje



Figura 5.19 Máquina con el rotor en posición central, bajo el motor

Dimensiones

El ancho del rotor determinará el ancho de trabajo, habitualmente 2,4 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.

Tipos de útiles o herramientas

El rotor puede incorporar diferentes tipos de útiles:

- picas, que son los útiles con mayor poder de disgregación por lo que se utilizan también para reciclados
- paletas, adecuadas para la estabilización de suelos de cualquier tipo
- martillos, similares a las paletas
- cuchillas, más indicadas para suelos cohesivos, derivadas de los útiles de los rotavator agrícolas.

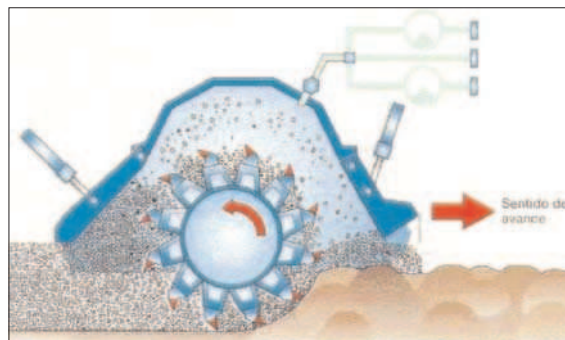


Figura 5.20 Rotor de máquina estabilizadora

En las fig. 5.21 a 5.23 se adjuntan fotografías de distintos tipos de rotores.

Algunos equipos incorporan rotores con la posibilidad de emplear distintos tipos de útiles en función del trabajo a realizar. Otros incluyen rotores intercambiables.

El número de útiles también será función de la operación a realizar. Los rotores específicos para estabilización incorporan entre 50 y 80 paletas. Los equipos mixtos para reciclado y estabilización pueden llegar a incorporar más de 200 picas.

El posicionamiento de los útiles en el rotor puede ser en línea, o helicoidal o en uve, para reducir los esfuerzos máximos.

El modo de fijación de los útiles al rotor determina la sencillez o dificultad del cambio. No se debe olvidar que los útiles de disgregación y mezcla son los elementos de desgaste del equipo, siendo necesario diariamente cambiar un número que variará en función de la abrasividad y granulometría del suelo, así como del material del que estén fabricados (acero común, acero tratado, carburo de tungsteno).

Los portaútiles o elementos de fijación del útil al rotor, pueden estar diseñados para un solo tipo de útil, lo que implica la necesidad de cambiar el rotor para cambiar la utilización del equipo, a no ser que el útil admita su aplicación a actuaciones diferentes. En otros casos son adaptables a diversos tipos de útiles, lo que permite emplear un mismo rotor para trabajos diferentes. Los portaútiles son también elementos de desgaste, por lo que algunos fabricantes han patentado también elementos de fácil sustitución.



Figura 5.21 Rotor con paletas



Figura 5.22 Rotor con cuchillas



Figura 5.23 Rotor con picas

Sentido y velocidad de giro

El sentido de giro del rotor puede ser contrario al sentido de giro de las ruedas motrices, que es el más habitual puesto que permite una mayor finura de disgregación y homogeneidad de la mezcla.

Algunos equipos permiten trabajar en ambas direcciones, con lo cual varía el sentido del giro respecto al de las ruedas motrices.

La velocidad de giro del rotor (revoluciones por minuto) y la velocidad de los extremos de los útiles condicionan el rendimiento. La mayoría de los equipos incorporan varias velocidades (3 ó 4, por ejemplo), que se seleccionan desde la cabina en función de la resistencia del material a estabilizar. Para una determinada velocidad de giro del rotor se selecciona, de forma automática o manual, la velocidad de avance de la máquina más adecuada para el óptimo funcionamiento del motor, lo cual determinará el rendimiento.

Profundidad de mezcla

En función del tipo de suelo y su estado, los equipos disponibles en la actualidad pueden llegar a profundidades de mezcla superiores a los 400 mm, con motores de entre 300 kW y 500 kW.

Estos espesores se sitúan en el límite de la capacidad de compactación de los compactadores habituales para suelos granulares, y muy por encima en el caso de suelos arcillosos.

Regulación de la posición relativa del rotor y la cámara en función del espesor a tratar

Mediante esta posibilidad se consigue regular el volumen de la cámara de mezcla adaptándolo a la profundidad del tratamiento, y por lo tanto al volumen de material tratado.

Potencia neta por unidad de ancho disponible en el rotor (kW/m)

Una vez seleccionada la velocidad de giro del rotor, la velocidad de avance de la máquina estará determinada por la potencia disponible. A mayor potencia por tanto, mayor rendimiento.

Características de las compuertas de la cámara de mezcla

Las cámaras de mezcla están dotadas de una o dos compuertas de apertura regulable manualmente o hidráulicamente (fig. 5.24). 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. Puede incorporar un elemento alisador que mejora el acabado (fig. 5.25).

Algunos equipos incorporan también una compuerta delantera de apertura regulable. La posibilidad de regular el ángulo de apertura de la compuerta delantera permite variar las condiciones de mezclado y pulverización del suelo y la cal o el cemento. Cuando ambas compuertas son regulables, es posible trabajar en ambos sentidos de desplazamiento.

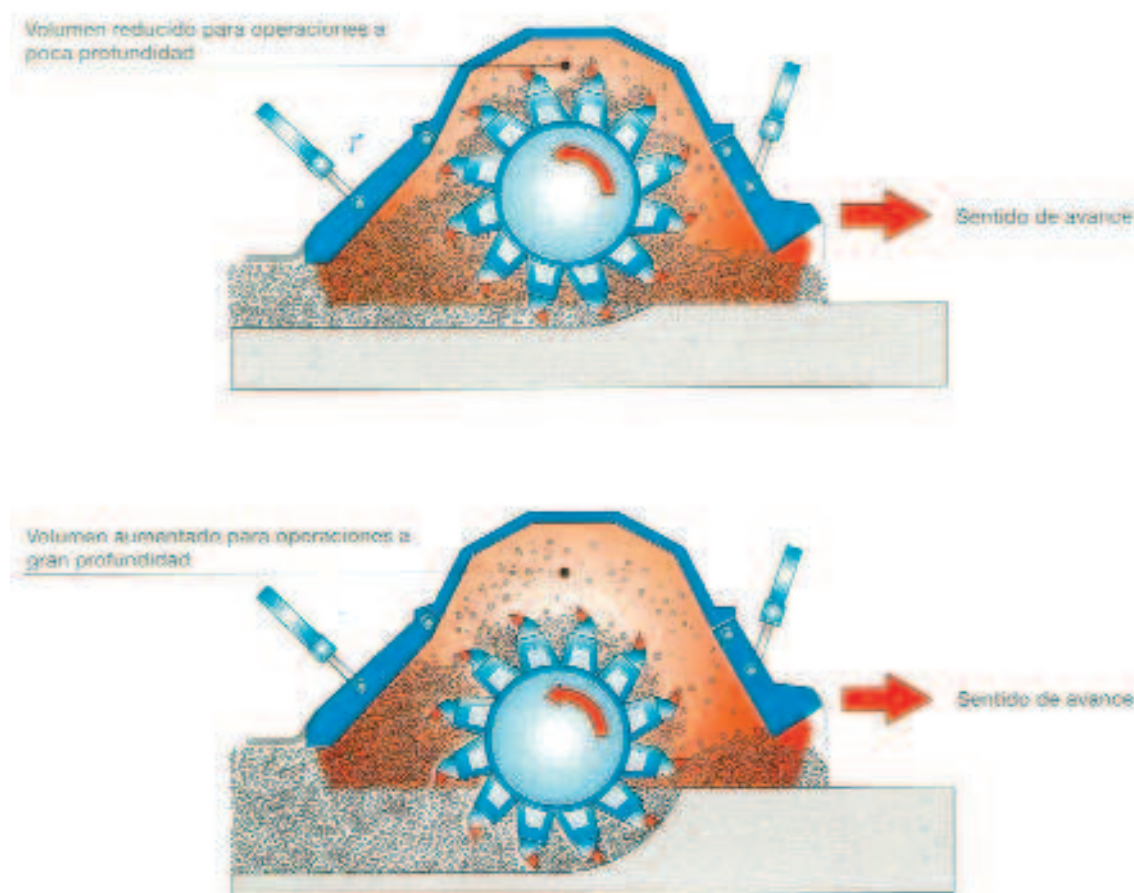


Figura 5.24 Regulación de la posición relativa del rotor y la cámara



Figura 5.25 Compuerta trasera alisadora

5.5.2.4. Características del sistema dosificador de aditivos líquidos

Algunos equipos disponen de un sistema dosificador de aditivos líquidos, agua, lechada de cal o cemento, etc. Consisten, en general, en un sistema de bombeo que envía el líquido a una barra con difusores situada en la cámara de mezcla. Normalmente incorpora un caudalímetro para regulación del caudal que, además, está ligado a la velocidad de avance del equipo. El equipo está gobernado por un microprocesador que el operador programa desde la cabina. Este sistema puede tener diferentes características en función del equipo y del fabricante.

Es importante conocer la capacidad máxima y mínima de dosificación del sistema, así como los tipos de líquidos utilizables. También es conveniente que el sistema de parada de la dosificación esté ligado al de la máquina, para garantizar la cantidad correcta de líquido en cualquier punto.

Características del sistema de control del espesor

Los equipos modernos incorporan sistemas de regulación y control manual y automático del espesor tratado, así como de la pendiente transversal del rotor. La referencia para el control de espesores puede ser externa mediante palpador mecánico, ultrasonidos o láser, o puede ser un elemento de la propia máquina. En este caso interesa que sean las patas que circulan sobre la capa sin estabilizar y por lo tanto menos deformada.

El sistema debe ser regulable desde la cabina. Es interesante también que disponga de registro de espesores.

Sistema de regulación de esfuerzos

El esfuerzo aplicado por el equipo para la disgregación y mezcla del suelo con la cal o el cemento debe adaptarse a las características del suelo y a la profundidad del tratamiento. Esta adaptación se produce:

- por variación de la velocidad de giro del rotor. En general, todos los equipos disponen de varias velocidades de trabajo
- por variación progresiva de la velocidad de traslación
- cambiando el útil de trabajo.

Así mismo, cuando se produce una sobrecarga de rotor, para que las cargas de choque no se transmitan a través del eje motor, es necesario disponer sistemas de limitación de estos esfuerzos, que varían en función del fabricante.

Sistemas de ayuda al operador

Una característica importante de este tipo de equipos 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.

Características mecánicas más importantes de los equipos de mezcla in situ

A la hora de seleccionar entre los diferentes equipos disponibles, es importante tener en cuenta las siguientes características:

- dimensiones para el transporte
- dimensiones de trabajo
- maniobrabilidad en lugares reducidos y terrenos blandos
- distancia mínima a obstáculos longitudinales, que vendrá gobernada por la distancia entre el lado exterior del neumático y el extremo del útil de mezcla
- peso
- características del motor, especialmente la potencia
- características y tipo de neumáticos
- tipo de transmisión, que puede ser mecánica o hidráulica
- características de la dirección (reversible, articulada, etc.)
- características de la tracción, que puede ser a dos ruedas, a las cuatro ruedas, o disponer de ambas posibilidades para adaptarse en cada caso al terreno.

Equipos de mezcla in situ con sistema integrado de dosificación y distribución del conglomerante

Para evitar la formación de polvo y las pérdidas de conglomerante, se han desarrollado equipos de mezclado que permiten evitar la necesidad de distribuirlo sobre el suelo. Para ello integran justo delante de la cámara de mezclado un sistema formado por tolva y dosificador alveolar que posibilita la distribución de la cal o el cemento. El sistema funciona completamente aislado del exterior por lo que no es posible la emisión de polvo al medio ambiente, excepto posiblemente durante la carga de conglomerante.

El equipo incorpora un depósito para el material pulverulento, el cual lógicamente es de poca capacidad. La dosificación es controlada por ordenador y ajustada a la

velocidad de avance del equipo. Para mejorar el rendimiento de la operación reduciendo las paradas para la recarga de conglomerante, se acopla al equipo de mezclado una cisterna de cal o cemento de gran capacidad.

5.6. Compactación

No hay ningún tipo de compactador que se adapte a todas las circunstancias posibles. Los criterios de selección del equipo a emplear dependen de muchos factores, pero el más importante es el tipo de material a compactar y su estado en el momento de la compactación.

Una vez seleccionado el mejor compactador para un suelo y condiciones determinadas, será fundamental operarlo correctamente con objeto de obtener una compactación óptima. Los factores más importantes a tener en cuenta son la velocidad del compactador, el espesor de la capa y el número de pasadas.

Cuando se trate de materiales tratados con cemento, no se debe olvidar que la compactación debe finalizar durante el plazo de trabajabilidad disponible, que puede ser relativamente corto.

Para la compactación de los materiales tratados con cemento o cal se emplean en general uno, o la combinación de algunos, de los siguientes tipos de compactadores:

- rodillo estático tipo pata de cabra
- rodillo vibratorio liso
- rodillo vibratorio tipo pata de cabra
- Compactador de neumáticos.

Además de estos compactadores, se pueden utilizar en superficies de difícil acceso otros como pisones, bandejas vibrantes, bandejas vibrantes reversibles o rodillos vibratorios pequeños.

5.6.1 Rodillo estático tipo pata de cabra

Bajo la denominación de pata de cabra se incluyen normalmente los rodillos pata de cabra propiamente dichos y todos aquellos en los cuales el rodillo o los rodillos presentan protuberancias y que están especialmente indicados para la compactación de suelos cohesivos relativamente secos y con un alto contenido de finos limosos o arcillosos. Son por tanto aplicables a la compactación de suelos mejorados o estabilizados con cal. En función de la forma de las protuberancias, hay diferencias importantes entre unos y otros.

En los rodillos pata de cabra propiamente dichos, las protuberancias son cilíndricas o troncocónicas y alargadas, del orden de los 20 cm, y su diámetro oscila entre los 7 y los 12 cm. Los cilindros son huecos, de forma que puedan lastrarse con arena o agua.



Figura 5.26 Rodillo pata de cabra remolcado

Las patas de cabra penetran a través de la capa superior y compactan la capa inferior, ejerciendo una presión que varía en torno a los 1,0 y 2,0 MPa, y que puede llegar a 3,0 MPa con lastre de agua y a 4,0 MPa con lastre de arena. El efecto de las patas de cabra es una compactación por presión y amasado de abajo hacia arriba, en la que la parte superior de una capa queda suelta al salir las patas y sólo se compacta una vez colocada la capa siguiente. Esto supone una limitación en zonas lluviosas, en las cuales se precisa otra maquina para sellar la superficie.

En función de la humedad, son suficientes del orden de 6 a 10 pasadas simples para compactar tongadas de 20 cm (el espesor de la tongada no debe superar la altura de las patas). La velocidad de trabajo recomendable es de 6 a 10 km/h.

☞ *Los rodillos pata de cabra nunca deben utilizarse como mezcladoras.*

Otros rodillos más usados actualmente y similares a los pata de cabra son aquellos que constan de 4 rodillos, una pareja delante y otra atrás, en los cuales las protuberancias tienen forma de paralelepípedo u óvalo estrecho (fig. 5.27), con una base inferior en contacto con el rodillo de área aproximadamente un 15 % superior a la base que contacta con el suelo (tamping foot o pieds dameurs).

Esta forma de las protuberancias permite, al contrario que en el caso anterior, que la parte superior de la capa también quede compactada, relativamente lisa y sellada.

Estas maquinas trabajan a velocidades del orden de los 24 a 32 km/h, lo cual hace que además de esfuerzos de presión y amasado tengan también un efecto de vibración e impacto, que incrementa su productividad.



Figura 5.27 Rodillo tipo tamping foot con cuchilla de empuje

Los rodillos con una carga estática lineal de entre 4.000 y 6.000 kg/m precisan del orden de 4 pasadas simples de cada pareja de rodillos para compactar capas del orden de 20 cm de suelos cohesivos, siempre que el material esté seco. Si el material está húmedo el número de pasadas sube a más de 12 con espesores de capa no mayores de 15 cm. El rendimiento se reduce, por lo tanto, considerablemente.

Los compactadores con más de 6.000 kg/m por rodillo pueden compactar capas de hasta 30 cm con unas 5 pasadas simples de cada pareja de rodillos si el material está seco. Si el material está húmedo el espesor se reduce a 20 cm y las pasadas aumentan hasta más de 12.

Para desarrollar completamente su capacidad de producción estos equipos precisan de espacio suficiente para alcanzar las altas velocidades a las que trabajan, por lo que solamente están indicados para grandes superficies, puesto que son máquinas relativamente caras.

5.6.2 Rodillo vibratorio liso

Para la compactación de suelos tratados con cal o cemento se emplean habitualmente los equipos propios del movimiento de tierras, es decir, compactadores autopropulsados con un único rodillo vibratorio en su parte delantera. Son compactadores especialmente indicados para suelos granulares y arenosos, siendo también efectivos con suelos que tengan un pequeño porcentaje de finos arcillosos.

Pueden emplearse también, especialmente en explanadas, rodillos tándem del tipo utilizado en capas de firmes.

Los rodillos vibratorios lisos (fig. 5.28 y 5.29) generan tres tipos de esfuerzos de compactación: presión, impacto y vibración. Las densidades alcanzadas son función de la frecuencia y amplitud de la vibración, de la carga lineal estática en la generatriz de los rodillos, de la fuerza centrífuga ejercida y de la velocidad de trabajo.



Figura 5.28 Rodillo vibratorio liso monocilindro

La fuerza centrífuga depende de la masa excentrica en el rodillo, de su distancia al centro y de la velocidad de giro.

La velocidad es importante porque determina el tiempo durante el cual se produce la compactación y, por lo tanto el número de golpes

por unidad de longitud. Para estas máquinas se consideran adecuadas velocidades en torno a los 3 km/h. Cuanto más reducida sea la frecuencia de vibración, menor deberá ser la velocidad.

Al menos en las primeras pasadas, es conveniente trabajar con la amplitud alta, lo cual significa una mayor aportación de energía

En la Tabla 5.2 se han incluido las principales características de algunos rodillos vibratorios.

Tabla 5.2 Características de algunos rodillos vibrantes lisos

Peso (kg)		Ancho (m)	Carga lineal estática (kg/m)	Frecuencia en alta/baja (Hz)	Amplitud alta/baja (mm)	Fuerza centrífuga alta/baja (kN)
Total máximo	En el rodillo					
5.000	1.850	1,365	1.355	32	1,3	59
14.000	5.600	2,130	2.629	33	1,7/0,8	246/119
14.200	7.000	2,130	3.286	33	1,6/0,8	300/146
18.600	12.200	2,130	5.728	29/33	1,8/1,1	300/238
19.000	12.700	2,130	5.962	29/31	1,8/1,2	317/231

Para materiales granulares con tamaños máximos menores de 80 mm, que son los más habituales en los tratamientos con cemento o cal compactados con este tipo de máquinas, el espesor de las capas a tratar y el número de pasadas debe seleccionarse en función de la carga estática en el rodillo.

Los equipos más modernos incluyen sistemas automáticos de control del grado de compactación en función del grado de rigidez de la capa, que además pueden ajustar automáticamente la frecuencia y amplitud de trabajo.



Figura 5.29 Rodillos vibratorios tándem

Tabla 5.3 Espesores de capas máximas y número de pasadas recomendados en función de la carga estática del rodillo

Carga estática lineal en el rodillo (kg/m)		Espesor de capa (cm)	Número de pasadas dobles
Mínimo	Máximo		
270	450	150	8-16
450	700	150	6-12
700	1.300	150	4-6
1.300	1.800	200	6-10
1.800	2.300	225	6-12
2.300	2.900	250	6-10
2.900	3.600	275	4-8
3.600	4.300	300	4-8
4.300	5.000	300	4-6
más de 5.000		300	2-4

5.6.3 Rodillo vibratorio pata de cabra

Este tipo de compactadores también recibe el nombre de pata de cabra, aunque de nuevo hay que insistir que no son rodillos pata de cabra propiamente dichos. Se trata compactadores similares a los vibratorios lisos, con la diferencia de que el rodillo presenta protuberancias en forma de almohadilla de unos 10 - 15 cm de altura, en número y sección adaptados al peso del rodillo (fig. 5.30), lo cual permite extender su campo de acción a los suelos cohesivos, aumentando la presión de contacto y reduciendo los esfuerzos tangenciales.

En general, los rodillos lisos vibratorios para movimiento de tierras cuentan con un rodillo equivalente o incluso un cilindro opcional de este tipo, lo que permite su utilización en la compactación de suelos más cohesivos.



Figura 5.30 Rodillo vibratorio tipo pata de cabra

5.6.4 Compactador de neumáticos

Aunque son más habituales en los trabajos de compactación de mezclas bituminosas, se trata de compactadores muy adecuados para suelos con finos relativamente cohesivos y húmedos, y que pueden utilizarse también en todo tipo de suelos (fig. 5.31). Se emplean asimismo para realizar un sellado superficial.

Estos compactadores disponen de un compartimento para lastre, lo cual hace posible modificar la masa por rueda. En general permiten también variar la presión de inflado de los neumáticos, cuyo número es de 7 a 9.

Las dos características más importantes de estos compactadores son la masa por rueda, que generalmente es de 3000 kg, llegando a 5000 kg en los modelos más grandes (siempre con lastre máximo), y la presión de inflado, que debe ser superior a 0,7 MPa.

Un compactador de 3.000 a 5.000 kg de masa por rueda necesitará entre 4 y 10 pasadas dobles para compactar una capa de 12-15 cm de material cohesivo húmedo. El pequeño espesor de la capa que puede trabajar limita su utilización en grandes terraplenes.

Con materiales con contenidos de humedad menores puede incrementarse el espesor de la capa y reducirse el número de pasadas de forma significativa.



Figura 5.31 Compactador de neumáticos

5.7 Refino de la superficie

Los diferentes tratamientos provocan en mayor o menor medida un esponjamiento del suelo y deformaciones puntuales de la rasante, por lo que, en general, es preciso proceder a un rasanteo o refino final, que se realiza con motoniveladora.

En el caso de la estabilización de suelos para explanadas, es preciso obtener una rasante final con tolerancias muy estrictas. Cuando se usa cemento, se debe refinar en un tiempo muy corto.

En estas circunstancias es necesario utilizar sistemas que permitan obtener buenos resultados en poco tiempo, como son los sistemas de guiado 3D (3 dimensiones) o, para superficies planas, el láser.

En el sistema 3D (fig. 5.32), una estación total robotizada queda enfocada permanentemente, y sigue al receptor, que va montado en la motoniveladora y unido solidariamente a la hoja de corte. Por lo tanto, se dispone de información en tiempo real de las coordenadas XYZ del prisma, y en consecuencia, de la altura de la cuchilla con respecto a la superficie de diseño requerida en cada punto. El sistema deduce también la dirección de avance de la máquina.

Esta información es transmitida por la estación total a un ordenador en el cual se ha introducido un modelo digital de la obra. En este ordenador se instala el software que gestiona la información que le llega de la estación total para co-



Figura 5.32 Estación total robotizada y prisma activo del sistema 3D

nocer la situación del receptor y envía a través de la misma a la máquina los datos necesarios para la corrección de la situación de la cuchilla.

Un sistema de control automático instalado en la motoniveladora (fig. 5.33) se encarga de conocer la posición relativa de la cuchilla con respecto a la máquina y de trasladar las instrucciones recibidas para materializar la posición requerida y la pendiente transversal adecuada.

Hay actualmente dos técnicas diferenciadas, dependiendo de que el sistema de comunicación esté basado en un haz láser, que también se usa para reconocer la coordenada “Z” del sensor, o que se haga mediante ondas hertzianas (radio).

Estos sistemas permiten materializar cualquier tipo de superficie de la que se pueda obtener un modelo informático, mejorando la calidad y homogeneidad del resultado final del trabajo. La nivelación por perfil se sustituye por una nivelación en continuo ya que la cota del terreno está definida en todos los puntos de la superficie a nivelar.

Se debe tener en cuenta que la máxima distancia de trabajo entre la estación total y la máquina es de 300 a 400 m. A partir de esta distancia la calidad puede verse mermada. Las condiciones ambientales adversas como lluvia, niebla, polvo, etc., reducen también en gran medida el alcance del sistema.

Por su parte, el sistema láser (fig. 5.34) es adecuado para atender una amplia variedad de aplicaciones, como edificios y plataformas de construcción, aeropuertos, aparcamientos, presas y canales. La condición básica para su aplicación es que se trate de una superficie plana: puede tener pendiente en una o dos direcciones, pero deben ser constantes en el área donde se prevé usar este control.

El equipo fijo consiste en un láser giratorio que define un plano virtual, dotado de nivelación automática y ajustable en inclinación. En la motoniveladora se montan dos mástiles con sensores móviles a ambos lados de la cuchilla, que indican al sis-



Figura 5.33 Motoniveladora guiada por sistema 3D

tema de control de la máquina si la hoja está cortando alto, bajo, o a cota, corrigiendo continuamente los errores.

Con el equipo láser se obtienen precisiones teóricas del plano de referencia de 2,5 mm a 50 m, con un alcance efectivo de 350 m.

Se dispone asimismo de un comprobador manual, montado sobre una mira topográfica telescópica, que sirve tanto para la calibración previa de la máquina como para comprobar inmediatamente el resultado del refino.



Figura 5.34 Equipo de nivelación láser

Con ambos sistemas, 3D y láser, la niebla y el polvo son un inconveniente, pero se puede trabajar con ellos durante la noche.

5.8 Curado y protección

Cuando se ejecute una mejora de suelos en capas sucesivas, una vez estabilizada una capa se puede extender rápidamente la capa subsiguiente, con un adecuado grado de humedad, que evite la pérdida de agua en la capa ya estabilizada.

En las explanadas, una vez finalizado el proceso se debe mantener un periodo de curado, sin tráfico, que variará de 3 a 7 días en función del tratamiento.

Normalmente será suficiente un riego ligero con agua que mantenga la superficie húmeda, acompañado de una pasada de rodillo liso sin vibrar para sellar la superficie. En el caso de explanadas estabilizadas con cemento, o si se prevén largos periodos antes de proceder a la construcción del firme, es conveniente realizar un riego con emulsión asfáltica (fig. 5.35). Para ello se emplearán preferentemente camiones regadores dotados de rampa de riego de altura y ancho ajustables y sistema de control automático de la dotación.

El riego con emulsión puede ir acompañado de la extensión de una arena limpia o una gravilla con objeto de permitir el tráfico de obra sobre la superficie del material tratado. Esta operación puede realizarse con gravilladoras autopropulsadas o acopladas a la caja del camión.

5.9 Tratamiento en central

Aunque no es el procedimiento habitual, en alguna obra concreta puede resultar conveniente la ejecución del tratamiento del suelo en central. En ese caso, los equipos necesarios para la mezcla en central, el transporte del material al tajo y su colocación, son los mismos que los empleados para las capas tratadas con cemento del firme:

- central de fabricación, en general de tipo continuo



Figura 5.35 Riego de curado con emulsión

- transporte mediante camiones volquete
- extendido con extendedora de asfalto o con motoniveladora.

La maquinaria de compactación y de curado y protección son la misma en ambos casos.

5.9.1 Centrales de fabricación

Con las centrales de fabricación (fig. 5.36 y 5.37) empleadas para la mezcla del suelo, el agua, el conglomerante y, eventualmente, aditivos, pueden alcanzarse en general producciones elevadas (> 300 t/h). Suelen ser plantas de fácil

montaje y desmontaje, con pocas necesidades de cimentación y de transporte sencillo. Constan, al menos, de los siguientes elementos:

- tolvas para alimentación del suelo y sistemas de dosificación del mismo, ponderales o volumétricos
- silos para el almacenamiento del conglomerante, verticales u horizontales, con sistemas de dosificación ponderal del mismo
- depósitos de agua, con dosificación volumétrica
- mezclador continuo de doble eje horizontal
- tolva de regulación para evitar paradas entre camiones



Figura 5.36 Planta de mezcla de 600 t/h con tres tolvas dosificadoras y tolva de regulación

- cintas para el transporte del suelo y de la mezcla
- grupo electrógeno o conexión a la red, incluyendo centro de transformación
- cabina de control con sistemas informáticos que permiten controlar todo el proceso de manera automática, continua y en tiempo real.

Para la alimentación del suelo a la planta y la formación y cuidado del acopio es necesario disponer de palas cargadoras sobre ruedas de capacidad adecuada al rendimiento de la misma.

Las centrales de fabricación deben situarse en zonas próximas a la obra cuya superficie sea suficiente para la disposición del acopio de suelo y la maniobra de los elementos de carga y transporte.

5.9.2 Transporte

Cuando se fabrica la mezcla de suelo, agua y conglomerante en central, las operaciones de transporte del material al tajo de extendido y su puesta en obra son también diferentes. El transporte se realiza en camiones o semirremolques basculantes (fig. 5.38). Es también posible utilizar camiones extraviales si las características de la obra lo permiten.

5.9.3 Extendido

El extendido del material se puede realizar con motoniveladora o con extendedoras similares a las empleadas para la colocación de mezclas bituminosas (fig. 5.38), aunque en este caso deben estar preparadas para manejar espesores importantes.

En el caso de emplear motoniveladoras, es conveniente recurrir a sistemas 3D como los descritos anteriormente para el refino de la capa, especialmente con suelos estabilizados con cemento.



Figura 5.37 Planta móvil de 400 t/h, sin tolva de regulación, cargando un vehículo extravial



Figura 5.38 Transporte del material estabilizado en camiones basculantes y colocación con extendedoras en paralelo

EJECUCIÓN DE LAS OBRAS

6

6.1 Planteamiento general

6.1.1. *Tratamiento de suelos en terraplenes y fondos de desmonte*

En cualquier obra que requiera grandes explanaciones es conveniente optimizar el movimiento de tierras desde los puntos de vista técnico, económico y medioambiental.

Los tratamientos de suelos con cal o con cemento permiten el máximo aprovechamiento de todos los materiales, minimizan el movimiento de tierras, y, además, hacen posible trabajar en condiciones climatológicas adversas.

Las capas estabilizadas presentan un mejor comportamiento durante su vida útil debido a su mayor capacidad de soporte y a su menor susceptibilidad al agua, pudiendo emplearse en cualquier parte de la infraestructura (fondos de desmonte, rellenos y coronación del terraplén) y del firme (bases y subbases).

Cualquiera de los tipos de suelos definidos en el artículo 330 del PG-3 puede ser tratado o estabilizado con el objeto de mejorar sus características geotécnicas y resistentes, siendo obligatorio en el caso de querer emplear suelos marginales.

Ahora bien, es muy importante considerar que una vez que a un suelo se le aplica un tratamiento con cal o con cemento, la clasificación y los parámetros del artículo 330 no son de aplicación, obteniéndose unos materiales distintos a los suelos naturales.

6.1.2 *Estabilización de las capas de apoyo del firme*

Los suelos a emplear en el cimiento del firme están más cerca de las cargas del tráfico, y por ello las exigencias técnicas son muy superiores a las correspondientes a los suelos empleados en los terraplenes y los fondos de desmonte.

 *El cimientto juega un papel relevante, que en situaciones adversas y en combinación con el agua, puede conllevar incluso la ruina del firme, al menos de forma local.*

Las capas superiores del cimientto, o capas de asiento del firme, tienen por ello la mayor responsabilidad en el trabajo conjunto de la estructura firme-cimientto, por lo que con frecuencia están formadas por capas de suelos de aportación o por la estabilización de los existentes. Estas capas constituyen la coronación sobre el núcleo de los terraplenes y el fondo de los desmontes.

Con la estabilización, además del objetivo de lograr un material menos sensible al efecto del agua y mucho más homogéneo que permita el paso del tráfico de obra, se obtiene una buena plataforma de apoyo que colabora estructuralmente con el firme y, en general, una mejora de la durabilidad de todo el firme, con un suelo con una mayor resistencia a la deformación bajo cargas que aporta la capacidad de soporte necesaria para permitir una mejor compactación de las capas del firme y la correcta nivelación de las mismas.

Como ya se ha comentado en otros capítulos, según los requerimientos exigidos a la explanada y el porcentaje y tipo de conglomerante, se diferenciará entre explanadas de suelos mejorados (S-EST1 y S-EST2 de la Norma 6.1-IC del Ministerio de Fomento) o explanadas de suelos estabilizados (S-EST3), cuyas características se exponen en el capítulo 9.

Si en los suelos mejorados el conglomerante modifica las características del suelo de forma moderada permitiendo utilizar incluso suelos marginales, en los suelos estabilizados se logra en cambio una resistencia y rigidez apreciables. En el caso de suelos estabilizados S-EST 3 el conglomerante a emplear debe ser cemento, aunque en ocasiones puede ser conveniente una estabilización mixta, primero con cal para mejorar las características del suelo y después con cemento.

La contribución estructural de una capa estabilizada como apoyo del firme es notable, y a ello se debe su creciente uso en explanadas de infraestructuras bajo todo tipo de tráfico. Debido a ello, su empleo como suelo estabilizado S-EST 3 es necesario, según la normativa del Ministerio de Fomento, para obtener una explanada E3.

En la estabilización de un suelo, la mezcla del mismo con el conglomerante puede realizarse in situ o en central. Este último proceso es similar al de otras unidades de obra como el suelocemento y sólo suele realizarse cuando se aprovecha una planta instalada para dicho material, pues éste resulta más caro.

Dado que suele tratarse de un caso excepcional y se asemeja a la fabricación del suelocemento, en el presente capítulo sólo se expondrá la estabilización in situ, pudiéndose consultar en el “Manual de firmes con capas tratadas con cemento” (IECA– CEDEX, 2003) aquellos aspectos relacionados con la fabricación en central.

En el caso de suelos cohesivos, el mezclado en central no es aconsejable debido a la escasa eficacia de los mezcladores de paletas con este tipo de suelos.

6.1.3. Etapas

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.

☞ *La incorporación del conglomerante se puede hacer por vía seca o por vía húmeda. En el primer caso, el conglomerante se extiende en polvo y el agua se puede extender directamente o incorporar a la estabilizadora, mientras que en el caso de la vía húmeda, se prepara una lechada de agua y conglomerante que se inyecta directamente en la cámara de mezclado.*

A este respecto, conviene precisar que no debe entenderse como vía húmeda la introducción del agua en la cámara de mezclado de la estabilizadora, ya que en ningún momento se forma una lechada de agua y conglomerante, si bien este procedimiento puede tener ventajas.

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, estado hídrico del mismo, configuración y tamaño de la obra, condiciones del tráfico local o de obra, etc.

Una de las ventajas del empleo del conglomerante en forma de lechada (fig. 6.1)



Figura 6.1 Estabilización por vía húmeda

es que todas las partículas del mismo están hidratadas antes de mezclarse con el suelo, con lo que se consigue un empleo óptimo del mismo, evitándose los riesgos de dispersión del material por el viento.

No obstante, en muchos casos no es posible el empleo de la vía húmeda como, por ejemplo, cuando la humedad del suelo es superior a la óptima de compactación.

6.1.4 Consideraciones prácticas

Resulta obvio que carece de sentido realizar la mezcla de un suelo con exceso de humedad con el conglomerante (cal o cemento) en forma de lechada, pues la humedad resultante hará imposible su correcta compactación. En estos casos la única forma de ejecutar el tratamiento deberá ser por vía seca.

En el caso de extender el conglomerante por vía seca (fig. 6.2), es muy importante que exista una buena sincronización entre todos los equipos, de tal manera que la longitud del tramo con cemento o cal extendidos por delante del equipo de mezclado sea lo más reducida posible con el fin de evitar pérdidas de conglomerante provocadas por el viento y, sobre todo, las molestias que ello origina tanto para el personal de obra como por las pequeñas afecciones que puede originar en el entorno.

En las obras donde se considere conveniente la ejecución por vía húmeda, conviene tener la vía seca como alternativa durante las épocas en las que la climatología sea desfavorable. De esta forma, la ejecución podrá seguir durante estos días.

En el caso de estabilizar con cal, desde el punto de vista logístico y económico, suele ser más interesante para la obra el empleo de cal viva (y por lo tanto, de

ejecución mediante vía seca), debido a que se necesita un menor porcentaje de cal y, además, la cal viva tiene una densidad mucho mayor ($0,9 \text{ t/m}^3$) que la cal apagada ($0,4 \text{ t/m}^3$) lo que permite abaratar los costes de transporte a obra.



Figura 6.2 Distribución de conglomerante por vía seca

6.2 Secado de suelos

6.2.1 Introducción

Es frecuente en obra que por las condiciones meteorológicas los suelos presenten humedades naturales excesivas, siendo muy complicada su compactación hasta la densidad requerida y dificultando además la circulación y operaciones de la maquinaria. En zonas con climas rigurosos también puede ocurrir que los suelos estén congelados.



Figura 6.3 Secado de suelo húmedo con cal viva y plataforma terminada

La solución habitual de voltear y orear los materiales requiere unas condiciones ambientales favorables, que con frecuencia son imposibles de predecir y controlar, retrasando e, incluso, deteniendo los trabajos de movimiento de tierras y explanaciones. Por ello la solución apropiada es el secado mediante la aportación y mezclado de cal viva (fig. 6.3).

En el caso de suelos arcillosos, un tratamiento con cal los mejora, haciéndolos más transitables y manejables, de manera que incluso una ligera lluvia posterior no les afecta de la misma manera que antes de emplear la cal.

Si los suelos tienen poca arcilla, el empleo de la cal no produce ninguna mejora intrínseca en el terreno, por lo que el efecto de secado sólo es para reducir el contenido de agua que el terreno contenga.

En todos estos casos, la ejecución debe ser por vía seca, siendo lo más adecuado emplear cal viva.

☞ *El tratamiento de secado con cal viva es aplicable a cualquier tipo de suelo, sea cual fuere su granulometría, pues, en estos casos, no se busca modificar sus características sino reducir su humedad.*

La dotación de cal viva necesaria para reducir la humedad del suelo debe ajustarse al comienzo de cada jornada de trabajo, dado que puede cambiar cada día. Es importante también controlar el tratamiento para no llegar a secar demasiado el suelo. Desde el punto de vista de la seguridad y salud de los trabajadores, el empleo de la cal viva requiere prudencia y experiencia, por lo que es conveniente contar con personal cualificado y seguir sus instrucciones.

La acción combinada de los tres factores: adición de producto seco, hidratación de la cal viva y evaporación de agua por el calor generado, es la que produce el secado del suelo. Éste comienza inmediatamente, tras la extensión de la cal y su mezclado

con el suelo, y se prolonga durante un período comprendido entre 1 y 4 horas. La duración del mismo depende de múltiples factores: climatología, método de ejecución, tipo de suelo, etc.

☞ *La modificación química que sufre el suelo tratado con cal hace que su curva Proctor se desplace ligeramente a la derecha y hacia abajo, teniendo por lo tanto el suelo estabilizado una humedad óptima algo superior a la del suelo sin tratar y una densidad algo menor, lo que facilita su compactación en obra.*

En el caso de suelos plásticos con humedad excesiva, mediante el tratamiento con cal viva no sólo se busca su secado, sino también reducir dicha plasticidad para su puesta en obra y reducir su sensibilidad al agua.

En tal caso son estos objetivos los que determinan la dosificación a emplear, pudiendo ser necesaria, en ocasiones, la aportación de agua a suelos que, originalmente, tenían humedades excesivas si el porcentaje de cal viva a emplear es mayor que el estrictamente necesario para ajustar la humedad.

6.2.2 Técnicas de ejecución

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.

☞ *De nada sirve secar una capa mediante la adición y mezclado con cal, si no se deja bien compactada y cerrada, o cubierta por la siguiente capa, y con la necesaria regularidad superficial y pendiente transversal para impedir la entrada o acumulación de agua.*



Figura 6.4 Estabilización de una plataforma portuaria

El efecto de secado no es permanente, por lo que de no hacerlo así, en el caso de que vuelva a llover, se corre el riesgo de tener que volver a secar la misma capa, repitiendo el proceso antes descrito varias veces.

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 agua.

En caso contrario, cualquier punto de acumulación de agua puede reblandecer el terreno y, al ser sometido al tráfico de obra, originar roderas receptoras de agua que facilitan su introducción en la plataforma.

Este efecto se multiplica si en lugar de una carretera o una obra de ferrocarril, lo que se construye es un aparcamiento, una plataforma portuaria (fig. 6.4) o la pista de un aeropuerto, en las que las explanaciones son más anchas y es más difícil su desagüe.

Dependiendo de las pendientes transversal y longitudinal, la distancia recorrida por el agua hasta encontrar salida puede ir desde unos pocos metros, en el caso de una carretera convencional, hasta unas decenas de metros en grandes plataformas.

Es conveniente diseñar y construir un sistema de desagüe y drenaje específico para cada fase de la obra. Los sumideros de agua que se proyectan pensando en la obra ya terminada con frecuencia no están contruidos, o bien se tapan para evitar obstrucciones por los arrastres de finos con el agua de lluvia. Incluso las cunetas no están muchas veces contruidas o reperfiladas hasta el final de la obra.

Duración del proceso

La cal viva, cuando se emplea como conglomerante para el secado de suelos, lo hace mediante tres efectos diferentes tal y como se ha explicado anteriormente: aporte de producto seco, reacción de hidratación de la cal, y evaporación por dicha reacción exotérmica.

Mientras que los dos primeros efectos se producen de forma casi inmediata e independiente de los factores exteriores, el tercero, la evaporación de agua, sí depende de las condiciones ambientales, temperatura ambiente y, sobre todo, de la humedad relativa del entorno, de manera que a mayor temperatura y menor humedad relativa, mejor efecto de secado.

Este efecto no es inmediato. Comienza unos cinco minutos después de mezclar la cal con el suelo y puede prolongarse durante un periodo comprendido entre 1 y 4 horas. Es conveniente dejar esponjada la masa de suelo mezclada con la cal, sin compactar, al menos durante ese plazo para conseguir un secado óptimo. Por ello, controlar y conocer el mismo ayudará a optimizar el empleo de la cal, de tal forma que, pasado este tiempo, se pueda continuar con la ejecución de la capa tratada.

Para estimar este período pueden llevarse a cabo directamente en el tajo medidas de la humedad, una vez realizada la mezcla, cada 30 minutos o 1 hora, para ver cuándo se ha conseguido el secado esperado. Por el carácter exógeno de la reacción del agua con la cal viva, también, puede correlacionarse esta humedad con la temperatura del suelo, consiguiendo así un método de control más inmediato para ajustar la dosificación día a día.

Ejecución

Para que la cal viva pueda actuar de forma eficiente, el procedimiento constructivo debe asegurar el extendido de la misma y su mezclado con el suelo con precisión suficiente en todo el ancho y espesor de las capas a tratar.

Cuando se trabaje con materiales de préstamo, para aprovechar el efecto de evaporación del agua lo mejor posible, es recomendable llevar a cabo la ejecución del tratamiento antes del extendido en zonas soleadas y aireadas, así como voltear y remover el material, una vez mezclado con la cal, lo máximo posible, antes de colocarlo.

6.3 Tratamiento y estabilización de los suelos en la construcción de terraplenes y fondos de desmonte

6.3.1 Introducción

El tratamiento de los suelos con cal o cemento puede aplicarse en la totalidad del terraplén, tongada a tongada, o bien en determinadas zonas o capas en las que interesa mejorar sus características (por ejemplo, en los espaldones y núcleo para impermeabilizar).

Las razones para emplear estos tratamientos dependen de cada situación: altura de los terraplenes (fig. 6.5), taludes menos tendidos, aprovechamiento de los suelos disponibles, impermeabilización del núcleo, zonas de la infraestructura sometidas a condiciones de riesgo (como zonas inundables), condiciones climáticas extremas, tráficos especialmente agresivos, etc. Así es posible recurrir a un diseño de terraplenes "encapsulados", o estructuras tipo sandwich, en el que se intercalan capas de suelo tratado con otras de suelo sin tratar.

En cualquier caso, la estabilización de todas o alguna de las capas de la infraestructura no exime de establecer los sistemas necesarios para un correcto drenaje y desagüe de la misma. Las capas tratadas con cal o cemento mejoran sus características frente al agua pero, como cualquier material, cuando permanecen inundadas disminuye su capacidad de soporte.

 *Es importante tener en cuenta que los suelos no pueden estabilizarse adecuadamente si en ellos se encuentran elementos de tamaño superior a 10 cm, puesto que dificultan mucho el mezclado y producen averías en los equipos de estabilización.*

6.3.2 Técnicas de ejecución

Construcción de terraplenes. Organización de la obra.

En los terraplenes que se tratan parcial o totalmente, la estabilización es una unidad de obra que ha de coordinarse con el movimiento de tierras, ya que la secuencia normal de trabajo es:

- extensión de una capa de suelo
- extensión del conglomerante
- mezcla del suelo con el conglomerante y el agua necesarias
- nivelación o rasanteo y compactación
- extensión de una nueva capa de suelo.



Figura 6.5 Estabilización de un terraplén

El rendimiento de los equipos de estabilización depende del de los equipos de movimiento de tierras y, por lo tanto, también el coste final del tratamiento.

Si en un terraplén únicamente hay que estabilizar el cimientado del mismo y la capa de coronación, el tratamiento no depende del movimiento de tierras y puede programarse con los medios óptimos, con lo que normalmente se consigue un abaratamiento de la unidad.

Los conglomerantes empleados, cal y cemento habitualmente, absorben agua, modifican la densidad y humedad óptima del ensayo Proctor de referencia y además evaporan parte del agua. Es necesario tener en cuenta todos estos efectos, de manera que una vez terminado el proceso de mezcla, la humedad de la capa tratada sea la adecuada para su compactación.

Tanto las máquinas estabilizadoras como los distribuidores de agua y de conglomerante, ya sea por vía seca o húmeda, tienen rendimientos de entre 4.000 y 12.000 m² por jornada de trabajo en un turno.

Según las condiciones, pueden requerirse consumos de agua en verano del orden de 450 m³/día, lo que obliga a programar tanto las cubas de agua como los puntos de abastecimiento y la obtención de los permisos para la misma.

Consideraciones prácticas

a) Precauciones ante la lluvia

En caso de estabilizar el cimientado de un terraplén, este trabajo ha de hacerse inmediatamente después del desbroce, cuidando siempre de dar salida a las aguas de lluvia. Normalmente esta capa tiene puntos bajos a desaguar, por lo que la cons-

trucción de las obras de paso necesarias y el extendido de las capas colindantes cobran especial importancia.

b) Espesores de tongada

Para estas capas puede utilizarse la máxima capacidad de las máquinas estabilizadoras para ejecutar el mayor espesor posible de una sola vez. En las máquinas más potentes esta profundidad puede llegar a ser de 50 cm, pero es preciso contar con compactadores suficientemente grandes para asegurar la compactación del fondo de estas tongadas.

La elección de la maquinaria adecuada es importante para evitar fracasos. Con maquinaria agrícola no es posible llegar a espesores de más de 15 cm, y aún así, es necesario dar varias pasadas para conseguir un mezclado eficaz.

 *La dificultad para el mezclado de capas conforme aumenta el espesor se hace especialmente notable cuando se trabaja en suelos cohesivos con exceso de humedad. Por lo tanto, en contra de lo que pueda parecer a priori, no siempre se alcanzarán los mejores rendimientos trabajando con el espesor de tongada máximo. Es muy recomendable realizar previamente distintos tramos de prueba para tratar de ajustar el espesor óptimo de tongada.*

Por todo lo anterior, es frecuente trabajar en capas de 30 a 35 cm de espesor.

En el caso de estabilizar fondos de desmonte y cimientos de terraplén de espesores mayores, se debe retirar el material previamente a acopio, estabilizar el fondo y continuar reponiendo y estabilizando por tongadas las siguientes capas.

c) Extendido

Una vez extendido y nivelado el suelo, se procederá al extendido del conglomerante. Las máquinas extendedoras han de estar perfectamente calibradas, debiéndose comprobar todos los días que la dotación corresponde exactamente a la de la fórmula de trabajo.

En el caso de emplearse cal apagada, puede hacerse un extendido por vía húmeda preparando una suspensión de cal en agua en cisternas especiales provistas de agitadores e introduciendo después esta lechada en la cámara de mezclado de la estabilizadora. Es también posible extender la lechada sobre el suelo.

Para los tratamientos en fondos de desmonte y en terraplenes la vía seca es más económica, al permitir obtener mejores rendimientos, por lo que es la más utilizada.

En la descarga de cal al suelo no es conveniente que haya ningún operador alrededor de las máquinas de descarga. Sin embargo, si el conglomerante se descarga con aire a presión, es necesaria la presencia de un operario que pueda cortar la presión del aire en el caso de rotura de alguna tubería, con el fin de evitar una descarga descontrolada de conglomerante.



Figura 6.6 Equipo de distribución de lechada de cal

Otro problema que puede presentarse cuando se dosifica en seco y se requieren altas dotaciones de conglomerante (por elevada dosificación o grandes espesores) es que se necesitan varias pasadas (en la segunda se pisa el conglomerante extendido). Además, al mezclarlo con el suelo la máquina estabilizadora puede producir una ola de conglomerante delante del tambor mezclador. Este efecto es notable a partir de $25 - 30 \text{ kg/m}^2$ para cal viva o cemento o la mitad para cal apagada (la densidad de esta última es la mitad que la de la cal viva o el cemento).

Una solución a este problema puede ser extender y mezclar en dos veces. Una secuencia tipo de trabajo en estos casos podría ser:

- extendido del 50 % del conglomerante
- primer mezclado
- extendido del resto del conglomerante
- mezclado final
- nivelación y compactación.

☞ *Si se emplea cemento como conglomerante, el mezclado, compactación y terminación del suelo debe quedar concluido en el plazo de trabajabilidad del material; mientras que si se emplea cal, puede iniciarse un día y concluirse al día siguiente.*

En ese caso, la cal flocula las arcillas en el primer mezclado y facilita mucho con ello el mezclado final.

En el caso de estabilizaciones mixtas cal-cemento en las que la dotación de cemento sea superior a 35 kg/m², el procedimiento de trabajo puede ser el siguiente:

- extendido de la totalidad de la cal
- primer mezclado en todo el espesor de la tongada
- extendido de la mitad de la dotación de cemento, una vez transcurrido el tiempo mínimo necesario para que la cal actúe por completo (normalmente unas 4 h)
- segundo mezclado, también en todo el espesor de la tongada
- extendido del porcentaje restante de cemento
- tercer mezclado, también en todo el espesor de la tongada.

Es necesario que las capas tengan un espesor constante y sean paralelas a la rasante definitiva. Cuando se construya una capa tratada sobre otra también tratada, la estabilizadora debe trabajar en una profundidad ligeramente superior a la teórica, para asegurar que no quedan lentejones de material sin tratar entre ambas, lo que constituiría un punto débil.

d) Humectación del suelo

El extendido y mezclado del agua en las obras de estabilización tiene tanta importancia como la del conglomerante.

La humedad de la mezcla ha de estar en el entorno de la óptima del ensayo Proctor modificado.

 *Tanto la falta de agua como el exceso impiden alcanzar el grado de compactación requerido.*

Además, un exceso de humedad puede provocar blandones. Si aparecieran estos últimos, hay que añadir más conglomerante y volver a mezclar con la máquina estabilizadora.

La cantidad de agua a añadir será la diferencia entre la humedad óptima de compactación y la que el suelo tenga en el momento de ejecutar la estabilización. Por ello es aconsejable controlar la humedad del suelo al inicio del tajo y cada vez que cambie alguna de las condiciones influyentes.

La forma de las curvas del ensayo Proctor modificado puede dar una idea del margen disponible en cada caso para la aplicación del agua. Cuando se emplea cal, la curva es más aplanada en su vértice, por lo que la densidad es menos sensible a las variaciones de humedad.

El agua puede añadirse de diferentes formas:

- directamente al suelo con una cisterna de riego como las usadas habitualmente en las obras de movimiento de tierras. Este método tiene el inconveniente de carecer de control de dosificación, de una peor homogeneidad en la distribución del agua y, por tanto, de unas mayores variaciones de humedad del suelo
- en la cámara de mezclado del estabilizador, tanto si se extiende el conglomerante por vía seca como por vía húmeda.

En el caso de extender el agua directamente sobre la tongada a estabilizar, el hacerlo antes de la extensión del conglomerante tiene la ventaja de que la superficie del suelo está humedecida y, por tanto, al distribuir a continuación la cal o el cemento en polvo, se adhiere mejor al suelo. Ahora bien, la cantidad de agua aportada al suelo debe ser controlada. Cuando en ocasiones haya que añadir mucha cantidad de agua (suelos muy secos, veranos calurosos, empleo de cal viva, etc.), es conveniente escarificar previamente el suelo para evitar que el agua corra por la superficie y se pierda por los laterales de la capa a humectar.

En este caso puede seguirse el siguiente procedimiento:

- escarificado o ripado
- primer extendido de agua, comprobando la dotación mediante la superficie humectada por cada cisterna de volumen conocido
- extendido del conglomerante
- primer mezclado
- segundo extendido de agua, midiéndola con el mismo procedimiento indicado anteriormente
- mezclado final en todo el espesor.

Este procedimiento tiene la ventaja de que se efectúa un doble mezclado, mejorando por tanto la envuelta y el producto final.

e) Mezclado

El mezclado ha de efectuarse con máquinas diseñadas específicamente para esta labor, es decir, estabilizadoras de suelos.

En obras complementarias (pistas de obra, caminos, etc.), de reducido volumen, irregular superficie o difícil acceso, puede emplearse maquinaria agrícola, pero su baja eficacia obliga a dar numerosas pasadas para conseguir un mezclado uniforme. El empleo de este tipo de maquinaria no permite trabajar en tongadas de espesor superior a 15 cm ni obtener unos resultados con la calidad exigida a las obras convencionales.

En el caso de que el suelo esté apelmazado o muy densificado, puede recurrirse a una disgregación previa con maquinaria agrícola para mejorar el mezclado posterior con la máquina estabilizadora y facilitar la entrada de agua en la capa a tratar. Con ello se consigue aumentar el rendimiento de todo el proceso y la calidad de la mezcla final obtenida.

También puede ser conveniente el empleo de este tipo de maquinaria para el mezclado en tajos reducidos, como las estabilizaciones en los trasdoses de las obras de fábrica o en los espaldones, en los que dar 4 ó 5 pasadas de mezcladora no supone un retraso para el resto de los equipos.

 *En algunos tipos de obras, como los trasdoses de las obras de fábrica, donde suele haber problemas para trabajar cerca de las paredes, puede ser más recomendable realizar una estabilización ex situ, es decir, extender y mezclar el suelo en las proximidades, para luego transportarlo y colocarlo en tongadas.*

De esta forma, se asegura la calidad de la estabilización. En el caso de que se emplee cal como conglomerante, se dispone de un margen mayor de tiempo que con el cemento entre el mezclado del conglomerante con el suelo y su colocación en la ubicación definitiva.

El mezclado con maquinaria no específica, como por ejemplo rodillos pata de cabra o de pisones, produce normalmente un material de peor calidad que el obtenido con las estabilizadoras, habida cuenta de la dificultad que tiene homogeneizar la mezcla de dos materiales sólidos en la que de uno sólo hay cantidades muy pequeñas (en torno al 3 %).

Habitualmente esta maquinaria sólo mezcla parcialmente en tongadas de espesor inferior al de los pisones (20 cm), por lo que las tongadas de las tierras extendidas no deben superar este espesor que, una vez compactado, se reduce a 15 cm. Para conseguir un buen reparto del conglomerante, puede recurrirse entonces a una mayor cuantía del mismo. Por este motivo, lo que a priori puede parecer un método de ejecución barato, puede traducirse en un producto peor y más caro.

f) Compactación

 *Es necesario recalcar la importancia de la compactación en esta unidad de obra. Sin una correcta compactación no es posible asegurar una estabilidad volumétrica, una resistencia mecánica y una inalterabilidad frente a los agentes externos.*

La compactación de los suelos con cemento presenta algunas diferencias frente a la de los tratados con cal:

- cuando se emplea cemento, lo más conveniente es empezar la compactación cuanto antes para evitar la pérdida de agua por evaporación. El plazo de trabajabilidad marca el tiempo disponible para terminar la ejecución de la capa tratada, cuya compactación debe quedar completada en el citado plazo

- si se emplea cal, no conviene empezar la compactación hasta pasado un tiempo de por lo menos una hora desde el mezclado. Incluso no hay inconveniente en que la mezcla se deje sin compactar de un día para otro. El motivo no es otro que el de dejar el suelo esponjado hasta que pierda todo el vapor de agua generado por la reacción cal-agua.

Iniciada la compactación (fig. 6.7), es aconsejable dar una pasada doble del rodillo con el vibrador en amplitud alta, a fin de que la compactación del fondo de la capa quede casi completada.

Una vez hecha esta precompactación, conviene nivelar teniendo en cuenta que la compactación final va a reducir ligeramente el espesor de la capa. Una vez realizada la nivelación, se debe proceder a la compactación final hasta alcanzar la densidad requerida en las especificaciones.

En el caso de utilizarse compactador de neumáticos, éste se debe emplear al final de la compactación, con el objetivo de lograr una superficie más cerrada.

g) Curado

Los materiales estabilizados con cal o con cemento han de someterse a un curado después de la compactación final.

En las capas de coronación y explanada el curado ha de realizarse con un riego de emulsión, mientras que en las que van a recibir otra tongada de suelo encima



Figura 6.7 Compactación de terraplén

puede ser suficiente con un riego ligero con agua antes de recibir la siguiente capa de tierras. Esta última ha de extenderse cuanto antes, con lo que se evita la pérdida de agua y la eventual recarbonatación de la cal en el caso de que se haya utilizado. Incluso puede que llegue a lograrse una cierta adherencia entre capas, con el consiguiente beneficio añadido.

6.4 Estabilización de capas del cimientado del firme

El objetivo del tratamiento de un suelo con cemento o cal es mejorar los parámetros geotécnicos y resistentes del suelo, de tal forma que sea posible su colocación en las capas del cimientado del firme con una determinada fiabilidad en cuanto a sus características y comportamiento a corto y largo plazo.

La metodología a seguir en la fase de estudio y dosificación de este tipo de tratamientos se aborda con profundidad en el Capítulo 4 del presente Manual, a fin de establecer la fórmula de trabajo.

6.4.1 Técnicas de ejecución

Preparación del suelo

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

Antes de iniciar las operaciones propias de preparación del suelo (fig.6.8), 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:

- el escarificado y la disgregación
- la aireación o humectación para lograr la humedad óptima
- la nivelación.

La operación de escarificado y disgregación se realiza hasta la profundidad necesaria para eliminar los elementos mayores de 80 mm, con el fin de optimizar la acción del conglomerante que posteriormente se extienda.



Figura 6.8 Preparación del suelo mediante ripado y retirada de elementos gruesos.

En esta fase se pretende también disgregar los grumos arcillosos que se forman en los terrenos cohesivos, logrando en estos casos pulverizar el suelo para que el conglomerante pueda actuar eficazmente, y buscando en todos los casos una curva granulométrica bien graduada, sin excesivos gruesos, y lo más homogénea posible. Resulta conveniente para una mejor operación de mezclado que el tamaño máximo se reduzca incluso por debajo de los 50 mm.

En obra se controlará la eficacia de disgregación. En el caso de determinados suelos es difícil obtener los límites indicados, lo cual no debe ser motivo para descartar la estabilización. La aceptación del grado de disgregación conseguido vendrá condicionada al resultado de los ensayos sobre el material después de estabilizar sin modificación en el laboratorio. No obstante, hay que destacar la gran importancia que tiene una buena disgregación para conseguir que, con el contenido mínimo de conglomerante que permita una distribución homogénea, se obtengan resultados satisfactorios de manera económica. No debe olvidarse nunca que el coste de asegurar unas buenas características granulométricas con la maquinaria de ripado (motoniveladoras con rípper, gradas de discos, etc.) suele ser mucho más reducido que el de incrementar el contenido del conglomerante porque los resultados sean dispares o bajos al tomarse las muestras de zonas de grumos o mal graduadas.

En líneas generales los suelos granulares como arenas o zahorras naturales pueden disgregarse fácilmente, mientras que los suelos más plásticos precisan un tratamiento más enérgico o un mezclado previo con cal.

De acuerdo con el artículo 512 del PG-3, el escarificado o disgregación del suelo se debe proseguir hasta que la granulometría del mismo cumpla las siguientes prescripciones:

- no debe contener elementos de tamaño superior a 80 mm
- en suelos a estabilizar con cemento, el cernido ponderal por el tamiz UNE 2 mm ha de ser superior al 20 %
- el cernido ponderal por el tamiz UNE 63 μ m debe ser:

- superior al 15 % en suelos a estabilizar con cal
- inferior al 50 % en S-EST1 y S-EST2 a estabilizar con cemento
- inferior al 35 % en S-EST3.
- la eficacia de disgregación, entendiendo como tal la razón entre el cernido en obra del material húmedo por un cierto tamiz y el cernido en laboratorio por dicho tamiz de ese mismo material desecado y desmenuzado, no ha de ser inferior al 100 % para el tamiz UNE 25 mm, ni al 80 % (S-EST3 y S-EST2) o al 60 % (S-EST1) para el tamiz UNE 4 mm.

El escarificado puede realizarse con un ripper de varios dientes montado sobre tractor o motoniveladora aunque la tendencia actual es realizarlo conjuntamente con el mezclado con equipos estabilizadores de alta potencia. Cuando sea necesario eliminar previamente elementos gruesos pueden emplearse rastrillos extractores de piedras arrastrados por un tractor y formados por un bastidor horizontal con dientes o púas curvas. En algunos casos pueden emplearse dos equipos, con una mayor separación entre dientes el primero para retirar los elementos mayores de 100 mm, y otro posterior, con las púas más juntas, para los bolos intermedios, aunque estos equipos rara vez son eficientes para espesores mayores de 15 cm.

Si el suelo está muy húmedo hay que proceder a airearlo para favorecer su desecación, solución válida en la mayoría de los casos salvo con suelos muy finos y muy plásticos, capaces de retener bastante agua y en los que hay que utilizar cal viva para reducir la humedad y aglutinar los finos.

La aireación o desecación debe prolongarse hasta conseguir en el suelo una humedad próxima a la óptima del ensayo Proctor modificado. En el caso de emplearse dosificadoras de conglomerante en forma de lechada, hay que tener en cuenta el contenido mínimo de agua que se puede aplicar con el sistema, y desecar el suelo hasta obtener una humedad similar a la óptima Proctor modificado menos la aportada con el conglomerante.

La aireación se suele hacer coincidir con la operación de escarificado y homogeneización del suelo.

En el caso contrario de suelos muy secos hay que aportar el agua necesaria para lograr la humedad óptima de mezclado que facilite la máxima densidad en la compactación. Incluso a veces, aunque dicha humedad se aporte mediante los equipos de estabilización, puede resultar interesante regar previamente el suelo para facilitar el proceso de escarificado, si éste se realiza de manera independiente.

Cuando los equipos de mezclado disponen de barra regadora, la humectación se efectúa a través de ellos desde camiones cisterna acoplados o dosificadoras de lechada. En caso contrario, hay que llevarla a cabo previamente con cisternas dotadas de barra regadora, pero esta solución carece de control de la dosificación y resulta menos homogénea en sus resultados, por lo que no se aconseja en las capas de apoyo del firme.

Una vez finalizadas las tareas anteriores es 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.

Salvo en lo que respecta a la nivelación del terreno, que no es su misión específica y debe efectuarse mediante motoniveladora, todo este proceso de preparación del terreno puede simplificarse claramente al utilizar equipos estabilizadores de suelos (ver capítulo 5).

Con estos equipos normalmente no es necesario realizar el escarificado y disgregación, dado que ellos mismos realizan conjuntamente estas operaciones (siempre que no existan bolos de tamaño superior a 10 cm). Si, además, se emplean equipos dosificadores de conglomerante en forma de lechada (vía húmeda), se reduce o elimina también la operación de humectación del terreno.

Aunque con estos equipos se logra una mayor homogeneidad, necesitan que la humedad del suelo esté bastante por debajo de la óptima, dada la aportación de agua que conlleva el fabricar una lechada (1,5 – 2,0 % como mínimo).

Distribución del conglomerante

El objetivo de esta etapa es dosificar del modo más preciso posible la cantidad de conglomerante necesario, de acuerdo con la fórmula de trabajo y el espesor a estabilizar.

Sólo en obras muy pequeñas, de reducida superficie a estabilizar, o en zonas irregulares no accesibles a los equipos mecánicos, la distribución del conglomerante se puede realizar de forma manual.

Para ello, se colocan los sacos del conglomerante (fig. 6.9) sobre el suelo formando una cuadrícula de lados aproximadamente iguales, de acuerdo con la dosificación



Figura 6.9 Distribución del conglomerante de forma manual en una superficie reducida

aprobada y, una vez abiertos, se distribuye el conglomerante uniformemente mediante rastrillos manuales o rastras de púas remolcadas. Así, si por ejemplo se está realizando la estabilización en un espesor de 25 cm y la dotación de la fórmula de trabajo es del 3 % de conglomerante, hay que extender unos 15 kg/m², lo que supone disponer un saco de 30 kg cada 2 m².

En los restantes casos es conveniente utilizar equipos mecánicos (fig. 6.10 y 6.11). Éstos han experimentado un gran desarrollo en los últimos años, logrando unas altas prestaciones y cumpliendo con todos los requisitos de la legislación medioambiental y de seguridad y salud, como por ejemplo la protección con faldones cuando la descarga del conglomerante se realice a más de 10 cm del suelo. En cualquier caso los equipos deben encontrarse en buen estado, para evitar pérdidas de combustibles, aceites u otros productos sobre el terreno.



Figura 6.10 Distribución del conglomerante en polvo (vía seca)

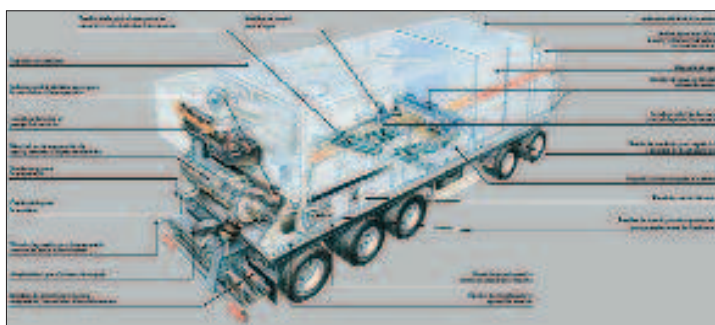


Figura 6.11 Equipos de dosificación de lechada (vía húmeda)

La extensión del conglomerante se efectúa por bandas adyacentes paralelas, borde contra borde, sobre toda la superficie a tratar de acuerdo con la planificación realizada para el equipo de mezclado.

En la opción de vía húmeda, los equipos de dosificación pueden distribuir la lechada mediante elementos de regado (cisternas dotadas de paletas en su interior para mantener la suspensión por agitación), aunque actualmente los equipos utilizados dosifican la lechada a través de unos inyectores a la carcasa del equipo, donde se realiza el mezclado.

Si bien estos equipos proporcionan una mayor precisión en la dosificación, no debe reducirse excesivamente la dotación mínima de conglomerante, pues se corre el riesgo de no asegurar una correcta distribución y homogeneización en la mezcla.

Así, si se dispone de un suelo granular poco plástico pero que no tiene las características de explanada E1 y ésta se consigue, según los ensayos de laboratorio, con una dosificación de cemento del 1,5 %, como no se debe dosificar en obra menos del 2,0 % es recomendable realizar los ensayos oportunos para, aumentando la dosificación de cemento, obtener una explanada de calidad superior (E2 o E3) con el consiguiente ahorro en el firme correspondiente.

En cualquier caso, se debe asegurar siempre que se está dosificando la cantidad de conglomerante necesaria, por lo que los controles en obra deben ser continuos y cuidadosos, comprobándose que los inyectores funcionan correctamente, lo cual reviste cierta dificultad. Al final de la jornada, y en muchas ocasiones incluso a mediodía, se debe proceder a la limpieza de los mismos y del conjunto del equipo.

 *Es muy importante prever en la organización de la obra el número de paradas necesario para alimentar los equipos dosificadores.*

La descarga de una cuba de cemento puede durar casi media hora, contabilizando todas las operaciones necesarias, y una estabilización de una superficie extensa como puede ser la explanada de una autovía en la que se obtienen rendimientos de trabajo altos al disponer por delante de suficiente terreno despejado (aproximadamente 10.000 m²/día), este tiempo de parada puede llegar a suponer 3 ó 4 horas de la jornada sin estabilizar (6-8 cubas de 25-27 t).

A este problema se añaden también las quejas del suministrador de conglomerante por el tiempo que están retenidas las cubas de transporte esperando a que la dosificadora se descargue de lechada, o los retrasos generados por los errores de planificación en la petición del mismo que hace que a veces se paralice el tajo por falta de conglomerante en la obra.

Mezcla in situ

Para evitar todo esto, una buena solución es tener en obra una cuba nodriza de gran capacidad (mayor de 35 m³) sobre la que descargan las cisternas del transportista. Esta cuba posteriormente alimenta a la dosificadora de conglomerante.

Para ello suelen emplearse equipos mezcladores rotatorios (fig. 6.12), constituidos normalmente por un único rotor de eje horizontal provisto de paletas, alojado den-

tro de una carcasa arrastrada (tipo pulvimixer) o suspendida del bastidor en posición frontal o central (estabilizadora).

Existen también otros equipos como las mezcladoras de varios rotores o las plantas móviles, si bien no suelen emplearse en estabilizaciones por su mayor coste.

El mezclado es una de las fases del proceso que más condicionan el rendimiento de una estabilización. El ancho de trabajo se limita a un máximo de 2,5 m para facilitar el transporte de la maquinaria evitando necesitar la señalización de transporte especial. Ello obliga a un planteamiento de construcción por calles, que en el caso de emplear cemento no podrán ser de excesiva longitud para evitar la formación de juntas frías entre ellas.



Figura 6.12 Equipo de estabilización

Así, el proceso en una explanada amplia como puede ser la de un tramo de autovía (con un ancho de 12-13 m) se puede realizar de dos formas distintas (fig. 6.13):

- por calles adyacentes de cierta longitud (unos 500 m), empezando por un borde y nivelando cada calle con la estabilizada previamente situada junto a ésta. En este caso siempre se suele trabajar en la dirección de avance, haciendo retroceder la máquina de mezclado, marcha atrás, para iniciar la franja colindante por la

zona de inicio de la franja previa, que es la que más tiempo lleva estabilizada y que, por ello, está más próxima a finalizar el plazo de trabajabilidad, en el caso de emplear cemento. A medida que se van ejecutando calles se van compactando y terminando

- por calles de corta longitud (unos 100-150 m), que es lo más usual, sobre las que se extiende el conglomerante y se realiza el mezclado solapando con las franjas colindantes, hasta completar el ancho de la explanada. Mientras se finaliza el mezclado de todo el ancho y se pasa al siguiente tramo de 100 m, en el primero de ellos se procede al refino con motoniveladora y a la compactación posterior del ancho completo en la longitud tratada. 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.

☞ *Si la precisión en la distribución del conglomerante es importante, también lo es el efectuar un adecuado proceso de mezclado con la humedad apropiada, que asegure una buena homogeneidad del producto en la profundidad requerida y, por tanto, el aprovechamiento óptimo del conglomerante.*

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. Aunque hay equipos que son cámaras de mezclado que pueden trabajar en un ancho de hasta 5,75 m, lo normal es emplear estabilizadoras, rotavators o pulvimixers con un ancho máximo de trabajo de 2,50 m.

Para un espesor de unos 20 cm y un suelo apto para ser estabilizado se pueden alcanzar rendimientos que varían entre 4.000 y 10.000 m² diarios, pudiéndose considerar rendimientos medios de 6.000 – 8.000 m²/día. En obras de urbanización, con pozos de registro y bordillos que dificultan mucho los trabajos, los rendimientos rara vez superan los 3.000 m²/día.

Evidentemente la naturaleza del terreno tiene una gran influencia: cuanto más duros sean los materiales y más grande su tamaño, menor será el rendimiento por la dificultad en el avance y el mayor desgaste de las picas. Así, con un material cuarcítico hay que realizar un mayor número de paradas para sustituir las picas desgastadas. Por otra parte, la presencia de elementos muy gruesos dificulta más el trabajo y provoca más atascos y averías.

Es importante observar cuidadosamente el estado de las picas. Aunque los equipos de estabilización suelen lograr una buena homogeneidad en sentido vertical (en todo el espesor de la tongada), en sentido horizontal no se produce apenas mezclado y distribución a lo largo del rotor (salvo en algunos modelos, que son más bien mezcladoras, que disponen incluso de tornillos sin fin de reparto en su parte trasera). Por ello, el conglomerante y el agua tienen que estar bien repartidos y todas las picas del tambor han de tener un desgaste similar, debiendo ser sustituidas las más desgastadas.

El espesor tratado con conglomerante se controla mediante la apertura de catas tras el mezclado y antes de la compactación. A este respecto, hay que tener en cuenta los centímetros en que se reducirá el espesor del material tras la compactación para comprobar si se obtiene la cota definida en el proyecto.

Fabricación en central

El proceso es muy similar al de una capa de suelocemento, por lo que se aconseja la consulta en el “Manual de firmes con capas tratadas con cemento” (IECA – CEDEX).



Figura 6.13 Estabilización por calles o bandas cortas con un único equipo, y en bandas largas con dos equipos

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-EST1 (95 % si la capa no es de coronación), el 97 % para S-EST2 y el 98 % para S-EST3. 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 19-25 t de peso con una carga estática sobre generatriz de 500 N/cm o superior, para capas de 25-40 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 (fig. 6.14) 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 refinado con motoniveladora.

Tras la compactación vibratoria, en ocasiones se utiliza un compactador de neumáticos (fig. 6.15) con el objetivo de densificar y cerrar la superficie mediante su compactación estática y amasado. A este respecto hay que indicar que los rodillos prescritos en el PG-3, de carga superior a las 35 t, pueden ser en ocasiones de excesivo peso y actuar más en la parte central del espesor de la capa que en el tercio superior.

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. En obras importantes esto no suele suceder por el control de producción continuo y rápido de la densidad con aparatos como los gammadensímetros o sondas nucleares, pero sí en obras de inferior categoría, en las que no se justifica un control constante, sino únicamente de comprobación.



Figura 6.14 Rodillos vibratorios compactando capas estabilizadas

Por ello, una vez fijadas las condiciones de empleo de los equipos en el tramo de ensayo, es necesario respetarlas estrictamente, dando instrucciones claras y precisas a los conductores de los compactadores, los cuales han de conocer:

- el momento en el que deben intervenir
- la velocidad de trabajo de su compactador
- los parámetros de trabajo (frecuencia y amplitud de la vibración, presión de inflado)
- el número de pasadas que tienen que realizar.

La ejecución se suele iniciar mediante una o varias pasadas dobles de rodillo liso vibrando con alta amplitud a efectos de lograr compactar el fondo de capa y planchar la capa sin producir desplazamientos. Después, tras la nivelación con motoniveladora, se continúa con varias pasadas vibrando hasta alcanzar la densidad especificada (de 3 a 5 pasadas dobles según el material), y, por último, si se emplea, el compactador de neumáticos (de 3 a 5 pasadas dobles) hasta que se observe la superficie bien cerrada. Normalmente es suficiente con un compactador de cada tipo, dado el alto rendimiento de los mismos. El número de pasadas se debe determinar en el tramo de ensayo a la vista de los resultados del mismo, pues depende tanto de la maquinaria empleada como de las características del material.



Figura 6.15 Compactador de neumáticos

Aunque en explanadas no es usual que haya puntos de difícil acceso, en estos últimos suele ser útil el empleo de pequeños rodillos lisos vibratorios de manejo manual. La compactación debe realizarse con la menor demora posible tras el mezclado, especialmente en el caso de estabilizar con cemento, por un doble motivo:

- para no dejar expuestos a la intemperie los materiales sueltos, con la consiguiente pérdida de humedad
- porque los plazos de trabajabilidad de los materiales estabilizados con cemento suelen ser relativamente cortos (en condiciones favorables nunca más de 2-3 horas, dependiendo del tipo de cemento empleado y de la temperatura ambiente), salvo que se utilicen retardadores de fraguado. El empleo de estos últimos, así como de cementos con un contenido elevado de adiciones activas, es aconsejable en cualquier caso, sobre todo teniendo en cuenta que en las obras de este tipo es muy importante que unas bandas suelden con las otras. Para ello es esencial que el conglomerante de una banda no haya empezado a fraguar antes de finalizar la compactación de la contigua.

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

Un problema que puede surgir durante los días calurosos o de viento es la desecación de la superficie de forma muy rápida durante la compactación, situación que se observa claramente de forma visual, adquiriendo las mezclas un color más terroso y seco. En estos casos es imprescindible pulverizar agua (no regar, ni encharcar), siendo aconsejable disponer de un camión cisterna con barra regadora dotada de boquillas de jardinería, o bien simples sulfatadoras de mano con agua en el caso de obras muy reducidas. Esta solución es más adecuada que el empleo del agua de los depósitos de los compactadores de neumáticos, ya que ésta humedece de forma más localizada y a veces hace que se adhiera el material a las ruedas.

Durante la compactación se debe efectuar un control continuo de la densidad alcanzada y de la humedad mediante el uso de equipos rápidos como el gammaden-símetro. De esta forma se pueden detectar anomalías en el proceso y corregir sus causas. La medición con estos equipos se debe realizar introduciendo la sonda hasta el fondo de la capa.

Por último, hay que insistir en la conveniencia de realizar un tramo de ensayo para definir con precisión el sistema de compactación (equipos y número de pasadas), que además permite evaluar la eficacia del mezclado, ajustar la humedad adecuada, etc.

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 (fig.6.16).

Para ello, tras una primera compactación inicial hasta alcanzar una densidad del orden del 90-92 % de la máxima Proctor modificado, se procede a la nivelación de la capa, eliminando preferentemente el material en vez de compensar las partes bajas aportando material de las altas. Esto debe considerarse durante el proceso de estabilización del suelo, para tratar un pequeño sobreepesor de capa (algún centímetro) con el fin de compensar lo eliminado en la operación final de nivelado. El refino debe realizarse de forma rápida y siempre dentro del plazo de trabajabilidad del material estabilizado.

Al ser ésta una operación que depende de la habilidad del maquinista, para lograr buenos resultados son interesantes las motoniveladoras dotadas de equipos auxiliares de nivelación tipo 3D, guiadas desde una estación total por radio. Otras opciones como láser o infrarrojos resultan menos adecuadas en carreteras, pero son aprovechables en grandes superficies planas como aparcamientos o aeropuertos. Una vez llevado a cabo el refino, se prosigue la compactación hasta alcanzar la densidad requerida, pero ya sobre una superficie cuya regularidad superficial se ha corregido y en la que, al tener ya una compactación elevada, las deformaciones originadas por el paso de los rodillos son reducidas.



Figura 6.16 Refino del material con motoniveladora y compactación final

Curado y protección superficial

En el caso de las estabilizaciones con cemento, el Pliego PG-3 prescribe un riego de curado (fig. 6.17) con una emulsión bituminosa de rotura rápida y baja viscosidad, con una dotación mínima de betún residual de 300 g/m^2 . 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 una dotación de $2-4 \text{ l/m}^2$. Además, se debe comprobar que el tráfico no provoca un deterioro superficial importante en la capa estabilizada. Ésta debe limpiarse bien antes de extender la capa superior.

☞ *Las capas estabilizadas deben tratarse para evitar la evaporación del agua y mantener su nivel hídrico durante al menos una semana.*

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 como ya se ha comentado.

Tramo de prueba

Antes de iniciar la obra, se debe realizar un tramo de prueba con la fórmula de trabajo seleccionada, a fin de corroborar su facilidad 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 de material disgregado, dosificación de conglomerante y uniformidad en la dosificación, así como todos los demás requisitos exigidos.



Figura 6.17 Curado de la capa estabilizada con agua y con riego de emulsión

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

- el modo de empleo de cada rodillo
- el número de pasadas
- los recorridos de los rodillos
- el 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.

La longitud del tramo de prueba no debe ser inferior a 100 m, siendo conveniente adoptar longitudes superiores. Se debe realizar con suficiente antelación, a fin de poder verificar correctamente todos los puntos mencionados, entre los que se pueden destacar los siguientes:

- capacidad de los medios disponibles para una correcta puesta en obra
- control de la humedad in situ
- obtención de la densidad prescrita
- control de la capacidad de soporte y/o resistencias a 7 días
- curado adecuado del material.

El Director de las Obras, a la vista de los resultados obtenidos, debe aprobar o rechazar la fórmula de trabajo y los equipos de trabajo a emplear.

Ensanches

En el cajeo y ensanche de una carretera, en general sólo hay que estabilizar una sola calle o parte de la misma, pero en este caso hay que prever un pequeño sobrecancho de seguridad para la maquinaria, dado que si se limita esta anchura a los 2,5 m necesarios, en las zonas de terraplén o con cunetas se corre el riesgo de caída o vuelco de los equipos.

Los trabajos deben programarse para que la caja se abra y se estabilice lo más rápidamente posible. El material de base que enrasa con la carretera existente ha de extenderse a las pocas horas, para no dejar un escalón peligroso durante la noche. El periodo necesario para poder extender el material de base encima de la explanada estabilizada viene dado por la capacidad para obtener las densidades exigidas en esta capa: si mediante la estabilización no se ha logrado la capacidad de soporte necesaria será difícil obtener la densidad prevista en la capa de material que se apoye sobre aquélla.

6.4.2 Limitaciones a la ejecución

Los efectos de mejora y estabilización de un suelo se producen debido a las reacciones químicas ya explicadas en este manual, lo que hace a estos materiales muy sensibles a los procesos de ejecución y a los agentes climáticos externos. Se exponen seguidamente los condicionantes más frecuentes.

Ejecución en época calurosa

No se debe estabilizar con cemento cuando la temperatura ambiente, a la sombra, sea superior a 35° C. En épocas calurosas, las altas temperaturas producen una desecación del material que altera desfavorablemente las reacciones de hidratación de la pasta de cemento.

Algunas de las medidas que se pueden emplear para reducir estos problemas en caso de altas temperaturas son:

- en el caso de estabilizaciones con cemento, empleo de conglomerantes con alto contenido en adiciones (tipos CEM IV, CEM V o ESP VI) y clase resistente 32,5 N, que producen un menor calor de hidratación
- también en el caso de estabilizaciones con cemento, empleo de un retardador de fraguado para incrementar el plazo de trabajabilidad, que en estos casos de alta temperatura ambiental se ve reducido
- pulverización de agua durante la compactación
- extensión inmediata del riego de curado.

Ejecución en época fría

No se debe estabilizar cuando la temperatura ambiente descienda por debajo de 5° C y se prevean heladas, ya que la ganancia de resistencia es muy débil y prácticamente inexistente por debajo de dicha temperatura. En caso de que la temperatura tienda a aumentar, se puede fijar este límite en 2° C.

En el caso de emplear cemento, es favorable que su contenido de adiciones sea reducido (tipo II y resistencia 42,5 N).

En las estabilizaciones con cal, el empleo de cal viva es beneficioso, debido al calor producido por las reacciones exotérmicas de hidratación.

Ejecución en tiempo lluvioso

Aunque en caso de lluvia no se pueden continuar los trabajos por la imposibilidad de poder compactar el material al incrementar considerablemente la humedad por encima de la óptima, y debido al lavado de la superficie que se puede producir, sí es aceptable estabilizar el material cuando haya una lluvia fina y ligera.

Ejecución con viento fuerte

En caso de dosificarse el conglomerante en polvo, no se ha de extender con viento fuerte (velocidad por encima de 35 km/h), que además puede desecar rápidamente la superficie del material, tanto durante el escarificado, como durante el mezclado o la compactación, incluso en ambientes marítimos con humedades elevadas.

En estos casos son aún más necesarios los equipos para poder pulverizar continuamente una película fina de agua hasta que se extienda el riego de curado.

6.5 Guía práctica de identificación de problemas

En la Tabla 6.1 se presenta una guía práctica de identificación de algunos de los problemas más comunes que pueden surgir durante la ejecución de los suelos estabilizados y de las causas que suelen provocarlos.

Tabla 6.1 Guía práctica de identificación de problemas en suelos estabilizados

Problema	Causas posibles		Comentario
La resistencia de las probetas es inferior a la requerida	Se ha dosificado menos cemento del indicado en la fórmula de trabajo		Comprobar consumos diarios y tratar los dosificadores
	La humedad de la mezcla es alta		Comprobar la humedad del suelo antes de la mezcla y los dosificadores Verificar la densidad in situ
	Posible suelo de peores características que el ensayado en laboratorio		Si se sospecha, acotar la zona de peores características y realizar una campaña de límites
	La fabricación de probetas es incorrecta	Exceso de humedad	La humedad nunca puede ser mayor que la de obra
		Curado defectuoso	Averías en la cámara de curado
		Falta de compactación	Densidad de la probeta inferior a la requerida a inferior a la obtenida en el tramo ejecutado
	Se está utilizando un cemento distinto al de la fórmula de trabajo		Comprobar todos los albaranes
	Muestra mal tomada		Comprobar que el material con el que se ha confeccionado la probeta es representativo del lote Material tomado fuera de la zona sometida a tratamiento
Mezclado defectuoso		Examinar la máquina mezcladora, picas, velocidad de avance, espesor ejecutado y estado de las compuertas de la misma	
La densidad que se obtiene en obra es inferior a la que se prescribe	Humedad del material tratado		Por lluvias o por razones de fabricación La densidad es muy sensible de la humedad
	Falta energía de compactación		Por número de pasadas o por peso de los compactadores
	La densidad de referencia es alta		Contrastar la zona tratada. Comprobar si se utilizan métodos diferentes (maza Proctor y martillo Kango)
	Las capas de debajo no están bien compactadas		Es posible que la humedad sea superior a la óptima
	El método de medida no funciona correctamente		La sonda nuclear no siempre proporciona resultados suficientemente precisos en el caso de estabilizaciones con cal
Problemas asociados al acabado o terminación	La superficie se descarna		Puede ocurrir en materiales muy susceptibles a la humedad (hinchamientos) en el caso de que haya lluvias en los primeros días después de la estabilización Comprobar que no circula tráfico a edad temprana
	La superficie presenta ondulaciones		No se está compactando bien. Se está secando la superficie por viento y hay arrollamientos al compactar Puede haber exceso de finos
	Bordes muy deformados		Falta de compactación en las capas inferiores Falta de berma Los bordes se están secando y no tienen consistencia Se está compactando mal
	Fisuración incontrolada		Resistencia excesiva Curado inadecuado Observar evolución. Si es preciso, prefisurar
	Fuerte descompactación superficial		La capa puede haber sido afectada por la helada sin protección
	Otros aspectos de la fisuración		Las mezclas tratadas con cemento son muy sensibles a los movimientos Nunca se deben colocar en un terraplén de cierta entidad sin tiempos de espera y una correcta compactación de todas las capas, lo que supone un control exhaustivo del espesor de todas ellas
Problemas asociados a un exceso de conglomerante	Resistencia excesiva a 90 días		Error en la fórmula de trabajo por no haber determinado resistencias a 90 días
	Fisuración incontrolada		Se debe prefisurar Dejar evolucionar antes de tomar decisiones
	Temperatura elevada de la mezcla		Comprobar la temperatura del conglomerante
	Exceso de resistencia a 7 días		Se debe formular preferiblemente a 90 días, incluso aunque se ponga en servicio antes
	Contaminaciones del suelo tratado		Cuando se producen y son detectadas se suele sobredosificar como mal menor y esto genera dispersiones de resultados

GESTIÓN DE LA CALIDAD



7.1 Introducción

Actualmente las empresas que intervienen en el sector de la construcción de obra pública disponen, en su gran mayoría, de sistemas de gestión de calidad certificados por las normas ISO 9001 y 14001. Se ha dado un gran avance respecto a los antiguos conceptos de control de calidad, incluyéndose en los sistemas de gestión conceptos de calidad adicionales a los tradicionales.

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 período de explotación de la carretera.

La calidad de la obra, en cualquier caso, está íntimamente ligada a 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 la calidad (fig. 7.1) comienza por establecer unas especificaciones para todos los elementos que intervienen en el proceso, es decir:

- materiales
- estudios y ensayos previos

PROCESO DE GESTIÓN DE LA CALIDAD

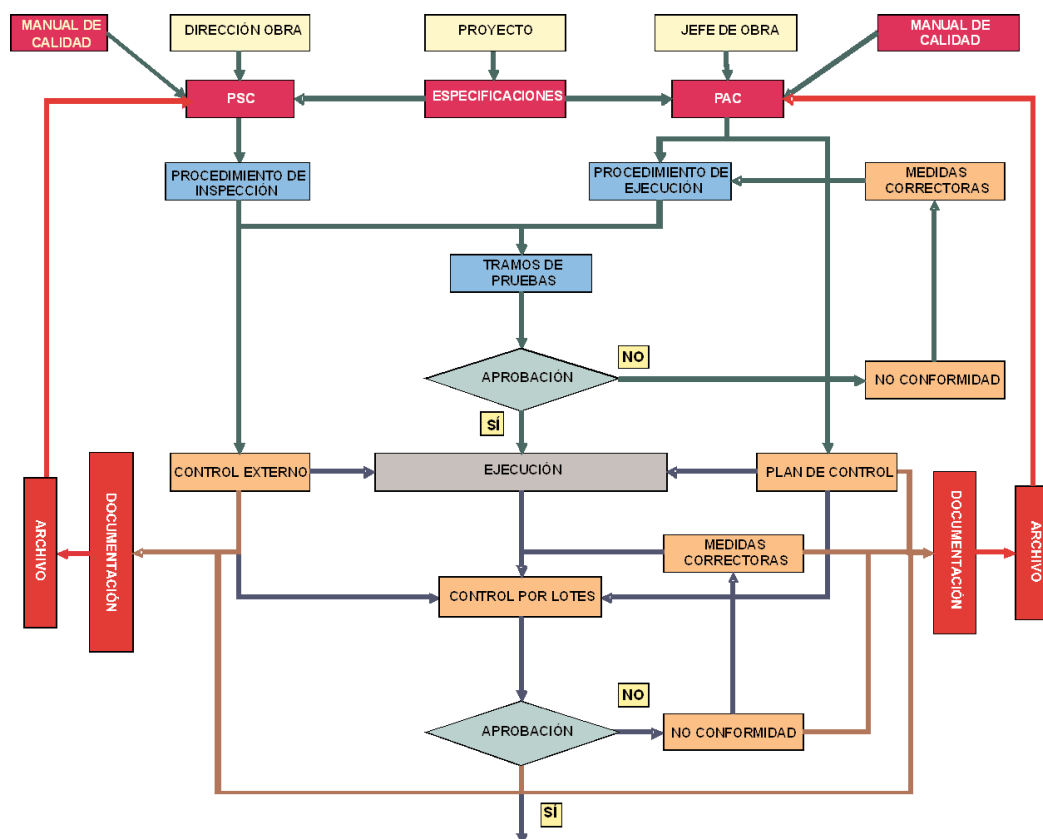


Figura 7.1 Esquema del proceso de gestión de la calidad

- equipos y procesos, tanto de fabricación como de puesta en obra
- ejecución
- obra terminada.

Existe una interrelación muy acusada entre las exigencias de la obra terminada, las de los materiales a emplear y las de fabricación y puesta en obra.

De acuerdo con estas especificaciones, la empresa constructora elaborará el denominado Plan de Calidad de Producción o Autocontrol (conocido en las obras y en lo sucesivo en este documento como PAC), que abarcará todos los conceptos necesarios para la ejecución de la estabilización con la calidad requerida. Este PAC incluirá un plan de control de calidad de la ejecución para verificar que dicha calidad requerida se consigue. Este control de calidad de producción incluye los controles de ejecución, geométricos y de materiales.

El PAC asimismo incluye la apertura de no conformidades de las anomalías detectadas en los controles, y de las acciones correctivas pertinentes para evitar la repetición de las mismas.

La propiedad, habitualmente, comprueba la correcta implantación del PAC en obra mediante un Plan de Supervisión de la Calidad (de recepción, contraste o control externo, conocido en las obras y en lo sucesivo en este documento por PSC). El PSC lo desarrolla el Director Facultativo de la Obra con una Asistencia Técnica y un Laboratorio de Materiales contratados al efecto. Los controles del PSC son unos muestreos estadísticos que inciden sobre las unidades de obra, en general de menor cuantía que los del PAC, y que los desarrolla la Dirección de Obra mediante un Plan de Control de Verificación o Recepción.

En el caso de que la propiedad no exigiese el Plan de Aseguramiento de la Calidad, o la empresa constructora no lo tuviera desarrollado, se deberían ajustar en lo posible a lo especificado en este capítulo para el Control de Calidad de la obra.

7.2 Especificaciones a considerar en el PAC para los tratamientos en formación de terraplenes

7.2.1 Establecimiento de las especificaciones de los materiales

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.

Conglomerantes

En el tratamiento de suelos para formación de terraplenes el conglomerante utilizado normalmente es la cal aunque en algunos casos, cuando los materiales no son predominantemente arcillosos, se puede utilizar cemento para mejorar su capacidad de soporte.

Se fijará el tipo de conglomerante a emplear según la naturaleza y la humedad del suelo, siendo recomendable utilizar cal viva cuando se quiera aprovechar las cualidades de secado de este material, porque los suelos a tratar posean humedades naturales por encima de la fijada para la compactación.

Las definiciones, denominaciones y especificaciones de las cales para estabilización de suelos están recogidas en la norma UNE-EN 459-1, y las de los cementos en las

normas UNE – EN 197-1 (cementos comunes) y UNE 80307 (cementos para usos especiales).

En la redacción de las especificaciones de estos materiales es conveniente tener en cuenta también los artículos 200 “Cales para estabilización de suelos”, 202 “Cementos” y 512 “Suelos estabilizados in situ” del Pliego de Prescripciones Técnicas para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) del Ministerio de Fomento, así como la Instrucción para la Recepción de Cementos.

Es importante fijar unas exigencias de capacidad de almacenamiento del conglomerante en depósitos estancos que garantice la cadencia normal de los trabajos.

Suelos a estabilizar

Los suelos susceptibles de estabilizar para su empleo en terraplén y saneo de fondos de desmonte son, como se ha indicado en el apartado anterior, materiales arcillosos, de alta plasticidad y generalmente expansivos, que no cumplen las especificaciones mínimas del “Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes” (PG-3) para este uso. Asimismo, algunas Comunidades Autónomas, como la de Andalucía en su Instrucción para el diseño de Firmes, definen las características de los materiales para su uso en terraplén.

Estos tipos de suelos se estabilizan con cal, mejorando a través de las reacciones químicas que se producen, las características físicas y mecánicas de los mismos, convirtiéndolos en tolerables o adecuados.

En suelos con plasticidad media o baja, la estabilización podrá ser también con cemento.

Previo al inicio de la estabilización, se realizará un estudio de Fórmula de Trabajo y una vez aprobada ésta por el Director de la Obra, se procederá a la ejecución del correspondiente tramo de prueba. En algunas recomendaciones técnicas para la estabilización de suelos, como las de la Junta de Andalucía, se recoge la obligatoriedad de la Fórmula de Trabajo y el contenido mínimo de la misma, que estará en función de la finalidad del tratamiento.

Se realizará una fórmula de trabajo para cada tipo de suelo a estabilizar y tipo de conglomerante a emplear, la cual deberá indicar:

- características del suelo a estabilizar
- dotación del conglomerante a emplear
- características del material estabilizado
- humedad del suelo en el momento de la mezcla con el conglomerante
- humedad de compactación.

El objeto del tramo de prueba es verificar la idoneidad tanto de la fórmula de trabajo como de los equipos y procedimientos de ejecución y control. El tramo de prueba deberá realizarse con los mismos equipos y espesores de tongada que se vayan a utilizar en la obra. En él se comprobará además la eficacia de disgregación del suelo y la profundidad y homogeneidad del tratamiento en todo el espesor de la tongada, así como el plazo de trabajabilidad en el caso de emplear cemento.

A la vista de los resultados obtenidos, el Director de Obra decidirá si es aceptable la fórmula de trabajo, y son aceptables o no los equipos y procedimientos de ejecución propuestos por el Contratista.

Materiales estabilizados

Los materiales, una vez estabilizados para la formación de terraplenes y saneos de fondos de desmonte, deben como mínimo alcanzar la calidad de suelos especificada en los pliegos, en general tolerables o adecuados.

En las “Recomendaciones para el tratamiento de los suelos con cal” de la Junta de Andalucía, además de unos valores de densidad, capacidad de soporte, se exigen la dotación de cal, valor del pH, índice de plasticidad y estabilidad volumétrica (hinchamiento/colapso).

Como particularidad interesante, contemplan la determinación del índice CBR a 1, 4 y 7 días de edad, lo que permite, estableciendo una correlación entre los resultados a diferentes edades, aprobar con rapidez las capas con el consiguiente aumento del ritmo de obra.

También se incluyen procedimientos para comprobar la homogeneidad del tratamiento en toda la profundidad de la tongada, mediante toma de muestras a diferentes profundidades.

7.2.2 Establecimiento de las especificaciones del proceso de ejecución

Las especificaciones del proceso de ejecución abarcan a los equipos, a las exigencias de obra terminada y a las disposiciones sobre seguridad y salud y la protección del medio ambiente (Tabla 7.1).

Equipos para la estabilización de suelos

Los equipos para formar terraplenes y saneos de fondos de desmonte con suelos estabilizados se describen en el capítulo 6. El Director de la Obra deberá aceptar los equipos presentados por el contratista:

- equipos de almacenamiento del conglomerante
- equipos de extendido
- equipos de mezclado

- equipos de compactación
- en los casos de estabilización en central, las plantas.

Especificación de unidad terminada

Las especificaciones de cada normativa definen los valores a conseguir de los diferentes parámetros.

Así, el PG-3 prescribe, en función del tipo de suelo estabilizado (S-EST1, S-EST2, S-EST3), unos valores mínimos de contenido de conglomerante, del 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.

Disposiciones con respecto a la seguridad y salud y la protección del medio ambiente

Se refieren a las prescripciones de los materiales y procedimientos de ejecución relativas a seguridad y salud y medio ambiente que contemplan las disposiciones vigentes, con respecto a la protección de los trabajadores y emisión de polvo a la atmósfera.

Se fijará la máxima velocidad del viento para la ejecución de las obras cuando la extensión del conglomerante sea en seco.

7.3 Especificaciones de los tratamientos en formación de explanadas

Las principales prescripciones se resumen en la Tabla 7.1

7.3.1 Establecimiento de las especificaciones de los materiales

Las especificaciones deben abarcar todos los materiales que intervienen en el proceso de la estabilización de una explanada, que son:

- los conglomerantes
- los suelos que se van a estabilizar
- los eventuales aditivos que, en algunos casos, se puedan emplear en el caso del tratamiento con cemento
- finalmente, se deberán fijar las especificaciones del material final producido en la estabilización.

Tabla 7.1 Prescripciones técnicas relativas al empleo de suelos tratados

Materia	Prescripciones que se pueden introducir	
	Terraplén	Explanada
	- Naturaleza y características del conglomerante a utilizar	
Conglomerante		- Fijar reglas para la dosificación de cal en función del estado de humedad del suelo, en el caso de utilizar dos conglomerantes - Fijar la humedad del suelo que obligue a utilizar la vía seca como sistema de estabilización
Capacidad de almacenamiento del conglomerante	- Capacidad adaptada al ritmo de producción	
Naturaleza, estado y localización de los suelos antes de ser tratados	- Tabla de características de los suelos a tratar - Localización de yacimientos de material a reservar para su tratamiento	
Extendido del producto de tratamiento	- Aceptación del sistema de extendido, en el caso de que se hubiera de aplicar la vía seca - Valor máximo del coeficiente de variación del sistema - Fijación de las características del distribuidor - precisión - cuantía por m² de superficie	
Sistemas de mezclado	- Aceptación del tipo, naturaleza y características de los equipos de mezcla - Eficacia de disgregación del suelo - Homogeneidad de la mezcla en el espesor de la tongada (pH y OCa en tratamientos con cal)	
	- Técnicas de ejecución especiales	- Profundidad de mezcla - Dispositivo especial de dosificación para vía húmeda
Compactación	- Tipo, naturaleza, número y características de los rodillos - Exigencias de compactación (% de la densidad del Proctor de referencia)	
Características mínimas del suelo estabilizado	- Valores mínimos de - CBR - contenido mínimo de conglomerante - cambios volumétricos (hinchamiento/colapso) - módulo de deformación E_{v2} (en el caso de explanadas)	
Acabado de la superficie y juntas	- Rasante - Anchura de capa estabilizada - Solapes	- Tolerancia de nivelación de la plataforma - Realización de un refino superficial para ajustar la rasante - Exigencias de regularidad superficial
Capacidad de soporte y deformabilidad		- Exigencias mínimas de módulo de deformación con placa estática o dinámica - Exigencias mínimas de deflexión patrón
Disposiciones medioambientales	- Aplicación de la normativa vigente en materia de emisiones de polvo - Aplicación de la normativa vigente en Seguridad y Salud - Velocidad del viento a partir de la cual debe ser interrumpido el tratamiento - Dosificación de cal y/o cemento - Valor mínimo del índice CBR o resistencia a compresión - Reducción de plasticidad	
Fórmula de trabajo	- Estabilidad volumétrica. Hinchamiento/colapso - Humedad del suelo en el momento de la mezcla y humedad de compactación	

Conglomerantes

Los materiales empleados en la estabilización de suelos son fundamentalmente la cal y el cemento. La elección de una u otro depende de las características geotécnicas y de la humedad del suelo.

En el tratamiento de suelos para formación de explanadas el conglomerante utilizado normalmente es el cemento aunque en algunos casos, cuando los materiales son predominantemente arcillosos, debe utilizarse cal para mejorar sus cualidades.

En algunos casos puede ser necesaria una estabilización mixta, efectuando primeramente una estabilización con cal para que se produzca la reacción química cal-arcilla y posteriormente con cemento.

Las definiciones, denominaciones y especificaciones de las cales para estabilización de suelos vienen expresadas en la norma UNE-EN 459 -1.

En la redacción de las especificaciones de este material es conveniente tener en cuenta también el artículo 200 “Cales para estabilización de suelos”, incluido dentro del PG-3.

Los cementos a utilizar serán de los tipos descritos en el capítulo 2.

Las especificaciones del tipo elegido se extraerán de las normas UNE correspondientes:

- UNE - EN 197-1 “Cemento. Parte 1 : Composición, especificaciones, y criterios de conformidad de los cementos comunes”
- UNE 80 307 “Cementos para usos especiales”.

Asimismo será de aplicación la vigente Instrucción para la recepción de cementos. También se debe consultar el artículo 202 “Cementos”, del citado PG-3.

En el caso del cemento es importante fijar el principio de fraguado del mismo y, si el suelo a estabilizar contiene sulfatos, utilizar un cemento resistente a los sulfatos.

Aditivos

Eventualmente se pueden utilizar retardadores de fraguado cuando, por razones de temperatura, el proceso de fraguado se adelante, pudiendo peligrar la calidad del producto estabilizado.

También puede ser necesario su empleo para incrementar el tiempo de trabajabilidad de la mezcla de cemento y suelo, con climatología calurosa.

Las especificaciones de dosificación y sistemática de adición deben ser consultadas al fabricante del aditivo y verificarlas en el tramo de prueba.

Agua

El agua para una estabilización deberá cumplir en general las mismas especificaciones fijadas para hormigones y morteros en el artículo 280 del PG-3.

El agua de mar se puede emplear en la composición de la estabilización, aunque no debe usarse en el curado.

En general se pueden utilizar, tanto en el amasado como en el curado, todas las aguas que hayan sido sancionadas por la práctica.

7.3.2 Suelos aptos para estabilizar para la formación de las explanadas

El artículo 512 “Suelos estabilizados in situ” del PG-3 establece ciertos requisitos para los suelos que vayan a ser estabilizados, en cuanto a:

- granulometría
- características geotécnicas (plasticidad)
- composición química.

Las prescripciones que han de cumplir se han expuesto en el capítulo 2.

El ensayo de materia orgánica mide todos los materiales oxidables que existan en el suelo, por lo que en determinados suelos en los que existen compuestos no orgánicos oxidables, los valores obtenidos pueden ser altos, sin que exista materia orgánica. En estos casos es conveniente efectuar estudios complementarios antes de desechar los suelos.

Cuando se vaya a utilizar como agente estabilizador cemento, se comprobará que los materiales a tratar no presenten reactividad potencial con los álcalis de éste.

En lo que respecta a los sulfatos solubles presentes en el suelo que, en ambiente básico pueden reaccionar con alúmina (Al_2O_3) y cal (CaO), con posible formación diferida de ettringita, en condiciones de cambio de humedad; las distintas especificaciones para los estabilizados con cal limitan el contenido de sulfatos solubles. Estos límites máximos oscilan desde 0,8 % de las Recomendaciones de la Junta de Andalucía al 1 % del PG-3.

En lo que respecta a las exigencias granulométricas y de plasticidad, habrá que tener en cuenta estos requisitos a la hora de fijar las especificaciones de suelos tratados para explanadas, aunque conviene recapacitar antes de transcribirlos íntegramente.

Es evidente que la formación de explanadas exige unas prestaciones, para los materiales que las conforman, superiores a los empleados en terraplén, lo que obliga a emplear mejores suelos para su tratamiento.

A este respecto, en la normativa del Ministerio de Fomento se exige que el suelo no presente expansividad. Esta prescripción puede resultar demasiado restrictiva en algunos casos, por lo que conviene recordar que existe una norma europea, la EN 13286-49, que mide la aptitud de un suelo a ser tratado con cal o cemento, basándose en un ensayo acelerado de expansividad mediante inmersión en agua caliente de la muestra tratada, y en la que se indica que el suelo es utilizable si la expansión medida tras el ensayo no es superior al 5 % (pudiendo aceptarse valores de hasta el 10 % en determinados casos). Si los suelos presentan una cierta expansividad es aconsejable realizar dicho ensayo antes de descartarlos.

En la fórmula de trabajo se indicará el plazo de trabajabilidad de la mezcla en el caso de las estabilizaciones con cemento, cuyo valor cumplirá lo especificado en el Pliego.

7.3.3 Características de los suelos una vez estabilizados para formación de explanadas

La normativa del Ministerio de Fomento (artículo 512 del PG-3) establece tres tipos de suelos estabilizados cuyas especificaciones vienen expresadas en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2 Características exigidas a los suelos estabilizados (Pliego PG-3)

Características	Unidad	Norma	Tipo suelo estabilizado		
			S-EST1	S-EST2	S-EST3
Índice CBR, a 7 días		UNE-EN 13286-47	≥ 6	≥ 12	-----
Compresión simple, a 7 días	MPa	UNE-EN 13286-41	-----	-----	≥ 1,5
Densidad (Proctor modificado)	% dens. máxima	UNE-EN 13286-2	≥ 95 (≥ 97 en capas de coronación)	≥ 97	≥ 98
Módulo de compresibilidad E_{v2} (ensayo de placa de carga)	MPa	UNE 103808	≥ 60	≥ 120	≥ 300
Deflexión patrón máxima*	10 ⁻² mm	6.3 IC	≤ 250	≤ 200	≤ 125

* En capas de coronación de explanadas y para categorías de tráfico pesado T00 a T2

La Instrucción de Firmes de la Junta de Andalucía establece las categorías de cimiento indicadas en la Tabla 7.3.

La Junta de Andalucía, mediante la Instrucción de Firmes y el Pliego de auscultación dinámica de alto rendimiento (ADAR), establece para el plano de explanada las deflexiones máximas según la categoría del cimiento, midiéndolas con el deflectómetro de impacto. Estos valores los deben cumplir los suelos estabilizados cuando se usan como coronación del cimiento (plano de explanada).

Tabla 7.3 Categorías de cimiento de firme (Instrucción para el diseño de firmes de la Red de Carreteras de Andalucía)

Categoría de cimiento	Módulo equivalente, E_e (MPa)
Baja	≥ 60
Media	≥ 100
Alta	≥ 160

7.3.4 Establecimiento de las especificaciones del proceso de ejecución

Las especificaciones del proceso de ejecución abarcan a los equipos, a las exigencias de obra terminada y a disposiciones sobre la seguridad y salud y protección del medio ambiente.

Se deben incluir los preceptivos tramos de prueba para la aprobación de las fórmulas de trabajo, así como los equipos y procedimientos de ejecución.

Equipos de ejecución de la estabilización

Los equipos de ejecución de la estabilización de explanadas son más precisos y complejos que los empleados para la formación de terraplenes.

Será necesario establecer cuál es el sistema de estabilización más adecuado (vía húmeda o seca) a las condiciones de cada obra.

El procedimiento de vía húmeda debe ser el exigido en condiciones normales, sobre todo para obras importantes.

Sin embargo, una humedad excesiva de los suelos puede obligar a exigir la vía seca, como sistema de estabilización. En este caso es necesario fijar las condiciones de humedad natural de los materiales en los yacimientos, que pueden obligar a cambiar de sistema adoptando el proceso por vía seca.

Si el exceso de humedad viene motivado por la climatología adversa, la opción de empleo de vía seca puede ser temporal, durante el período en el que se mantengan estas condiciones. Una vez superado este período se puede volver a utilizar la vía húmeda.

Especificación de unidad terminada

A la unidad terminada habrá que fijarle, en primer lugar, los condicionamientos a exigir en materia de compactación, que son los expresados en la Tabla 7.2.

Se fijarán también las tolerancias de rasante. Para una explanada tratada es habitual un valor de 20 mm.

En lo que respecta al espesor de la capa estabilizada, el valor medio no deberá ser inferior al especificado, de tal manera que no más de dos de las medidas individuales den valores por debajo del 10% del espesor nominal.

El Índice de Regularidad Internacional (IRI) de la explanada deberá cumplir lo fijado en los Pliegos. En la Tabla 7.4 se incluyen los valores especificados por el PG-3.

Tabla 7.4 Exigencias de regularidad superficial para la capa superior de la explanada (Pliego PG-3)

Porcentaje de hm	IRI (dm/hm)
50 %	< 3,0
80 %	< 4,0
100 %	< 5,0

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) (fig. 7.1) o dinámica (UNE 103807), o bien de deflexiones.

Especificaciones en materia de seguridad y salud y medio ambiente

Se refieren al cumplimiento de los materiales y procesos de ejecución a las disposiciones vigentes en materia de salud y medio ambiente, con respecto a la emisión de polvo a la atmósfera.

Las prescripciones técnicas relativas al empleo de suelos tratados en explanadas se recogen en la Tabla 7.1.

7.4 Elaboración del Plan de Aseguramiento de la Calidad

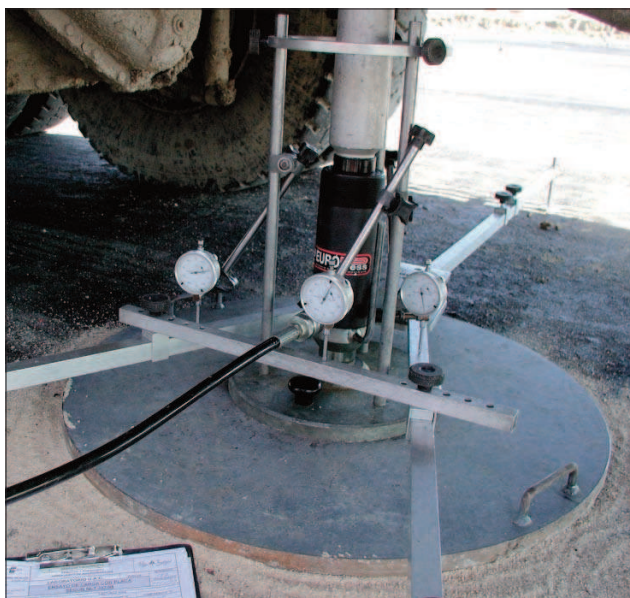


Figura 7.1 Placa de carga

De acuerdo con las disposiciones generales descritas en su Manual de Calidad, el contratista que va a ejecutar la estabilización debe elaborar un Plan de Aseguramiento de la Calidad de la unidad de obra, el cual deberá ser sometido a aprobación del Director de la Obra.

Este plan de calidad, que irá incluido en el plan general de la obra, debe contemplar los siguientes apartados:

- estructuración y lotificación
- especificaciones técnicas de compra y fichas de recepción
- procedimiento técnico específico de realización de la estabilización

- elaboración de un Plan de Puntos de Inspección (PPI), con las correspondientes fichas de inspección que incluya controles de ejecución, geométricos y de materiales, como medida de garantizar que se cumplen las prescripciones técnicas del proyecto para la unidad terminada
- verificación de equipos
- no conformidades y medidas correctivas.

7.4.1 Estructuración y división en lotes

El control de los parámetros de una estabilización se realiza, como en el resto de unidades de obra, por muestreo. Se hará una estructuración 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.

Esta estructuración planificada se irá ajustando durante la ejecución a los lotes homogéneos realmente ejecutados por el contratista (las zonas homogéneas terminadas, como una tongada ejecutada en un día). Por ejemplo, CD-SCL-2T- PK1+200-1+800, es decir calzada derecha, suelo estabilizado con cal, 2ª tongada y los PK límites de la capa.

Estos códigos de lote deberán figurar con claridad para asegurar la trazabilidad en todas las fichas de inspección, órdenes de trabajo al laboratorio, actas de resultados de ensayos, etc. que se realicen tanto por el autocontrol del contratista como por el control de recepción de la Dirección de Obra, de tal forma que si con posterioridad se produjesen daños en el lote, se pueda identificar claramente toda la documentación generada en el control de calidad para su análisis.

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

Las reglamentaciones oficiales, por ejemplo el PG-3 del Ministerio de Fomento, en su artículo 512, y las Recomendaciones para el tratamiento de suelos con cal de la Junta de Andalucía, establecen recomendaciones a la hora de fijar el tamaño de los lotes y el número de muestras.

7.4.2 Especificaciones Técnicas de Compra y Fichas de Recepción

Las características de los suministros se incluyen en las Especificaciones Técnicas de Compra, y la recepción de los mismos mediante las Fichas de Recepción de Materiales de Obra. Los contratistas en su sistema de calidad incluyen unos modelos tipo, que se deberán adaptar al proyecto concreto a ejecutar y aprobarse antes del comienzo de los trabajos.

Las especificaciones técnicas de compra se adjuntan al contrato de suministro y posteriormente, durante la ejecución de la estabilización, se recepcionarán las distintas partidas mediante los oportunos Informes de Recepción.

Los ensayos a realizar en la Recepción de las distintas partidas y suelos a estabilizar, los lotes y frecuencia de muestreo se incluirán en el Plan de Control de Calidad de Materiales, en función del proyecto y normativa vigente.

Conglomerantes

Durante la ejecución, si el suministro es constante a lo largo del tiempo, el lote de control será la cantidad de conglomerante recibido durante un mes, siempre que esta cifra no supere las 200 toneladas, en cuyo caso el lote se hará por esa cantidad.

En caso de suministros discontinuos, cada uno de ellos se considerará como un lote. Para cada lote se realizará una caracterización de la cal como sistema de verificación de los datos obtenidos del suministrador, al que, para cada entrega de material, se le exigirá un albarán en el que se incluirá el tipo de conglomerante, su procedencia, cantidad y datos de características.

Antes de comenzar los trabajos de la estabilización se efectuarán análisis de muestras de conglomerante tomadas en la fábrica que va a servir a la obra, así como cuando se cambie de suministrador o tipo. Estos ensayos se ajustarán a las especificaciones redactadas para la obra, según se ha indicado en el apartado correspondiente. En su defecto, para la cal se aplicará el artículo 200 del PG-3 y la Instrucción para la Recepción de cales en obras de estabilización de suelos, y para el cemento el artículo 202 del PG-3 y la Instrucción para la Recepción de Cementos.

Aditivos

Los aditivos se suministrarán debidamente etiquetados y acompañados del certificado de garantía del fabricante. Sobre el producto suministrado se efectuarán comprobaciones periódicas de acuerdo con la norma UNE-EN 934-2.

Agua

La calidad del agua se puede comprobar semanal o mensualmente, si estos periodos se consideran suficientes. Habrá que vigilar que no se produzcan contaminaciones en las conducciones y depósitos de almacenamiento.

Suelos a estabilizar

Los suelos a estabilizar deben ser controlados en el tajo de extendido mediante ensayos de caracterización, verificando sus parámetros con el del préstamo de suministro que se utilizó para la formula de trabajo.

Tanto el PG-3 como las Recomendaciones para el tratamiento de suelos con cal de la Junta de Andalucía definen el tipo y la frecuencia de los ensayos a realizar a los suelos a estabilizar.

7.4.3 Procedimiento técnico de ejecución de la estabilización

El procedimiento constructivo de la estabilización se redactará teniendo en cuenta los siguientes puntos:

- la forma de ejecutar los diferentes tajos o tareas elementales que tienen incidencia en la calidad final del tratamiento
- la organización y medios que se prevé emplear para garantizar la ejecución y orden de estas tareas elementales, haciendo hincapié en los siguientes puntos:
 - la gestión de los productos de tratamiento, es decir, su recepción, almacenamiento y control de consumo
 - el modo de explotación de los yacimientos de los materiales destinados para ser tratados (modo de extracción, acopios en caso de ser necesarios, ajuste de la humedad...)
 - el sistema de fabricación y de la puesta en obra del suelo estabilizado (aprovisionamiento, extendido del material de estabilización, mezcla y homogeneización con el conglomerante, compactación, refinado, compactación final, aplicación del riego de curado, etc.), describiendo la maquinaria y los medios humanos de que se dispondrá
- la protección del medio ambiente frente a la emisión de polvo, si se prevé que se va a producir esta circunstancia.

El procedimiento técnico de estabilización se basará en el Pliego de Prescripciones Técnicas del Proyecto, la normativa vigente y las instrucciones técnicas contenidas en el Manual de Calidad de la empresa que la realiza, particularizándolas y aprobándolas para este proyecto concreto.

7.4.4 Plan de Puntos de Inspección y Fichas de Inspección

El plan de control abarcará las diferentes fases de la ejecución de la estabilización, teniendo por objeto verificar que la obra ejecutada cumple los criterios de aceptación del proyecto, para lo cual se elaborarán los correspondientes Plan de Puntos de Inspección (PPI) y Fichas de Inspección (FI).

El Plan de Puntos de Inspección debe incluir los conceptos siguientes:

- control de Calidad de Materiales
- control de Calidad de Ejecución
- control de Calidad Geométrico
- control de Auscultación en su caso.

El Control de Calidad de Materiales

Para el desarrollo del Control de Calidad de Materiales se redactará un Plan de Control según lo especificado en el Pliego de Prescripciones Técnicas del Proyecto y la normativa vigente. Este comprenderá, al menos:

Materiales

- suelos a estabilizar
- conglomerante
- aditivos
- agua.

Tipo y composición de la mezcla

El tipo y composición de la mezcla serán los definidos en el proyecto, y deberá fijar la dosificación del conglomerante, aditivos (en su caso) y agua; y las características exigidas al material estabilizado. Previo al comienzo de la unidad de obra, se verificará y optimizará la mezcla mediante el estudio de la Fórmula de Trabajo. Se confeccionará una fórmula para cada tipo de suelo, conglomerante y tratamiento diferente. Incluirá, al menos, los siguientes parámetros:

- la dosificación del conglomerante
- el plazo de trabajabilidad, en caso de utilizarse cemento
- el valor mínimo del CBR o compresión simple a los 7 días
- la estabilidad volumétrica, determinada por los ensayos de hinchamiento y colapso
- la humedad del suelo en el momento de la mezcla
- la humedad de compactación

- el % mínimo de la densidad máxima Proctor modificado
- la reducción del índice de plasticidad
- el valor mínimo del pH
- la granulometría conseguida.

Control del suelo estabilizado durante la ejecución

Un aspecto importante a tener en cuenta es el momento en que se realizan los ensayos. Así, la determinación del contenido de conglomerante (cal o cemento) o del pH, deben realizarse transcurrido el menor tiempo posible desde la toma de muestras, cuando aún no han comenzado las reacciones químicas conglomerante-suelo, en la que se modifican los compuestos originales.

A la inversa, otras determinaciones como límites de Atterberg, contenido de finos, índice CBR o hinchamiento, deben realizarse dejando transcurrir el tiempo suficiente para que el conglomerante haya hecho su efecto.

El PG-3 incluye ensayos a realizar y en ciertos casos tamaños de lotes a ensayar. La Junta de Andalucía tiene unas Recomendaciones para la Redacción de Planes de Control de Calidad de Materiales y Equipos que facilitan la redacción de los mismos. En la Tabla 7.5 se incluyen los apartados de estabilizaciones de las mismas, tanto para los controles de autocontrol como para los de recepción.

El Control de Calidad de Ejecución

Se controlarán todos los aspectos que intervienen en la calidad del producto final, los cuales deberán quedar documentados por los inspectores en las correspondientes fichas de inspección de los lotes ejecutados:

- sistema de explotación de yacimientos
- sistema de acopios, si se prevé esta circunstancia
- sistema de extendido, mezcla y compactación
 - condiciones ambientales, sobre todo de la temperatura y de la posibilidad de lluvia durante el extendido y velocidad del viento en extendido por vía seca
 - humedad del material
 - extendido del conglomerante, caso de vía seca
 - velocidad de avance de la máquina estabilizadora
 - eficacia de la disgregación (en el caso de las estabilizaciones con cal)

Tabla 7.6 Recomendaciones para el control de calidad de estabilizaciones de suelos (Junta de Andalucía)

Ensayo	Observaciones	Norma o Procedimiento	Plan de ensayos de autocontrol			Plan de ensayos de recepción		Observaciones
			Referencia	Ensayos		Ensayos		
				nº	Tamaño lote	nº	Tamaño lote	
2.- ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CAL O CEMENTO								
2.1.- Identificación de suelos a estabilizar (cuando sea de adición, no estabilización del terreno, en cuyo caso ya está ensayado en el apartado 1.1								
Análisis granulométrico de suelos		UNE 103101	Pliego proyecto/ Recomendaciones Suelos-cal GIASA	1	10.000 m³	1	10.000 m³ *	* Cada 5.000 m³ para las capas de asiento de firme. ** En el caso de detectarse la presencia de sulfatos solubles, este parámetro se analizará cada 5.000 m³
Límites de Atterberg		UNE 103103 UNE 103104		1	10.000 m³*	1	10.000 m³ *	
Contenido de materia orgánica en suelos		UNE 103204		1	10.000 m³*	1	10.000 m³ *	
Contenido de sulfatos solubles en suelos		UNE 103201		1	10.000 m³**	1	10.000 m³ **	
Contenido de sales solubles en suelos		NLT 114		1	10.000 m³	1	10.000 m³	
Ensayos de consolidación en edómetro		UNE 103405		1	20.000 m³	1	20.000 m³	
Ensayo de colapso en suelos	*	NLT 254		1	20.000 m³	1	20.000 m³	Para suelos tolerables y/o si el contenido en yeso es > 2 %. También en suelos susceptibles de colapso
Ensayo de compactación. Proctor modificado		UNE-EN 13286-2		1	20.000 m³	1	20.000 m³	
Determinación en laboratorio del índice C.B.R. del suelo		UNE-EN 13286-47	1	20.000 m³	1	20.000 m³		
Reactividad potencial	*	EHE	Pliego proyecto/PG-3	1	Tipo/suelo	1	Tipo/suelo	En el caso de suelos a estabilizar con cemento y se sospeche pueda presentar algún tipo de reactividad
2.2.- Identificación de los materiales								
2.2.1.- Cal								
Se exigirá etiqueta de marcado CE				1	Origen	1	Origen	
Análisis químico de la cal (al menos: MgO, CaO, SQ, CO ₂ y H ₂ O libre)	*	UNE-EN 459-2	Pliego proyecto/PG-3	1	Tipo/mes	1	Tipo	También pérdida por calcinación para cales hidratadas (S)
Estabilidad de volumen en cales	*	UNE-EN 459-2	Pliego proyecto/PG-3	1	Tipo/mes	1	Tipo	Cuando: 5 % < MgO < 7 % en cales tipo CL90 y CL80
Finura de molido de la cal		UNE-EN 459-2	Pliego proyecto/PG-3	1	Tipo/mes	1	Tipo	
Reactividad de la cal	*	UNE-EN 459-2	Pliego proyecto/PG-3	1	Tipo/mes	1	Tipo	Solo para cales vivas (Q)
2.2.2.- Cemento								
Se exigirá etiqueta de marcado CE y declaración CE de conformidad (solo en el caso de cementos comunes)		UNE-EN 197-1 UNE 80307		1	Procedencia	1	Procedencia	
Contenido de trióxido de azufre en cementos		UNE-EN 196-2	Pliego proyecto/RC-08	1	Tipo/200 t o mes	1	3 meses	En el caso de cementos comunes en posesión del marcado CE, se podrá eximir, a juicio del Director de Obra, de la realización de éstos
Contenido de cloruros en cementos	*	UNE 80217	Pliego proyecto/RC-08	1	Tipo/200 t o mes	1	3 meses	
Estabilidad en volumen en cementos		UNE-EN 196-3	Pliego proyecto/RC-08	1	Tipo/200 t o mes	1	3 meses	
Pérdida por calcinación de cementos		UNE-EN 196-2	Pliego proyecto/RC-08	1	Tipo/200 t o mes	1	Tipo	Si el cemento posee Sello de Calidad, se podrá eximir, a juicio del Director de Obra, de la realización de los ensayos de Control de Producción
Resistencia mecánica de cementos	*	UNE-EN 196-1	Pliego proyecto/RC-08	1	Tipo/200 t o mes	1	Tipo	
Determinación cuantitativa de los componentes del cemento		UNE 80216. Apart. 6	Pliego proyecto/RC-08	1	Tipo/600 t o 3 meses	1	Tipo	
Tiempo de fraguado del cemento		UNE-EN 196-3	Pliego proyecto/RC-08	1	Tipo/200 t o mes	1	Tipo	
2.2.3.- Agua								
Determinación del contenido en aceites y grasas en el agua		UNE 7235	Pliego proyecto/E.H.E	1	Tipo/Procedencia	1	Tipo/Procedencia	En el caso de agua procedente de la red de abastecimiento de agua potable, no será necesaria la realización de los ensayos
Determinación de hidratos de carbono en agua		UNE 7132	Pliego proyecto/E.H.E	1	Tipo/Procedencia	1	Tipo/Procedencia	
Determinación de cloruros en el agua	*	UNE 7178	Pliego proyecto/E.H.E	1	Tipo/Procedencia	1	Tipo/Procedencia	
Determinación del contenido total de sulfatos en agua		UNE 7131	Pliego proyecto/E.H.E	1	Tipo/Procedencia	1	Tipo/Procedencia	
Determinación del contenido total de sustancias disueltas en agua		UNE 7130	Pliego proyecto/E.H.E	1	Tipo/Procedencia	1	Tipo/Procedencia	
pH del agua		UNE 7234	Pliego proyecto/E.H.E	1	Tipo/Procedencia	1	Tipo/Procedencia	

Ensayo	Observaciones	Norma o Procedimiento	Plan de ensayos de autocontrol			Plan de ensayos de recepción		Observaciones
			Referencia	Ensayos		Ensayos		
				nº	Tamaño lote	nº	Tamaño lote	
2.3.- Dosificación de la mezcla								
Fórmula de trabajo para estabilización de suelos con cal	*	Según punto 4 de Recomendaciones suelos-cal GIASA	Pliego proyecto/PG-3	1	Tipo/suelo	1	Tipo/suelo	Con al menos 3 porcentajes distintos de cal o cemento
Fórmula de trabajo para estabilización de suelos con cemento		Según punto 512.5.1 de ORDEN FOM/891/2004, de 1 marzo de 2004	Pliego proyecto/PG-3	1	Tipo/suelo	1	Tipo/suelo	
Plazo de trabajabilidad	*	UNE-EN 13286-45	Pliego proyecto/PG-3		Tipo/suelo	1	Tipo/suelo	Solo para estabilización de suelos con cemento
2.4.- Control de ejecución (suelo estabilizado con cal)								
Humedad mediante secado en estufa		UNE 103300	Pliego proyecto/ recomendaciones suelo-cal GIASA	1	5.000 m³/día *	1	5.000 m³/día *	Cada 1.000 m³ o 2/día para capas de asiento de firme
Eficacia de disgregación. (Antes de estabilización)		UNE-EN 933-1		1	5.000 m³/día *	1	5.000 m³/día *	
Análisis granulométrico de suelos		UNE 103101		1	5.000 m³/día *	1	5.000 m³/día *	
Límites de Atterberg		UNE 103103 UNE 103104		1	5.000 m³/día *	1	5.000 m³/día *	
pH en suelos		UNE 77305		1	5.000 m³/día *	1	5.000 m³/día *	
Contenido en cal del suelo estabilizado		Según anejo nº 3 de "Verificación de inicio de unidad de obra: Estabilización de suelo con cal"		1	5.000 m³/día *	1	5.000 m³/día *	
Determinación del Índice C.B.R., a 1, 4 y 7 días		UNE-EN 13286-47		1	5.000 m³/día *	1	5.000 m³/día *	* Cada 5.000 m³ o 2/semana para capas de asiento de firme ** Los ensayos de hinchamiento o colapso en los casos que se den en material a estabilizar
Ensayo de compactación. Proctor modificado		UNE-EN 13286-2		1	10.000 m³/semana*	1	10.000 m³/semana *	
Ensayo de hinchamiento libre en edómetro		UNE 103601		1	10.000 m³/semana*	1	10.000 m³/semana *	
Ensayo de colapso en suelos	**	NLT 254		1	10.000 m³/semana*	1	10.000 m³/semana *	
2.5.- Control de ejecución (suelo estabilizado con cemento)								
Humedad mediante secado en estufa		UNE 103300	Pliego proyecto/PG-3	2	Día	1	5.000 m³/día *	* Cada 1.000 m³ o 2/día para capas de asiento o de firme ** Para suelos S-EST 3 *** Para suelos tipo S-EST 1 y S-EST 2
Eficacia de disgregación (antes de estabilización)		UNE-EN 933-1	Pliego proyecto/PG-3	2	Día	1	5.000 m³/día *	
Dosificación de cemento (m² suelo estabilizado)		PG-3 512.9.2	Pliego proyecto/PG-3	2	Día	1	5.000 m³/día *	
Resistencia a compresión simple (a 7 días)	**	UNE-EN 13286-41	Pliego proyecto/PG-3	5	Día	1	5.000 m³/día *	
Determinación del índice C.B.R., a 7 días	***	UNE 103502	Pliego proyecto/PG-3	5	Día	1	5.000 m³/día *	* Cada 1.000 m³ o 2/día para capas de asiento o de firme
Ensayo de compactación. Proctor modificado		UNE-EN 13286-2	Pliego proyecto/PG-3	1	10.000 m³/semana*	1	10.000 m³/semana *	
Ensayo de hinchamiento libre en edómetro	*	UNE 103601	Pliego proyecto/PG-3	1	45.000 m³/mes	1	45.000 m³/mes	
Ensayo de colapso en suelos		NLT 254	Pliego proyecto/PG-3		45.000 m³/mes	1	45.000 m³/mes	En los casos que se den en el material a estabilizar
2.6.- Control de la compactación del suelo estabilizado								
Densidad y humedad in situ		ASTM D-3017 ASTM D-2922	Pliego proyecto/PG-3	7	Día	5	5.000 m²	Cada 3.000 m² en capas de asiento

- plazo de trabajabilidad (en el caso de las estabilizaciones con cemento)
- homogeneidad del tratamiento en la profundidad de la tongada
- control de la compactación (densidad y humedad)
- control de espesores (catas)
- control de capacidad de soporte (SEST-1 y SEST-2) o de resistencia (SEST-3)
- control del curado
- juntas
- refino
- otros controles que el contratista considere necesarios para la calidad de la obra.

El control de las condiciones meteorológicas, sobre todo de la temperatura y de la posibilidad de lluvias, es importante para comprobar que no se superan los límites que fijan las prescripciones para la realización de los trabajos de estabilización, en cuyo caso habría que suspenderlos.

El control de la humedad del material es necesario para fijar el sistema a emplear y, en el caso de vía húmeda, decidir las proporciones de agua y conglomerante en la lechada a suministrar. En el caso de la vía seca, ayudará a decidir si es necesario añadir agua, mediante riego con cisterna, al suelo o directamente al tambor mezclador para alcanzar la humedad óptima. Lo normal es efectuar mediciones de la humedad, por lo menos dos veces al día.

El control del extendido del conglomerante es importante para garantizar las prestaciones finales del producto. En el caso de la vía seca se efectuará mediante mediciones de la cuantía superficial utilizando dispositivos de recogida de muestras al paso del repartidor (fig. 7.2). En la vía húmeda, extrayendo muestras de la lechada que se analizarán luego en laboratorio y comprobando la dotación de la misma en la superficie tratada.

Se controlará el consumo de conglomerante a diario, comparando con los consumos teóricos en función de los volúmenes estabilizados; esta comparación servirá de verificación de que los consumos son correctos.

En el caso de utilizar la vía seca se ajustará la dotación de conglomerante tomando muestras del material extendido sobre la superficie del suelo. En el caso de vía húmeda se fijarán las proporciones de la lechada en función de la humedad del suelo a estabilizar, ajustando el agua y el conglomerante de la misma.

Se fijará la proporción mínima de agua que permita que la lechada se pueda bombear sin problemas, descartando el sistema de vía húmeda cuando la humedad necesaria sea inferior a estos mínimos, debiéndose utilizar, en este caso, la vía seca.



Figura 7.2 Bandeja para control de la dotación de conglomerante y pesado de la misma

Se establecerá la velocidad máxima de la máquina estabilizadora, por encima de la cual no se garantiza la homogeneidad de la mezcla y la desaparición completa de nódulos del suelo sin pulverizar.

El control de espesor de extendido (fig. 7.3) se realizará extrayendo el material en puntos aleatorios fijados de antemano y midiendo la profundidad del orificio, o bien mediante sondas. También se controlará la homogeneidad de la tongada tomando muestras en la parte superior e inferior y determinando en las mismas los contenidos de conglomerante y el pH.

La compactación se controlará mediante la medida de la humedad y de la densidad seca del suelo. Lo más normal es efectuar esta medida con equipos de isótopos, en superficie y en fondo de capa. Se verificará periódicamente el equipo, utilizando el método de la arena como sistema de verificación.

Dentro de los parámetros que afectan al comportamiento de una capa estabilizada, la densidad (fig. 7.4) y la homogeneidad son de la máxima importancia. Por otro lado son características que se pueden optimizar de una manera económica. Por eso es muy importante controlar exhaustivamente estos parámetros.

La densidad de referencia y sus tolerancias deben estar perfectamente definidas en el proyecto y deben confirmarse en los tramos de prueba. Según el tipo de estabilización las exigencias suelen estar entre 95 y el 100% del Proctor modificado.

Generalmente se suele fijar que la densidad media de cada lote supere el valor de la den-



Figura 7.3 Control de espesor de capa estabilizada



Figura 7.4 Control de densidad con sonda nuclear

sidad exigida y que no haya desviaciones superiores a 2 puntos por debajo de la misma.

Otro tema a tratar es la definición de la densidad de referencia, que hay que constatar periódicamente mediante nuevos ensayos Proctor. En el Plan de Control de Calidad de Materiales se indicará la cadencia de esta determinación, según la normativa a aplicar.

El control de la capacidad de soporte en los suelos S-EST1 y S-EST2 se suele hacer mediante ensayos de CBR, analizando las muestras extraídas en el laboratorio a los 7 días de la extracción.

Para el suelo estabilizado tipo S-EST3 se confeccionarán probetas (fig. 7.5) que se compactarán a la densidad exigida en obra y que se romperán a compresión simple a siete días, debiendo alcanzar valores superiores a 1,5 MPa.



Figura 7.5 Fabricación de probeta en obra con martillo vibrante

Cuando se fabriquen probetas es conveniente realizar un número determinado de series tomadas aleatoriamente que constarán como mínimo de dos probetas por serie, aunque sería deseable fabricar un mayor número con objeto de romper a diferentes edades. El número de series dependerá del nivel de control. Lo mínimo a exigir sería tres series de dos probetas cada una por cada lote, haciendo un total de 6 probetas por lote.

Se seguirá el mismo criterio cuando el parámetro a controlar sea la capacidad de soporte, efectuando un ensayo de CBR por lote.

Para el control del curado se debe comprobar visualmente la humedad de la superficie estabilizada hasta el momento de aplicar la emulsión de curado, verificar que el riego se efectúa correctamente y con la dotación especificada y asegurar que no se levante durante la ejecución de la obra.

Las dotaciones de emulsión se comprueban por diferencia de peso de las planchas que se colocan en superficie antes y después de extendida la emulsión.

El control de calidad geométrico

El control geométrico de la estabilización se emplea para verificar que las características geométricas de la obra ejecutada se ajustan a las del proyecto. El control geométrico se realiza con equipos de topografía. El espesor también se puede averiguar mediante extracción de testigos (fig. 7.6).

El control efectuado debe estar de acuerdo con las especificaciones exigidas en materia de geometría, que han sido expuestas en el apartado 7.3.4.

Los aspectos a controlar serán:

- replanteos
- control del espesor de las tongadas del extendido
- rasantes
- tolerancias geométricas
- otros controles que el contratista considere necesarios para la calidad de la obra.

Controles de auscultación

Cada vez con más frecuencia se utilizan para estos controles vehículos dotados de aparatos de medición que permiten obtener una gran cantidad de datos en un corto periodo de tiempo.

Estos equipos empezaron a emplearse para el control de capas de firme, pero su uso se ha extendido también a las explanadas por su alto rendimiento.

Algunas Administraciones, como la Junta de Andalucía, los aplican sistemáticamente en sus obras desde 1995.

En las capas estabilizadas se pueden utilizar para verificar:



Figura 7.6 Extracción de testigo

- la regularidad superficial: mediante un perfilómetro láser
- la capacidad de soporte: midiendo las deflexiones con un deflectómetro de impacto o equipos similares
- los espesores: mediante un georradar instalado en un vehículo automóvil.

7.5 Control y verificación de equipos

La maquinaria de puesta en obra debe ser tarada antes de comenzar los trabajos, con objeto de comprobar que se obtiene:

- una correcta dosificación del conglomerante
- una mezcla homogénea del mismo con el agua y el suelo.

Durante la ejecución de la estabilización se efectuarán verificaciones periódicas de las máquinas que intervienen, comprobando los dosificadores y el estado de los dispositivos de mezclado de la estabilizadora, efectuando los cambios oportunos cuando fuera necesario.

Con todos estos puntos se confeccionarán las correspondientes fichas de inspección, a partir de las contenidas en el Manual de Calidad de la empresa que la realiza, particularizándolas y aprobándolas para cada proyecto concreto.

Este control se plasma en los siguientes documentos:

- programa de equipos sometidos a control
- instrucciones de verificación de equipos
- fichas de verificación o calibración de equipos.

7.6 Detección y tratamiento de las no conformidades y medidas correctivas

La aplicación del plan de calidad lleva en último término a una comparación de los valores alcanzados en la obra con respecto a las especificaciones. En caso de que no se cumplan dichas especificaciones, para un determinado parámetro, en un determinado lote, éste queda pendiente de aprobación, debiéndose abrir la correspondiente no conformidad. En este caso habrá que tomar medidas para corregir las deficiencias que emanan de esta situación, con objeto de restituir el lote al cumplimiento de las especificaciones.

En cualquier caso, la detección de cualquier tipo de no conformidad debe ser documentada incluyéndola en el Registro de no Conformidades de la Obra.

En el caso de establecer medidas correctivas para evitar que vuelva a suceder en el futuro, se abrirá el correspondiente parte, el cual se incluirá en el Registro de Acciones Correctivas y Preventivas de la Obra.

La descripción y el tratamiento, así como el responsable del cierre de las no conformidades, deben ser incluidos, de forma muy clara, en el Parte de no Conformidad.

7.7 Análisis de resultados

Toda la documentación generada como consecuencia de la aplicación del plan de control aporta una cantidad de datos importante, que se debe interpretar y analizar periódicamente mediante el tratamiento estadístico de los resultados obtenidos.

Este análisis se incluye dentro de los Informes de obra al Director de las Obras, en los que se resume la situación de las obras de estabilización en el momento de su elaboración. Estos informes se suelen emitir mensualmente, realizándose un informe final una vez acabada la estabilización.

En estos informes se deben incluir:

- listado de las partes en que se ha dividido la obra (lotes) para la ejecución de la estabilización, con su localización en planos
- descripción de las acciones de control realizadas (frecuencia, métodos y medios utilizados, etc)
- una relación ordenada de los resultados de medidas realizadas sobre las propiedades ensayadas, utilizando gráficos para su mayor comprensión.
- las no conformidades abiertas y las medidas tomadas para su corrección.

Un instrumento muy útil para incluir en estos informes son los gráficos de control (fig. 7.7), que permiten analizar de una forma rápida y sencilla la marcha de los procesos, y actuar con prontitud cuando éstos se desajusten. La Junta de Andalucía, en su “Manual para la elaboración de los gráficos de control de calidad en las obras” define unas pautas para la representación gráfica de los resultados de ensayo que se realicen en número suficientemente representativo, utilizando conceptos estadísticos como medias móviles y niveles de confianza. En estos gráficos se representan también los valores individuales y sus límites de aceptación según las especificaciones del proyecto. Estos gráficos de control permiten una mejor evaluación de la calidad de la obra ejecutada y son una herramienta muy útil tanto para el Contratista como para la Dirección de Obra.

En la unidad de obra de estabilización, los parámetros más interesantes para controlar estadísticamente mediante gráficos son los siguientes:

- 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).

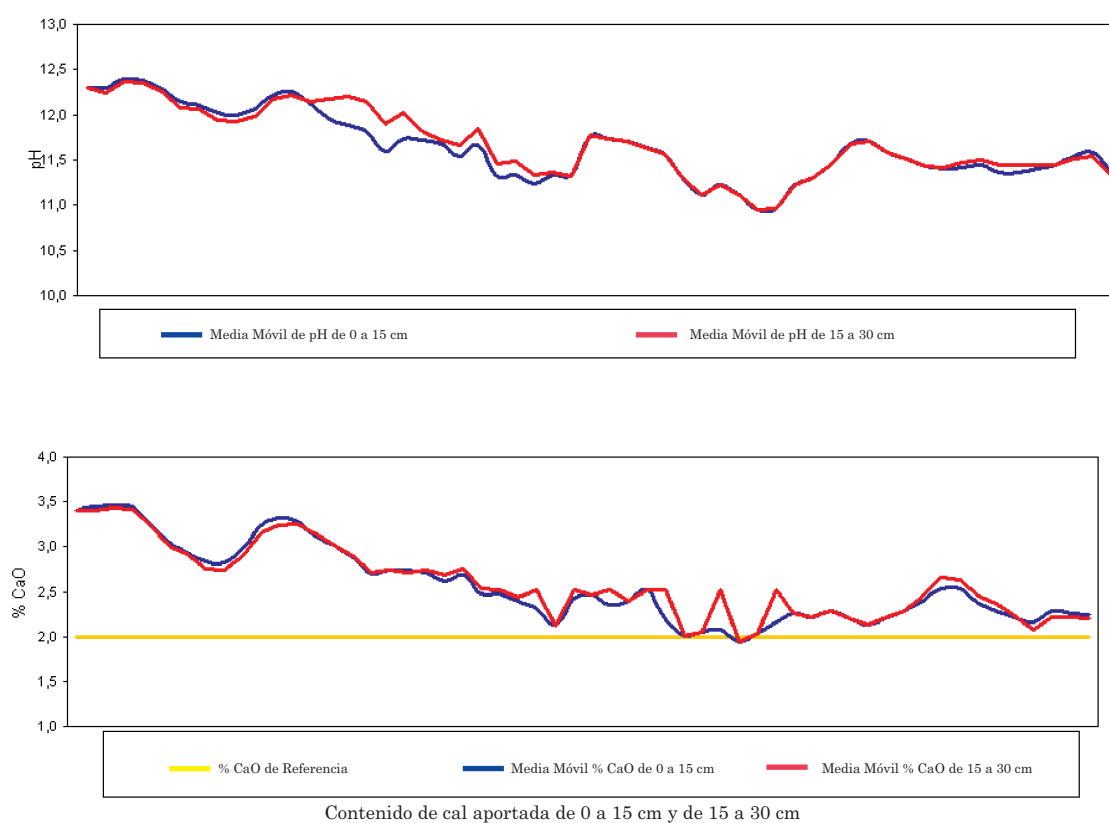


Figura 7.7 Modelos de gráficos de control

PREVENCIÓN DE RIESGOS LABORALES

8

En este capítulo se van a tratar los aspectos que deben tenerse en cuenta en las obras de estabilización de suelos con cal o con cemento, desde el punto de vista de los riesgos que pueden presentarse para los trabajadores que intervienen en la operación, derivados fundamentalmente del empleo de estos conglomerantes.

8.1 Identificación de riesgos

8.1.1 Del proceso de ejecución

- atropellos, colisiones y atrapamientos por maquinaria o elementos móviles
- caídas de material desde la caja de los vehículos
- caídas de personas al mismo y a distinto nivel en acceso o descenso de la maquinaria
- proyección de partículas
- contactos eléctricos
- sobreesfuerzos.

8.1.2 Exposición a agentes físicos o químicos

- ruido
- polvo ambiental y de conglomerantes (inhalación)
- contactos con cal o cemento (piel, ojos)
- vibraciones



Figura 8.1 Detalle de faldón de protección de un distribuidor de conglomerante

8.2 Equipos y medios auxiliares

8.2.1 Maquinaria

- camiones de transporte
- mezcladoras, recicladoras, distribuidores de conglomerante (fig. 8.1), motoniveladoras
- compactadores de neumáticos
- rodillos vibrantes
- cuba de agua
- camión regador
- herramientas manuales.

8.2.2 Elementos de protección colectiva

- pórticos de limitación de galibo en cruces con líneas eléctricas aéreas
- vallas o barreras resistentes para acotar zona de trabajo.

8.2.3 Equipos de protección individual (EPI)

- casco de seguridad homologado o gorra según los casos (fig. 8.2)
- botas de seguridad



Figura 8.2 Operario con equipo de seguridad

- guantes adecuados a riesgo químico (cal, cemento). No deben ser nunca de materiales plásticos que puedan producir sudor en las manos
- ropa de trabajo ajustada (pero no apretada) que evite contacto con la piel
- protección de las vías respiratorias
- protectores auditivos
- ropa de alta visibilidad (chaleco reflectante)
- gafas de protección integral.

8.3 Procedimiento de trabajo

Se indican unas medidas a considerar, para disminuir los posibles riesgos en las distintas fases de trabajo.

8.3.1 Actuaciones previas

Los vehículos y la maquinaria utilizados serán revisados antes del comienzo de la obra. Durante el desarrollo de ésta se llevarán a cabo revisiones periódicas a fin de garantizar su buen estado de funcionamiento y la seguridad. Si hubiera interferencias con líneas eléctricas aéreas, se señalizarán y se colocarán gálibos.

- se mantendrá en todo momento la señalización viaria establecida para el desvío de caminos y carreteras
- será obligatorio el mantenimiento de las protecciones en todas las zonas de trabajo que lo requieran.

8.3.2 Ejecución

Aplicables al trabajo

- no se sobrepasarán las cargas especificadas para cada vehículo
- se regarán los tajos y caminos de acceso suficientemente y con la frecuencia necesaria para evitar la formación de ambiente con polvo en suspensión, sin encharcar y de forma que no se sobrepase en los puntos a tratar con el conglomerante la humedad especificada
- no se permitirá la presencia sobre la maquinaria en marcha de otra persona que no sea el conductor
- las maniobras de aproximación y vertido de productos en la tolva estarán dirigidas por el encargado de la unidad de obra
- se vigilará la existencia de extintores de incendios adecuados en las máquinas, así como el estado de éstos, de forma que su funcionamiento quede garantizado
- todas las arquetas, pozos de registro o similares existentes se mantendrán con su tapa puesta o en su defecto con tapas provisionales, barandillas o, cuando menos, se delimitará la zona con malla de balizamiento

Aplicables a la maquinaria

- la maquinaria dispondrá de marcado CE y se encontrará en perfecto estado de funcionamiento

- los accesos y circulación interna se efectuarán por los lugares indicados, con mención especial al cumplimiento de las normas de circulación y la señalización dispuesta
- el ascenso y descenso de la máquina se realizará por los lugares habilitados al efecto (escalerillas metálicas, etc.)
- no se podrán transportar personas en las máquinas que no dispongan de asientos para ello
- se controlará el buen funcionamiento de las luces, dispositivos luminosos y dispositivos acústicos de marcha atrás
- no se permitirá fumar en la maquinaria o en sus inmediaciones durante las operaciones de carga de combustible y de mantenimiento
- queda prohibido permanecer o realizar trabajos dentro del radio de acción o zona de influencia de la maquinaria

 *Queda prohibido el uso de teléfonos móviles por los operadores de la maquinaria cuando ésta se encuentre en funcionamiento.*

8.4 Estabilización con cal

8.4.1 Indicaciones generales

Además de las medidas de carácter general indicadas en los puntos anteriores, cuando se utilice cal, a efectos de prevenir los riesgos para los trabajadores, se tendrán en cuenta las indicaciones siguientes:

- el suministro y almacenamiento se hará en camiones cisterna, que descarguen directamente a los silos reguladores de obra o a los repartidores, o bien en sacos paletizados o big bags para su manejo mecanizado. El suministro irá acompañado de la hoja de seguridad proporcionada por el fabricante de la cal
- el reparto de la cal sobre el suelo no se efectuará en ningún caso mediante aire a presión
- para estos trabajos se nombrará un Supervisor de Seguridad, que normalmente será el encargado de la unidad de obra
- identificación de riesgos:
 - la cal viva es irritante
 - el valor límite de exposición (VLE) es de 2 mg/m³
 - las frases R de riesgo son:

- ✓ R37 Irritante para las vías respiratorias
- ✓ R38 Irritante para la piel
- ✓ R41 Riesgo de graves daños oculares
- las frases S de seguridad son:
 - ✓ S2 Mantener fuera del alcance de los niños
 - ✓ S25 Evitar el contacto con los ojos
 - ✓ S26 En caso de contacto con los ojos lavar con abundante agua y solicitar ayuda médica
 - ✓ S37 Usar guantes adecuados
 - ✓ S39 Usar protección para ojos y cara.

Las frases R (de riesgo) y S (de seguridad) son indicaciones de acuerdo con la normativa europea de sustancias químicas y de etiquetado y envasado de sustancias peligrosas (transpuesta a la normativa española) para informar al usuario de forma rápida y fácil en la etiqueta de los envases sobre los riesgos del producto, mientras que las medidas a observar en su manejo son frases con un número y texto tipo, contenidas en una tabla común a todos los productos, tomando aquellas que corresponden a cada producto.

La cal diluida en agua puede provocar daños epidérmicos (quemaduras alcalinas) graves y permanentes, especialmente si el contacto es prolongado.

Si hay que realizar en obra el apagado de la cal, esta operación debe hacerse sólo por personal específicamente formado, siguiendo las instrucciones del fabricante, con los EPI indicados, debido al fuerte calor desprendido en el proceso.

En caso de proyección de cal a los ojos se puede producir irritación y en casos extremos, lesión ocular.

La inhalación de polvo de cal de forma continuada puede provocar irritación de las vías respiratorias.

8.4.2 Protección personal

La manipulación y trasiego debe llevarse a cabo con sistemas estancos o, en su defecto, con suficiente ventilación para mantener los niveles de polvo por debajo de los VLE.

Es importante utilizar equipo de protección personal adecuado. Todos los EPI tendrán marcado CE.

- protección respiratoria: debe usarse filtro de respiración EN 140 categoría P2, especialmente en lugares poco ventilados o con fuerte exposición
- protección de las manos: deben usarse guantes de protección a los agentes cáusticos EN 374 que no produzcan sudor en las manos
- protección de los ojos: debe usarse protección ocular integral EN 166 frente al polvo con gafas de marcado 4 (también es válido el 5). No deben usarse lentes de contacto mientras se maneje el producto. Es aconsejable tener un lavador de ojos personal
- protección cutánea: se debe emplear ropa de trabajo transpirable que evite el contacto con la piel y con cierre elástico, así como calzado resistente a los agentes alcalinos
- seguridad general y medidas de higiene: la ropa de trabajo y los EPI deben estar limpios y secos.

Se puede utilizar crema protectora si es necesario.

Si el contacto con el producto es diario, los trabajadores deben ducharse después del trabajo y aplicar cremas protectoras sobre las partes de la piel en contacto con el producto, especialmente sobre el cuello, cara y muñecas.

Todo el personal que tenga que permanecer cerca del tajo de extendido de cal ha de colocarse con el viento a la espalda, siempre que sea posible.

Durante la descarga de la cisterna de transporte a las máquinas repartidoras solamente permanecerá cerca de los equipos el conductor de la cisterna de transporte, debidamente protegido.

En ningún caso se permitirá extender la cal directamente sobre el suelo mediante presión.

 *Es importante utilizar equipos de protección adecuados. Todos los EPI tendrán marcado CE.*

8.4.3 Manipulación y almacenamiento

La cal se ha de almacenar en lugar seco. Se deben evitar las corrientes de aire y la humedad. Se mantendrá alejada de papel, paja y nitrocompuestos.

Se dejará fuera del alcance de los niños.

En caso de incendio en la zona se debe usar polvo seco, CO₂ o espuma, evitando el agua.

La cal no es inflamable ni combustible. Retarda la llama y es un inhibidor del fuego.

8.4.4 Información toxicológica. Síntomas

En la Tabla 8.1 se resumen los peligros más importantes que pueden presentarse por el manejo inadecuado de la cal, los síntomas de los mismos, las medidas de prevención a adoptar y los primeros auxilios en caso de que se produzcan

Tabla 8.1 Síntomas de daños causados por el manejo inadecuado de la cal y medidas a adoptar

Tipos de peligro/exposición	Peligros/síntomas agudos	Prevención	Primeros auxilios
Inhalación	Sensación de quemazón en la nariz, garganta y vías respiratorias superiores, tos.	Protección respiratoria (mascarilla)	Evitar la fuente de polvo y retirar a la persona afectada hacia zona con aire fresco. Lavar con abundante agua la zona afectada. Solicitar ayuda médica, si es necesario.
Piel	Enrojecimiento, aspereza, sensación de quemazón.	Guantes protectores, traje de protección.	Despacio y con un cepillo suave o con aire limpio a presión limpiar la superficie contaminada para retirar los restos de producto. Lavar inmediatamente la zona afectada con abundante agua. Quitar la ropa contaminada. Solicitar ayuda médica, si es necesario.
Ojos	Enrojecimiento, dolor, visión borrosa.	Gafas ajustadas de seguridad o pantalla facial o protección ocular combinada con la protección respiratoria.	Lavar los ojos inmediatamente con abundante agua. Conseguir ayuda médica urgente
Ingestión	Calambres abdominales, sensación de quemazón en la boca, garganta y esófago, vómitos, debilidad.	No comer, beber ni fumar durante el trabajo.	Lavar la boca con agua. Beber abundante agua. NO provocar el vómito. Buscar ayuda médica, si es necesario

8.5 Estabilización con cemento

8.5.1 Indicaciones generales

Además de lo mencionado en cuanto a medidas de carácter general, cuando se utilice el cemento, a efectos de prevenir los riesgos para los trabajadores, se tendrán en cuenta las indicaciones siguientes:

- el cemento suministrado a granel se debe descargar directamente a los silos. Si se hace en sacos, vendrán paletizados para su manejo mecanizado
- en ningún caso se extenderá sobre el suelo mediante aire a presión

- para estos trabajos se nombrará un Supervisor de Seguridad, que normalmente será el encargado de la unidad de obra
- identificación de riesgos:
 - ✓ el cemento es irritante
 - ✓ el valor limite de exposición (VLE) es de 10 mg/m³
- las frases R de Riesgo son:
 - ✓ R36 Irritante para los ojos
 - ✓ R37 Irritante para las vías respiratorias
 - ✓ R38 Irritante para la piel
- las frases S de Seguridad son:
 - ✓ S2 Mantener fuera del alcance de los niños
 - ✓ S24 Evitar contacto con la piel
 - ✓ S25 Evitar el contacto con los ojos
 - ✓ S26 En caso de contacto con los ojos lavar con abundante agua y solicitar ayuda médica
 - ✓ S37 Usar guantes adecuados
 - ✓ S39 Usar protección para ojos y cara.

La mezcla de cemento y agua da lugar a una pasta con un pH altamente básico (11-13,5) como resultado de la hidratación de los silicatos y aluminatos de calcio. En caso de contacto prolongado puede provocar deshidratación de la piel y las mucosas.

En caso de manipulación, hay que evitar la formación de nubes de polvo de cemento.

La proyección de cemento a los ojos puede producir irritación y, en casos extremos, lesiones oculares.

La inhalación de polvo de cemento de forma continuada puede provocar irritación de las vías respiratorias.

8.5.2 Protección personal

La manipulación debe hacerse con sistemas estancos o, en su defecto, con suficiente ventilación para mantener los niveles de polvo por debajo de los VLE

☞ *Es importante utilizar equipos de protección adecuados. Todos los EPI tendrán marcado CE.*

- protección respiratoria: se debe usar filtro de respiración EN 140 categoría P2 o mascarilla FFP1
- protección de las manos: se deben usar guantes de protección frente a agentes cáusticos EN 374 que no produzcan sudor en las manos
- protección de los ojos: se debe usar protección integral ocular EN 166 frente al polvo, con gafas marcado 4 (también es válido el 5)
- protección cutánea: se debe usar ropa de trabajo transpirable que evite el contacto con la piel, con cierre elástico, así como calzado resistente a los agentes básicos. Si el contacto es con cemento seco, se quitará el máximo posible y se lavará con agua abundante. Si es con cemento húmedo, se lavará con agua abundante
- seguridad general y medidas de higiene: la ropa de trabajo y los EPI deben estar limpios y secos.

Se ha de mantener buena limpieza de manos antes de las comidas. En caso de ingestión significativa, se enjuagará la boca y se consultará al médico.

8.5.3 Manipulación y almacenamiento

El cemento debe almacenarse en medios cerrados (sacos, silos, etc.). La descarga en obra del cemento a granel se hará directamente a los silos. En caso de suministrarse en sacos, éstos deberán almacenarse en local cerrado, sin corrientes de aire ni humedad. Se reducirá la presencia de personas en la zona a las necesarias. Se evitará la formación y dispersión de nubes de polvo de cemento.

En caso de incendio en la zona de empleo del cemento, puede utilizarse cualquier agente extintor, salvo que por otras circunstancias no debidas al cemento alguno sea inadecuado

8.5.4 Información toxicológica. Síntomas

En la Tabla 8.2 se resumen los peligros más importantes que pueden presentarse por el manejo inadecuado del cemento, los síntomas de los mismos, las medidas de prevención a adoptar y los primeros auxilios en caso de que se produzcan.

Tabla 8.2 Síntomas de daños causados por el manejo inadecuado del cemento y medidas a adoptar

Tipos de peligros exposición	peligros/síntomas agudos	Prevención	Primeros auxilios
Inhalación	Tos. Dolor de garganta.	Usar mascarilla FFP1.	Aire limpio, reposo.
Piel	Piel seca. Enrojecimiento.	Guantes protectores. Traje de protección.	Aclarar y lavar la piel con agua y jabón. En caso de alergia, aplicar cremas protectoras.
Ojos	Enrojecimiento. Dolor. Quemaduras profundas graves.	Gafas ajustadas de seguridad.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después proporcionar asistencia médica.
Ingestión	Dolor abdominal. sensación de quemazón.	No comer, beber o fumar durante el trabajo.	No provocar el vómito. Proporcionar asistencia médica.

8.6 Normativa aplicable

- Ley 31/95 de prevención de riesgos laborales
- R.D. 1.627/97 Disposiciones de seguridad y salud en obras de construcción
- R.D. 485/97 Disposiciones mínimas en materia de señalización de seguridad y salud en el trabajo
- R.D. 487/97 Disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la manipulación manual de cargas
- R.D. 773/97 Disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la utilización por los trabajadores de los equipos de protección individual
- R.D. 1.215/97 Disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización de los trabajadores de los equipos de trabajo
- R.D. 374/2001 Agentes químicos
- R.D. 363/95 Clasificación, envasado y etiquetado de sustancias peligrosas
- R.D. 255/2003 Reglamento de clasificación, envasado y etiquetado de preparados peligrosos.

PROYECTO DE EXPLANADAS ESTABILIZADAS



9.1 Planteamiento general

El tratamiento o estabilización de un suelo tiene por objetivo, como se ha visto en los capítulos anteriores, mejorar las características del mismo para conseguir una mayor uniformidad, una menor sensibilidad al agua, y una reducción de su humedad y su plasticidad, todo lo cual se traduce en un material de mejor comportamiento tanto durante la puesta en obra como en servicio.

Todos estos aspectos deben tenerse en consideración durante la fase de proyecto y realizar el diseño conjunto tanto de la estructura de las capas del firme, como de las capas de apoyo del mismo.

Para ello, deben realizarse tomas representativas de los suelos existentes o que se vayan a obtener con los correspondientes movimientos de tierras y caracterizar estas muestras en laboratorio mediante los ensayos oportunos.

Con todos estos datos, se diseñarán conjuntamente las capas de cimiento del firme y este último, optimizando criterios económicos, constructivos y medioambientales (y nunca en el sentido inverso de adoptar a priori una solución y buscar luego los suelos o áridos apropiados para la misma).

Para definir y caracterizar la explanada y capas de firme, además de la Norma 6.1-IC sobre Secciones de Firme de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento, se dispone de diversas normativas autonómicas, como son las Recomendaciones de proyecto y construcción de firmes y pavimentos de la Junta de Castilla y León (2004), la Instrucción para el Diseño de firmes de la Junta de Andalucía (2007), la Norma para el dimensionamiento de firmes de la red de carreteras del País Vasco (2007) y la Norma de Secciones de firme de la Comunitat Valenciana (2009).

9.2 Normativa del Ministerio de Fomento

En las Normas 6.1-IC (Firmes flexibles) y 6.2-IC (Firmes rígidos) de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Obras Públicas publicadas en 1976 se in-

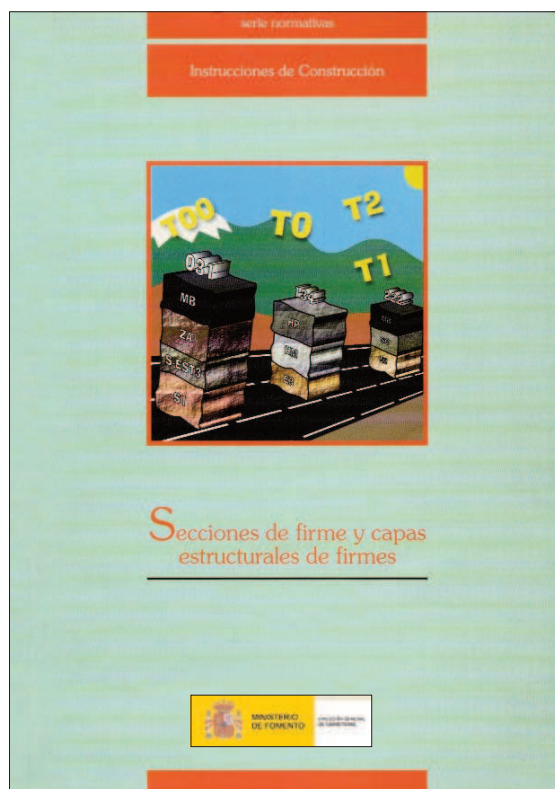


Figura 9.1

cluyó por primera vez una Tabla de clasificación de explanadas. Ésta supuso una novedad de gran interés, al permitir de manera sencilla a proyectistas y constructores definir una explanada y caracterizar su capacidad de soporte.

Dicha Tabla fue redactada de acuerdo con el estado de la técnica en aquella época, en la que la maquinaria existente no ofrecía suficientes garantías para estabilizar suelos in situ en espesores superiores a 15 cm.

Los avances que han ido experimentando los equipos de estabilización han elevado considerablemente estos valores límite. Por ello, en la revisión de las Normas de firmes publicada en 2002, las cuales se refundieron en la Instrucción 6.1 y 2-IC, se modificó también la Tabla de explanadas, admitiendo en esta última capas estabilizadas de hasta 30 cm de espesor. Se mantuvieron las tres categorías existentes hasta la fecha (E1, E2 y E3), así como los tres tipos de suelos tratados:

- S-EST1 y S-EST2 (suelos mejorados con cemento o con cal), en los que se mejoran considerablemente las propiedades del suelo con un pequeño porcentaje de conglomerante, y cuyas características exigidas se exponen en la Tabla 9.1.
- S-EST 3 (suelo estabilizado con cemento), material con una cierta rigidez al que se le exige una resistencia mínima a compresión de 1,5 MPa a 7 días de edad, así como un contenido mínimo de cemento del 3%.

Tabla 9.1 Tipos de suelos estabilizados

	Conglomerante		Características a 7 días	
	Tipo	%	CBR	R _{compresión}
S-EST1	cemento o cal	≥ 2	≥ 6	-----
S-EST2	cemento o cal	≥ 3	≥ 12	-----
S-EST3	cemento	≥ 3	----	≥ 1,5 MPa

Dicha Instrucción fue sustituida a su vez por la Norma 6.1-IC (fig. 9.1), vigente en el momento de la publicación de este manual, la cual fue aprobada en 2003, si bien no se introdujeron en ella modificaciones importantes en lo relativo a explanadas.

Una de las novedades más importantes de la normativa actual sobre firmes del Ministerio de Fomento, además de la tabla de clasificación de explanadas (fig. 9.2), es el control de la capacidad de soporte de la explanada mediante el ensayo de carga con placa (norma UNE 103808). No sólo se controla la calidad del suelo a colocar en obra (Tabla 9.2) sino que se miden las características in situ del resultado final obtenido.

Para ello se exige un módulo mínimo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga E_{v2} de dicho ensayo, según se define en la Tabla 9.3, donde se incluye además la densidad mínima especificada en obra como porcentaje respecto a la máxima obtenida en el ensayo Proctor modificado.

En el caso de tráfico T00 a T2 se exige también una deflexión patrón máxima, la cual se puede evaluar mediante distintos ensayos (placa de carga estática o dinámica, deflectómetro de impacto, curviámetro, etc.).

Tabla 9.2 Características de los suelos para explanadas

	Marginales*	Tolerables	Adecuados	Seleccionados
Granulometría	----	----	$D_{max} = 10 \text{ cm}$ Pase 2 < 80 % Pase 0,080 < 35 %	$D_{max} = 10 \text{ cm}$ Pase 0,40 < 15 %
Plasticidad	Si LL > 90 IP < 0,73 (LL-20)	LL < 65 Si LL > 40 IP > 0,73 (LL-20)	LL < 40 Si LL > 30 IP > 4	Si pase 0,40 ≥ 15% LL < 30 IP < 10
Materia orgánica	< 5 %	< 2 % < 1 % (Ex)	< 1 %	< 0,2 %
Sales solubles		Yeso < 5 % Otras < 1 % SO ₃ < 1 % (Ex)	< 0,2 %	< 0,2 %
Hinchamiento	< 5 %	< 3 % < 1 % Ex		
CBR coronación		≥ 3	≥ 5 6 (Ex)	≥ 10 ≥ 12 (Ex)

(Ex): en capa de coronación de explanada

* Su empleo sólo será posible si se estabilizan con cal o cemento para conseguir S-EST1 o S-EST2

Tabla 9.3 Características exigidas a la explanada

	E_{v2} placa de carga (UNE 103808)	% D _{máx.} P.M.	Deflexión patrón máxima sólo para tráfico T00 a T2 (10 ⁻² mm)
E1	≥ 60 MPa	≥ 97 % ⁽¹⁾	≤ 250
E2	≥ 120 MPa	≥ 97 %	≤ 200
E3	≥ 300 MPa	≥ 98 %	≤ 125

(1) 95% si no es capa de coronación de explanada

➡ En la tabla de formación de explanadas (fig. 9.2) de la Norma de Secciones de Firme (2003) del Ministerio de Fomento se puede observar la importancia que se concede a la estabilización. Ésta es obligatoria siempre que se quiera obtener una explanada E3, así como en el caso de autovías o carreteras de nuevo trazado (Nota de servicio 5/2006) y prácticamente imprescindible para explanadas E2, salvo que se disponga de suelos seleccionados.

Los espesores de las capas estabilizadas son de 25 ó 30 cm. En la actualidad dichas capas se utilizan por las ventajas citadas en los capítulos anteriores, al facilitar una superficie de apoyo homogénea y estable y colaborar conjuntamente con toda la estructura del firme, aumentando la durabilidad del mismo.

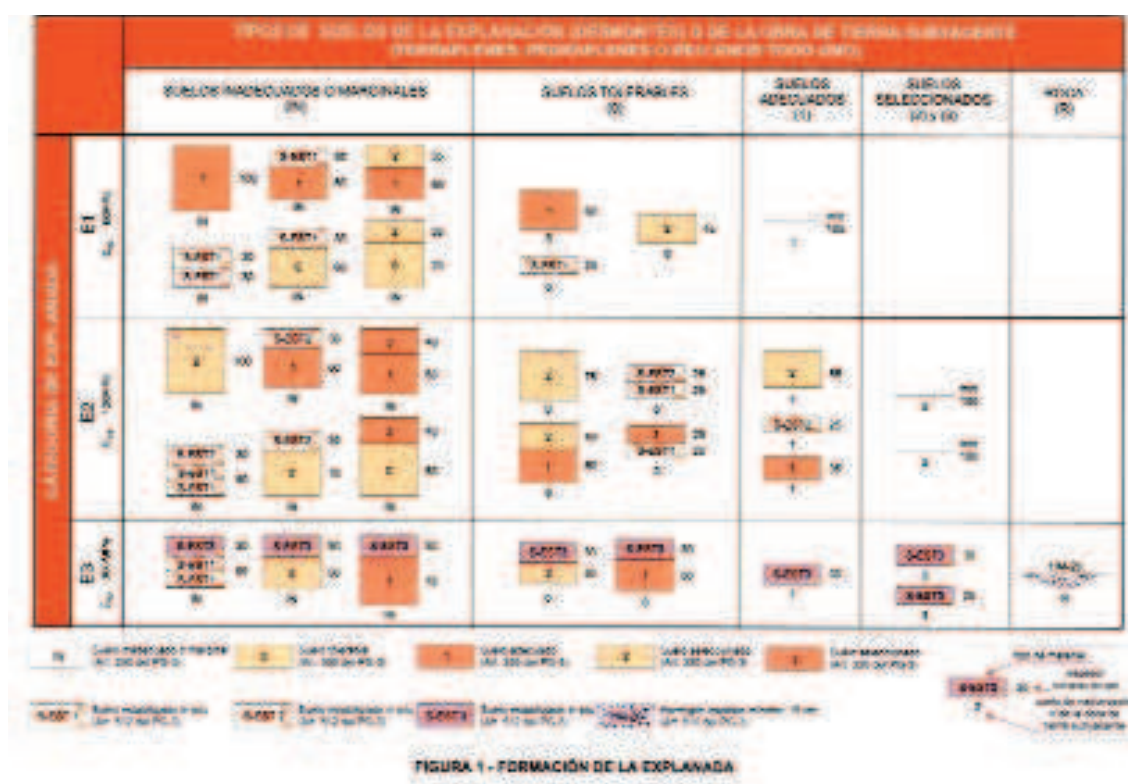


Figura 9.2 Formación de explanadas (Norma 6.1-IC)

Por ello, salvo que se disponga de suelos adecuados ($\text{CBR} \geq 6$) con los que conseguir una explanada E1, o seleccionados ($\text{CBR} \geq 12$), si se desea obtener una explanada E2 (categoría mínima para carreteras con tráfico T1 o superior), la estabilización es la única solución posible. Además es una solución que permite el empleo de algunos suelos marginales, que en otro caso tendrían que ser trasladados a vertedero.

9.3 Normativas autonómicas

9.3.1 Recomendaciones de proyecto y construcción de firmes y pavimentos de la Junta de Castilla y León

En 1996, con la experiencia acumulada durante muchos años en su red de carreteras realizando estabilizaciones y capas gruesas de suelocemento, la Dirección General de Carreteras e Infraestructuras de la Junta de Castilla y León publicó las “Recomendaciones de proyecto y construcción de firmes y pavimentos”. Este documento, con importantes novedades tanto en el catálogo de secciones de firme de nueva construcción como en el cuadro de formación de explanadas (apostando claramente por la solución de estabilizar), incluía un capítulo de cada uno de los materiales y unidades de obra incorporados a dichas secciones, entre ellos los dedicados a suelos estabilizados in situ con cal y suelos estabilizados in situ con cemento.

En el nuevo cuadro de formación de explanadas, los espesores de las capas estabilizadas y de suelos se incrementaron considerablemente respecto a los de la tabla de formación de explanadas de la Norma 6.1 y 6.2-IC del Ministerio de Fomento entonces vigente, publicada en 1989, de acuerdo con las siguientes directrices:

- el interés que presenta la estabilización para el aprovechamiento de suelos inadecuados o de baja calidad, que en muchas regiones de Castilla y León aparecen frecuentemente en el trazado
- la importancia que tiene mejorar la calidad de las explanadas en el comportamiento futuro del firme, para evitar la considerable reducción de la vida útil del mismo que se produce cuando su cimiento es inadecuado
- la mayor sensibilidad del comportamiento estructural de las capas de base de materiales tratados con conglomerantes hidráulicos respecto a las reducciones de espesor, considerando además las características de realización in situ de las explanadas
- la existencia de maquinaria que permite la estabilización con garantía de capas de suelos en espesores de hasta 40 cm
- la experiencia en estabilizaciones de Castilla y León.

Así se publicó una tabla de formación de explanadas, en la que se incluyeron soluciones para todos los casos posibles con capas estabilizadas variando

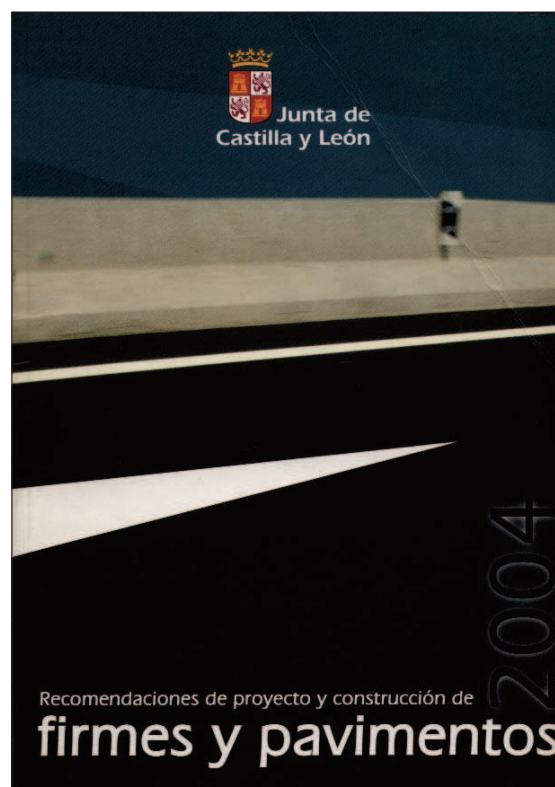


Figura 9.3

desde 25 hasta 40 cm de espesor (este último sólo en el caso de explanadas E1 sobre suelos inadecuados).

En la edición de 2004 de dichas Recomendaciones de Proyecto y Construcción de Firmes y Pavimentos de la Junta de Castilla y León (fig. 9.3), se adoptó la misma tabla de formación de explanadas de la Norma 6.1-IC, pero variando algunas soluciones poco compatibles (fig. 9.4). En las Recomendaciones se indica que la formación de las explanadas se debe llevar a cabo preferentemente mediante la estabilización de suelos in situ.

A estas categorías de explanada se les exige el mismo valor mínimo del módulo de compresibilidad indicado en cada caso en la Tabla 9.3. No obstante, respecto al control de las capas de la explanada una vez terminadas, se indica que “si los materiales satisfacen las especificaciones establecidas, se colocan en los espesores mínimos indicados y finalmente se compactan hasta alcanzar los niveles exigidos, el valor del módulo de compresibilidad habrá de superar el mínimo indicado para la correspondiente categoría de explanada. Por ello y hasta que se encuentren contrastados y suficientemente experimentados los dispositivos rápidos de control del módulo de compresibilidad exigido (como por ejemplo el ensayo de carga con placa dinámica) se deberán controlar y comprobar las condiciones exigidas a los materiales y las de puesta en obra (CBR, espesores, densidades, etc.)”. Sin embargo, dependiendo de la importancia de la obra el PPTP puede establecer la necesidad de determinarlo mediante ensayos. En explanadas estabilizadas es recomendable realizar estos ensayos transcurridos al menos 14 días tras la ejecución.

	Suelos adecuados o mejorados (E1)	Suelos inestables (E2)	Suelos Adecuados (E3)	Suelos adecuados (E2 y E3)	Nivel (E)
E1					

Figura 9.4 Formación de explanadas (Junta de Castilla y León)

Las prescripciones exigidas en el PG-3 se modifican ligeramente. Así, por ejemplo, se eleva al 2,5 % el contenido mínimo de cal o cemento en el caso de S-EST 1, admitiendo únicamente una reducción hasta el 2 % en el caso de dosificar en lechada.

Por otra parte, el índice de plasticidad admisible para el empleo de cemento se aumenta hasta 20.

Se permite la distribución manual del conglomerante en superficies muy reducidas, inferiores a 1.000 m², y la dosificación en polvo en el caso de ensanches estrechos, categorías de tráfico pesado T4 o cuando la humedad natural del suelo es superior a la admisible para dosificar en forma de lechada. Además se hace hincapié en el control de la dosificación mediante la medición de los consumos y dotaciones medias y el control de la humedad-densidad referenciados al ensayo Proctor modificado, que deberá realizarse cada 5.000 m³ de material.

9.3.2 Instrucción para el Diseño de Firmes de la Red de Carreteras de Andalucía

La Instrucción de Andalucía, publicada por primera vez en 1999 y actualizada en el año 2007 (fig. 9.5), basa el método de diseño de firmes en el cálculo analítico, disponiendo de un programa denominado Icafir para el desarrollo del mismo. A la estabilización de suelos se dedican varios apartados y comentarios, destacándose la posibilidad de una estabilización mixta cuando además de disminuir la sensibilidad al agua se pretende mejorar notablemente la capacidad de soporte.

La definición del cimientado del firme y del plano de explanada (entendiéndose por tal a la superficie superior del cimientado del firme) se lleva a cabo en base a las características mecánicas definidas para los suelos estabilizados (Tabla 9.4).

Esta Instrucción describe con gran detalle el tratamiento del terreno natural subyacente (TNS) y el cimientado del firme, estableciendo las características exigibles para el uso de la estabilización de suelos en núcleos de terraplén y capas de asiento, así como los criterios de proyecto del firme sobre capas estabilizadas.

Tabla 9.4 Características de los suelos estabilizados (Instrucción de Andalucía)

Materiales	Conglomerante	Módulo E (MPa)	Coefficiente de Poisson
Suelo estabilizado S-EST1	cemento/cal	100	0,35
Suelo estabilizado S-EST2	cemento/cal	200	0,30
Suelo estabilizado S-EST3	cemento	1.000	0,25

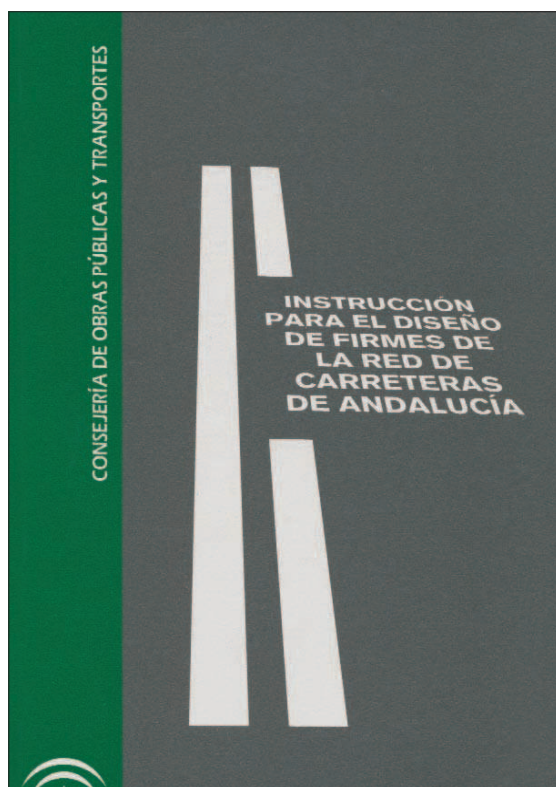


Figura 9.5

9.3.3 Otras normativas autonómicas

En 1986 apareció la primera normativa con carácter regional, las Normas Técnicas para las carreteras de Vizcaya. En ellas se clasificaban las explanadas en dos categorías, EX1 y EX2, con índices CBR mayores de 8 y 20 respectivamente. En dicha normativa aparecían soluciones con capas estabilizadas de 20 y 25 cm de espesor, aunque no fueron utilizadas dada la buena calidad de los suelos de la zona.

En 2006 se publicó la Norma para el dimensionamiento de firmes de la red de carreteras del País Vasco (fig. 9.6). En ella se especifican tres tipos de explanadas, a las que se les exige un módulo de compresibilidad E_{v2} de 120, 200 y 300 MPa respectivamente. En todas ellas se proponen soluciones con suelos estabilizados in situ tipo S-EST1, S-EST2 y S-EST3.

En 2009 se aprobó la Norma de secciones de firme de la Comunitat Valenciana (fig. 9.7), mientras que en el momento de redactar el presente Manual se encontraba en fase muy avanzada de preparación la normativa de firmes de Aragón. En ambas se concede

también una gran importancia a las estabilizaciones.

9.4 Estudio global del diseño del firme y la explanada conjuntamente

En el diseño estructural de las capas que van a soportar las cargas del tráfico previsto durante el periodo de vida útil, se debe considerar mediante criterios técnicos, económicos y medioambientales todo el conjunto formado por el firme y el cimiento del mismo o explanada.

Esto es porque la elección de una u otra explanada, de acuerdo con los suelos disponibles, condiciona la solución del firme a emplear y el espesor de las capas del mismo. Ello puede verse claramente con un ejemplo:

Supóngase una carretera en la que en la traza diseñada los informes geotécnicos clasifican el terreno como tolerable (0) en un espesor superior a 1 m. Según la Norma 6.1-IC, para lograr una explanada tipo E1, una posible solución sería extender 45 cm de un suelo seleccionado (2) obtenido de algunos préstamos o desmontes. Si el tráfico de la carretera es de categoría T2 (entre 200 y 800 vehículos pesados/carril y día), dos posibles alternativas de firme serían las siguientes:

a) solución semiflexible

28 cm de mezclas bituminosas

40 cm de zahorra artificial

b) solución semirrígida

18 cm de mezclas bituminosas

30 cm de suelocemento

Si al considerar el diseño del cimiento del firme se busca el mayor aprovechamiento de dichos suelos seleccionados (2) obtenidos de los préstamos o desmontes, para conseguir una explanada E3, en vez de extender 45 cm sería necesario disponer 15 cm más (60 cm) y estabilizar los 30 últimos cm para lograr un S-EST3. Este pequeño sobrecoste supone un importante ahorro en lo que se refiere al firme, pues en este caso de explanada E3, las soluciones de firme serían las siguientes:

c) solución semiflexible

20 cm de mezclas bituminosas

25 cm de zahorra artificial

d) solución semirrígida

15 cm de mezclas bituminosas

20 cm de suelocemento

que, como puede apreciarse, suponen un ahorro de 8 cm de mezclas bituminosas y 15 cm de zahorra artificial en el caso de firmes semiflexibles, y de 3 cm de mezclas bituminosas y 10 cm de suelocemento en el caso de firmes semirrígidos (fig. 9.8).

En todos estos casos, al criterio puramente económico de reducción de costes hay que añadir otras consideraciones técnicas, como el mejor comportamiento del firme sobre una capa estabilizada, que colabora con el mismo prolongando su vida útil, o bien otras de tipo constructivo, al poder compartir los equipos de estabilización de la explanada con otras unidades de obra, como el suelocemento en caso de que éste se ejecute in situ.

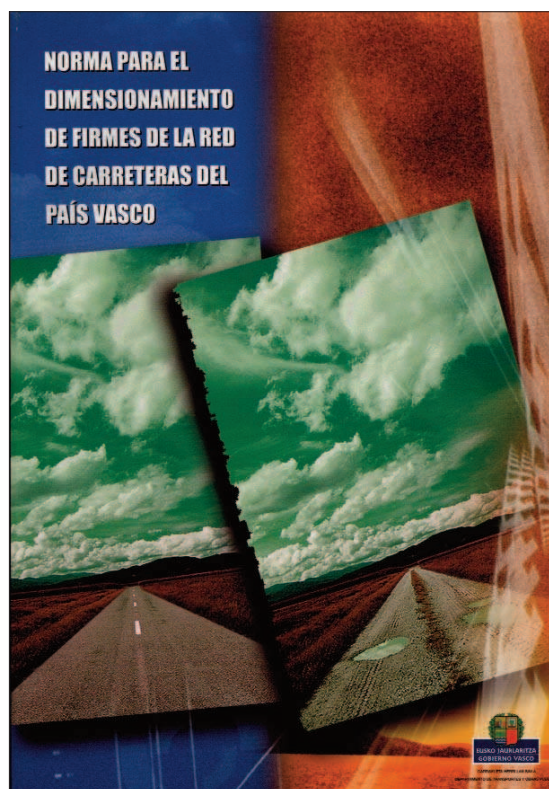


Figura 9.6

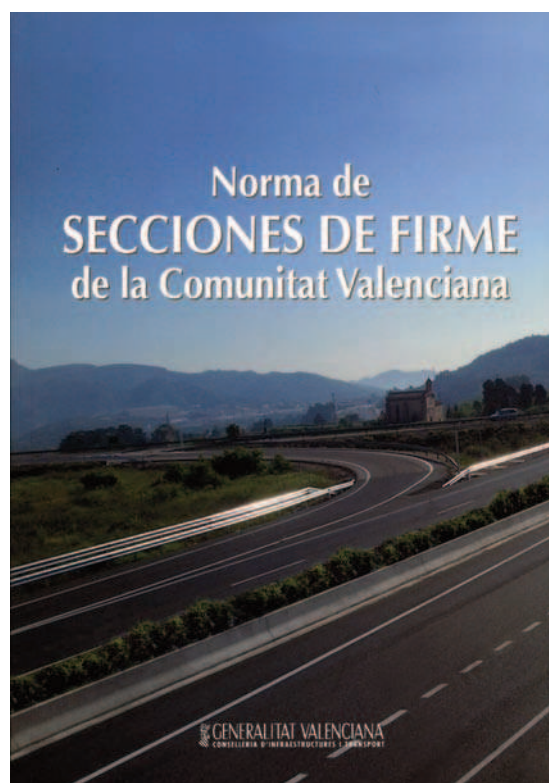


Figura 9.7

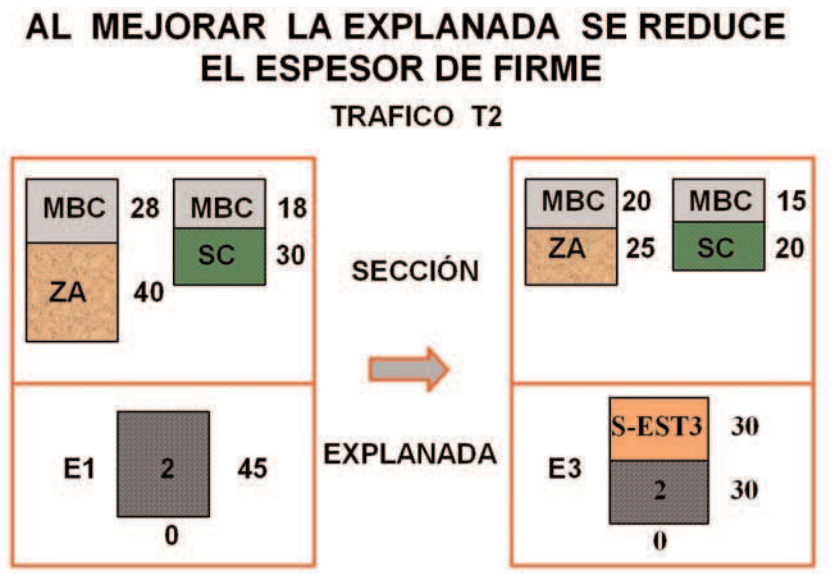


Figura 9.8 Ejemplo de diseño conjunto firme-explanada

ESTUDIO ECONÓMICO

10

10.1 Introducción

El objetivo de este capítulo es dar unas directrices generales y unos parámetros para poder calcular de una manera sencilla el coste de las unidades que se tratan en este Manual, teniendo en cuenta las diferentes circunstancias en las que se desarrolla cada obra.

A lo largo de todo el Manual se han descrito las ventajas de los suelos estabilizados y la forma de decidir cuál es el conglomerante idóneo y calcular la dotación óptima del mismo.

10.2 Costes de los distintos elementos que influyen en la estabilización (valoraciones en euros, 2007)

Es difícil fijar unos precios válidos para cada unidad de construcción de manera que se mantengan vigentes a lo largo del tiempo, ya que continuamente aparece en el mercado maquinaria nueva, más competitiva y con mejores rendimientos, y las condiciones del mercado y del entorno varían de un día a otro.

No obstante, se darán unas pautas para que se pueda calcular un precio al menos orientativo en cualquier circunstancia.

Los elementos que influyen en el precio final de una estabilización son:

- maquinaria
- conglomerantes
- rendimientos.

En el coste de la maquinaria, los factores a tener en cuenta son:

- adquisición
- periodo de amortización
- empleo en un año
- operador
- combustible
- mantenimiento
- transporte y retirada al tajo
- elementos de desgaste.

Los costes (€) diarios de los equipos específicos de una estabilización son los siguientes:

	Equipo		
	Recicladora-estabilizadora	Dosificador de lechada	Dosificador en polvo
Importe de adquisición	690.000	450.000	180.000
Periodo de amortización (años)	6	6	6
Coste de financiación (% sobre financiación anual)	5	5	5
Porcentaje de reparaciones y mantenimiento (%)	10	10	10
Días de trabajo por año	120	120	120
Potencia (CV)	650	225	150
Precio del gasoil (sin IVA)	0,70	0,70	0,70
Coste anual	115.000	75.000	30.000
Financiación anual	5.750	3.750	1.500
Reparaciones y mantenimiento	69.000	45.000	18.000
Total coste anual	189.750	123.750	49.500
Coste diario	1.581	1.031	413
Combustible (8 h)	582	202	134
Aceite	58	20	13
Maquinista	250	250	250
Total coste diario	2.472	1.503	810

A este coste hay que añadir el de los desgastes, muy variable de unas obras a otras.

No es fácil estimar de forma ni siquiera aproximada el coste del desgaste en cada obra. En algunas supera ampliamente el de trabajo de las máquinas.

Varias reglas pueden servir para tener una idea.

Algunas de las circunstancias que aumentan el desgaste son las siguientes:

- tamaños por encima de 10 cm
- materiales aglomerados
- materiales silíceos, porfídicos, muy duros o muy abrasivos en general.

Frente a estas circunstancias, los desgastes son menores cuando:

- no hay tamaños mayores de 5 cm
- el material está suelto
- el material es calizo o arcilloso.



Figura 10.1 Reposición de picas

Para calcular el coste del desgaste hay que tener en cuenta no sólo el número de picas o portapicas que se cambian diariamente, sino el deterioro sufrido tanto por el tambor como por la carcasa de envuelta, siendo habitual tener que reparar el tambor al menos una vez al año y cambiar la carcasa de envuelta una vez cada dos años, dependiendo del uso.

Estas operaciones, además de costosas (del orden de 15.000 a 20.000 € cada una de ellas), paralizan el equipo durante varios días.

El desgaste puede suponer por lo tanto un coste entre 0,1 €/m² en capas de 30 cm de espesor, hasta 1,0 €/m² o incluso más. El coste mínimo en condiciones óptimas está en torno a 0,1 €/m².



Figura 10.2 Picas desgastadas

El coste del transporte puede tener un peso decisivo en algunas obras, especialmente en las de tamaño inferior a 50.000 m².

Las máquinas que hay que transportar son:

- estabilizadora
- dosificador de conglomerante
- cuba de agua
- motoniveladora

- uno o dos rodillos.

Además, hasta que no estén todas las máquinas en el tajo, no se puede empezar la estabilización, ya que todas ellas son imprescindibles, excepto en algunos casos el segundo rodillo.

Los costes que influyen en cada uno de los conglomerantes son:

- fabricación
- transporte al lugar de empleo.

Como cifra de referencia se puede citar la de 90 €/t, coste del conglomerante en origen, más 0,075 € por cada km y tonelada transportada.

Hay algunos factores que influyen claramente en el rendimiento de la obra, como son:

- volumen de suelo a estabilizar, geometría y espesor de la plataforma
- volumen de conglomerante
- tipo de suelo que se quiere estabilizar: desgaste producido en las máquinas
- porcentaje de agua que es preciso añadir a la mezcla
- organización general de la obra

10.3 Ejemplo (precios en euros, año 2007)

Supóngase una obra de 50.000 m², situada a 200 km de la base de la maquinaria, en la que hay que estabilizar una capa de 30 cm de un material de densidad 2,2 t/m³ con una dotación de un 3 % de conglomerante, añadido por vía húmeda.

La repercusión del transporte será la que se indica a continuación.

Transporte de maquinaria			
	Distancia (km)		200
	Número de máquinas		6
	Coste por km recorrido (€, ida y vuelta)		3,00
	Total coste de transporte		3.600
Superficie de la obra (m ²)		50.000	
	Repercusión del transporte (€/m ²)		0,07

Se supone también un material con tamaños inferiores a 5 cm, no abrasivo y suelto, por lo que en principio puede considerarse una repercusión del desgaste del orden de 0,10 €/m².

El coste de operación de la maquinaria puede ser el siguiente:

Maquinaria empleada	coste/jornada (€)
Estabilizadora	2.472,00
Distribuidor de lechada	1.503,00
Cuba de agua	250,00
Motoniveladora	600,00
Rodillo 1	500,00
Rodillo 2	360,00
Total maquinaria	5.685,00
Rendimiento/jornada (m ²)	4.500
Coste operación (€/m ²)	1,26

Se debe comprobar que el rendimiento estimado es acorde con la maquinaria disponible y que el consumo de conglomerante está dentro de lo habitual.

Para la obra del ejemplo, el consumo de conglomerante por m² sería:

$$2.200 \text{ kg/m}^3 \times 0,30 \text{ m espesor} \times 3 \% \text{ de dotación} = 19,8 \text{ kg/m}^2$$

Suponiendo un rendimiento de 4.500 m²/jornada, el consumo diario de conglomerante sería:

$$4.500 \text{ m}^2 \times 19,8 \text{ kg/m}^2 \text{ de conglomerante} = 89.100 \text{ kg/jornada}$$

lo que en principio es una cantidad razonable. Ello supone un consumo medio entre 3 ó 4 cisternas de conglomerante al día, dependiendo de la capacidad de las mismas.

El coste por t del conglomerante para la obra del ejemplo sería por tanto el siguiente:

Adquisición en fábrica	90,00 €/t
Transporte: 200 km x 0,075 €/t y km	15,00 €/t
Coste total	105,00 €/t

Con la dotación supuesta de 18,9 kg/m², la repercusión del conglomerante por m² será igual a

$$0,0198 \text{ t/m}^2 \times 105,00 \text{ €/t} = 2,08 \text{ €/m}^2$$

El coste total por m² para la obra será pues el siguiente:

Total costes (€/m ²)	
Transporte	0,07
Ejecución	1,26
Desgastes	0,10
Conglomerante	2,08
Total (€/m²)	3,51

mientras que el coste total la estabilización para el conjunto de la obra es igual a:

$$50.000 \text{ m}^2 \times 3,51 \text{ €/m}^2 = 175.500,00 \text{ €}$$

Este coste, que en principio puede parecer elevado, es actualmente inferior en general al de otras alternativas que hasta hace poco tiempo eran más económicas, pero que se ven gravadas por cuestiones medioambientales.

Si para la obra de 50.000 m² del ejemplo se supone que se necesita disponer en esa misma superficie un suelo seleccionado en un espesor de 50 cm, por ser sus prestaciones, en cuanto a comportamiento bajo tráfico, inferiores en general a las de un suelo estabilizado, el volumen de dicho suelo que se precisaría sería igual a:

$$50.000 \text{ m}^2 \times 0,50 \text{ m} = 25.000 \text{ m}^3$$

Para la obtención de este suelo se supone que hay que alejarse 30 km de la obra, pagar un canon de extracción de 1,5 €/m³ y que en el itinerario no se atraviesa ninguna carretera con limitación de peso por vehículo.

Con ello, el coste del m³ procedente de préstamo puede ser similar al siguiente:

Coste de tierras procedentes de préstamos	
Canon	1,50
Arranque y carga	1,50
Transporte 30 km	3,97
Arreglo del préstamo	1,00
Total (€/m³)	7,97

El coste total del suelo será:

$$25.000 \text{ m}^3 \times 7,97 \text{ €/m}^3 = 199.250 \text{ €}$$

es decir, notablemente superior al de la estabilización.

Al coste anterior hay que añadir los de extensión, adición del agua necesaria, compactación y eventual refino del suelo en obra. Si además hay que enviar a vertedero 25.000 m³ de suelo existente en la obra, al coste final habría que sumar la cantidad siguiente:

Costes de depósito en vertedero (€/m ³)	
Canon de vertedero	2,00
Transporte 30 km	3,97
Total	5,97
Volumen transportado m ³	25.000
Total coste de depósito en vertedero (€)	99.250

10.4 Algunas consideraciones prácticas para mejorar los rendimientos

Hay una serie de trabajos previos o de precauciones que pueden mejorar el rendimiento de los equipos en las obras y, por lo tanto, facilitar el camino para conseguir un buen precio de la unidad.

10.4.1 Organización de la obra

- habitualmente la logística de una obra grande suele ser similar a la de una pequeña. Para conseguir buenos rendimientos es muy importante que los tajos sean largos y estén bien definidos antes de empezar con la estabilización
- una incorrecta nivelación del suelo antes de la estabilización suele ser uno de los motivos más frecuentes para que no se consigan buenos rendimientos. El suelo debe colocarse a su cota y compactarse hasta el 95 % de la densidad máxima Proctor normal, de manera que se asegure que todo el volumen de suelo está en su sitio y que por tanto la motoniveladora del tren de estabilización no va a ser empleada para mover 5 ó 10 cm de suelo de una parte a otra de la obra.
- paso entre unos puntos y otros de la obra: hay que preparar los caminos que permitan a las máquinas circular desde un tajo a otro de la obra sin dificultades, para disminuir así los tiempos muertos
- coordinación maquinaria - suministro de conglomerante - laboratorio. Ninguno de los actores que intervienen en la ejecución de las obras debe retrasar el trabajo de los otros, puesto que ello tiene como consecuencia inmediata una disminución del rendimiento.

10.4.2 Suministro del conglomerante

- coordinación entre la obra y la fábrica. Es uno de los aspectos más importantes. Las cisternas han de llegar a la hora acordada. La capacidad de almace-

naje en obra es mínima, aunque se disponga de una cisterna de acopio intermedia. De nada sirve no llevar a la obra a su hora la primera cisterna del día y que luego lleguen dos seguidas: el tiempo perdido no se recupera, porque no se pueden descargar dos cisternas al mismo tiempo

- comunicación permanente entre la obra y la fábrica de conglomerante, de manera que se sepa continuamente la situación del transporte y sus posibles retrasos por averías o complicaciones del tráfico. Todos los actores deben tener presente que es preciso coordinar un tren de maquinaria relativamente complejo en el que cada equipo tiene definidos tanto su misión concreta como su momento de entrada en el tajo
- acopio intermedio en obra: ayuda a que los rendimientos medios sean más altos.

10.4.3 Suministro de agua

- preparar todas las fuentes posibles, aunque algunos suministros alternativos sean más caros. Tener analizada la calidad del agua de las mismas. Tener contempladas alternativas para la época de estiaje. Obtener los permisos correspondientes a cada una de las fuentes (algunos pueden tardar meses en conseguirse). No desestimar nunca el tener que acudir al ayuntamiento más cercano y comprar agua de la red. Prever en estos casos caudal y presión suficiente para las necesidades de la obra. Puede ser preferible disponer de varios puntos simultáneos de toma de agua.
- preparar los accesos. Muchas veces una pasada de motoniveladora puede ser suficiente. En otras ocasiones puede ser preciso tener que extender un material de mayor capacidad de soporte (o incluso recurrir a una estabilización)
- limpieza del agua: mejora el producto final y evita atascos. Hay que evitar la presencia de arena, hierbas, ramas, etc.

10.4.4 Solapes

- si el número de pasadas es pequeño, pueden tener mucha influencia. Por ejemplo, si el ancho total es de 3,5 m y se estabiliza en 2 pasadas, el solape puede representar el 50 % de una pasada. Para anchos de plataforma de calzada de autovía (12-14 m) la repercusión es bastante menor
- tener en cuenta el conglomerante consumido en los solapes al calcular el total necesario
- cuando se dosifica por vía húmeda, tener mucho cuidado con el cierre de inyectores en las zonas de solape. El cierre de un inyector implica una dosificación más reducida en una banda de 30 cm, pero en esa zona de la máquina la cantidad de conglomerante no es nula. Es necesario dosificar de acuerdo con el ancho real de reparto, y no conforme al número de inyectores que se mantengan abiertos.

10.4.5 Desgastes

- a partir de cierto grado de desgaste, éste influye directamente en el rendimiento y por lo tanto en el precio de la unidad, por lo que es muy conveniente poner todos los medios posibles para disminuir el mismo
- el desgaste no sólo puede producirse en las picas o paletas sino también en toda la carcasa donde se produce la mezcla del conglomerante con el suelo.

10.4.6 Maquinaria auxiliar

- ha de estar en buenas condiciones. El equipo de estabilización es una cadena: basta con que falle uno de los eslabones para que todo el conjunto se pare. En caso de duda es conveniente incluso duplicar los equipos de menor coste (rodillos, cubas de agua)
- las motoniveladoras con sistemas automáticos evitan la dependencia de la topografía clásica, aunque se ha de estar muy seguro de que los datos introducidos son los más recientes. No obstante, en obras pequeñas, estrechas o con curvas estos sistemas pueden retrasar el rendimiento final y no aportar ninguna mejora.

BIBLIOGRAFÍA

- Woods, K.B., Berry, D.S. y Goetz, W.H.: "Highway Engineering Handbook". McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1960
- Sherwood, P.T.: "The properties of cement stabilized materials". Report LR 205, Transport and Road Research Laboratories, Crowthorne, Reino Unido, 1968
- Christensen, A. P. : "Cement Modification of Clay Soils". Research & Development Bulletin RD002.01S, Portland Cement Association, Skokie, USA, 1969
- Ingles, O.G. y Metcalf, J.B.: "Soil Stabilization: Principles and Practice". Butterworth, Sydney, Australia, 1972
- Del Barrio Martín-Gamero, E. : "Caminos de suelo-cemento". Agrupación de Fabricantes de Cemento de España, Madrid, 1975
- Kézdi, Á.: "Stabilized Earth Roads". Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 1979
- "Le ciment et la chaux dans les routes". Revue générale des routes et des aérodromes, Paris, 1980
- Venuat, M.: "Le traitement des sols à la chaux et au ciment". Paris, 1980
- Williams, R.I.T.: "Cement-treated pavements: materials, design and construction". Elsevier Applied Science Publishers, Londres, 1986
- "Semi-rigid pavements". Publicación 08.02.B, AIPCR, París, 1991
- Carpenter, S.H., Croveti, M.R., Smith, K.L., Rmeili, E. y Wilson, T.: "Soil and Base Stabilization and Associated Drainage Considerations. Volume 1. Pavement Design and Construction Considerations". Publication No. FHWA-SA-93-004, Federal Highway Administration, Washington, 1992
- "PCA Soil Primer". Publication EB007, Portland Cement Association, Skokie, USA, 1992
- Sherwood, P.T.: "Soil stabilization with cement and lime – A State of the Art Review". HMSO, Londres, 1992.
- Sherwood, P.T.: "Stabilized capping layers using either lime or cement, or lime and cement". Contractor Report 151, Transport Research Laboratory. Crowthorne, Reino Unido, 1992
- "Soil-cement Laboratory Handbook". Publication EB052, Portland Cement Association, Skokie, USA, 1992
- "Réalisation des remblais et des couches de forme. Guide technique". LCPC – SETRA, Paris, 1992
- "Conception et dimensionnement des structures de chaussée : guide technique". SETRA-LCPC, Paris, 1994
- Little, D.N.: "Handbook for stabilization of pavement subgrades and base courses with lime". Kendall/Hunt Publishing Company, Dubuque, USA, 1995
- "Soil-cement Construction Handbook". Publication EB003, Portland Cement Association, Skokie, USA, 1995
- "Report on Soil Cement". Report ACI 230.1R-90. ACI Manual of Concrete Practice 1997, American Concrete Institute, Farmington Hills, USA, 1997

- “Manual de Estabilización de Suelos con Cal”. ANCADE, Madrid, 1997
- Prusinski, J. y Bhattacharja, S.: “Effectiveness of Portland Cement and Lime in Stabilizing Clay Soils”. Publicación RP126, Portland Cement Association, Skokie, USA, 1999
- Jofré, C., Kraemer, C. y Díaz Minguela, J.: “Manual de firmes reciclados in situ con cemento”. IECA, Madrid, 1999
- “Traitement des sols à la chaux et/aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des remblais et des couches de forme. Guide technique”. LCPC – SETRA, París, 2000
- Little, D.N.: “Evaluation of structural properties of lime stabilized soils and aggregates”. National Lime Association, Arlington, USA, 2001
- “Soil-cement Inspector’s Manual”. Publication PA050, Portland Cement Association, Skokie, USA, 2001
- Ponencias del Primer Simposio Internacional sobre Estabilización de Explanadas y Reciclado In Situ de Firmes con Cemento. Salamanca, 1 a 4 de octubre de 2001. AEC-IECA, Madrid, 2001
- Bhattacharja, S. y Bhatta, J. I.: “Comparative Performance of Portland Cement and Lime Stabilization of Moderate to High Plasticity Clay Soils”. Research & Development Bulletin RD125, Portland Cement Association, Skokie, USA, 2003
- “Manual de firmes con capas tratadas con cemento”. CEDEX-IECA, Madrid, 2003
- “Norma 6.1-IC sobre Secciones de firme”. Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento, Madrid, 2003
- “Properties and Uses of Cement-Modified Soil “. Soil-cement Information IS411, Portland Cement Association, Skokie, USA, 2003
- “Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes PG-3. Artículo 512: Suelos estabilizados in situ”. Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento, Madrid, 2004
- “Manual para la elaboración de los gráficos de control de calidad de materiales”. Giasa, Consejería de Obras Públicas y Transportes, Junta de Andalucía, Sevilla, 2004
- “Pliego de prescripciones técnicas generales para los controles de auscultación dinámica de alto rendimiento”. Giasa, Consejería de Obras Públicas y Transportes, Junta de Andalucía, Sevilla, 2004
- “Recomendaciones para la verificación de inicio de unidad de obra”. Giasa, Consejería de Obras Públicas y Transportes, Junta de Andalucía, Sevilla, 2004
- “Recomendaciones de proyecto y construcción de firmes y pavimentos”. Junta de Castilla y León, Valladolid, 2004
- “Code de bonne pratique pour le traitement des sols à la chaux et/ou au ciment”. Recommandations R74/04, Centre de Recherches Routières, Bruselas, 2004
- “Manual de estabilización de suelo tratado con cal. Estabilización y modificación con cal”. Boletín 326, National Lime Association, Arlington, USA, 2004
- “Consideration of lime-stabilized layers in mechanistic-empirical pavement design”. National Lime Association, Arlington, USA, 2004

- “Lime treated soils save time & money”. Technical Digest, National Lime Association, Arlington, USA, 2005
- Scullion, T, Sebesta, S., Harris, J.P. y Syed, I.: “Evaluating the Performance of Soil-Cement and Cement-Modified Soil for Pavements: A Laboratory Investigation”. Research & Development Bulletin RD120, Portland Cement Association, Skokie, USA, 2005
- Ponencias del Segundo Simposio Internacional sobre Tratamiento y Reciclado de Materiales para Obras de Infraestructura. París, 24 a 26 de octubre de 2005. Cimbéton, París, 2005
- “Guide to Pavement Technology - Part 4D: Stabilised Materials”. Publicación AGPT04D/06, Austroads Inc., Sydney, 2006
- Kraemer, C. y Mestre, V.: “Evaluación y optimización de las explanadas”. VII Congreso Nacional de Firms, Ávila, 23 a 25 de mayo de 2006. Asociación Española de la Carretera, Madrid, 2006
- “Mixture design and testing procedures for lime stabilized soil”. Technical Brief, National Lime Association, Arlington, USA, 2006
- “Nota de Servicio 5/06 sobre explanadas y capas de firme tratadas con cemento”. Ministerio de Fomento, Madrid, 2006
- “Norma para el dimensionamiento de firms de la red de carreteras del País Vasco”. Departamento de Transportes y Obras Públicas, Gobierno Vasco, Vitoria, 2006
- “Traitement des sols à la chaux et/aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des assises de chaussées. Guide technique”. LCPC – SETRA, París, 2007
- “Instrucción para el diseño de firms de la red de carreteras de Andalucía”. Consejería de Obras Públicas y Transportes, Junta de Andalucía, Sevilla, 2007
- “Recomendaciones para la redacción de Pliegos de Especificaciones Técnicas Generales para el tratamiento de los suelos con cal”. Giasa, Consejería de Obras Públicas y Transportes, Junta de Andalucía, Sevilla, 2007
- “Recomendaciones para la redacción de planes de control de calidad de materiales en los proyectos y obras lineales”. Consejería de Obras Públicas y Transportes, Junta de Andalucía, Sevilla, 2007
- “Norma de Secciones de firme de la Comunitat Valenciana”. Conselleria d’Infraestructures i Transport, Comunitat Valenciana, Valencia, 2009

