



Gestión de Infraestructuras de Andalucía, S.A.  
**CONSEJERÍA DE OBRAS PÚBLICAS Y TRANSPORTES**

**RECOMENDACIONES PARA LA REDACCION DE: PLIEGOS DE**  
**ESPECIFICACIONES TECNICAS GENERALES PARA EL**  
**TRATAMIENTO DE**  
**LOS SUELOS CON CAL**

**ÁREA DE OPERACIONES**

**UNIDAD DE CONTROL TÉCNICO**

***VERSIÓN 3. DICIEMBRE DE 2010***

## **GRUPO DE TRABAJO**

### **Equipo Redactor:**

- |                               |                     |
|-------------------------------|---------------------|
| – Manuel Atienza Díaz         | Coordinador         |
| – Juan Antonio Diez De Dios   | Coordinador Adjunto |
| – Enrique J. Galeote Gallardo | Coordinador Adjunto |
| – Manuel Salas Casanova       | Ponente             |
| – María José Sierra López     | Vocal               |
| – Sara Manzano Valverde       | Vocal               |
| – Domingo Quesada Arriaza     | Vocal               |
| – Luis Quintana De Juan       | Vocal               |
| – Carlos García López         | Vocal               |
| – Antonio Miguel Vila Marín   | Vocal               |
| – Raúl Rasero Del Real        | Secretario Técnico  |
| – Ignacio J. Ponce Arroyo     | Secretario Técnico  |

### **Secretaría:**

- Carmen Muñoz Escudero

## **INTRODUCCION**

**En la Autovía A-381 Jerez Los Barrios, tramos IV y V, se están ejecutando 5 millones de m<sup>3</sup> de terraplén estabilizado con cal, circunstancia que se consideró muy adecuada para profundizar en la tecnología de estos trabajos mediante la redacción unas recomendaciones para la redacción del pliego de prescripciones técnicas generales, que recopilase y avanzase en la normativa y bibliografía existente, con el objetivo de dotar tanto a los Contratistas, como a los Directores de Obra y Laboratorios de Control de Calidad de Materiales, de una herramienta útil para la ejecución y control de la unidad**

**Para la realización de este fin, GIASA organiza un equipo redactor con personal de las obras antes mencionadas, con el objetivo de editar las presentes “Recomendaciones para la Redacción de: Pliegos de Especificaciones Técnicas Generales para el Tratamiento de los Suelos con Cal”, fruto de las investigaciones y ensayos efectuados durante la ejecución de estas unidades.**

**Con el uso de este Pliego esperamos que los trabajos objeto del mismo, se realicen con unos sistemas de ejecución y control definidos, y que no tenga que depender tanto el diseño y la ejecución, como hasta ahora, de la mayor o menor experiencia de los intervinientes.**

**Gracias al numeroso equipo redactor por su interés y buen hacer, pues sin duda será una aportación útil en el avance de estas técnicas que mejore la calidad final de estos trabajos en nuestra Comunidad Autónoma.**

**Manuel Atienza Díaz  
Coordinador del Grupo**

## **ÍNDICE**

0. NOTAS PREVIAS PARA SU USO
1. DEFINICIÓN
2. TIPOS DE TRATAMIENTO. AMBITO DE APLICACIÓN
  - 2.1 SECADO DE SUELOS CON EXCESO DE HUMEDAD
  - 2.2 MEJORA – ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA SU USO EN TERRAPLENES Y DESMONTES
  - 2.3 MEJORA – ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA SU USO EN CAPAS DE ASIENTO DE FIRME
3. MATERIALES
  - 3.1 CAL
    - 3.1.1 Definición
    - 3.1.2 Clasificación
    - 3.1.3 Características generales
  - 3.2 SUELOS
    - 3.2.1 Condiciones generales
    - 3.2.2 Granulometría
    - 3.2.3 Plasticidad
    - 3.2.4 Contenido en sulfatos
    - 3.2.5 Materia orgánica
4. TIPO Y COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA. FÓRMULA DE TRABAJO
  - 4.1 FÓRMULA DE TRABAJO PROPUESTA
    - 4.1.1 Secado de suelos
    - 4.1.2 Mejora – estabilización de suelos
  - 4.2 ACEPTACIÓN DE LA FÓRMULA DE TRABAJO
5. TRAMOS DE PRUEBA
  - 5.1 MEZCLA EN CENTRAL
  - 5.2 MEZCLA “IN SITU”
  - 5.3 ACEPTACIÓN DE LOS TRAMOS DE PRUEBA
  - 5.4 ACEPTACIÓN DE LOS MÉTODOS DE CONTROL
    - 5.4.1 Determinación del espesor del tratamiento
    - 5.4.2 Ensayos de control de dotación de cal y homogeneidad de la mezcla en superficie y en profundidad.
    - 5.4.3 Ensayos de control de compactación
    - 5.4.4 Ensayos de capacidad soporte, utilización de los dos tipos de ensayo CBR
    - 5.4.5 Definición y aceptación de otros ensayos de control.
6. EQUIPOS NECESARIOS PARA LA EJECUCIÓN DE LAS OBRAS
  - 6.1 EQUIPOS DE MEZCLA “IN SITU”
    - 6.1.1 Distribución de la cal
    - 6.1.2 Mezcla del suelo con la cal
  - 6.2 EQUIPOS DE MEZCLA EN CENTRAL
    - 6.2.1 Fabricación de la mezcla
    - 6.2.2 Transporte de la mezcla
    - 6.2.3 Vertido y extensión de la mezcla
  - 6.3 COMPACTACIÓN DE LA MEZCLA

- 7. EJECUCIÓN DE LAS OBRAS
  - 7.1 PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE EXISTENTE
  - 7.2 DISGREGACIÓN DEL SUELO PREVIO AL MEZCLADO
  - 7.3 HUMECTACIÓN O DESECACIÓN DEL SUELO
  - 7.4 MEZCLA
    - 7.4.1 En central
    - 7.4.2 “In situ”
      - 7.4.2.1 Distribución de la cal
      - 7.4.2.2 Mezcla del suelo con la cal
  - 7.5 CURADO INICIAL
  - 7.6 COMPACTACIÓN
  - 7.7 ACABADO DE LA SUPERFICIE
  - 7.8 JUNTAS
  - 7.9 CURADO FINAL
- 8. ESPECIFICACIONES DE LA UNIDAD TERMINADA
  - 8.1 SECADO DE SUELOS
  - 8.2 MEJORA – ESTABILIZACIÓN DE SUELOS
    - 8.2.1 Dosificación de cal
    - 8.2.2 Densidad
    - 8.2.3 Capacidad soporte
    - 8.2.4 Cambios volumétricos (hinchamientos, colapsos)
    - 8.2.5 Valor mínimo del PH
    - 8.2.6 Índice de plasticidad
    - 8.2.7 Tolerancias geométricas
- 9. LIMITACIONES DE LA EJECUCIÓN
- 10. SEGURIDAD E HIGIENE EN LA EJECUCIÓN DE LA UNIDAD
- 11. CONTROL DE CALIDAD
  - 11.1 CONTROL DE PROCEDENCIA
    - 11.1.1 Suelos
      - 11.1.1.1 Secado de suelos
      - 11.1.1.2 Mejora – estabilización de suelos
    - 11.1.2 Cal
      - 11.1.2.1 Suministro
      - 11.1.2.2 Identificación
      - 11.1.2.3 Recepción
      - 11.1.2.4 Control de calidad
        - 11.1.2.4.1 Control de recepción
        - 11.1.2.4.2 Control adicional
        - 11.1.2.4.3 Criterios de aceptación o rechazo
  - 11.2 CONTROL DE EJECUCIÓN
    - 11.2.1 Secado de suelos
    - 11.2.2 Mejora – estabilización de suelos
      - 11.2.2.1 Control de la mezcla fabricada
      - 11.2.2.2 Control de la mezcla compactada

11.3 UTILIZACION DE LAS GRÁFICAS DE CONTROL

11.4 CRITERIOS DE ACEPTACIÓN O RECHAZO DEL LOTE

11.4.1 Densidad y humedad de compactación

11.4.2 Espesor

11.4.3 Capacidad soporte

11.4.4 Cambios volumétricos

**ANEXO**

- Procedimiento para la estimación del porcentaje de cal añadido a un suelo para su tratamiento

## **SUELOS TRATADOS CON CAL**

### **0. NOTAS PREVIAS PARA SU USO**

Estas recomendaciones se han redactado directamente como si fuese el Pliego, de tal forma que facilite el trabajo de incorporación a los Proyectos tras la lectura y revisión, en su caso, de las mismas.

A lo largo de los distintos apartados de las recomendaciones y para su mejor comprensión se han incluido numerosos comentarios, enmarcados por un recuadro y con la letra en cursiva.

### **1. DEFINICIÓN**

Se define como suelo tratado con cal a la mezcla homogénea y uniforme de un suelo con cal a fin de mejorar las características geotécnicas o de trabajabilidad del mismo.

Se distinguirán dos métodos de construcción, según el lugar en que se efectúe la mezcla del suelo con la cal:

- Mezcla “in situ”
- Mezcla en central.

El Proyecto fijará el método a seguir.

*Los efectos que se consiguen en los suelos tras su mezcla con cal son consecuencia de reacciones físicas – químicas (floculación o aglomeración de las partículas finas arcillosas en elementos más gruesos y friables, hidratación del óxido de calcio, cambio iónico, cambios mineralógicos, reacciones de cementación entre la sílice de los suelos con el hidróxido de calcio, aumento del PH de los suelos etc.). Algunas de estas reacciones se producen de manera inmediata y otras a más largo plazo:*

***Reacciones inmediatas***

- *Secado de suelos*

*(En el caso de utilizar cal en polvo)*

- *Mejoras geotécnicas*
  - *Disminución del porcentaje de finos.*
  - *Disminución de la plasticidad.*
  - *Mejora de la estabilidad volumétrica.*
  - *Aumento de la capacidad soporte.*

***Reacciones a más largo plazo***

- *Aumento de las resistencias mecánicas.*
- *Mejora de la impermeabilidad.*
- *Aumento de la resistencia a los ciclos de hielo – deshielo.*

*El grado de consecución de estos efectos será función de la tipología del suelo y del porcentaje de cal empleado, lo que definirá al tratamiento como “mejora o estabilización”*

## **2. TIPOS DE TRATAMIENTO. ÁMBITO DE APLICACIÓN**

*Una vez decidido el método de fabricación de la mezcla ("in situ" o en central), se pueden clasificar los distintos tratamientos de los suelos con cal en función de:*

- *La necesidad del tratamiento  
Secado de suelos húmedos, mejora, estabilización.*
- *Del tipo de capa tratada  
Terraplén, fondos de terraplén y desmonte, capas de asiento de firme, capas de firme.*

Es objeto del presente Pliego, el tratamiento de los suelos con cal para:

- Secado de suelos húmedos.
- Mejora – estabilización de suelos para terraplenes, fondos de terraplén y de desmonte.
- Mejora – estabilización de suelos para su uso en capas de asiento de firme.

### **2.1. SECADO DE SUELOS CON EXCESO DE HUMEDAD**

Secado de los suelos con exceso de humedad para conseguir:

- Su trabajabilidad.
- Condiciones de compactación adecuada.
- Permitir el tránsito de la maquinaria de obra sobre el suelo.

*El secado de los suelos con cal se produce, en el caso de utilizar la cal en polvo, por varios efectos:*

*Aporte de material seco.*

*Por volteo del material. Acción que puede ejecutarse en el proceso de mezclado.*

***Y en el caso de utilizar cal viva, además:***

*Hidratación de la cal. El óxido de calcio reacciona con el agua del suelo para formar hidróxido de calcio. Esta reacción de hidratación de la cal viva es fuertemente exotérmica y produce evaporación de agua.*

*El aporte de un 1% de cal viva puede disminuir el contenido de humedad de un suelo un 4 o 5%, y en el caso de volteo de material se puede llegar hasta el 7%.*

### **2.2. MEJORA – ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA SU USO EN TERRAPLENES Y DESMONTES**

Este tipo de tratamiento se puede utilizar en:

- Terraplenes con materiales inadecuados (arcillosos) que no cumplen las especificaciones geotécnicas exigidas.
- Fondos de terraplén y desmonte con:
  - ⇒ Materiales inadecuados.
  - ⇒ En zonas inundables.
- Cuñas de transición de obras de fábrica.



- Zonas de compactación difícil.

*Las mejoras geotécnicas antes mencionadas, permiten la utilización de suelos arcillosos para la construcción del terraplén que de no ser tratados con cal serían calificados como inadecuados. Análogamente se pueden “tratar,” para mejorar sus propiedades, los fondos de terraplén y desmonte cuando nos encontremos asimismo con suelos inadecuados o de calidad inferior a la exigida, de esta forma se evita la sustitución del material.*

*La mejora de la sensibilidad al agua que se consigue con esta estabilización, permite su uso en el caso de fondos de terraplén y desmonte en zonas inundables, cuando el Proyecto no contemple (o no sea posible) utilizar escollera.*

*Los aumentos de la capacidad soporte de los suelos tras la estabilización ayuda a eliminar los asentos que se producen en las zonas de difícil compactación como son las cuñas de transición de las obras de fábrica.*

### **2.3. MEJORA - ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA SU USO EN CAPAS DE ASIENTO DE FIRME**

*Las capas de asiento de firme son conocidas en otros Pliegos como capas de explanada.*

Hay que distinguir este tratamiento del utilizado en los terraplenes. Las mayores especificaciones de calidad de estas capas en la carretera, obligan a unos mayores requisitos para el proceso de mejora-estabilización:

- Requisitos de origen:
  - ⇒ Calidad mínima de los suelos a estabilizar.
- Requisitos durante la ejecución:
  - ⇒ Dotaciones mínimas de cal.
  - ⇒ Calidad mínima de la maquinaria a emplear.
  - ⇒ Controles mínimos a realizar.
- Calidad del producto obtenido.

*La calidad de las capas de asiento de firme es fundamental para conseguir durabilidad en una carretera. Las especificaciones técnicas exigidas a los suelos para la fabricación de estas capas obligan en ciertos casos a la utilización de préstamos.*

*El proceso de estabilización con cal de los suelos para su uso en la conformación de las capas de asiento, debe ser ejecutado con un adecuado control de calidad (tanto de ejecución, como de recepción de materiales) a fin de asegurar que se consiga la homogeneidad en las características del producto final.*

*Como consecuencia de los distintos niveles de calidad exigidos a estos tres tipos de tratamientos, (secado de suelos, terraplén y capas de asiento de firme), en los siguientes capítulos, en su caso, se distinguirá lo especificado para cada uno de ellos.*

### 3. **MATERIALES**

#### 3.1. **CAL**

Las cales para construcción están sujetas a la Directiva Europea 89/106/CEE, siendo obligado su marcado CE. Las normas armonizadas que regulan este mercado son:

- UNE-EN 459-1/AC: 2002 Cales para la construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad.
- UNE-EN 459-1:2002 Cales para la construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad.
- UNE-EN 459-2:2002 Cales para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo.
- UNE-EN 459-3:2002 Cales para la construcción. Parte 3: Evaluación de la conformidad.

Para el caso específico de las mejoras y/o estabilización de suelos se cuenta con la norma española:

- UNE 80502:2003 Cales vivas o hidratadas utilizadas en la mejora y/o estabilización de suelos.

En estas recomendaciones, para el tratamiento de los suelos con cal, se exige que la fabricación de la cal se ajuste a lo indicado en la serie normativa UNE-EN 459, y que sus características cumplan lo especificado en la Norma UNE 80502.

##### 3.1.1. **Definición**

Las cales para la estabilización de suelos son cales aéreas cálcicas para la construcción cuyos principales constituyentes, dados por el análisis químico, son los óxidos e hidróxidos de calcio [CaO, Ca (OH)<sub>2</sub>] con cantidades menores de los óxidos de Mg, Si, Al y Fe.

*Definiciones UNE 80502:2003*

**Cal para construcción:** Cales utilizadas en la construcción de edificios y en ingeniería civil.

**Cales aéreas:** Cales compuestas principalmente por óxido o hidróxido de calcio y/o magnesio que endurecen lentamente al aire bajo el efecto del dióxido de carbono presente en el aire. En general, no endurecen bajo el agua, pues no poseen propiedades hidráulicas. Pueden ser cales vivas o cales hidratadas.

**Cales vivas Q:** Cales aéreas compuestas principalmente de óxido de calcio y de magnesio producidas por calcinación de la caliza y/o dolomita. Las cales vivas tienen una reacción exotérmica en contacto con el agua. Las cales vivas se presentan en distintas granulometrías que van desde terrones a material finamente molido.

**Cales hidratadas S:** Cales aéreas, cálcicas o dolomíticas resultantes del apagado controlado de las cales vivas. Se producen en forma de polvo seco, de pasta o de lechada.

**Cales cálcicas, CL:** Cales compuestas principalmente por óxido de calcio o hidróxido de calcio, sin adición de materiales puzolánicos o hidráulicos.

##### 3.1.2. **Clasificación**

Las cales empleadas para la mejora y/o estabilización de suelos serán cales aéreas cálcicas vivas o hidratadas, con las características que se especificarán en el apartado 3.1.3, con las siguientes clases:

### Cal clase Q:

Cal viva cálcica. Tipos: CL 90Q o CL 80Q, según la Norma UNE-EN 459-1 cuya composición química cumple con los requisitos de la Norma UNE-EN 459-1 y además con los requisitos de reactividad y granulometría de la tabla 2

### Cal clase S

Cales hidratadas cálcicas. Tipos CL 90S o CL 80S según la Norma UNE-EN 459-1 cuya composición química cumple con los requisitos de la Norma UNE-EN 459-1 y además con los requisitos de humedad y granulometría de la tabla 3

Salvo justificación en contrario, para la mejora y/o estabilización de suelos, se usarán cales aéreas, vivas o hidratadas, tipo CL 90.

### 3.1.3 Características generales

**Tabla 1**  
**Requisitos químicos para la cal (Cales Clases Q y S)**

	<b>Tipos de Cal</b>	<b>CaO+MgO</b>	<b>MgO</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>SO<sub>3</sub></b>
1	CL 90Q CL 90S	> 90	< 5	< 4	< 2
2	CL 80Q CL 80S	> 80	< 5	< 7	< 2

Los valores se aplican a todos los tipos de cales. Para las cales vivas (Q) estos valores corresponden al producto acabado. Para las cales hidratadas (S), los valores se refieren al producto exento de agua libre y de agua combinada. Véase el apartado 4.1.5 de la Norma UNE-EN 459-2:2002.  
Los valores de la tabla se expresan en porcentajes en masa

**Tabla 2**  
**Requisitos de reactividad y granulometría (Cales Clase Q)**

<b>Propiedad</b>	<b>Valores especificados</b>
Retenido por el tamiz de 3 mm.	0 %
Retenido por el tamiz de 2 mm.	5 % máximo
Reactividad con agua a t' 60°C	15 min, máximo

**Tabla 3**  
**Requisitos de humedad y granulometría (Cales Clase S)**

<b>Propiedad</b>	<b>Valores especificados</b>
Retenido por el tamiz de 0.2 mm.	2 % máximo
Humedad	2 % máximo

Las cales para estabilización de suelos deberán presentar un aspecto homogéneo y no un estado grumoso o aglomerado.

El Proyecto indicará, previa la realización de los ensayos correspondientes, la clase de cal más adecuada a emplear para cada tipo de suelo.

## **3.2. SUELOS**

### **3.2.1. Condiciones generales**

Los suelos a tratar con cal estarán exentos de materia vegetal.

### **3.2.2. Granulometría**

El tamaño máximo permitido antes del tratamiento, que no deberá ser superior a:

- Ochenta milímetros (80 mm) en el caso de las capas de asiento de firme.
- Ciento cincuenta milímetros (150 mm) en el resto de los casos. El Director de Obra, podrá aumentar este valor tras la ejecución de los correspondientes tramos de prueba, que garanticen que con la maquinaria utilizada se consiguen las características del producto terminado con homogeneidad.

*La limitación de tamaños máximos se refiere tanto a materiales "duros" (rocas), como a grumos arcillosos que presenten los suelos a estabilizar.*

*La calidad que se exige a las capas de asiento de firme obliga a su limitación. Para el resto de los casos la limitación de estos tamaños consigue mejores resultados en el tratamiento y se obtienen mayores rendimientos de la maquinaria.*

El porcentaje de finos que pasan por el tamiz 0.063 UNE será:

- Superior al quince por ciento (15 %).
- Inferior al cincuenta por ciento (50%) en el caso de suelos estabilizados tipo SC – 2 para capas de asiento de firme.

*Para que se produzcan las reacciones de estabilización de los suelos con cal es necesario la presencia de material arcilloso.*

*Aunque uno de los efectos de la estabilización con cal es la aglomeración de las partículas arcillosas, las exigencias granulométricas de las estabilizaciones tipo SC – 2 para capas de asiento de firme limitan el porcentaje de finos del suelo antes de su tratamiento.*

### 3.2.3. Plasticidad

El índice de plasticidad, según las normas UNE 103103 y 103104, será:

- Superior a diez (10).
- Inferior a cuarenta (40) en el caso de los suelos estabilizados tipo SC-2 para capas de asiento de firme.

Si dicho índice fuera superior a cuarenta (40), el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares o, en su defecto, el Director de las Obras podrá ordenar que la mezcla del suelo con cal se realice en dos (2) etapas.

*La plasticidad que presenta un suelo es uno de los motivos principales para la elección de la cal como aditivo estabilizador de dicho suelo. Su valor y lo que ello conlleva debe tenerse muy en cuenta en esta unidad de obra.*

*Los efectos que la cal produce en la plasticidad de los suelos son la eliminación de la misma, (en suelos no muy plásticos), o su disminución que se manifiesta en:*

*El límite líquido prácticamente se mantiene.*

*El límite plástico aumenta de valor.*

*El índice de plasticidad como consecuencia de lo anterior se reduce.*

*El índice de plasticidad es el parámetro fundamental que se utiliza para el control de la plasticidad en los suelos tratados con cal.*

### 3.2.4. Contenido en sulfatos

*Los sulfatos pueden afectar a la estabilización de los suelos con cal mediante reacciones químicas que provocan cambios volumétricos como son la formación de etringita (trisulfoaluminato de calcio).*

El contenido en sulfatos “solubles” expresados como  $SO_3$ , determinado según UNE 103201, será inferior a ocho décimas por ciento (0,8 %) en peso sobre muestra total. El uso de suelos con porcentajes superiores podrá ser autorizado por la Dirección de las Obras tras la realización de estudios especiales que lo justifiquen.

*De existir sulfatos, su distribución en el suelo no es muy homogénea, por lo que cuando son detectados hay que extremar los controles de identificación para asegurar que no se utilicen materiales que superen los límites establecidos.*

En el caso de ser el contenido de sulfatos solubles expresados como  $SO_3$ , superior al medio por ciento (0.5%) en peso sobre muestra total, se incrementará el control de producción, para delimitar y asegurar que no se utilizan suelos que superen los valores

permitidos. Adicionalmente en el proceso de ejecución se procurará que estos sulfatos se distribuyan homogéneamente en la capa, para disminuir su potencial efecto.

En los fondos de desmote o terraplén, de existir sulfatos en cuantía superior a los límites indicados, se tomarán medidas para impedir la contaminación del material estabilizado.

### **3.2.5. Materia orgánica**

*La materia orgánica, retrasa los efectos de la cal en los suelos e inhibe las reacciones puzolánicas de cementación a largo plazo.*

El contenido en materia orgánica, determinada según UNE 103204 será inferior:

- Uno por ciento (1 %) para las capas de asiento de firme.
- Dos por ciento (2 %) para el resto de los casos.

## **4. TIPO Y COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA. FÓRMULA DE TRABAJO**

El tipo y composición de la mezcla serán los definidos en el Proyecto, el cual deberá fijar **la dosificación mínima de cal** y las **características mínimas** que se le exigirán al suelo tras su tratamiento.

### **4.1. FÓRMULA DE TRABAJO PROPUESTA.**

En ella se hará constar en función del tipo de tratamiento:

#### **4.1.1. Secado de suelos.**

Para este caso, la fórmula de trabajo indicará la dotación mínima de cal necesaria para conseguir las condiciones requeridas de trabajabilidad o de humedad final del suelo.

La fórmula indicará las humedades de partida de los suelos y la humedad final que se consigue con el porcentaje y método de mezcla previsto.

*En el caso de necesitar definir un grado de trabajabilidad del suelo, un parámetro interesante a determinar en la fórmula de trabajo es el "índice portante inmediato" conocido como IPI, (CBR sin sobrecargas), según la norma francesa NFP 94078, se fijarán valores del mismo para distintas dotaciones de cal y métodos de mezcla.*

#### 4.1.2 Mejora - estabilización de suelos.

*En el tratamiento de los suelos con cal para su mejora – estabilización, el estudio de la fórmula de trabajo es fundamental para contar con las garantías de conseguir dichas mejoras.*

*La fórmula de trabajo consiste en la determinación de la variación de las características geotécnicas exigidas a los suelos tras su mezcla con porcentajes crecientes de cal, que engloban al mínimo fijado en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares.*

Se confeccionará una fórmula de trabajo para cada tipo de suelo, de cal y de tratamiento diferentes.

El tratamiento no deberá iniciarse sin que el Director de las Obras haya aprobado su fórmula de trabajo, la cual señalará:

- **A) La dosificación de cal**, que deberá ser igual o superior a la mínima fijada en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, y será siempre superior a:
  - ⇒ Dos por ciento (2%) para los suelos estabilizados tipo SC – 1.
  - ⇒ Tres por ciento (3%) para los suelos estabilizados tipo SC – 2 para las capas de asiento de firme.
  
- **B) El valor mínimo CBR a los siete (7) días**, especificado en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares que deberá ser superior a:
  - ⇒ Doce (12) para los suelos estabilizados tipo SC – 2 para las capas de asiento de firme.
  - ⇒ Seis (6) para el resto de los casos.

*El índice CBR es el principal parámetro utilizado para la definición y control de ejecución de los tratamientos de los suelos con cal, llegando a ser en instrucciones como ICAFIR o la 6.1 IC prácticamente el único valor de referencia.*

*Las necesidades de esta unidad de obra, han requerido la definición de 2 tipos de ensayo CBR: el de caracterización de los suelos cal y el de control de ejecución de los suelos cal.*

### **CBR de caracterización de los suelos cal**

*La caracterización de un suelo tras su mezcla con cal, se realiza durante:*

- La redacción del proyecto.*
- Para la confección de la fórmula de trabajo.*
- Como ensayo de control para la comprobación de los requisitos de proyecto durante la ejecución de la obra.*

*En estos trabajos se estudia la viabilidad del tratamiento: “el suelo que se consigue tras su mezcla con cal”, el índice CBR en este caso es el definido por la norma UNE 103502, realizándose una preparación de muestra en laboratorio de acuerdo con UNE 103100, procediéndose a una trituración de todos los grumos que presentase el suelo, a una mezcla íntima y cuidada del suelo con la cal y a la humectación de la mezcla para conseguir la humedad óptima mediante el ensayo Proctor modificado.*

*La curva CBR que se obtiene es el índice CBR frente a la densidad, tras los 7 días de inmersión en agua. Adicionalmente se determinará el índice CBR a 1, 4 y 7 días con la densidad mínima exigida en obra, y la humedad óptima de compactación, para su uso posterior en el control de ejecución.*

### **CBR de control de ejecución de los suelos cal**

#### Preparación de la muestra.

*Cuando se utiliza el ensayo CBR como control de ejecución, éste debe informar de la “validez” de la ejecución del tratamiento, es decir: “de la calidad real del suelo puesto en obra”, por tanto, en la realización del ensayo “no se deben alterar” las condiciones de “disgregación, mezcla y humectación” conseguidas con la maquinaria utilizada en obra, por lo que en la ejecución del ensayo, a la mezcla solo se le tamiza, (para eliminar lo retenido por el tamiz UNE 20 mm), y se coloca en los moldes CBR con la densidad mínima solicitada, (97 o 95% de la densidad máxima obtenida en el ensayo Proctor modificado), y la humedad alcanzada en obra.*

#### Tiempos de ensayo

*El control de ejecución no puede esperar los “tiempos normales” del ensayo, (de 7 a 11 días), en el control de ejecución resulta imprescindible poder tomar decisiones a edades más tempranas, para ello se determinará la “evolución del índice CBR en el tiempo, del suelo tratado con cal en obra”:*

- Se confeccionan tres moldes CBR (con la muestra de suelo cal tomada en obra), en iguales condiciones de compactación: “densidad mínima exigida y con la humedad alcanzada en obra”, que se ensayan a penetración a 1, 4 y 7 días, obteniéndose la curva CBR/días.*

*Aunque el valor de referencia sea el de los 7 días, como se conoce la evolución del CBR del suelo con la cal por su fórmula de trabajo y por los ensayos de caracterización, con los resultados obtenidos en el control de ejecución a 1 y 4 días, se pueden tomar decisiones a estas edades más tempranas de la mezcla.*



– **C) La estabilidad volumétrica determinada por:**

- Los asientos en el ensayo de colapso en edómetro realizado según la NLT 254.
- Los hinchamientos obtenidos en el ensayo en edómetro según la UNE 103601.
- Los hinchamientos obtenidos en el ensayo CBR según la UNE 103502.

A los siete (7) días, los cambios volumétricos, serán nulos para las capas de asiento de firme.

Para el resto de los casos serán inferiores a:

- Uno por ciento (1,0 %) en los ensayos edométricos (hinchamiento o colapso).
- Dos por ciento (2.0 %) en el ensayo CBR.

*Una de las causas del tratamiento de los suelos con cal es mejorar su estabilidad volumétrica, esta estabilización, (consecuencia de las reacciones físico – químicas del suelo con la cal), evoluciona en el tiempo, por lo que de producirse fenómenos de asientos o hinchamientos habrá que estudiar su “evolución”. En estos casos se repetirán los ensayos, tras someter las muestras a un proceso de curado durante siete días en bolsas de plástico, dentro de la cámara húmeda, para evitar la pérdida de humedad.*

– **D) La humedad del suelo en el momento de su mezcla con la cal**

La humedad del suelo deberá ser tal que permita que, con el equipo que se vaya a realizar la estabilización, se consiga el grado de disgregación requerido y su mezcla con la cal sea uniforme.

– **E) La humedad de compactación**

La humedad de compactación para los suelos tratados con cal es la óptima Proctor modificado con una tolerancia de menos 0 más dos por ciento (–0 + 2%).

– **F) El porcentaje mínimo de la densidad máxima “Proctor modificado”** según UNE 103501 a obtener no deberá ser inferior al:

- Cien por cien (100%) en trasdós de estructuras y rellenos localizados en obras de drenaje.
- Noventa y siete por ciento (97 %) para las capas de asiento de firme.
- Noventa y cinco por ciento (95%) para el resto de los casos.

#### – **G) Reducción del índice de plasticidad**

La reducción de la plasticidad que se conseguirá tras el tratamiento será:

- En los suelos con índice de plasticidad inferior a treinta y cinco (35) esta se reducirá a menos de quince (15).
- En los suelos con índice de plasticidad superior a treinta y cinco (35) esta se reducirá al menos a la mitad.

En todos los casos, la plasticidad final del suelo estabilizado en las distintas capas, cumplirá los valores definidos en el Proyecto.

#### – **H) Valor mínimo del PH**

*Para que se puedan producir las reacciones puzolánicas de cementación a largo plazo de los suelos con la cal, (con las que se consiguen el incremento de las características mecánicas), es imprescindible que el valor del PH sea superior a 12.  
Existen métodos de dosificación de los suelos con cal cuyo fundamento es la consecución de este valor del PH.  
Estas reacciones, (para algunos autores son las reacciones de estabilización), han de ser exigidas para las capas de asiento de firme.*

El valor del PH tras el tratamiento será superior a doce (12) para las capas de asiento de firme, y superior a diez (10) para el resto de los casos.

#### – **I) Modificación de la granulometría**

La fórmula de trabajo reflejará la variación en la granulometría que se produce tras la mezcla del suelo con la dotación prevista de cal, referencia que se utilizará para el posterior control de ejecución.

#### – **J) Determinación de la dotación de cal y homogeneidad de la mezcla**

- Medición del PH.
- Contenido de cal.

En el control de ejecución se determinará el PH y el contenido de cal del suelo tratado, lo que conjuntamente con las curvas de calibrado, informará de la dotación de cal de la muestra analizada.

*La determinación de la dotación de cal existente en el suelo tras su tratamiento, así como el grado de homogeneidad conseguido en la mezcla, son características importantes del control de ejecución. La fórmula de trabajo fijará los valores que se habrán de conseguir de PH y contenido de cal, y posteriormente en los tramos de prueba se confirmarán o adecuarán estos valores. En la fórmula de trabajo se reflejarán las curvas de calibrado de la variación del PH, y del contenido de cal de los suelos antes del tratamiento y en las mezclas de estos con porcentajes crecientes de cal que engloben a la dosificación mínima prefijada.*

#### **4.2. ACEPTACIÓN DE LA FÓRMULA DE TRABAJO**

Una vez analizados por el Director de las Obras la fórmula de trabajo propuesta por el Contratista y el informe de contraste del laboratorio de control de calidad de recepción, procederá, en su caso, a la aprobación inicial de la fórmula de trabajo para la ejecución de los tramos de prueba.

#### **5. TRAMOS DE PRUEBA**

El objeto de los tramos de prueba es verificar la idoneidad de la fórmula de trabajo y los equipos empleados en la ejecución de la obra.

Una vez aprobada la fórmula de trabajo por parte del Director de las Obras, será preceptiva la realización de tramos de prueba para cada tipo de tratamiento, que se realizará con los espesores de tongada y medios que vaya a utilizar el Contratista en la ejecución de las obras.

Se verificarán los siguientes aspectos:

- En el caso de la mezcla en planta
  - ⇒ Comprobar la homogeneidad de la mezcla.
  - ⇒ Fijar la composición y forma de actuación del equipo de extendido.
  
- En el caso de mezcla “in situ”
  - ⇒ Fijar la composición del equipo de estabilización.
  - ⇒ Comprobar la profundidad y eficacia de la disgregación del suelo y la homogeneidad de su mezcla con la cal.
  
- Además, en ambos casos:
  - ⇒ Fijar la composición y forma de actuación del equipo de compactación, y
  - ⇒ Determinar la humedad de compactación más adecuada.

El Director de las Obras determinará si es aceptable la realización del tramo de prueba como parte integrante de la obra en construcción.

### **5.1. MEZCLA EN CENTRAL**

La prueba se realizará con la central que vaya a fabricar las mezclas de la obra.

Previo a la ejecución de los tramos de prueba se verificará que la planta de mezcla de los suelos con la cal propuesta, es adecuada para la calidad exigida. Se comprobará y analizará con los ensayos referenciados en el apartado 5.4.2. del presente Pliego, la homogeneidad del producto final.

### **5.2. MEZCLA “IN SITU”**

La prueba se realizará con el equipo que va a ejecutar las obras. El Contratista deberá especificar por escrito la composición, características y velocidades o pasadas de cada componente del equipo de estabilización y en el caso de que éste cambie durante las mismas, deberá volver a realizarse el estudio sobre un nuevo tramo de prueba.

Se establecerán las relaciones entre el número de pasadas de los equipos y las características alcanzadas, tanto para la disgregación del suelo y su mezcla con la cal, como para la humectación, en su caso, y la compactación.

### **5.3. ACEPTACIÓN DE LOS TRAMOS DE PRUEBA**

A la vista de los resultados obtenidos, el Director de las Obras definirá:

- Si son aceptables o no los equipos propuestos por el Constructor.
  - ⇒ En el primer caso, su forma específica de actuación y, en su caso, las correcciones necesarias, especialmente en lo relativo a etapas de mezcla, (central o “in situ), y humedad de compactación.
  - ⇒ En el segundo caso, el Constructor deberá proponer nuevos equipos, o incorporar equipos suplementarios o sustitutorios.

- El tramo de prueba confirmará la fórmula de trabajo o ésta deberá modificarse para la ejecución de los trabajos.

Asimismo, durante la ejecución de los tramos de prueba se analizarán los siguientes aspectos:

- Comportamiento del suelo durante la disgregación y mezcla, (en central o “in situ”), y del suelo tratado bajo la compactación.

## **5.4. ACEPTACIÓN DE LOS MÉTODOS DE CONTROL**

### **5.4.1. Determinación del espesor del tratamiento**

La determinación del espesor real del suelo tratado se realizará por medida directa mediante catas practicadas en la tongada.

### **5.4.2. Ensayos de control de dotación de cal y homogeneidad de la mezcla en superficie y profundidad**

- Medición del PH.
- Contenido de cal.

Para verificar la homogeneidad de la mezcla y la profundidad del tratamiento, se determinarán los valores de PH y contenido de cal de muestras de suelos tomadas antes y después del tratamiento, en distintas zonas y a distintas profundidades de la capa.

### **5.4.3. Ensayos de control de compactación**

Correlación entre los métodos de densidad “in situ” por el método de la arena y otros rápidos tales como isótopos radiactivos, carburo de calcio, etc.

### **5.4.4. Ensayos de capacidad soporte**

Se tomarán muestras del suelo estabilizado en los tramos de prueba para:

- La determinación del índice CBR a siete (7) días obtenido a partir de la curva CBR/densidad. Este índice servirá como análisis del material y comprobación de la fórmula de trabajo.

- Confeccionar la curva de crecimiento del índice CBR en el tiempo, a uno, cuatro y siete (1,4 y 7) días. Esta evolución del índice servirá de referencia para el posterior control de ejecución.

#### **5.4.5. Definición y aceptación de otros ensayos de control**

- Resistencia a compresión.
- Permeabilidad.

Tras cada tramo de prueba se aceptarán los métodos de control.

### **6. EQUIPOS NECESARIOS PARA LA EJECUCIÓN DE LAS OBRAS**

*La calidad a exigir a los equipos para la ejecución de las obras dependerá del tipo de tratamiento que se realice en cada caso, en los siguientes capítulos se fijarán los condicionantes mínimos para dichos equipos.*

Los equipos empleados en la ejecución de las obras cumplirán todas las disposiciones de la legislación vigente en materia ambiental, de seguridad y salud y de transporte.

Se utilizarán en la ejecución de los suelos estabilizados con cal, solamente los equipos que hayan sido previamente aprobados por el Director de las Obras después de la ejecución de los tramos de prueba.

Para la ejecución de los suelos tratados “in situ” con cal se deberán emplear equipos mecánicos. Éstos podrán ser equipos independientes que realicen por separado las operaciones de disgregación, distribución de la cal, humectación, mezcla y compactación, o bien equipos que realicen dos o más de estas operaciones, excepto la compactación, de forma simultánea.

#### **6.1. EQUIPOS DE MEZCLA “IN SITU”**

##### **6.1.1. Distribución de cal**

Los equipos para la distribución de cal, deberán ser adecuados para conseguir la homogeneidad de extendido para la capa a estabilizar exigida en este Pliego.

En el caso de distribuir la cal en polvo, deberán ser capaces de aplicar la totalidad de la dosificación prevista en dos (2) pasadas, como máximo.

### **6.1.2. Mezcla del suelo con la cal**

El tipo de tratamiento condicionará el grado de disgregación y de homogeneidad de la mezcla tanto en superficie como en profundidad, lo que implica la ejecución con equipos que aseguren la calidad de la mezcla.

En las zonas que por su reducida extensión, su pendiente, o su proximidad a obras de paso o desagüe, muros o estructuras, no permitan el empleo del equipo que normalmente se estuviera utilizando, se emplearán los medios adecuados a cada caso, de forma que las características obtenidas no difieran de las exigidas al suelo tratado en las demás zonas.

En estas zonas y en el caso que los suelos procedan de desmonte o préstamo, se tratarán previamente con la cal en el lugar de extracción, o donde sea posible el tratamiento, y posteriormente se colocarán en obra ya mezclados.

## **6.2. EQUIPOS DE MEZCLA EN CENTRAL**

### **6.2.1. Fabricación de la mezcla**

Se podrán utilizar centrales de mezcla continua o discontinua. La capacidad de producción horaria mínima de la central deberá ser adecuada a la programación de la obra.

En cualquier caso, la instalación deberá permitir dosificar por separado el suelo, la cal y, en su caso, los aditivos, en las proporciones y con las tolerancias fijadas en la fórmula de trabajo.

Las tolvas deberán tener paredes resistentes y estancas, bocas de anchura suficiente para que su alimentación se efectúe correctamente, provistas de una rejilla que permita limitar el tamaño máximo.

Los sistemas de dosificación de los materiales serán adecuados para conseguir las características especificadas, siendo aconsejables los ponderales sobre los volumétricos. En cualquier caso será el Director de las Obras quien aceptará estos sistemas de dosificación.

El agua añadida se controlará mediante un caudalímetro, de precisión superior al dos por ciento (2%).

En el caso de que se incorporen aditivos a la mezcla, la central deberá tener sistemas de almacenamiento y de dosificación independientes de los correspondientes al resto de los materiales, protegidos de la humedad, y un sistema que permita su dosificación de acuerdo con la fórmula de trabajo.

Los equipos de mezcla deberán ser capaces de asegurar una completa homogeneización de los componentes dentro de las tolerancias fijadas.

### **6.2.2. Transporte de la mezcla**

La mezcla se transportará al lugar de empleo en camiones de caja abierta, lisa y estanca, perfectamente limpia. Deberán disponer de lonas o cobertores adecuados para proteger la mezcla durante su transporte. Por seguridad de la circulación vial será inexcusable el empleo de cobertores para el transporte por carreteras de servicio.

Se tendrán en cuenta las pérdidas de humedad que suponga el transporte a obra, para la consecución de la humedad de compactación.

Los medios de transporte deberán estar adaptados, en todo momento, al ritmo de ejecución de la obra teniendo en cuenta la capacidad de producción de la central y la distancia entre la central y el tajo de extendido.

### **6.2.3. Vertido y extensión de la mezcla**

En este caso de mezcla en central, el vertido y la extensión de los suelos tratados con cal se realizarán con los equipos habituales utilizados en las obras de movimientos de tierras. El tipo a exigir (motoniveladoras, extendedoras, etc.), dependerá de las características a conseguir en la capa.

## **6.3. COMPACTACIÓN DE LA MEZCLA**

Todos los compactadores deberán ser autopropulsados y tener inversores del sentido de la marcha de acción suave y estar dotados de dispositivos para mantenerlos húmedos en caso necesario.

La composición del equipo de compactación se determinará en el tramo de prueba, y deberá estar compuesto como mínimo por un (1) compactador vibratorio de rodillos metálicos.

El rodillo metálico del compactador vibratorio tendrá una carga estática sobre la generatriz no inferior a trescientos newton por centímetro (300N/cm) y será capaz de alcanzar una masa de al menos quince toneladas (15 t), con amplitudes y frecuencias de vibración adecuadas.

Si se utilizasen compactadores de neumáticos, éstos deberán ser capaces de alcanzar una masa de al menos treinta y cinco toneladas (35 t) y una carga por rueda de cinco toneladas (5 t), con una presión de inflado que pueda alcanzar un valor no inferior a ocho décimas de megapascal (0,8 Mpa).

Los compactadores con rodillos metálicos no presentarán surcos ni irregularidades en ellos. Los compactadores vibratorios tendrán dispositivos automáticos para eliminar la vibración al invertir el sentido de la marcha. Los de neumáticos tendrán ruedas lisas, en



número, tamaño y configuración tales que permitan el solape entre las huellas delanteras y las traseras.

El Director de las Obras, tras la ejecución de los tramos de prueba, aprobará el equipo de compactación que se vaya a emplear, su composición y las características de cada uno de sus componentes, que serán las necesarias para conseguir una densidad adecuada y homogénea del suelo estabilizado en todo su espesor, sin producir roturas del material ni arrollamientos.

En los lugares inaccesibles para los equipos de compactación convencionales, se emplearán otros de tamaño y diseño adecuados para la labor que se pretende realizar.

## **7. EJECUCIÓN DE LAS OBRAS**

### **7.1. PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE EXISTENTE**

*En el tratamiento "in situ" hay que distinguir dos casos: cuando este se realiza sobre el material de la superficie existente (fondos de terraplén y desmonte..), o cuando el suelo es total o parcialmente aportado y tratado con cal tras su extensión.*

Si en la superficie del suelo a tratar "in situ" existieran defectos o irregularidades que excedieran de los tolerables, a juicio del Director de las Obras, se corregirán según sus instrucciones.

Si se añade suelo de aportación para corregir las características del existente, se deberán homogeneizar ambos con el equipo de mezcla en todo el espesor de la capa que se vaya a estabilizar, antes de iniciar la distribución de la cal.

Si el suelo que se va a tratar fuera en su totalidad de aportación, (mezclado en central o "in situ"), previamente a su extensión y tratamiento, se deberán comprobar las condiciones de compactación y geometría de la capa subyacente para que en el caso de no ser las exigidas sean corregidas.

### **7.2. DISGREGACIÓN DEL SUELO PREVIO AL MEZCLADO**

Tras la preparación de la superficie existente, en su caso, se disgregará el suelo:

- El terreno natural existente se disgregará hasta la profundidad a estabilizar.
- Los terrenos de aportación cuando los grumos sean superiores a los permitidos.

En ambos casos con la disgregación se conseguirá que el suelo no presente grumos superiores a:

- Ochenta milímetros (80 mm) para su uso en capas de asiento de firme.
- Ciento cincuenta milímetros (150 mm) en el resto de los casos.

Estos tamaños de grumos serán aceptados siempre que tras el proceso de mezcla se consigan los valores de eficacia de disgregación establecidos en el apartado 7.4 del presente Pliego.

### **7.3. HUMECTACIÓN O DESECACIÓN DEL SUELO**

La humedad del suelo deberá ser tal que permita que, con el equipo que se vaya a realizar la estabilización, se consiga el grado de disgregación requerido y su mezcla con la cal sea uniforme.

En los casos en que la humedad natural del suelo sea excesiva, se tomarán las medidas adecuadas para conseguir la preparación necesaria, pudiéndose proceder a su desecación por oreo o a la adición y mezcla de materiales secos, o se podrá realizar, previa aceptación del Director de las Obras, una etapa previa de disgregación y mezcla con cal en polvo para corrección del exceso de humedad del suelo.

*En los suelos con humedad natural excesiva es recomendable el empleo de cal viva con las debidas condiciones de seguridad y salud, y no utilizar la vía húmeda con lechada de cal ya que esta aportaría más agua.*

En el caso de ser necesaria la incorporación de agua a la mezcla para alcanzar el valor de humedad fijado por la fórmula de trabajo, deberán tenerse en cuenta las posibles evaporaciones o precipitaciones que puedan tener lugar durante la ejecución de los trabajos. Dicha incorporación podrá realizarse, bien mediante riego previo del suelo con tanque regador, o bien en la carcasa del equipo de mezcla a la vez que se realiza esta.

En el primer caso, el agua deberá agregarse uniformemente disponiéndose los equipos necesarios para asegurar la citada uniformidad e incluso realizando un desmenuzamiento previo del suelo si fuera necesario. Deberá evitarse que el agua escurra por las roderas dejadas por el tanque regador, o se acumule en ellas. Asimismo, no se permitirán las paradas del equipo mientras esté regando, con el fin de evitar la formación de zonas con exceso de humedad.

En el segundo caso, deberá comprobarse que el abastecimiento de agua de la cisterna nodriza y el sistema de pulverización del estabilizador de suelos garantizan la dosificación prevista de la mezcla.

Si la cal se dosificara en forma de lechada, por vía húmeda, las proporciones agua – cal hidratada de la lechada se diseñarán de tal forma que aporte la humedad necesaria a la mezcla suelo – cal.

El método de humectación deberá ser aprobado por el Director de las Obras, quien así mismo podrá autorizar el riego del suelo después de la distribución de la cal por vía seca en casos excepcionales: fuertes vientos, efectividad del tratamiento, etc.

#### **7.4. MEZCLA**

*El grado de disgregación conseguido, se valorará además de limitar el tamaño máximo de los grumos, por la llamada “**eficacia de disgregación**” referida a un tamaño o tamiz, que es:  
La relación entre el “porcentaje que pasa” en obra del material húmedo y el “porcentaje que pasa” en el laboratorio de ese mismo material desecado y desmenuzado, por el tamiz al que se refiere.*

Sea como fuere el proceso de mezcla, (central o “in situ”), la eficacia de disgregación será:

##### Para las capas de asiento de firme

- Del cien por cien (100%) referida al tamiz veinticinco milímetros (25 mm).
- Para los suelos estabilizados tipo SC – 2 para capas de asiento de firme, del ochenta por ciento (80 %) referidas al tamiz cuatro milímetros (4 mm).
- Para los suelos estabilizados tipo SC – 1 para capas de asiento de firme, del sesenta por ciento (60 %) referidas al tamiz cuatro milímetros (4 mm).

##### Para el resto de los casos

- Del ochenta por ciento (80 %) referida al tamiz cuarenta milímetros (40 mm).

En el caso de materiales muy arcillosos y mezcla “in situ”, para poder conseguir estos valores de eficacia de disgregación, pudiera resultar necesario realizar el tratamiento en dos etapas. El objeto de la primera etapa es hacer, que tras un curado inicial, el suelo sea lo suficientemente trabajable para que tras la segunda etapa se alcancen las condiciones exigidas.

##### **7.4.1. En central**

En el momento de iniciar la fabricación de la mezcla, el suelo estará acopiado en cantidad suficiente para permitir a la central un trabajo sin interrupciones. El Director de las Obras fijará el volumen mínimo de acopios exigibles en función de las características de la obra y del volumen de mezcla que se vaya a fabricar.

La carga de las tolvas se realizará de forma que su contenido esté siempre comprendido entre el cincuenta y el cien por cien (50 a 100%) de su capacidad, sin rebosar.

La operación de mezcla se realizará mediante dispositivos capaces de asegurar la completa homogeneización de los componentes. El Director de las Obras fijará, a partir de los ensayos iniciales (medición del PH, contenido de cal), el tiempo mínimo de amasado.

Se comenzará mezclando el suelo con la cal, añadiéndose, en caso necesario, posteriormente el agua y, en su caso los aditivos disueltos en ella. La cantidad de agua añadida a la mezcla será la necesaria para alcanzar la humedad fijada en la fórmula de trabajo, teniendo en cuenta la existente en el suelo así como la variación del contenido de agua que se pueda producir por evaporación durante la ejecución de la mezcla y tras su transporte y extendido.

Se podrá acopiar, protegidas para evitar desecaciones y carbonataciones, (por ejemplo cubiertas con un plástico), mezclas de los suelos con cal un máximo de cinco (5) días, antes de su colocación en obra.

#### **7.4.2. “In situ”**

##### **7.4.2.1 Distribución de la cal**

La cal viva o apagada se distribuirá uniformemente mediante equipos mecánicos con la dosificación fijada en la fórmula de trabajo, de dos formas posibles:

- Por **vía seca**, en forma de polvo a granel, mediante una extensión previa sobre la superficie de trabajo, anterior al mezclado con el suelo.
- Por **vía húmeda**, en forma de lechada de cal hidratada o apagada, elaborada previamente también por equipos mecánicos. La proporción de cal en la mezcla será, como máximo, del treinta y cinco por ciento (35%).

*En los suelos secos, que necesiten aporte de humedad, puede usarse indistintamente la vía seca o húmeda. En el caso de emplearse la vía seca, con cal viva, se necesitará aportar un 30% del peso de cal añadida, más de agua para su hidratación. Si se emplea la vía húmeda, hay que considerar el aporte de agua que lleva la propia lechada de cal.*

*El empleo de la vía húmeda exige la utilización de cal apagada. Los equipos normales actualmente disponibles para la producción de lechada de cal no permiten el empleo de la cal viva.*

*Utilizando la vía seca, el empleo de cal viva tiene la ventaja de que posee una densidad mucho mayor que la de la cal apagada y, además, se necesita menos aporte de material. Por el contrario, requiere una mayor cantidad de agua y la adopción de mayores precauciones de seguridad y salud en el manejo del producto.*

La cal a granel se suministrará a la obra en camiones cisternas con descarga a presión, estancos, y conformes a la legislación de transporte de mercancías vigente. La descarga desde estos camiones a los equipos de extendido se hará mediante conductos y dispositivos que garanticen la estanqueidad y seguridad de las operaciones.

En la distribución de la cal se tomarán las medidas adecuadas para el cumplimiento de la legislación que, en materia ambiental y de seguridad laboral, estuviese vigente.

Los **equipos** normalmente utilizados para la distribución de la cal son:

– **Vía seca**

⇒ *Extendedora con dosificador volumétrico sin servodirigir con la velocidad de avance:*

Se regula la cantidad de cal vertida por unidad de tiempo, en función de la apertura de las trampillas y sistemas extractores. Se controlará durante el extendido la velocidad de avance de la extendedora para asegurar que la dosificación sea la prevista.

⇒ *Extendedora con dosificador volumétrico servodirigido con la velocidad de avance:*

Se fija la anchura y el caudal de extendido en función de la dosificación de cal prevista y el espesor de capa a tratar.

⇒ *Extendedora con dosificador volumétrico servodirigido con la velocidad de avance y control ponderal:*

Se fija la anchura y el caudal de extendido en función de la dosificación de cal prevista y el espesor de capa a tratar, y se registran todos los datos del funcionamiento de la máquina durante la ejecución de los trabajos.

*Estos equipos consisten en camiones - silo o tanques remolcados con tolvas acopladas en la parte posterior con compuertas y dispositivos de extracción regulables.  
Si bien el funcionamiento de los equipos es similar, la precisión y regularidad obtenida con los dos últimos es mayor y además poseen un sistema de regulación más simple.*

En el caso de las capas de asiento de firme, solo se podrán utilizar equipos servodirigidos con la velocidad de avance, siendo además recomendable con control ponderal.

Si la descarga de la cal sobre el suelo a estabilizar se realizase desde una altura superior a diez centímetros (10 cm), el dispositivo de descarga estará protegido con faldones cuya

parte inferior no deberá distar más de diez centímetros (10 cm) de la superficie del firme, con el objeto de evitar que el viento afecte al extendido.

En el caso de que el extendido de la cal se realice por vía seca, deberán coordinarse adecuadamente los avances del equipo de dosificación de cal y del de mezcla, no permitiéndose que haya entre ambos una longitud extendida de cal superior a cien metros (100 m).

La extensión se detendrá cuando la velocidad del viento sea excesiva a juicio del Director de las Obras, cuando supere los diez metros por segundo (10 m/s), o cuando la emisión de polvo afecte a zonas pobladas, ganaderas o especialmente sensibles.

#### – **Vía húmeda**

El equipo de dosificación de cal, del agua y eventualmente, de los aditivos, se compondrá de depósitos, bombas de caudal variable u otros dosificadores volumétricos o ponderales y difusores adecuadamente dispuestos, con control automático programable de dosificación, que permitan realizar las dosificaciones de la fórmula de trabajo correspondiente, según la profundidad y anchura de la capa que se vaya a tratar y según la velocidad de avance de la máquina.

Cuando la cal se aporte en forma de lechada, el equipo para su fabricación tendrá un mezclador con alimentación volumétrica de agua y dosificación ponderal de la cal. El equipo de estabilización que posteriormente realice la mezcla suelo – cal deberá estar provisto de un dosificador – distribuidor volumétrico de lechada, con bomba de caudal variable y dispositivo de rociado, así como control automático programable de dosificación, que permita adecuar las dosificaciones a la fórmula de trabajo correspondiente, según la profundidad y anchura de la capa que se vaya a estabilizar y la velocidad de avance la máquina.

La fabricación de la lechada podrá realizarse en un dispositivo de fabricación – dosificación acoplado a la máquina estabilizadora, o bien en instalaciones portátiles montadas a pie de obra. En este último caso, la distribución de la lechada se hará mediante cisterna nodriza a los pulverizadores del estabilizador de suelos o mediante riego – extensión previa del suelo.

Antes de iniciar el proceso en obra se purgarán y pondrán a punto las bombas y dispersores de agua y de lechada fuera del lugar de empleo, para garantizar las dotaciones establecidas en la fórmula de trabajo de manera continua y uniforme. En cada parada del equipo se realizará una limpieza de los difusores.

*La razón por la que la proporción de cal en la lechada deba ser como máximo del 35%, es que para concentraciones mayores, se dificulta el mezclado y la circulación de la lechada por todos estos dispositivos.*

#### 7.4.2.2 Mezcla del suelo con la cal

Inmediatamente después de la distribución de la cal deberá procederse a su mezclado con el suelo. La mezcla deberá conseguir una dispersión homogénea de la cal, lo que se reconocerá por su color uniforme y la ausencia de grumos, y se controlará por los ensayos definidos en el artículo 11 del presente Pliego. Toda la cantidad de cal distribuida se deberá mezclar con el material disgregado antes de haber transcurrido tres horas (3h) desde su extendido.

La mezcla “in situ” del suelo con la cal se realizará mediante equipos autopropulsados que deberán contar con los dispositivos necesarios para asegurar una mezcla homogénea en toda la anchura y profundidad del tratamiento. Si se detectaran segregaciones, partículas sin mezclar, o diferencias de contenido de cal o de agua en partes de la superficie tratada, deberá detenerse el proceso y realizar las oportunas correcciones hasta solucionar las deficiencias.

En el caso de que el extendido de cal se realice por vía seca, en zonas con vientos moderados, deberán coordinarse adecuadamente los avances del equipo de dosificación de cal y del de mezcla, de tal forma que ambos actúen uno inmediatamente a continuación del otro, para evitar el levantamiento de la cal en polvo extendida sobre el suelo.

### **7.5. CURADO INICIAL**

*Cuando la mejora – estabilización de un suelo se plantea en dos etapas, para que los resultados finales sean los previstos, hay que controlar las condiciones del curado inicial o de la primera etapa.*

Si la mezcla se realizase en dos (2) etapas, el suelo tratado con cal se dejará curar de veinticuatro (24) a cuarenta y ocho (48) horas, durante las que se cuidará de evitar variaciones de humedad, compactando ligeramente si existieran riesgo de precipitaciones. Este plazo de curado podrá ser aumentado hasta siete (7) días, a criterio del Director de las Obras, si el índice de plasticidad del suelo fuera superior a cuarenta (40).

### **7.6. COMPACTACIÓN**

En el momento de la compactación la mezcla deberá estar disgregada en todo su espesor, y su humedad será la fijada en la fórmula de trabajo con las tolerancias indicadas en el apartado 4.1.2.E. del presente Pliego.

La compactación se realizará según el plan aprobado por el Director de las Obras en los tramos de prueba. Se compactará en una sola tongada y se continuará hasta alcanzar la densidad especificada en el apartado 4.1.2.F. del presente Pliego.

La compactación se realizará de manera continua y uniforme. Si el proceso de ejecución, incluida la mezcla, se realiza por franjas, al compactar una de ellas se ampliará la zona de compactación para que incluya, al menos, quince centímetros (15 cm) de la

anterior. Deberá disponerse en los bordes una contención lateral adecuada. Si la mezcla se realiza con dos máquinas en paralelo con un ligero desfase, se compactarán las dos franjas a la vez.

Los rodillos deberán llevar su rueda motriz del lado más cercano al equipo de mezcla. Los cambios de dirección de los compactadores se realizarán sobre mezcla ya compactada, y los cambios de sentido se efectuarán con suavidad. Los elementos de compactación deberán estar siempre limpios y, si fuera preciso, húmedos.

En el caso de las capas de asiento de firme y cuando la estabilización se realiza “in situ”, durante la compactación, la superficie del suelo estabilizado se conformará mediante su refinado con motoniveladora, eliminando irregularidades, huellas o discontinuidades, para lo cual el Director de las Obras podrá aprobar la realización de una ligera escarificación de la superficie y su posterior recompactación previa adición del agua necesaria.

### **7.7. ACABADO DE LA SUPERFICIE.**

*Las condiciones de acabado vendrán fijadas en el proyecto según el tipo (terraplén, capas de asiento de firme, etc.), de capa tratada.*

La superficie del suelo tratado con cal se conformará hasta alcanzar las rasantes y perfiles señalados en los planos, con las tolerancias establecidas en el Proyecto para la capa. Si dicha superficie presentase irregularidades, huellas o discontinuidades inadmisibles, a juicio del Director de las Obras, deberá escarificarse ligeramente, recompactando la zona afectada, previa adición del agua necesaria.

### **7.8. JUNTAS.**

De existir juntas longitudinales, se solaparán un mínimo de veinte centímetros (20cm), cuidando no sobrepasar las condiciones de humedad en las zonas de solape.

En cuanto a las juntas transversales en el caso de las estabilizaciones “in situ”, se comenzará el proceso de estabilización sobre el material ya tratado anteriormente en una longitud mínima de medio metro (0,5 m).

### **7.9. CURADO FINAL**

*La consecución de determinadas propiedades geotécnicas de los suelos tratados con cal pueden necesitar de un curado final de la capa.*

*Para que se produzcan las reacciones de estabilización es preciso que no se pierda la humedad y que no se “carbonate” la cal, por ello hay que proteger las capas de los suelos tratados que no vayan a ser tapadas de una manera inmediata, ello se puede conseguir con la extensión de un riego bituminoso de curado. En el caso de necesitar proteger su acabado y tener que dar paso sobre ella al tráfico, además habrá que extender un árido de cobertura.*



En el caso de las capas de asiento de firme que no vayan a ser inmediatamente tapadas por la siguiente capa, será preceptivo la extensión de un riego de curado con un producto bituminoso que impida la pérdida de humedad y la carbonatación de la cal, este riego de curado se ejecutará en la misma jornada que se acabe su compactación. En el caso de tener que proteger la capa por tener que dar tráfico sobre ella, además del riego de curado se extenderá un árido de cobertura que proteja a dicho riego.

## **8. ESPECIFICACIONES DE LA UNIDAD TERMINADA**

### **8.1. SECADO DE LOS SUELOS**

Tras el tratamiento de los suelos, estos presentarán una humedad igual o inferior a la especificada.

### **8.2. MEJORA – ESTABILIZACIÓN DE SUELOS**

#### **8.2.1. Dosificación de cal.**

El contenido de cal del suelo tratado, deberá ser igual o superior al propuesto en la fórmula de trabajo aceptada por la Dirección de Obra con un nivel de confianza del noventa y cinco por ciento (95 %).

#### **8.2.2. Densidad.**

El porcentaje de la densidad respecto de la máxima “Proctor modificado”, según la norma UNE 103501, del suelo tratado con cal deberá ser superior al:

- Cien por cien (100%) en trasdós de estructuras y rellenos localizados en obras de drenaje.
- Noventa y siete por ciento (97 %), para las capas de asiento de firme.
- Noventa y cinco por ciento (95 %) para el resto de los casos.

#### **8.2.3. Capacidad Soporte.**

El índice CBR de las probetas de suelo tratado con cal, (realizado de acuerdo con la norma UNE 103502 con las modificaciones indicadas en el apartado 4.1.2 B del presente Pliego), a los siete (7) días, no deberá ser inferior al valor especificado en dicho apartado.

#### **8.2.4. Cambios volumétricos (hinchamientos, colapso).**

Los cambios volumétricos: asiento en el ensayo de colapso según NLT 254, expansión en los ensayos de hinchamiento en edómetro UNE 103601 o CBR UNE 103502, en el caso de producirse, serán inferiores a los indicados en el artículo 4.1.2.C del presente Pliego.

### **8.2.5. Valor mínimo del PH**

El suelo tratado con cal deberá presentar un valor de PH superior o igual al solicitado en el artículo 4.1.2.H del presente Pliego.

### **8.2.6. Índice de plasticidad**

El suelo tratado con cal deberá presentar unos valores del índice de plasticidad inferiores o iguales al solicitado en el artículo 4.1.2.G del presente Pliego.

### **8.2.7 Tolerancias geométricas**

Serán las definidas para cada capa en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares.

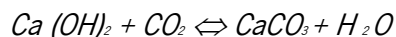
## **9. LIMITACIONES DE LA EJECUCIÓN**

Los trabajos de tratamiento de los suelos con cal se suspenderán cuando la temperatura ambiente, a la sombra, sea inferior a dos grados centígrados (2°C).

Con lluvias ligeras que no perturben la buena ejecución de los trabajos, el Director de las Obras podrá autorizar la continuación de los mismos. Cuando se produzcan aguaceros que no lleguen a inundar la zona de trabajo, y no haya temor de arrastres de la cal, podrán continuarse las obras uno o dos (1 ó 2) días después de pasados aquellos tras la verificación de la zona de trabajo por la Dirección de la Obra.

Cuando la fuerza del viento sea excesiva, a juicio del Director de las Obras, no se podrá aplicar cal en polvo.

*El compuesto químico que produce las reacciones de mejora y estabilización de los suelos es el hidróxido de calcio. Aunque esta estabilización no está tan condicionada en el tiempo como la del suelo cemento, hay que evitar la carbonatación del hidróxido de calcio por contacto con el anhídrido carbónico atmosférico según la reacción:*



*Esta reacción de carbonatación elimina la presencia del elemento estabilizador, es por lo que hay que proteger de la acción del aire a la cal tras su extensión procediendo lo más pronto posible a su mezcla con el suelo. Asimismo, como las reacciones de mejora – estabilización de los suelos con la cal se siguen produciendo mientras exista hidróxido de calcio en contacto con el suelo, interesará proteger de la carbonatación al suelo una vez tratado, tapando la capa con otra o con un riego de material bituminoso tal y como se analizó en el apartado 7.9 “curado final”*

La totalidad de cal aplicada deberá mezclarse con el suelo antes de que hayan transcurridos:

- Dos (2) horas, a partir de su aplicación para los suelos estabilizados tipo SC- 2 para capas de asiento de firme.
- Tres (3) horas, a partir de su aplicación para el resto de los casos.

La compactación y el acabado deberán terminarse:

- Antes de cinco (5) días, contados desde el final de la última mezcla en los suelos estabilizados tipo SC – 2 para capas de asiento de firme.
- Antes de siete (7) días en el resto de los casos.

En el caso de que la mezcla se realice en central, esta se podrá acopiar, protegida para evitar la desecación, (por ejemplo cubiertas con un plástico), hasta cinco (5) días, y posteriormente ser colocada en obra.

Mientras no se hayan terminado la compactación, acabado y curado del suelo tratado, deberá prohibirse cualquier tipo de circulación que no sea imprescindible para dichas operaciones.

## **10. SEGURIDAD E HIGIENE EN LA EJECUCIÓN DE LA UNIDAD**

Se redactará según el proyecto, pliegos y normativa vigente

## **11. CONTROL DE CALIDAD**

### **11.1 . CONTROL DE PROCEDENCIA**

#### **11.1.1 Suelos**

##### 11.1.1.1 Secado de suelos

Antes del inicio del tratamiento de secado con cal, se determinará la humedad que presentan los suelos, para fijar la dosificación de cal necesaria de acuerdo con lo definido en el tramo de prueba.

##### 11.1.1.2 Mejora – estabilización de suelos

Antes del inicio del tratamiento de mejora – estabilización con cal se identificará cada tipo de suelo, determinando la dosificación de cal necesaria en función de los resultados de los ensayos y las fórmulas de trabajo. El tamaño de los lotes y ensayos a realizar para cada tipo de suelos será:

Para las capas de asiento de firme

Cada cinco mil metros cúbicos (5.000 m<sup>3</sup>) o fracción.

Para el resto de los casos

Cada diez mil metros cúbicos (10.000 m<sup>3</sup>) o fracción.

**Sobre cada muestra se realizarán los siguientes ensayos:**

- Granulometría por tamizado, según UNE 103101.
- Límite líquido e índice de plasticidad, según las normas UNE 103103 y 103104.
- Contenido en sulfatos solubles, según la norma UNE 103201.
- Contenido en materia orgánica, según la norma UNE 103204.

Además de estos ensayos cada veinte mil metros cúbicos (20.000 m<sup>3</sup>) o fracción:

- Determinación en edómetro del ensayo de colapso NLT 254.
- Determinación de los hinchamientos libres en el ensayo edométrico UNE 103601.
- Ensayo Proctor modificado UNE 103501.
- Índice CBR UNE 103502.

En el caso de detectarse la presencia de sulfatos solubles, los lotes para este ensayo serán de cinco mil metros cúbicos (5000 m<sup>3</sup>) para todos los casos.

El Director de las Obras podrá variar el tamaño de los lotes, ordenar la repetición de los ensayos, así como la realización de otros adicionales.

## **11.1.2 Cal**

### 11.1.2.1 Suministro

Se cumplirán las prescripciones indicadas en el artículo 200.3 del PG-3.

La cal para estabilización de suelos será transportada en cisternas presurizadas y dotadas de medios neumáticos o mecánicos para el trasiego rápido de su contenido a los silos de almacenamiento o a los equipos que alimentan a las máquinas de extendido. Los silos de almacenamiento serán estancos y estarán provistos de sistemas de filtros.

Excepcionalmente, en obras de pequeño volumen y a juicio del Director de las Obras, para el suministro, transporte y almacenamiento de cal se podrán emplear sacos o big-bags.

#### 11.1.2.2 Identificación

Se cumplirán las prescripciones indicadas en el artículo 200.4 del PG-3.

Cada remesa de cal para estabilización de suelos que llegue a obra irá acompañada de un albarán con documentación anexa y una hoja de características con los resultados de los análisis y ensayos correspondientes a la producción a la que pertenezca la remesa suministrada.

El albarán o la documentación anexa contendrán, explícitamente, al menos, los siguientes datos:

- Nombre y dirección del fabricante y de la empresa suministradora.
- Fecha de fabricación y de suministro.
- Identificación del vehículo que lo transporta.
- Cantidad que se suministra.
- Denominación comercial, si la hubiese, y clase de cal para el tratamiento de suelos suministrada, de acuerdo con lo indicado en la Norma UNE-EN 459-1
- Nombre y dirección del comprador y destino.
- Referencia del pedido.
- Marcado CE del producto, según lo indicado en el Anexo ZA de la Norma UNE-EN 459-1.
- En su caso, cualquier distintivo de calidad que el material tenga concedido, bajo las condiciones que impongan su concesión y, en su caso, instrucciones de uso y seguridad.
- Instrucciones de trabajo, si fuera necesario.
- Información de seguridad, si fuera necesaria

#### 11.1.2.3 Recepción

Se comprobará en la recepción que la cal cumple con lo especificado en los apartados de “Suministro e Identificación”.

Se solicitará al proveedor toda la documentación relativa al marcado CE: etiqueta, declaración de conformidad y certificación de la Entidad Notificada.

Si estas comprobaciones son satisfactorias, la Dirección de Obra podrá aceptar la partida o en caso contrario se desestimaré la misma.

#### 11.1.2.4 Control de calidad

Será de aplicación lo dispuesto en el artículo 200.5 del vigente PG – 3, en el que se detallan los controles a realizar para el control de recepción y el control adicional.

El muestreo de las cales tiene que llevarse a cabo de acuerdo con el capítulo 3 de la Norma UNE-EN 459-2.

La toma de muestras de las cales debe llevarse a cabo lo más rápidamente posible para reducir al mínimo la absorción de humedad y dióxido de carbono. Una vez recogida la muestra debe guardarse en un recipiente estanco y con cierre hermético hasta su análisis.

#### 11.1.2.4.1 Control de recepción

Se considerará como lote, que se aceptará o rechazará, de acuerdo con lo dispuesto en el apartado 11.1.2.4.3, en bloque, a la cantidad de cal de la misma clase y procedencia recibida semanalmente, en suministros continuos o cuasi continuos, o cada uno de los suministros, en suministros discontinuos. En cualquier caso, el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares o el Director de las Obras podrán fijar otro tamaño de lote.

De cada lote se tomarán dos (2) muestras, una para realizar los ensayos de recepción y otra de reserva que se conservará al menos durante cien (100) días en un recipiente adecuado y estanco, donde quede protegida de la humedad, del CO<sub>2</sub> atmosférico y de la posible contaminación producida por otros materiales. Cuando el suministrador de la cal lo solicite, se tomará una tercera muestra para éste.

Los ensayos de recepción serán los siguientes:

- Contenido de óxidos de calcio y magnesio, según la UNE- EN 459 – 2.
- Contenido de dióxido de carbono, según la UNE – EN 459 – 2.
- Finura, según la UNE – EN 459 – 2.
- Reactividad, según la UNE 80 502.

#### 11.1.2.4.2 Control adicional

Una (1) vez al mes y como mínimo tres (3) veces durante la ejecución de la obra, por cada clase de cal para el tratamiento de suelos, y cuando lo especifique el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, se realizará obligatoriamente los ensayos de recepción necesarios para la comprobación de las características especificadas.

Si la cal hubiese estado almacenada en condiciones atmosféricas normales durante un plazo superior a dos (2) meses, antes de su empleo se realizarán, como mínimo, sobre una muestra representativa de la cal almacenada, sin excluir los terrones que hubieran podido formarse, los ensayos de contenido de dióxido de carbono y finura. Si no cumpliera lo establecido para estas características, se procederá a su homogeneización y realización de nuevos ensayos, o a su retirada.

En ambientes muy húmedos o en condiciones atmosféricas desfavorables o de obra anormales, el Director de las Obras podrá reducir el plazo de dos (2) meses anteriormente indicado para la comprobación de las condiciones de almacenamiento de la cal.

Además de lo anteriormente establecido, cuando el Director de las Obras lo considere conveniente, se llevarán a cabo ensayos adicionales para la comprobación de las características que estime necesarias.

#### 11.1.2.4.3 Criterios de aceptación o rechazo

El Director de las Obras indicará las medidas a adoptar en el caso de que la cal para el tratamiento de suelos no cumpla alguna de las especificaciones establecidas. En cualquier caso, la remesa se rechazará si, en el momento de abrir el recipiente que la contenga, apareciera en estado grumoso o aglomerado.

## **11.2. CONTROL DE EJECUCIÓN**

### **11.2.1 Secado de suelos**

Los tamaños de lote y ensayos a realizar serán:

Cada mil metros cúbicos (1000 m<sup>3</sup>) y tipo de suelos y por lo menos una vez al día si se trata menos material:

- Humedad según UNE 103300.

### **11.2.2 Mejora – estabilización de suelos**

#### 11.2.2.1 Control de la mezcla fabricada

Los tamaños de lote y ensayos a realizar serán:

##### Para las capas de asiento de firme

Cada mil metros cúbicos (1.000 m<sup>3</sup>) y tipo de suelo, o al menos dos veces al día si la cantidad tratada es menor.

##### Para el resto de los casos

Cada cinco mil metros cúbicos (5.000 m<sup>3</sup>) y tipo de suelo, o al menos una vez al día si la cantidad tratada es menor.

- Humedad del suelo según UNE 103300.

- Determinación del índice CBR de control de ejecución, según lo indicado en el Anejo de este Pliego, determinando los valores de hinchamiento producidos en este ensayo.
- Determinación del grado de eficacia de disgregación en los tamices veinticinco y cuatro milímetros (25 y 4 mm).
- Determinación de la homogeneidad y profundidad del tratamiento, que se realizará por análisis químico de la variación tras el tratamiento de los valores de PH y contenido de cal en los suelos, en muestras tomadas en la mitad superior e inferior de la tongada.

Para las capas de asiento de firme

Cada cinco mil metros cúbicos (5.000 m<sup>3</sup>) y tipo de suelo, o dos veces en semana si se trata menos.

Para el resto de los casos

Cada diez mil metros cúbicos (10.000 m<sup>3</sup>) y tipo de suelo, o una vez por semana si se trata menos.

- Proctor modificado de la mezcla según UNE 103501.
- Ensayo hinchamiento libre en edómetro, según UNE 103601.
- Ensayo de colapso en edómetro según NLT 254.

#### 11.2.2.2 Control de la mezcla compactada

Los tamaños de lote y ensayos a realizar serán:

Para las capas de asiento de firme

Cada tres mil metros cuadrados (3000 m<sup>2</sup>).

Para el resto de los casos

Cada cinco mil metros cuadrados (5000 m<sup>2</sup>).

- Determinación del espesor del tratamiento.
- Sobre 5 unidades, tomadas en forma aleatoria de la superficie definida como lote se realizarán los ensayos de densidad y humedad “in situ”.

### **11.3. UTILIZACIÓN DE LAS GRÁFICAS DE CONTROL**

*La expresión de los resultados de los ensayos en gráficas es una herramienta de gran ayuda para su supervisión, además, informan de las tendencias de las características analizadas por ellas.*



Los resultados de los ensayos relacionados a continuación, se expresarán de forma gráfica según el “Manual para la elaboración de los gráficos de control de calidad en las obras de GIASA” vigente:

- Índice CBR, tanto de caracterización como de ejecución.
- Control de la homogeneidad del tratamiento a dos profundidades, (medición de los valores de PH y contenido de cal en las mitades superior e inferior de la tongada).
- Hinchamientos CBR y libre.
- Control de compactación.

Además de los indicados, el Director de las Obras podrá exigir la presentación en modelos gráficos de otros parámetros que estime conveniente.

## **11.4. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN O RECHAZO DEL LOTE**

### **11.4.1 Densidad y humedad de compactación**

Las densidades medias obtenidas no deberán ser inferiores a la especificada en el apartado 8.2.2. del presente Pliego; no más de dos (2) individuos de la muestra ensayada podrán presentar resultados individuales de hasta dos (2) puntos porcentuales por debajo de la densidad especificada. De no alcanzarse los resultados exigidos, el lote se recompactará si se estuviera dentro del plazo marcado en el apartado 9 del presente Pliego, de lo contrario, será reconstruido a cargo del Constructor.

La humedad de compactación será la óptima obtenida en el ensayo “Proctor modificado” con una tolerancia de menos 0 más dos por ciento (-0 + 2%).

### **11.4.2 Espesor**

Para las capas de asiento de firme:

El espesor obtenido no deberá ser inferior al especificado en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares o en los planos de secciones tipo. No más de dos individuos de la muestra ensayada del lote presentarán resultados que bajen del especificado en un diez por ciento (10 %).

En el caso de que el espesor medio obtenido fuera inferior al especificado, se procederá de la siguiente manera:

- Si el espesor medio obtenido fuera inferior al ochenta por ciento (80 %) del especificado, se reconstruirá la capa por cuenta del Contratista.

- Si el espesor medio obtenido fuera superior al ochenta por ciento (80 %) del espesor especificado, se podrá admitir siempre que se compense la merma de espesor con el espesor adicional correspondiente en la capa superior por cuenta del Contratista.

No se permitirá en ningún caso el recrecimiento en capa delgada.

En el caso de los terraplenes:

El espesor de la tongada no diferirá del espesor teórico en más de un treinta por ciento (30 %), en caso contrario el lote será reconstruido por el Contratista.

### **11.4.3 Capacidad soporte**

Para las capas de asiento de firme:

La media de los índices CBR no deberá ser inferior al valor especificado en 8.2.3. del presente Pliego, y ningún resultado individual podrá ser inferior a dicho valor en más de un veinte por ciento (20 %)

En el caso de que la media de los índices CBR fuera inferior al valor especificado, se procederá de la siguiente manera:

- Si el resultado fuera inferior al noventa por ciento (90 %) del valor de referencia especificado, se reconstruirá la capa por cuenta del Contratista.
- Si el resultado obtenido no fuera inferior al noventa por ciento (90 %) del valor de referencia especificado, el lote se aceptará aplicando una penalización.

Para los terraplenes:

La media de los índices CBR no deberá ser inferior al veinte por ciento (20 %) del valor especificado en 8.2.3. del presente Pliego, y ningún resultado individual podrá ser inferior a dicho valor en más de un treinta por ciento (30 %)

En el caso de que la media de los índices CBR fuera inferior al valor especificado, se procederá de la siguiente manera:

- Si el resultado fuera inferior al setenta por ciento (70 %) del valor de referencia especificado, se reconstruirá la capa por cuenta del Contratista.
- Si el resultado obtenido no fuera inferior al setenta por ciento (70 %) del valor de referencia especificado, el lote se aceptará aplicando una penalización.

#### **11.4.4 Cambios volumétricos**

##### Para las capas de asiento de firme:

No presentarán cambios volumétricos (asientos en los ensayos de colapso o expansión en los ensayos de hinchamiento en edómetro o CBR) transcurridos siete (7) días de la mezcla, en caso contrario se procederá de la siguiente manera:

- Si estos fueran superiores al medio por ciento (0,5 %) el lote será reconstruido por el Contratista.
- Si estos fueran inferiores al medio por ciento (0,5 %) el lote se aceptará aplicando una penalización.

##### Para el resto de los casos:

No presentarán cambios volumétricos (asientos en los ensayos de colapso o expansión en los ensayos de hinchamiento en edómetro o CBR) transcurridos siete (7) días de la mezcla, superiores a los indicados en el artículo 4.1.2 del presente Pliego, en caso contrario se procederá de la siguiente manera:

Para los ensayos edométricos (colapso NLT 254 o hinchamientos libres UNE 103601)

- Si estos fueran superiores al dos por ciento (2 %) el lote será reconstruido por el Contratista.
- Si estos fueran inferiores al dos por ciento (2 %) el lote se aceptará aplicando una penalización.

Para los hinchamientos en el ensayo CBR UNE 103502

- Si estos fueran superiores al tres por ciento (3 %) el lote será reconstruido por el Contratista.
- Si estos fueran inferiores al tres por ciento (3 %) el lote se aceptará aplicando una penalización.

**ANEXO**

**PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DEL PORCENTAJE DE CAL**  
**AÑADIDO A UN SUELO PARA SU TRATAMIENTO**

**1. OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN**

Este procedimiento, tiene como objeto especificar un método de análisis para estimar el porcentaje de cal añadido a un suelo tras un tratamiento, secado, mejora o estabilización, con cal.

El método se fundamenta en la determinación del contenido en calcio activo de una misma muestra de suelo, tomada en obra, antes y después de su mezcla con cal.

El contenido en calcio activo de un suelo en una variable en el préstamo, acopio o cantera, por ello resulta imprescindible para la estimación del contenido de cal añadida a un suelo, la elaboración de una curva de calibrado exclusiva para cada muestra de dicho suelo.

Como interesa conocer la homogeneidad del tratamiento en todo el espesor de la tongada, se realizarán las determinaciones en las zonas superior e inferior de la tongada.

## **2. NORMAS PARA CONSULTA**

UNE 7050 Tamices y tamizado de ensayo.

UNE 103100 Preparación de muestra para los ensayos de suelo.

## **3. APARATOS, MATERIAL NECESARIO Y REACTIVOS**

### **Aparatos:**

- Aro con nuez de 6 cm. de diámetro.
- Papel de filtro de poro fino, exento de cenizas.
- Matraz Erlenmeyer de 250 ml.
- Bureta de 50 ml.
- Embudos de 8 cm. de diámetro.
- Embudo de placa filtrante de vidrio.
- Pesa sustancias.
- Desecador, con perclorato de magnesio, o con alúmina activada, o con gel de sílice...
- Material de vidrio: el usual en un laboratorio de análisis químicos.
- Material volumétrico de vidrio, de precisión analítica (de la clase A tal como se define en las normas ISO sobre material volumétrico de vidrio).
- Mortero y maza para pulverizar el suelo.
- Tamices de 125  $\mu\text{m}$ .
- Estufa de desecación con temperatura graduable hasta 110 °C.
- Balanza analítica con precisión de  $\pm 0.0001$  g.
- Agitador magnético
- Placa de calefacción

### **Reactivos:**

Se utilizarán únicamente reactivos de calidad analítica conocida y agua destilada o de pureza similar.

- Agua destilada.
- Oxalato amónico.
- Permanganato potásico.
- Ácido sulfúrico ( $\rho = 1.84$ ).

## **4. NUMEROS DE ENSAYOS**

Todas las determinaciones, incluidas las utilizadas para la obtención de la curva de calibrado se harán por duplicado.

## **5. TOMA DE MUESTRAS**

Se tomarán en obra las siguientes muestras.

- Muestra del suelo original antes del tratamiento (suelo original).
- Muestra de la cal usada para el tratamiento.
- Muestra del suelo tratado con cal tomada en la mitad superior de la tongada.
- Muestra del suelo tratado con cal tomada en la mitad inferior de la tongada.

## **6. REALIZACIÓN DE LA CURVA DE CALIBRADO**

Se realizará una curva de calibrado determinando el porcentaje de calcio activo de las siguientes muestras y preparaciones en el laboratorio:

- a) Muestra de suelo original.
- b) Muestra de suelo original mezclada con un porcentaje de cal igual al solicitado para el tratamiento en obra más el 1%.
- c) Muestra de suelo original mezclada con un porcentaje de cal igual al solicitado para el tratamiento en obra menos el 1%.

### **6.1. Preparación de las muestras**

#### 6.1.1. Preparación del suelo original.

- a) De una muestra representativa del suelo original tomar unos 200 g. siguiendo el procedimiento descrito en la norma UNE 103100.
- b) Secar en estufa a 60°C.
- c) Pulverizar en mortero de manera que todas las partículas pasen por el tamiz de 125 µm.
- d) Pesar en la balanza analítica, con la precisión indicada unos 30 g. del suelo preparado.

#### 6.1.2. Preparación de los suelos mezclados con cal en el laboratorio.

- a) Pesar en la balanza analítica, con la precisión indicada unos 30 g de la muestra del suelo original preparado según el apartado 6.1.1. mas el porcentaje de cal definido en el punto 6.b.
- b) Pesar en la balanza analítica, con la precisión indicada unos 30 g de la muestra del suelo original preparado según el apartado 6.1.1. mas el porcentaje de cal definido en el punto 6.c.

### **6.2. Preparación de las disoluciones**

#### **Solución valorada de permanganato potásico, aproximadamente 0.1N**

##### **Preparación:**

En un pesa sustancias se pesan 3.3 g de  $MnO_4K$  y se pasan a un vaso de 250 ml que contenga 150 ml de agua destilada calentada a 60 °C., se lava el pesa sustancias con 5 porciones de unos 10 ml de agua destilada y se vierten los lavados en el vaso de 250 ml. Se agita el líquido para disolver la sal, se pasa la solución a una probeta de 1 litro y se diluye hasta dicho volumen con agua destilada. Se agita la disolución con la varilla de vidrio y se pasa la solución a un frasco de un litro.

Se deja reposar tres días, se filtra la disolución a través de un embudo de placa filtrante de vidrio y se guarda en un frasco de color topacio con cierre esmerilado.

### **Valoración:**

En un pesa sustancias se coloca 1 g aproximadamente de oxalato sódico, se coloca la tapa del pesa sustancias con una abertura para que pueda evaporarse la humedad y se introduce el pesa sustancias con el oxalato en una estufa a 105-110 °C. Se seca el producto durante por lo menos dos horas a dicha temperatura. Se saca el pesa sustancias de la estufa y se deja enfriar en un desecador. Se saca del desecador y en cada uno de los tres vidrios de reloj se pesa con exactitud 0.1 g de oxalato sódico.

El contenido de cada virio de reloj se pasa a un matraz Erlenmeyer de 250 ml. Se añaden a cada matraz 50 ml de agua, arrastrando hacia el Erlenmeyer las partículas que queden adheridas al vidrio de reloj.

Se agita para disolver la sal, se añaden a cada matraz 50 ml de ácido sulfúrico (1:10) a temperatura ambiente y se agita para obtener una disolución homogénea. Se calienta la solución justo hasta el punto de ebullición y se valora con la solución de permanganato potásico, aproximadamente 0.1 N, hasta que una gota de la misma origina un color rosa persistente durante 30 segundos.

Se calcula el factor de corrección del permanganato potásico 0.1 N de la siguiente forma:

$$F = \frac{V * 0.1 * 0.067}{P} = 0.0067 \frac{V}{P}$$

Siendo:

V = volumen de permanganato potásico empleado en la valoración

P = peso de oxalato

### **Solución de oxalato amónico 0.2 N**

En un vaso de 100 ml se pesan 14.2 g de oxalato amónico, se pasan a un vaso de 1 litro, se añaden unos 800 de agua destilada y se agita con una varilla de vidrio para disolver la sal.



Se pasa la disolución a un matraz aforado de 1 litro, se lava el vaso con tres porciones de 25 ml de agua destilada, se pasan los lavados al matraz aforado y se diluye hasta el enrase con agua destilada.

### 6.3. Método operatorio

Se toman 10 gramos de la muestra preparada según el apartado 6.1.1. del suelo original y se colocan en un vaso de 600 ml. Se añaden 250 ml de oxalato amónico 0.2 N y se agita durante dos horas, utilizando un agitador magnético. Se filtra la suspensión resultante descartando las primeras porciones del filtrado, y se toman con pipeta 10 ml del líquido claro, pasándolos a un matraz Erlenmeyer de 250 ml.

Se añaden 10 ml de  $\text{SO}_4\text{H}_2$  (1:10) y se calienta justo hasta ebullición.

Se valora la disolución en caliente con  $\text{MnO}_4\text{K}$  0.1N hasta color rosa persistente. Se anota el volumen de permanganato potásico consumidos (n).

Se valora de igual forma en caliente 10 ml de la disolución original de oxalato amónico tras la adición de 10 ml de  $\text{SO}_4\text{H}_2$  (1:10). Se anota el volumen de permanganato consumido (N).

Se procede del mismo modo con las muestras preparadas en 6.1.2, a y b.

### 6.4. Cálculos

Teniendo en cuenta que el miliequivalente del  $\text{CaCO}_3$  es 0.050 y que de los 250 ml de extracto se toman 10 ml para la valoración, el porcentaje de carbonato cálcico activo en el suelo vendrá dado por la expresión:

$$\% \text{CaCO}_3 \text{ activo} = (N-n) 1.25$$

### 6.5. Representación gráfica

Se representan gráficamente los tres valores obtenidos del porcentaje de calcio activo en función de los porcentajes de cal añadidos.

Se traza la curva de calibrado.

## 7. DETERMINACION DEL PORCENTAJE DE CALCIO ACTIVO EN EL SUELO ESTABILIZADO

De cada una de las muestras de suelo estabilizado tomadas en la mitad inferior y superior de la tongada, se pesan unos 200 g y se secan en la estufa. Se pulverizan en mortero de manera que todas las partículas pasen por el tamiz 125  $\mu\text{m}$ .

Se sigue el procedimiento descrito en 6.1.3. y se calcula el valor de calcio activo según 6.1.4.

## **8. ESTIMACION DEL CONTENIDO DE CAL EN EL SUELO ESTABILIZADO.**

Se estiman los contenidos de cal añadidos al suelo en la mitad superior e inferior de la tangada mediante la representación de los valores de calcio activo determinados en el apartado 7 en la curva de calibrado obtenida en el apartado 6.