

TRATAMIENTOS DE SUELOS CON CAL





TRATAMIENTOS DE SUELOS CON CAL.

PLANTEAMIENTO GENERAL, DISEÑO

Y CONTROL DE CALIDAD

AUTOR:

Angel Sampedro Rodríguez

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Director Técnico de ANCADE (Asociación Nacional de fabricantes de Cales y Derivados de España).

Profesor de Caminos y Aeropuertos (Universidad Alfonso X El Sabio).

C/ Goya, 23, 3º Dcha.

28001 – MADRID

Tlf.: 91 426 12 91 / Fax: 91 431 57 99

E-mail: sampedro@ancade.es

ÍNDICE:

1. INTRODUCCIÓN.

2. ASPECTOS GENERALES.

2.1. TIPOS DE CALES

2.2. TIPOS DE TRATAMIENTOS

2.3. FACTORES POTENCIALMENTE ADVERSOS

3. VENTAJAS DE LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CAL.

4. DISEÑO DEL TRATAMIENTO

4.1. ANÁLISIS PREVIO DE LOS SUELOS

4.2. FÓRMULA DE TRABAJO

5. EJECUCIÓN DE LA ESTABILIZACIÓN.

5.1. PREPARACIÓN DE LOS SUELOS Y ALMACENAMIENTO DE LA CAL

5.2. EXTENDIDO DE LA CAL

5.3. MEZCLADO

5.4. COMPACTACIÓN Y TERMINACIÓN

6. CONTROL DE CALIDAD EN LAS ESTABILIZACIONES CON CAL.

6.1. CONTROL DE LA EJECUCIÓN

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

**ANEXO 1: Artículo “De cal y carreteras...” A. Sampedro y J. Gallego
(Revista CARRETERAS – Nº 135 Sep-Oct 04)**

**ANEXO 2: MANUAL DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CAL
(ANCADE)**

**ANEXO 3: LISTADO DE FABRICANTES DE CALES Y DERIVADOS
(ANCADE)**

1. INTRODUCCIÓN.

Actualmente, en la construcción de obras lineales y cualquier otra que requiera grandes explanaciones, es fundamental minimizar y compensar al máximo posible el movimiento de tierras debido a consideraciones económicas, ambientales y técnicas.

Cada vez se hace más difícil optimizar los procesos constructivos en cuestiones de coste, plazo y calidad. La necesidad de terrenos para préstamos y vertederos puede llegar a ser el factor determinante en esta optimización.

Por lo tanto, se hace cada vez más necesaria la utilización de todos los materiales que se encuentran directamente en la traza de las propias obras, sean cuales sean sus propiedades. Ello obliga a un estudio detallado de sus propiedades para así adoptar los tratamientos y medidas necesarios para lograr que su comportamiento sea satisfactorio durante la vida útil de la obra, y por supuesto, a un coste razonable.

Los suelos con contenidos apreciables de arcillas y limos, muy frecuentes en toda la geografía española, presentan graves problemas geotécnicos para su empleo en la construcción de infraestructuras debidos a su elevada plasticidad, reducida capacidad portante e inestabilidad de volumen en función de la humedad (hinchamiento y retracción). El tratamiento y estabilización con cal de estos suelos es una solución muy interesante desde los puntos de vista económico, ambiental y técnico, citados anteriormente. En general, puede afirmarse que siempre que el Índice de Plasticidad (I.P.) de un suelo sea igual o mayor que 10, es aconsejable y satisfactoria su estabilización con cal.

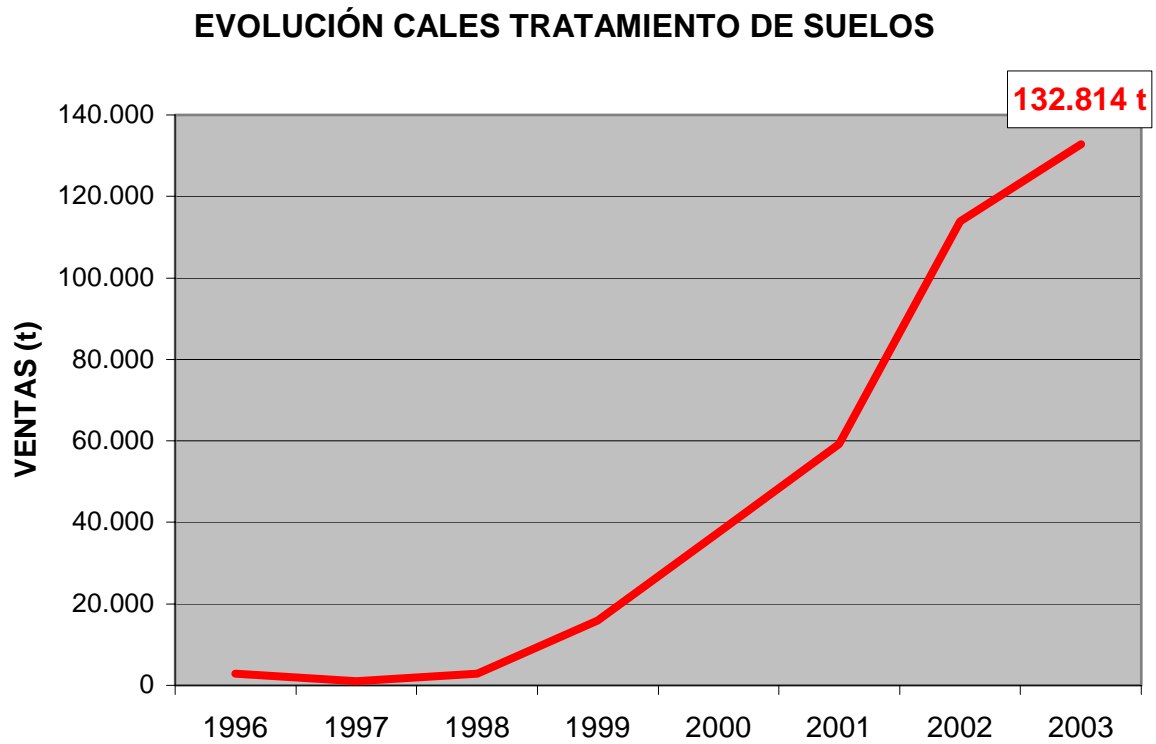
También es importante indicar las ventajas que presenta la técnica de estabilización de suelos con cal para el tratamiento y reparación de caminos y explanaciones con problemas de plasticidad y baja capacidad portante.

Estas vías de baja intensidad fallan y dejan de ser operativas tras la caída de moderadas lluvias. Su tratamiento con cal garantiza su operatividad durante todo el año.

Con unos costes mínimos de ejecución, se aseguran importantes ahorros en la conservación de estas redes y en los derivados de su inoperatividad durante varios meses al año.

El Control de Calidad, tanto en la fase de diseño como en la de ejecución, de estos tratamientos del suelo debe ser muy cuidadoso y exigente. De esta forma, se garantizarán los efectos buscados a corto y largo plazo.

Prueba del desarrollo que ha alcanzado esta técnica en España es la evolución de los consumos de cales para tratamientos y/o estabilización de suelos desde el año 1995, fecha de la creación de ANCADE.



2. ASPECTOS GENERALES.

El tratamiento de terrenos arcillosos con cal permite su utilización, evitando los mayores costes y afecciones ambientales que supondría su retirada y posterior reemplazamiento por otros suelos de mejores características geotécnicas y mecánicas.



2.1. TIPOS DE CALES

Las cales utilizadas en la estabilización de suelos son **CALES AÉREAS CÁLCICAS (CL)**, llamadas así porque endurecen con el CO₂ presente en el aire, y compuestas principalmente por óxido e hidróxido de calcio y de magnesio, sin adición de materiales puzolánicos e hidráulicos.

En este sentido, las cales empleadas en la estabilización de suelos deberán contar con el **Marcado CE**, señalado en la Directiva Europea de Productos para la Construcción, y obligatorio en España desde agosto de 2003.

Las cales a emplear en la estabilización de suelos vienen definidas por la Norma UNE-EN 459-1 *“Cales para la construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad”*.

Se trata de Norma armonizada para las Cales para la Construcción, incluyendo, por supuesto, las obras de ingeniería civil. Para la estabilización de suelos, se emplean las cales aéreas.

Según esta Norma, estas presentan las siguientes formas:

- **Cales vivas, Q:** Cales aéreas constituidas principalmente por óxido de calcio (CaO) y de magnesio (MgO), producidos por la calcinación de caliza. Dentro de este tipo deberán emplearse las CL 90-Q.
- **Cales apagadas o hidratadas, S:** Cales aéreas, cálcicas resultantes del apagado controlado de las cales vivas. Están compuestas principalmente por hidróxido de calcio [Ca(OH)₂]. Dentro de este tipo deben ser CL 90-S.

En España, se matiza la aplicación de cales en ingeniería civil con los requisitos suplementarios marcados por las Normas UNE 80 502 y el Art.200 del PG-3.

Por lo tanto, tan importante como analizar las características del suelo, como se verá más adelante, es el de comprobar que la cal a emplear es apta para la estabilización del suelo, conforme a la siguiente normativa de aplicación en España y en Europa:

- O.C. 27/12/99 del PG-3 (Artículo 200 “Cales para estabilización de suelos”).
- Norma UNE 80 502: *“Cales vivas o hidratadas utilizadas en la mejora y/o estabilización de suelos”*.

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

Por otro lado, deberá tenerse en cuenta también la “Instrucción para la recepción de cales en obras de estabilización de suelos (RCA-92)”.

Para asegurar la calidad de la cal utilizada en el Tratamiento, deberá analizarse:

- **Contenido de componentes magnésicos y cálcicos.**

El contenido en óxidos de calcio y de magnesio, sobre muestra calcinada¹ debe ser mayor del 90 (CL 90), en masa.

- **Contenido de dióxido de carbono (CO₂).** Este parámetro completa a los anteriores en las exigencias de cal libre, pues la muestra sobre la que se ensaya es calcinada.

Este contenido, en el punto de fabricación, deberá ser inferior al 5 por ciento, en masa.

- **Finura del molido.** El análisis granulométrico evalúa la finura de la cal.

Todas las partículas deberán ser inferiores a 6,3 mm., y más del 90 por ciento inferiores a 0,2 mm.

- **Reactividad de la cal.** Se aplica a la cal viva (Q), y permite medir la rapidez de reacción de esta con el agua.

Se evalúa midiendo el tiempo que tarda en alcanzar la temperatura de 60 °C al agitar una muestra de cal viva en agua. Este tiempo deberá ser inferior a 25 minutos, siendo la cal más reactiva cuanto menor sea el tiempo.

¹ En horno eléctrico a 950-1.000 °C.

2.2. TIPOS DE TRATAMIENTOS

Hay varios tipos posibles de tratamientos de suelos con cal, en función de los objetivos a conseguir: el secado, la modificación y la estabilización propiamente dicha.

2.2.1. Secado/Descongelación de suelos

En el caso de suelos arcillosos con exceso de humedad, la adición de cal viva disminuye el contenido de agua por la acción combinada de:

- aporte de producto seco,
- consumo del agua necesaria para hidratarse y formar hidróxido cálcico,
- y evaporación de agua debida a la reacción anterior, fuertemente exotérmica.

De esta forma, el aporte de un 1 % de cal viva puede disminuir el contenido de humedad del suelo en un 4 ó 5 %. Si a ello le sumamos el efecto de aireación y volteo de un material procedente de un préstamo, el valor de la disminución puede llegar al 7 %.

La siguiente fotografía (cortesía de SOLTEC), refleja la evaporación producida en un suelo completamente encharcado al extender cal viva.



Además, en suelos excesivamente húmedos y sometidos a temperaturas extremadamente bajas, se plantea un problema añadido: la congelación del agua impide su colocación en obra.

Aparentemente, se produce un efecto engañoso. El agua se endurece y la capacidad portante del suelo parece mejorar. El problema se produce cuando se intenta compactar, deshaciéndose el hielo por efecto de la presión.

La mezcla del suelo con cal viva permite, debido a la conjunción de los efectos anteriormente señalados, elevar la temperatura del suelo, deshaciendo el hielo y reduciendo inmediatamente el exceso de humedad.

Por el contrario, si la humedad de los suelos se encuentra por debajo de la óptima, puede ser aconsejable aplicar la cal en forma de lechada, aportando la cal y el agua necesarias en una sola operación.

La **cal en forma de lechada** es la 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.

En la siguiente fotografía puede apreciarse la ejecución de una estabilización de explanadas mediante lechada de cal.



2.2.2. Mejora por modificación

Se trata de una modificación inmediata de las propiedades geotécnicas, reduciendo en un corto periodo de tiempo (minutos/horas) la cantidad de agua retenida por la arcilla y mejorando su trabajabilidad.

La mezcla de cal con el suelo provoca reacciones rápidas que originan cambios físico-químicos producidos por cambios iónicos, neutralización y floculación. Las finas partículas de arcilla se aglomeran en elementos más gruesos y friables. Estas reacciones se producen siempre que el suelo tenga un cierto porcentaje de finos.



En obra se aprecia que el suelo pierde su carácter pegajoso y toma un aspecto arenoso, mejorando enormemente su trabajabilidad y compactibilidad, mejorando también la capacidad portante. La modificación actúa tan rápidamente como se hace la mezcla de cal con el terreno. En general, para conseguir estas modificaciones, la dosificación necesaria de cal oscila entre el 1 y el 3 por ciento.

2.2.3. Estabilización

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 de la arcilla, aumentando la capacidad portante del suelo con el fin de poder emplearlo en capas más solicitadas. De esta forma pueden obtenerse explanadas y subbases con buenas

propiedades estructurales que van incrementándose en el tiempo, a la vez que hace insensible la capa estabilizada al agua y a los ciclos hielo-deshielo.

Al elevar la cal el pH del suelo estabilizado hasta valores de 12,4, 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 portland, incrementan la resistencia mecánica. Esta reacción de tipo puzolánico es progresiva con el tiempo y aumenta la impermeabilidad, la resistencia mecánica y la resistencia a las heladas del suelo tratado. Los porcentajes necesarios de cal para garantizar la permanencia de las reacciones puzolánicas a lo largo del tiempo oscilan entre el 3 y el 8 por ciento.

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. Es aconsejable, por lo tanto, basar el proyecto de una estabilización determinada en un estudio más en detalle de cómo mejora la cal los parámetros resistentes del suelo a medio y largo plazo.

2.2.4. Estabilización mixta

Cualquiera de los efectos anteriores, conjunta o separadamente, pueden aprovecharse para mejorar el efecto de las cales sobre ciertos suelos cuando se van a tratar con otros ligantes, como suele ser el caso del cemento.

En el caso de que los suelos a tratar con cemento, para su colocación en capas de coronación o de firmes, presenten humedades excesivas y/o tengan cierta plasticidad, la corrección previa de estos problemas mediante un leve tratamiento con cal (porcentajes en torno al 1 por ciento), permite optimizar la acción del cemento sobre el suelo, reduciendo su dosificación necesaria y evitando los riesgos que esto conlleva.

2.3. FACTORES POTENCIALMENTE ADVERSOS

Dos son los aspectos que más negativamente pueden influir en la estabilización de suelos con cal: su contenido en sulfatos solubles y en materia orgánica.

Con respecto al contenido de **materia orgánica**, esta puede inhibir las reacciones puzolánicas, retardando los efectos de la cal sobre el suelo. Pero, por otro lado, la mezcla del suelo con la cal permite eliminar esta materia orgánica.

Por lo tanto, en el caso de suelos con porcentajes excesivos de esta, conviene sobredosificar la cal necesaria para eliminar la materia orgánica presente.

El contenido de **sulfatos solubles**, bien por su existencia en el propio terreno, o bien por ser aportados por las aguas subterráneas existentes, puede afectar la estabilización mediante la reacción de los sulfatos solubilizados en el agua con los aluminatos cálcicos hidratados, producidos por la reacción puzolánica entre el suelo y la cal, formando *Etringita* (trisulfoaluminato cálcico), muy expansiva, que puede llegar a romper las capas ya extendidas y compactadas.

En el ataque por sulfatos, el agua constituye un elemento esencial para el mismo. Así, el agua presente en el material estabilizado suelo-cal puede ser insuficiente para disolver la cantidad necesaria de sulfato, de forma que no exista ataque apreciable aún con grandes cantidades de sulfatos, a menos que haya una aportación suficiente de agua desde el exterior.

En este sentido, normalmente en España, los sulfatos contenidos en los terrenos están en forma de yeso, o provienen de este mineral por el efecto de su solubilidad en las aguas, bien de lluvia o subterráneas, que pasan por formaciones yesíferas. Y por otra parte, la solubilidad del yeso es muy pequeña.

Lo anterior significa que, solamente si hay sulfatos solubles en cantidad suficiente, y diluidos en el agua existente en la mezcla suelo-cal, habrá formación de etringita, pudiendo romperse las capas ya ejecutadas y todas las que se hayan dispuesto encima.

Por este motivo, es muy importante la determinación de los sulfatos solubles en laboratorio mediante algún método de ensayo que refleje lo mejor posible las condiciones que se dan en la práctica, respecto a la cantidad de sulfatos que pasan a disolución.

En general, con respecto al contenido de sulfatos solubles, puede decirse lo siguiente, en base a la experiencia obtenida en Estados Unidos y Francia, recogida por el Prof. Dallas N. Little, de la Universidad de Austin (Texas):

- Si el contenido total está muy por debajo del 1,0 por ciento, en peso, no se debe tener ninguna consideración especial.

- Si el contenido total de sulfatos solubles está en el entorno del 1,0 por ciento, no hay peligro, pero es conveniente controlar el mezclado y la humectación de una forma más exigente a lo habitual. Conviene estudiar en laboratorio el hinchamiento potencial del suelo para ajustar el período requerido entre las fases de mezclado y compactación.

Conviene que la humedad del suelo sea de 3 a 5 puntos porcentuales por encima de la humedad óptima. De esta forma se posibilita la formación, en el caso de que así fuera, de Etringita antes de la compactación.

Si los resultados obtenidos en laboratorio, lo aconsejaban, convendría precompactar la capa, y dejar pasar, antes de terminar de compactar, un período de entre 3 y 7 días, en función de dichos ensayos. Incluso, puede aplicarse el tratamiento en dos fases.

- Los suelos con un contenido en sulfatos solubles muy superior al 1,0 por ciento no deben, en general, tratarse con cal, pues el riesgo de fallo y rotura de la capa es elevado, y muy difícil de controlar.

No obstante, hay que incidir en el hecho de que, en muchas ocasiones, la aparición de altos niveles de sulfatos solubles se produce en zonas muy localizadas, de pequeña extensión y profundidad, y, además, de forma muy heterogénea.

Esto permite que, una vez estudiado y localizadas estas zonas, puede reducirse el porcentaje de sulfatos homogeneizando y mezclando los suelos de la traza en el propio proceso constructivo, con el movimiento de tierras.

3. VENTAJAS DE LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CAL.

El tratamiento de suelos arcillosos con cal viva o hidratada en cualquier obra de movimiento de tierras: laderas, terraplenes, explanadas, firmes, plataformas, etc., correspondiente a cualquier tipo de infraestructura: viales, aeropuertos, ferrocarriles, etc., permite obtener una serie de ventajas técnicas y económicas que citaremos a continuación:

- Posibilidad de reutilización de los suelos disponibles en la traza, disminuyendo la necesidad de préstamos y vertederos. Este aspecto, además de disminuir las afecciones

medioambientales, disminuye los costes del movimiento de tierras, incidiendo especialmente en el transporte de materiales y en el tiempo de ejecución.

- La reducción del plazo de ejecución viene determinada también por la rapidez de las reacciones suelo-cal y el efecto secante producido. El Índice de Plasticidad disminuye notablemente y el suelo se vuelve más friable, aumentando inmediatamente su trabajabilidad. Además, el empleo de cal viva ayuda a secar rápidamente los suelos húmedos, facilitando su compactación.
- El empleo de cal incrementa la capacidad portante de los suelos aumentando su índice C.B.R. También aumenta las resistencias a tracción y a flexión. Por lo tanto, la mejora producida en las capas y explanadas estabilizadas permite reducir espesores y las posibilidades de fallo durante su vida útil.
- Otra ventaja muy importante de la estabilización con cal frente al empleo de otros conglomerantes, es que no presenta un fraguado rápido, lo cual permite una gran flexibilidad en la organización de las distintas fases de ejecución: mezcla, extendido, compactación, etc.

No obstante, para evitar la recarbonatación previa de la cal, debe realizarse el mezclado con el suelo antes de 8 horas, desde el momento del extendido. Además, con el fin de evitar la recarbonatación de la cal y su arrastre por el viento, conviene mezclar lo antes posible la cal extendida.

La estabilización de cualquier capa soporte, haciéndola insensible al agua y aumentando su resistencia frente a los tráficoos que soportará durante su vida útil, reduce los costes de construcción, conservación y explotación de la infraestructura.

4. DISEÑO DEL TRATAMIENTO

El objetivo es el de, una vez analizada la aptitud de los suelos al tratamiento con cal, diseñar el tratamiento a realizar en función de las características de estos suelos y de los objetivos a lograr.

Dependerá, por tanto, del efecto perseguido, ya sea el secado de suelos con humedad natural excesiva, una modificación instantánea del suelo y/o una estabilización de la capa a largo plazo.

4.1. ANÁLISIS PREVIO DE LOS SUELOS

El primer paso será identificar completamente las características de los suelos a emplear para decidir si su estabilización con cal es la solución más recomendable.

En este sentido, las **campañas de ensayos** a realizar serán las siguientes:

- **Ensayos de identificación de suelos:** (límites Atterberg, granulometría, hinchamiento, humedad natural, contenido de sulfatos solubles, carbonatos, materia orgánica, etc.). Con los resultados obtenidos se podrán clasificar los suelos.
- **Ensayos de comportamiento:** Los dos factores fundamentales son el de la Compactación (Proctor Normal o Modificado) y la Capacidad portante (C.B.R. y/o Resistencia a Compresión Simple).

En función de los resultados de estos ensayos y de los objetivos a conseguir, se valorará la aptitud de los suelos a su tratamiento con cal. A este respecto, cabe decir que el tratamiento con cal será más beneficioso para un suelo cuanto mayor sea su proporción de finos y su plasticidad.

En general, puede decirse que aquellos suelos con un porcentaje de finos superiores al 5 por ciento en masa (Tamiz 0,063) y/o un Índice de Plasticidad igual o superior a 10, son susceptibles de mejorar sus propiedades por acción de la cal.

4.2. FÓRMULA DE TRABAJO

Una vez considerado que el suelo es apto para su tratamiento con cal, se pasa a determinar la fórmula de trabajo para la mezcla suelo-cal que permita conseguir los objetivos propuestos.

La dosificación óptima de cal, en el caso de buscar la **modificación** inmediata, será aquella que logre reducir e incluso, anular, la plasticidad del suelo y el hinchamiento potencial, y aumentar hasta un valor aceptable la capacidad portante del suelo (CBR).

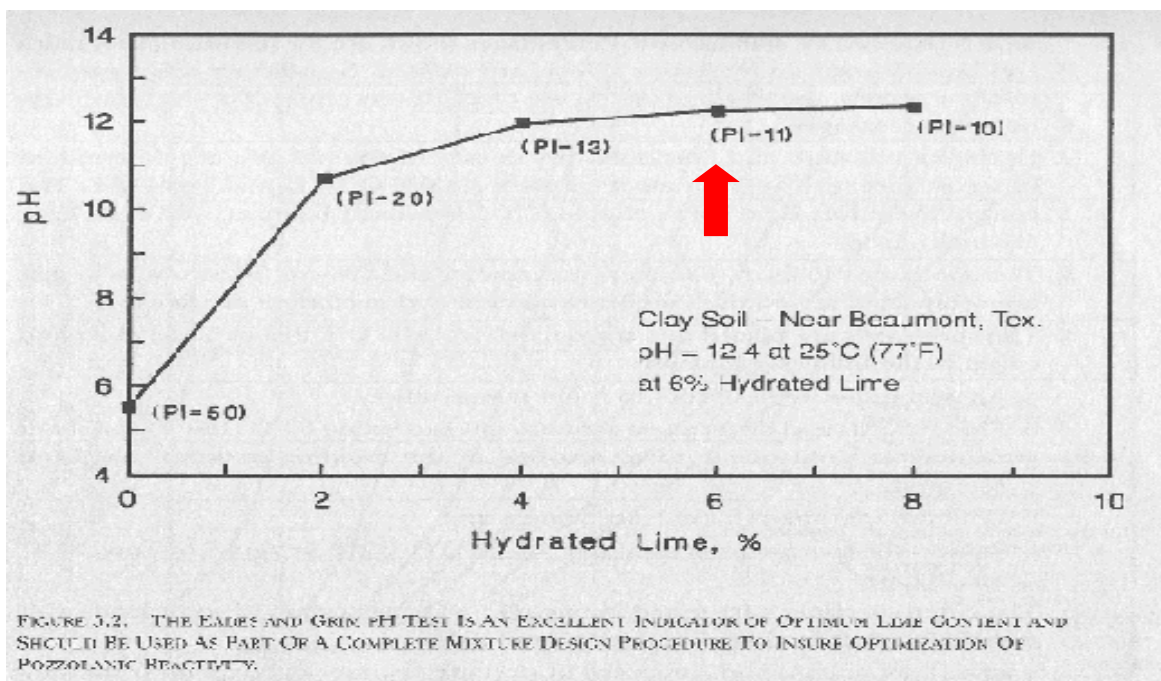
Para ello, la fórmula de trabajo se obtiene a partir del análisis de los parámetros y ensayos anteriores realizados con distintas muestras representativas del terreno mezcladas con

distintos porcentajes de cal. De esta forma, se podrá comprobar el efecto de la cal y así determinar el porcentaje necesario para alcanzar los objetivos buscados.

En el caso de buscar, además, la **estabilización** a largo plazo, deberán analizarse el resto de parámetros más detalladamente. Además de los señalados anteriormente, se determinarán las *Resistencias Mecánicas* sobre probetas confeccionadas con los moldes del CBR. Estas probetas se romperán por compresión a distintas edades, según se determine previamente.

Un método muy útil por su rapidez y fiabilidad es basar el estudio para la estabilización en el **método del pH**, el hecho por *Eades and Grim* (1966), indicado en la norma ASTM C 977-00 (Apéndice X1).

Este procedimiento se basa en el hecho de que la adición de cal necesaria para estabilizar un suelo es aquella que garantiza el mantenimiento de un elevado pH que permita el desarrollo de las reacciones puzolánicas. Para ello, se ensayan muestras con distintos porcentajes de cal, midiéndose el pH en determinadas condiciones. El porcentaje óptimo es aquel que permite alcanzar el valor de 12,4.



En cualquier caso, al realizar las mezclas suelo-cal para los ensayos, se esperará una hora, como mínimo, entre la realización de la mezcla y el comienzo del ensayo o la confección de las probetas.

Durante el tiempo de espera después del amasado, o durante la conservación de las probetas, se utilizarán las protecciones necesarias para que la mezcla no pierda humedad y la cal no se recarbonate por la acción del CO₂ del aire.

5. EJECUCIÓN DE LA ESTABILIZACIÓN.

La estabilización de suelos con cal puede hacerse principalmente de dos formas diferentes:

- Mezcla in situ (Vía seca / húmeda).
- Mezcla en central o planta móvil.

El **mezclado en planta** puede resultar idóneo si el suelo utilizado proviene de un préstamo en el cual se puede mezclar la cal con el suelo y almacenarlo para su posterior puesta en obra mediante las técnicas normales de terraplenado.

El problema que se plantea es que el amasado que realizan estas plantas se realiza en una mezcladora de palas, que no es muy eficaz con los tipos de suelos susceptibles de tratar con cal, es decir, con suelos arcillosos.

Un sistema que podríamos denominar **mezclado próximo** es el de realizar el mezclado con estabilizador de suelos en zonas o explanaciones exteriores a la traza.

La mezcla suelo-cal se realiza en explanaciones próximas a los préstamos de terreno, o en zonas próximas a la traza. Se extiende el suelo en tongadas y se realiza su mezcla con cal *in situ*, con la metodología convencional.

Estas tongadas suelo-cal se recogen, bien para apilar en montones, o bien para transportarlo y colocarlo sobre la traza.

Esta metodología está especialmente indicada para tratar suelos procedentes de préstamos y en zonas de la traza de difícil ejecución: cuñas de transición a obras de fábrica, etc.

No olvidemos la ventaja antes mencionada que supone para la organización de una obra el hecho de que la cal no presente un proceso de endurecimiento rápido que marque una

rigidez en los intervalos de mezcla y puesta en obra. La mezcla suelo-cal puede apilarse en montones durante días, para su posterior colocación en capas, siempre que se controle su humedad y se proteja del aire. Para este fin puede ser necesaria la cubrición con lonas o plásticos.

No obstante, el sistema de **mezclado in situ** está siendo el más utilizado en España hasta el día de hoy. La maquinaria disponible actualmente para la estabilización de suelos permite obtener resultados excelentes con esta técnica. Su calidad en cuanto a la finura, dosificaciones y homogeneidad del mezclado es muy buena.

La estabilización in situ se realiza siguiendo las siguientes fases:

1ª fase) Preparación del suelo y almacenamiento de la cal:

Escarificación o esponjamiento del suelo o del préstamo y su colocación en capas compatibles con el mezclador a utilizar. De esta forma se mejora significativamente el rendimiento del proceso posterior de mezclado.

El suministro y almacenamiento de la cal debe hacerse teniendo en cuenta los criterios de accesibilidad, distancias, espacio necesario, seguridad e higiene, y ritmo de producción de la obra. El almacenamiento de la cal en obra debe hacerse en contenedores estancos y dotados de sistemas de filtros que eviten el contacto con la humedad y con el aire para garantizar su conservación.

Es muy importante también controlar y regular la Humedad natural del suelo, de tal forma que, si esta es superior a la Humedad óptima del Ensayo Proctor, convendrá aplicar cal viva para reducirla. Por el contrario, si esta fuese inferior a la óptima, habrá que regar las capas en cualquiera de las fases aquí descritas.

2ª fase) Extendido de la cal:

Adición y extensión de la cantidad, calculada previamente mediante los estudios de laboratorio pertinentes, de la cal en forma de polvo (vía seca) o de lechada (vía húmeda). Para ello, se utilizarán los equipos que garanticen la precisión requerida.

3ª fase) Mezclado:

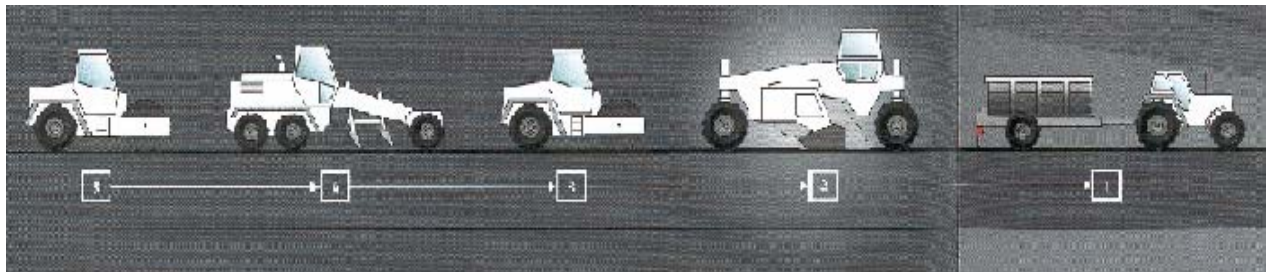
Mezclado de la cal y el suelo en todo el espesor de la capa mediante las pasadas necesarias para lograr su homogeneidad. Para ello se pueden utilizar equipos

recicladores/estabilizadores de suelos, pulvimezcladores, etc., que aseguren la eficacia necesaria.

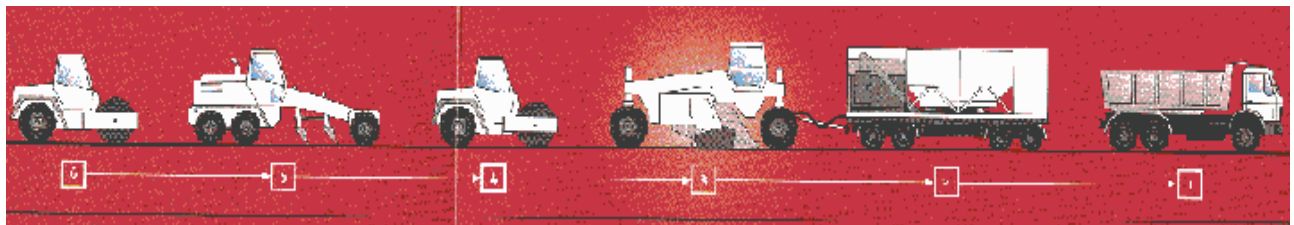
4ª fase) Compactación y terminación:

Compactación mecánica y humectación hasta conseguir las densidades necesarias, nivelación y curado de la capa mezclada mediante las técnicas convencionales de movimiento de tierras.

Ejecución in situ por vía seca:



Ejecución in situ por vía húmeda:



5.1. PREPARACIÓN DE LOS SUELOS Y ALMACENAMIENTO DE LA CAL

La preparación de los suelos consiste en una serie de operaciones previas cuya ejecución es necesaria, y muy importante, para mejorar los rendimientos del tratamiento propiamente dicho:

- Escarificación y esponjamiento de los suelos para mejorar los rendimientos del mezclado. Se realiza con ripper montado en motoniveladora o tractor de orugas, o bien mediante escarificadores de gradas o de discos. Este aspecto es determinante para lograr la profundidad y homogeneidad de mezclado requerida.

- Aireación de los suelos, en el caso de que sea necesario.
- Humidificación de los suelos en el caso de suelos demasiado secos mediante los sistemas de riego tradicionales. Este aspecto es muy importante ya que sobre un suelo esponjado y humedecido, la cal, según cae, se quedará adherida, evitando el riesgo de venteo, y comenzará a actuar inmediatamente sobre el suelo, incluso, antes de empezar la mezcla. En el caso de utilizar equipos pulvimezcladores, puede inyectarse el agua directamente en el proceso de mezclado, dentro de la cámara.
- Eliminación de grandes terrones, frecuentes en algunos suelos arcillosos, mediante ripper, rastrillos o desterronadores. De esta forma se favorece la homogeneidad del mezclado y se evitan numerosas averías y desgaste de piezas en los mezcladores.

El suministro y almacenamiento de la cal debe hacerse teniendo en cuenta los criterios de accesibilidad, distancias, espacio necesario, seguridad y ritmo de producción de la obra. El almacenamiento de la cal en obra debe hacerse en contenedores estancos y dotados de sistemas de filtros que eviten el contacto con la humedad y con el aire para evitar la recarbonatación con el CO₂.



La cal a granel se suministrará a la obra en camiones cisterna 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.

Con el objeto de controlar estas operaciones, deberá comprobarse el correcto funcionamiento y colocación de todos los elementos (válvulas, filtros, mangueras, etc.), así como el propio proceso de descarga entre cisternas, silos y extendedoras de cal.

5.2. EXTENDIDO DE LA CAL

El extendido de la cal en polvo a granel, viva o apagada, debe realizarse, por razones de precisión, seguridad y comodidad, mediante cualquiera de las tipologías de máquinas de extendido que actualmente existen en el mercado:

- *Extendedoras con dosificador volumétrico no servodirigido con la velocidad de avance*². Primeramente se regula la cantidad de cal vertida por unidad de tiempo y luego se controla la velocidad de avance para esparcir la cantidad de cal necesaria por metro cuadrado.

Un sistema interesante y práctico de este tipo consiste en un sistema de tornillo que, adosado a la parte posterior de la cisterna neumática de suministro de cal, permite extender la totalidad del contenido directamente de la cisterna al terreno.

- *Extendedoras con dosificador volumétrico servodirigido con la velocidad de avance*³. La dosificación se regula mediante un sistema extractor (cinta, tornillo, tambor, etc.) cuya velocidad de funcionamiento está servodirigida por la velocidad de avance de la extendidora.
- *Extendedoras con dosificador volumétrico servodirigido con la velocidad de avance y un control ponderal*⁴. Las fases de regulación se simplifican y la precisión es mayor.
- *Dosificadores de lechada de cal*⁵. Poseen un mezclador de la lechada y un dosificador volumétrico servodirigido a la velocidad de avance.

² Extendido por vía seca.

³ Vía seca.

⁴ Vía seca.

⁵ Extendido por vía húmeda.

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 dos últimos tipos de equipos es similar, la precisión y regularidad obtenida con los últimos es mayor, además de poseer un sistema de regulación más simple.

Es conveniente que el dispositivo de descarga estará protegido con faldones cuya parte inferior se aproxime al suelo, con el objeto de evitar que el viento afecte al extendido mientras se descarga la cal sobre el suelo.

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, siendo conveniente que ambos funcionen uno a continuación del otro, de tal forma que la cal permanezca el mínimo tiempo posible sobre el suelo sin mezclarse.



5.3. MEZCLADO

Esta fase consiste en mezclar la cal con el material a estabilizar conforme a la finura y homogeneidad requeridas por las fórmulas de trabajo.

En obras complementarias (pistas de obra, caminos agrícolas, etc.) y de pequeñas dimensiones se puede realizar el mezclado mediante varias pasadas con aperos agrícolas: gradas de discos, arados de vertedera, chísels, rotocultores (rotabator), etc. Estos son baratos y disponibles en cualquier lugar del mundo. También puede realizarse la mezcla con la hoja de motoniveladora. Pero sólo en obras secundarias donde se esté buscando el secado y/o un tratamiento leve del suelo.

Para la estabilización con cal de capas soporte de infraestructuras civiles, cuyas especificaciones son muy exigentes por razones obvias de calidad, la maquinaria específica para realizar el mezclado son los “**estabilizadores de suelos**”, o equipos pulvimezcladores de eje horizontal. Estos equipos también se usan habitualmente en el reciclado de firmes.



Son equipos autónomos especialmente concebidos para la estabilización de suelos. Tienen un mezclador intermedio horizontal formado por un rotor con eje provisto de cavadoras o picas cubierto por una carcasa dentro de la cual se realiza la mezcla al girar el rotor a gran velocidad. Además, tienen un sistema de inyección de agua o lechada en la cámara de mezclado.



Con esta maquinaria puede realizarse una mezcla homogénea en profundidades de hasta 50 cm., mediante una sola pasada, alcanzando grandes rendimientos (hasta 10.000 – 12.000 m²/día).

No obstante, no hay que dejarse llevar demasiado por este concepto de espesor máximo de mezclado. Por un lado, el espesor máximo de capa vendrá dado, generalmente, por la capacidad de compactación.

Y por otro, no siempre implica un mejor rendimiento total el hecho de trabajar con el mayor espesor de capa posible, pues en el caso de trabajar con suelos plásticos, excesivamente húmedos, el hecho de tener que mezclar una tongada excesiva, dificulta enormemente el mezclado y avance de la máquina.

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.

5.4. COMPACTACIÓN Y TERMINACIÓN

La compactación de las capas tratadas se realiza tras su nivelación con motoniveladora mediante las técnicas convencionales en el movimiento de tierras. Es importante que el

espesor de las capas sea compatible con el rendimiento de los compactadores a utilizar: neumáticos, vibrantes o pata de cabra.



La explanada compactada deberá recibir una protección superficial dependiendo de su naturaleza y de la climatología para permitir su endurecimiento antes de colocar la siguiente capa. El curado puede efectuarse manteniendo la superficie húmeda o mediante un riego de curado, *gravillonado* o *arrocillo*, etc.

6. CONTROL DE CALIDAD EN LAS ESTABILIZACIONES CON CAL.

El objetivo de las medidas a adoptar en el Control de Calidad es el de asegurar la correcta ejecución de los distintos elementos y fases estudiados anteriormente. Para ello, este control se basará en:

- a) Características de los materiales, tanto de los suelos a tratar como de la cal a emplear. Si esta última permanece almacenada más de dos meses, es conveniente comprobar nuevamente sus características antes de emplearla.
- b) Correcto diseño del tratamiento a realizar en función de los parámetros anteriores y de los objetivos a lograr. Dependerá, por tanto, del efecto perseguido, ya sea el secado de

suelos con humedad natural excesiva, una modificación instantánea del suelo y/o una estabilización de la capa a largo plazo.

- c) Correcta ejecución de la obra. Se deberán controlar tanto las dosificaciones especificadas como las técnicas y elementos constructivos aplicados, así como la homogeneidad y calidad del mezclado final (apreciación visual, pH, etc.).
- d) Comprobación y análisis final. Es importante, tanto desde el punto de vista de la estabilización ejecutada como desde el de las próximas a realizar, analizar todo el proceso seguido y los resultados obtenidos durante la vida útil de la obra, con el objetivo de poder avanzar en el desarrollo de esta técnica.

6.1. CONTROL DE LA EJECUCIÓN

Consiste en controlar el seguimiento del proceso constructivo diseñado previamente y de que los resultados obtenidos sean satisfactorios.

Para ello, antes del comienzo de las actividades, es imprescindible la realización de **tramos de prueba** en los que poder ajustar y coordinar, a escala real, todos y cada uno de los parámetros de ejecución: espesor de tongada, porcentaje de cal, humedad de compactación, maquinaria empleada, etc.

Estos tramos de prueba consistirán en realizar distintas calles de tratamiento, modificando los distintos parámetros sensibles para poder encontrar las soluciones óptimas de ejecución.

I. Preparación de los suelos:

Antes del extendido de la cal, se debe comprobar visualmente que el suelo está esponjado y que no existen grandes terrones.

II. Extendido de la cal:

Se puede controlar de dos formas distintas:

- a) Mediante pesadas periódicas de la cal recogida en recipientes o lonas de superficie conocida ($< 1 \text{ m}^2$) dispuestas en el suelo antes del paso de la máquina.
- b) Controlando el peso total de cal extendida dividido por la superficie cubierta.



III. Mezclado:

Es necesario extraer testigos de las capas ejecutadas. Deberá comprobarse la finura y la homogeneidad obtenidas en todo el espesor de la mezcla. Puede hacerse visualmente, o por métodos físico-químicos.



Los métodos más usados son:

- a) Inspección Visual del Color y Aspecto de la mezcla suelo-cal.

En este sentido, y tomando como referencia el color y aspecto de la mezcla realizada en laboratorio, con las proporciones a aplicar en obra, se podrá observar, bien a lo largo de una cata, o de un testigo, la variación del color y su homogeneidad a lo largo de su profundidad.

Para lo anterior hay que tener en cuenta que las superficies a observar no tienen que haber sido alteradas ni por la excavación de la cata ni por la extracción del testigo.

En el caso de Testigos Cilíndricos, se romperán por tracción (Ensayo Brasileño), y se observará la coloración en las dos superficies interiores, y a distintas alturas o porciones, para ver la homogeneidad del mezclado.

b) Utilización de la Fenolftaleína.

Realizada la cata o extraído el testigo, y procediendo en la preparación de las superficies de la misma forma que en el apartado anterior, se rocía con Fenolftaleína dichas superficies en todo su espesor.

Se observará entonces la coloración producida a lo largo de dichas caras, teniendo en cuenta lo siguiente:

- La Fenolftaleína, incolora, vira a rosa cuando el pH es 8,4 o superior. Aprovechando esta propiedad, y como la cal aumenta el pH del suelo hasta un máximo de 12,4, en función de la dosificación, se podrá ver si hay cal en todo el espesor mezclado en tanto que se produzca dicha coloración.
- Sin embargo, este método no permite distinguir el porcentaje o grado de homogeneidad del mezclado a lo largo de todo el espesor de la capa tratada, puesto que siempre que el valor del pH alcance el valor mínimo de 8,4, la coloración rosa será la misma.
- Este método, combinado con el anterior, podría darnos una estimación de la homogeneidad del mezclado en el espesor de la capa.

c) Medición del pH.

Lo más eficaz, para controlar la eficacia del mezclado, es utilizar métodos basados en la medición de la variación del pH producida por la mezcla del suelo con la cal, ya analizada en fase de proyecto, para la dosificación.

Para obtener una evaluación cuantitativa y más exacta, se debe medir, mediante un peachímetro portátil, el pH en distintas zonas del espesor mezclado mediante catas o testigos.

La concordancia del pH obtenido a distintas profundidades permitirá garantizar la homogeneidad del mezclado, pues estará garantizando una homogeneidad en la acción de la cal sobre el suelo.

A este respecto, es importante tener en cuenta que en los ensayos de pH para determinar la dosificación de cal utilizados en Proyecto (Eades,...) se utiliza sólo la fracción arcillosa del suelo, lo cual puede implicar que la variación del pH anterior no tiene porqué coincidir exactamente.

También es importante considerar el tiempo de espera transcurrido desde la confección de la mezcla hasta la realización de los ensayos.

IV. Control Final:

Una vez realizada la compactación, el objetivo principal es lograr el CBR especificado. Se medirá la densidad/humedad obtenida, a fin de lograr una densidad media mayor al 95 % de la Densidad máxima obtenida en el ensayo Proctor (Normal o Modificado), y se medirá también el espesor estabilizado.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

1. Asociación Nacional de fabricantes de Cales y Derivados de España (ANCADE). "Manual de Estabilización de suelos con cal". Madrid, 1997.
2. Little, Dallas N. "Handbook for Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime". USA, 1995.
3. Eades, J.L., and Grim, R.E. "A Quick test to Determine Lime Requirements for Soil Stabilization". USA, 1966.
4. Transportation Research Board. "State of the art Report 5: *Lime Stabilization*". USA, 1987.
5. Junta de Andalucía, AEC. Varias Ponencias. "I Congreso Andaluz de Carreteras". Granada, 1998.

6. Junta de Andalucía, AEC. Varias Ponencias. "II Congreso Andaluz de Carreteras". Cádiz, 1999.
7. Grupo Calcinor, S.A. "Estabilización y tratamiento de Suelos con Cal". Guipúzcoa, 2000.
8. ANCADE, CEACOP. Varias Ponencias. "Jornadas sobre el uso de la Cal en la Estabilización de suelos en Andalucía". Córdoba, 2000.
9. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) – Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA). "Traitement des sols á la chaux et/ou aux liants hydrauliques". Guide technique. Paris, 2000.
10. Norma ASTM C 977-00 "Specification for Quicklime and Hydrated Lime for Soil Stabilization". USA, 2000.
11. Junta de Castilla y León, ANCADE, ACALINCO. Varias Ponencias. "Jornada sobre la Cal en la Mejora y Estabilización de suelos". Valladolid, 2001.
12. IECA, AEC, ATC. Varias Ponencias. "I^{er} Simposio Internacional sobre Estabilización de Explanadas y Reciclado In Situ de Firmes con Cemento" . Salamanca, 2001.
13. Artículos 200 "Cales para estabilización de suelos" (OM 27/12/99) y 512 "Suelos estabilizados in situ" (OC 10/2002) del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3), de la D.G. de Carreteras del Ministerio de Fomento. España, 2002.
14. ANCADE. "Jornada sobre Maquinaria para la Estabilización de suelos con cal". SMOPYC 2002 – Salón Internacional de Maquinaria para Obras Públicas, Construcción y Minería. Zaragoza, 2002.
15. INTEVÍA. "Los suelos marginales en la construcción de Obras Lineales". Varias Ponencias. Sevilla 2002.
16. Junta de Andalucía, AEC. Varias Ponencias. "III Congreso Andaluz de Carreteras". Sevilla, 2003.

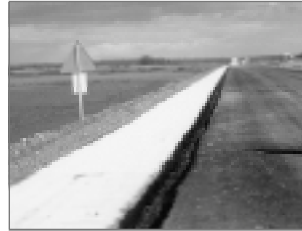
17. Junta de Andalucía – GIASA. “Recomendaciones para la redacción de Pliegos de Especificaciones Técnicas Generales para el Tratamiento de los suelos con cal”. Sevilla, 2003.
18. Sampedro, A. “Curso sobre Tratamientos de suelos”. Academia de Ingenieros del Ejército. Madrid, 2004.
19. AIDICO. “Jornada Técnica: *Tratamiento y Estabilización de suelos con cal*”. Valencia, 2004.
20. INTEVÍA. “Mezclas con Cemento en Explanadas y Firmes”. Varias Ponencias. Madrid, 2004.
21. Sampedro, A.; Gallego, J. “De cal y carreteras...”. CARRETERAS Nº 135. Madrid, 2004.
22. CEDEX - INTEVÍA. “Caracterización de zahorras, suelos estabilizados y materiales tratados con cemento para firmes de carretera”. Varias Ponencias. Madrid, 2004.

**ANEXO 1: Artículo “De cal y carreteras...” A.
Sampedro y J. Gallego (Revista CARRETERAS – N°
135 Sep-Oct 04)**

Ángel Sampedro Rodríguez

Director Técnico
ANCADE

Juan Gallego Medina

Profesor Titular de Universidad
Universidad Politécnica de Madrid

De cal y carreteras...

Lime and roads...

RESUMEN

El presente artículo analiza las principales aplicaciones de las cales, vivas o hidratadas, en la construcción de carreteras.

Por un lado, la construcción de carreteras tiene que cumplir unas condiciones técnicas, económicas y medioambientales que llevan a considerar la reutilización de los suelos de la traza mediante su tratamiento con cal (modificación y/o estabilización), como una de las soluciones más adecuadas.

En este artículo se muestra el “estado del arte” de estas técnicas, analizando el uso de la cal en los distintos tipos de tratamiento de suelos con cal, exponiéndose diferentes ejemplos de ejecución de obras, concluidas recientemente o aún en fase de ejecución, con los resultados obtenidos.

Por otro lado, la cal hidratada o hidrato de cal constituye un polvo mineral que reduce el riesgo de deformaciones plásticas, mejora la resistencia a la desvuelta del árido por la acción del agua y limita la rigidización que acompaña a los fenómenos de envejecimiento en los materiales bituminosos.

Palabras clave: *Cal viva, Cal hidratada, Tratamiento, Estabilización, Mezclas bituminosas.*

ABSTRACT

This paper presents the main uses of the quick and slaked limes in the construction of the roads.

On one side, the construction of roads has to taken into account the technicals, economicals and environmental conditions that carry to reuse of the soils of the place by means of their treatment with lime (modification and/or stabilization).

In this way, this paper presents the “state of art” of this technics, with the analysis of the use of lime in differents types of treatment of soils, showing several examples of works, just finished or in execution, with the results obtained.

On other side, the slaked lime or hydrated lime is a powdered product that reduces the risk of plastic deformations, improve the resistance to loss of the bond between the asphalts and the aggregate and reduces the oxidation of the asphalts wich causes hardening and stiffening.

Keywords: *Quick lime, Slaked lime, Treatment, Stabilization, Asphalts.*



La cal se ha empleado en la construcción de vías desde muy antiguo. Muchas calzadas romanas están apoyadas sobre bases de mezclas compactadas de arcillas y cal. De su estabilidad y capacidad portante durante toda su vida útil no podemos dudar.

No obstante, su aplicación de forma sistemática en la construcción de carreteras en España se viene haciendo desde los últimos siete u ocho años. Las exigencias técnicas y medioambientales de los últimos años han impulsado la reutilización de los suelos de la traza mediante su tratamiento y/o estabilización.

A ello también han contribuido dos factores esenciales:

La calidad de las cales empleadas en la construcción de carreteras, con un desarrollo de la normativa vigente que ha permitido garantizar dicha calidad en obra.

El desarrollo de la maquinaria específica para estabilización de suelos, permitiendo una calidad en la ejecución de estos trabajos excelente.

Las principales aplicaciones de las cales, vivas o hidratadas, en la construcción de carreteras, son en *tratamientos y/o estabilizaciones de suelos*, por un lado; y, por otro, como *polvo mineral de aportación (filler) en mezclas bituminosas*.

Si bien esta última aplicación no es todavía de uso común en España, sí lo es en otros países del Norte de Europa y en Estados Unidos. Por el contrario, la estabilización de suelos ha experimentado un enorme desarrollo en los últimos años, obteniéndose muy buenos resultados en todas sus aplicaciones.

Los suelos estabilizados, ya sea con cal y/o con cemento, constituyen capas más uniformes y homogéneas, de mayor calidad, con mayor durabilidad y prácticamente insensibles al agua.

Debido a esto, la *Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento*, así como el resto de Administraciones Públicas con competencias de carreteras, están apostando decididamente por el empleo de estabilizaciones de suelos. Prueba de ello es el nuevo cuadro de formación de explanadas que establece la *Norma 6.1 IC de Secciones de Firme (2002)*.

Es muy importante remarcar que el tratamiento y/o estabilización de suelos es una solución ventajosa no sólo para capas de explanada y firme de las vías de alta

capacidad, sino que esta técnica debe ser aplicada en todo tipo de carreteras y caminos.

TIPOS DE CALES EMPLEADOS EN CARRETERAS

Las cales utilizadas en la construcción de carreteras son *cales aéreas calcicas (CL)*, llamadas así porque endurecen con el CO₂ presente en el aire, y compuestas principalmente por óxido e hidróxido de calcio y de magnesio, sin adición de materiales puzolánicos e hidráulicos.

En este sentido, las cales empleadas en la construcción de carreteras deberán contar con el *Marcado CE*, señalado en la *Directiva Europea de Productos para la Construcción*, y obligatorio en España desde agosto de 2003.

Las cales a emplear, tanto en la estabilización de suelos como en la fabricación de mezclas bituminosas, vienen definidas por la *Norma UNE-EN 459-1 "Cales para la construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad"*. Se trata de Norma armonizada para las Cales para la Construcción, incluyendo, por supuesto, las obras de ingeniería civil.

Según esta Norma, estas presentan las siguientes formas:

- *Cales vivas, Q*: Cales aéreas constituidas principalmente por óxido de calcio (CaO) y de magnesio (MgO), producidos por la calcinación de caliza. Dentro de este tipo deben emplearse las CL 90-Q.
- *Cales apagadas o hidratadas S*: Cales aéreas, calcicas resultantes del apagado controlado de las cales vivas. Están compuestas principalmente por hidróxido de calcio [Ca(OH)₂]. Dentro de este tipo deben ser CL 90-S.

En España, se matiza la aplicación de cales en carreteras con los requisitos suplementarios marcados por las *Normas UNE 80 502 "Cales vivas o hidratadas utilizadas en la mejora y/o estabilización de suelos"*, *UNE 80 503 "Hidróxido de calcio para utilización en mezclas bituminosas"*, y el *Art.200 del PG-3 "Cales para estabilización de suelos"*.

Para asegurar la calidad de la cal utilizada deberá analizarse:

- *Contenido de componentes magnésicos y calcicos*. El contenido en óxidos de calcio y de magnesio, sobre muestra calcinada^(*) debe ser mayor del 90 (CL 90) por ciento, en masa.

(*) En horno eléctrico a 950-1.000 °C



- *Contenido de dióxido de carbono (CO₂)*. Este parámetro completa a los anteriores en las exigencias de cal libre, pues la muestra sobre la que se ensaya es calcinada. Este contenido, en el punto de fabricación, deberá ser inferior al 5 por ciento, en masa.
- *Finura del molido*. El análisis granulométrico evalúa la finura de la cal. Todas las partículas deberán ser inferiores a 6,3 mm, y más del 90 por ciento inferiores a 0,2 mm.
- *Reactividad de la cal*. Se aplica a la cal viva (Q), y permite medir la rapidez de reacción de esta con el agua. Se evalúa midiendo el tiempo que tarda en alcanzar la temperatura de 60 °C al agitar una muestra de cal viva en agua. Este tiempo deberá ser inferior a 25 minutos, siendo la cal más reactiva cuanto menor sea el tiempo.

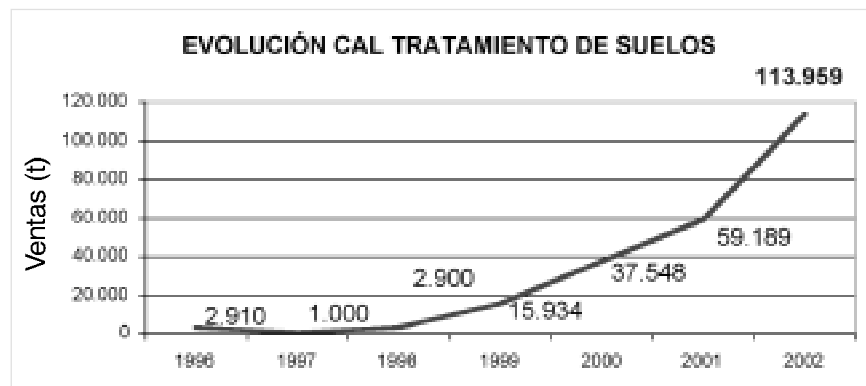


Figura 1. Evolución consumo de cales para tratamiento de suelos (Fuente: ANCADE).

TRATAMIENTOS DE SUELOS CON CAL

1. Introducción

Actualmente, en la construcción de carreteras y cualquier otra que requiera grandes explanaciones, es fundamental minimizar y compensar al máximo posible el movimiento de tierras debido a consideraciones económicas, ambientales y técnicas.

Los suelos con contenidos apreciables de arcillas y limos, muy frecuentes en toda la geografía española,

presentan graves problemas geotécnicos para su empleo en la construcción de infraestructuras debidos a su elevada plasticidad, reducida capacidad portante e inestabilidad de volumen en función de la humedad (hinchamiento y retracción). El tratamiento y estabilización con cal de estos suelos es una solución muy interesante desde los puntos de vista económico, ambiental y técnico, citados anteriormente.

Prueba del desarrollo que ha alcanzado esta técnica en España es la evolución de los consumos de cales para tratamientos y/o estabilización de suelos desde el año 1995, fecha de la creación de ANCADE (ver Figura 1).

2. Tipos de tratamiento

El tratamiento de terrenos arcillosos con cal permite su utilización (ver Foto 1), evitando los mayores costes y afecciones ambientales que supondría su retirada y posterior reemplazamiento por otros suelos de mejores características geotécnicas y mecánicas.



Foto 1. Obra de estabilización de suelos.



Foto 2. Secado y descongelación de suelos.



Foto 3. Ejecución de estabilización por vía húmeda.

Hay varios tipos posibles de tratamientos de suelos con cal, en función de los objetivos a conseguir: el secado, la modificación y la estabilización propiamente dicha.

2.1. Secado/Descongelación de suelos

En el caso de suelos arcillosos con exceso de humedad, la adición de cal viva disminuye el contenido de agua por la acción combinada de:

- aporte de producto seco,
- consumo del agua necesaria para hidratarse y formar hidróxido cálcico, y
- evaporación de agua debida a la reacción anterior; fuertemente exotérmica.

De esta forma, el aporte de un 1 % de cal viva puede disminuir el contenido de humedad del suelo en un 4 ó 5 %. Si a ello le sumamos el efecto de aireación y volteo de un material procedente de un préstamo, el valor de la disminución puede llegar al 7 % (ver Foto 2).

Además, en suelos excesivamente húmedos y sometidos a temperaturas extremadamente bajas, se plantea un problema añadido. La congelación del agua impide su colocación en obra.

Por el contrario, si la humedad de los suelos se encuentra por debajo de la óptima, puede ser aconsejable aplicar la cal en forma de lechada, aportando la cal y el agua necesarias en una sola operación.

La cal en forma de lechada es la 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 (ver Foto 3).

2.2. Mejora por modificación

Se trata de una modificación inmediata de las propiedades geotécnicas, reduciendo en un corto periodo de tiempo (minutos/horas) la cantidad de agua retenida por la arcilla y mejorando su trabajabilidad.

La mezcla de cal con el suelo provoca reacciones rápidas que originan cambios físico-químicos producidos por cambios iónicos, neutralización y floculación. Las finas partículas de arcilla se aglomeran en elementos más gruesos y friables. Estas reacciones se producen siempre que el suelo tenga un cierto porcentaje de finos.

En obra se aprecia que el suelo pierde su carácter pegajoso y toma un aspecto arenoso, mejorando enormemente su trabajabilidad y compactibilidad, mejorando también la capacidad portante. La modificación actúa tan rápidamente como se hace la mezcla de cal con el terreno. En general, para conseguir estas modificaciones, la dosificación necesaria de cal oscila entre el 1 y el 3 por ciento.

2.3. Estabilización

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 de la arcilla, aumentando la capacidad portante del suelo con el fin de poder emplearlo en capas más solicitadas. De esta forma pueden obtenerse explanadas y subbases con buenas propiedades estructurales que van incrementándose en el tiempo, a la vez que hace insensible la capa estabilizada al agua y a los ciclos hielo-deshielo.

Al elevar la cal el pH del suelo estabilizado hasta valores de 12,4, 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 portland, incrementan la resistencia mecánica. Esta reacción de tipo puzolánico es progresiva con el tiempo y aumenta la impermeabilidad, la resistencia mecánica y la resistencia a las heladas del suelo tratado. Los porcentajes necesarios de cal para garantizar la permanencia de las reacciones puzolánicas a lo largo del tiempo oscilan entre el 3 y el 8 por ciento.

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. Es aconsejable, por lo tanto, basar el proyecto de una estabilización determinada en estudios y ejecuciones anteriores con arcillas de similar composición mineralógica.

3. Factores potencialmente adversos

Dos son los aspectos que más negativamente pueden influir en la estabilización de suelos con cal: su contenido en sulfatos solubles y en materia orgánica.

El contenido de *sulfatos solubles*, bien por su existencia en el propio terreno, o bien por ser aportados por las aguas subterráneas existentes, puede afectar la estabilización mediante la reacción de los sulfatos solubilizados en el agua con los aluminatos cálcicos hidratados, producidos por la reacción puzolánica entre el suelo y la cal, formando *Etringita* (trisulfoaluminato cálcico), muy expansiva, que puede llegar a romper las capas ya extendidas y compactadas.

En el ataque por sulfatos, el agua constituye un elemento esencial para el mismo. Así, el agua presente en el material estabilizado suelo-cal puede ser insuficiente para disolver la cantidad necesaria de sulfato, de forma que no exista ataque apreciable aún con grandes cantidades de sulfatos, a menos que haya una aportación suficiente de agua desde el exterior.

En este sentido, normalmente en España, los sulfatos contenidos en los terrenos están en forma de yeso, o provienen de este mineral por el efecto de su solubilidad en las aguas, bien de lluvia o subterráneas, que pasan por formaciones yesíferas. Y por otra parte, la solubilidad del yeso es muy pequeña.

Lo anterior significa que, solamente si hay sulfatos solubles en cantidad suficiente, y diluidos en el agua existente en la mezcla suelo-cal, habrá formación de etringita, pudiendo romperse las capas ya ejecutadas y todas las que se hayan dispuesto encima.

También hay que incidir en el hecho de que, en muchas ocasiones, la aparición de altos niveles de sulfatos solubles se produce en zonas muy localizadas, de pequeña extensión y profundidad, y, además, de forma muy heterogénea.

Esto permite que, una vez estudiado y localizadas estas zonas, puede reducirse el porcentaje de sulfatos homogeneizando y mezclando los suelos de la traza en el propio proceso constructivo, con el movimiento de tierras.

Con respecto al contenido de materia orgánica, esta puede inhibir también las reacciones puzolánicas, debiendo limitar el contenido máximo de ésta en un suelo al 1%.

4. Diseño del tratamiento

El objetivo es el de, una vez analizada la aptitud de los suelos al tratamiento con cal, diseñar el tratamiento a realizar en función de las características de estos suelos y de los objetivos a lograr.

Dependerá, por tanto, del efecto perseguido, ya sea el secado de suelos con humedad natural excesiva, una modificación instantánea del suelo y/o una estabilización de la capa a largo plazo.

4.1. Análisis previo de los suelos

El primer paso será identificar completamente las características de los suelos a emplear para decidir si su estabilización con cal es la solución más recomendable.

En este sentido, las campañas de ensayos a realizar serán las siguientes:

- *Ensayos de identificación de suelos:* (límites Atterberg, granulometría, hinchamiento, humedad natural, contenido de sulfatos solubles, carbonatos, materia orgánica, etc.). Con los resultados obtenidos se podrán clasificar los suelos.
- *Ensayos de comportamiento:* Los dos factores fundamentales son el de la Compactación (Proctor Normal o Modificado) y la Capacidad portante (C.B.R. y/o Resistencia a Compresión Simple).

En función de los resultados de estos ensayos y de los objetivos a conseguir, se valorará la aptitud de los suelos a su tratamiento con cal. A este respecto, cabe decir que el tratamiento con cal será más beneficioso para un suelo cuanto mayor sea su proporción de finos y su plasticidad.



4.2. Fórmula de trabajo

Una vez considerado que el suelo es apto para su tratamiento con cal, se pasa a determinar la fórmula de trabajo para la mezcla suelo-cal que permita conseguir los objetivos propuestos.

La dosificación óptima de cal, en el caso de buscar la modificación inmediata, será aquella que logre reducir e incluso, anular; la plasticidad del suelo, reducir el hinchamiento potencial, y aumentar hasta un valor aceptable la capacidad portante del suelo (CBR).

Para ello, la fórmula de trabajo se obtiene a partir del análisis de los parámetros y ensayos anteriores realizados con distintas muestras representativas del terreno mezcladas con distintos porcentajes de cal. De esta forma, se podrá comprobar el efecto de la cal y así determinar el porcentaje necesario para alcanzar los objetivos buscados.

En el caso de buscar, además, la estabilización a largo plazo deberán analizarse el resto de parámetros más detalladamente. Además de los señalados anteriormente, se determinarán las Resistencias Mecánicas sobre probetas confeccionadas con los moldes del CBR. Estas probetas se romperán por compresión a distintas edades, según se determine previamente.

Un método muy útil por su rapidez y fiabilidad es basar el estudio para la estabilización en el método del pH, el hecho por Eades and Grim⁽³⁾, indicado en la norma ASTM C 977-00 (Apéndice XI).

Este procedimiento se basa en el hecho de que la adición de cal necesaria para estabilizar un suelo es aquella que garantiza el mantenimiento de un elevado pH que permita el desarrollo de las reacciones puzolánicas. Para ello, se ensayan muestras con distintos porcentajes de cal, midiéndose el pH en determinadas condiciones. El porcentaje óptimo es aquel que permite alcanzar el valor de 12,4.

5. Ejecución de la estabilización

La estabilización de suelos con cal puede hacerse principalmente de dos formas diferentes:

- Mezcla *in situ* (Vía seca / húmeda).
- Mezcla en central o planta móvil.

El *mezclado en planta* puede resultar idóneo si el suelo utilizado proviene de un préstamo en el cual se puede

mezclar la cal con el suelo y almacenarlo para su posterior puesta en obra mediante las técnicas normales de terraplenado.

El problema que se plantea es que el amasado que realizan estas plantas se realiza en una mezcladora de palas, que no es muy eficaz con los tipos de suelos susceptibles de tratar con cal, es decir, con suelos arcillosos.

Un sistema que podríamos denominar *mezclado próximo*, utilizado en otros países, es el de realizar el mezclado con estabilizador de suelos en zonas o explanaciones exteriores a la traza.

La mezcla suelo-cal se realizaría en explanaciones próximas a los préstamos de terreno, o en zonas próximas a la traza. Se extendería el suelo en tongadas y se realizaría su mezcla con cal *in situ*, con la metodología convencional. Estas tongadas suelo-cal se recogerían, bien para apilar en montones, o bien para transportar y colocar sobre la traza.

Esta metodología está especialmente indicada para tratar suelos procedentes de préstamos y en zonas de la traza de difícil ejecución: cuñas de transición a obras de fábrica, etc.

No olvidemos la ventaja que supone para la organización de una obra el hecho de que la cal no presente un proceso de endurecimiento rápido que marque una rigidez en los intervalos de mezcla y puesta en obra. La mezcla suelo-cal puede apilarse en montones durante días, para su posterior colocación en capas, siempre que se controle su humedad y se proteja del aire. Para este fin puede ser necesaria la cubrición con lonas o plásticos.

No obstante, el sistema de *mezclado in situ* está siendo el más utilizado en España hasta el día de hoy. La maquinaria disponible actualmente para la estabilización de suelos permite obtener resultados excelentes con esta técnica.

La estabilización *in situ* se realiza siguiendo las siguientes fases:

- 1ª fase. Preparación del suelo y almacenamiento de la cal: Escarificación o esponjamiento del suelo o del préstamo y su colocación en capas compatibles con el mezclador a utilizar. De esta forma se mejora significativamente el rendimiento del proceso posterior de mezclado .

El suministro y almacenamiento de la cal debe hacerse teniendo en cuenta los criterios de accesibilidad,



distancias, espacio necesario, seguridad e higiene, y ritmo de producción de la obra. El almacenamiento de la cal en obra debe hacerse en contenedores estancos y dotados de sistemas de filtros que eviten el contacto con la humedad y con el aire para garantizar su conservación.

Es muy importante también controlar y regular la Humedad natural del suelo, de tal forma que, si esta es superior a la Humedad óptima del Ensayo Proctor, convendrá aplicar cal viva para reducirla. Por el contrario, si esta fuese inferior a la óptima, habrá que regar las capas en cualquiera de las fases aquí descritas.

- 2ª fase. Extendido de la cal: Adición y extensión de la cantidad, calculada previamente mediante los estudios de laboratorio pertinentes, de la cal en forma de polvo (vía seca) o de lechada (vía húmeda). Para ello, se utilizarán los equipos que garanticen la precisión requerida.
- 3ª fase. Mezclado: Mezclado de la cal y el suelo en todo el espesor de la capa mediante las pasadas necesarias para lograr su homogeneidad. Para ello se pueden utilizar equipos recicladores/estabilizadores de suelos, pulvimezcladores, etc., que aseguren la eficacia necesaria.
- 4ª fase. Compactación y terminación: Compactación mecánica y humectación hasta conseguir las densidades necesarias, nivelación y curado de la capa mezclada mediante las técnicas convencionales de movimiento de tierras.

5.1. Preparación de los suelos y almacenamiento de la cal

La preparación de los suelos consiste en una serie de operaciones previas cuya ejecución es necesaria, y muy importante, para mejorar los rendimientos del tratamiento propiamente dicho (ver Foto 4):

- Escarificación y esponjamiento de los suelos para mejorar los rendimientos del mezclado. Se realiza con riper montado en motoniveladora o tractor de orugas, o bien mediante escarificadores de gradas o de discos. Este aspecto es determinante para lograr la profundidad y homogeneidad de mezclado requerida.
- Aireación de los suelos, en el caso de que sea necesario.
- Humidificación de los suelos en el caso de suelos demasiado secos mediante los sistemas de riego tra-



Foto 4. Preparación y extendido de los suelos a la Autovía A-381 "Jerez - Los Barrios".

dicionales. En el caso de utilizar pulvimezcladores, puede inyectarse el agua directamente en el proceso de mezclado.

- Eliminación de grandes terrones, frecuentes en algunos suelos arcillosos, mediante riper, rastrillos o desterronadores. De esta forma se favorece la homogeneidad del mezclado y se evitan numerosas averías y desgaste de piezas en los mezcladores.

El suministro y almacenamiento de la cal debe hacerse teniendo en cuenta los criterios de accesibilidad, distancias, espacio necesario, seguridad y ritmo de producción de la obra. El almacenamiento de la cal en obra debe hacerse en contenedores estancos y dotados de sistemas de filtros que eviten el contacto con la humedad y con el aire para evitar la recarbonatación con el CO₂.

La cal a granel se suministrará a la obra en camiones cisterna 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.

5.2. Extendido de la cal

El extendido de la cal en polvo a granel, viva o hidratada, debe realizarse, por razones de precisión, seguridad y comodidad, mediante cualquiera de las tipologías de máquinas de extendido que actualmente existen en el mercado (ver Foto 5):

- Extendedoras con dosificador volumétrico no servo-dirigido con la velocidad de avance^(*).

(*) Extendido por vía seca.



Foto 5. Extendido de la cal por vía seca.

- Extendedoras con dosificador volumétrico servodirigido con la velocidad de avance^(*). Extendedoras con dosificador volumétrico servodirigido con la velocidad de avance y un control ponderal^(*).
- Dosificadores de lechada de cal. Poseen un mezclador de la lechada y un dosificador volumétrico servodirigido a la velocidad de avance^(**).

Si bien el funcionamiento de los dos últimos tipos de equipos es similar, la precisión y regularidad obtenida con los últimos es mayor, además de poseer un sistema de regulación más simple.

Es conveniente que el dispositivo de descarga estará protegido con faldones cuya parte inferior se aproxime al suelo, con el objeto de evitar que el viento afecte al extendido mientras se descarga la cal sobre el suelo.

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, siendo conveniente que ambos funcionen uno a continuación del otro, de tal forma que la cal permanezca el mínimo tiempo posible sobre el suelo sin mezclarse.

5.3. Mezclado

Esta fase consiste en mezclar la cal con el material a estabilizar conforme a la finura y homogeneidad requeridas por las fórmulas de trabajo (Foto 6).

Para la estabilización con cal de capas soporte de infraestructuras civiles, cuyas especificaciones son muy exigentes por razones obvias de calidad, la maquinaria



Foto 6. Extendido de la cal por vía seca.

específica para realizar el mezclado son los pulvimezcladores, o pulverizadores de eje horizontal. Hoy en día, los comerciantes de maquinaria ya denominan a estos equipos *estabilizadores de suelos*, comúnmente usados también para el reciclado de firmes.

Son equipos autónomos especialmente concebidos para la estabilización de suelos. Tienen un mezclador intermedio horizontal formado por un rotor con eje provisto de cavadoras o picas cubierto por una carcasa dentro de la cual se realiza la mezcla al girar el rotor a gran velocidad. Además, tienen un sistema de inyección de agua o lechada en la cámara de mezclado.

Con esta maquinaria puede realizarse una mezcla homogénea en profundidades de hasta 50 cm., mediante una sola pasada, alcanzando grandes rendimientos (hasta 10.000 – 12.000 m²/día).

5.4. Compactación y terminación

La compactación de las capas tratadas se realiza tras su nivelación con motoniveladora mediante las técnicas convencionales en el movimiento de tierras. Es importante que el espesor de las capas sea compatible con el rendimiento de los compactadores a utilizar: neumáticos, vibrantes o pata de cabra.

6. Control de calidad en las estabilizaciones con cal.

El objetivo de las medidas a adoptar en el control de calidad es el de asegurar la correcta ejecución de los distintos elementos y fases estudiados anteriormente. Para ello, este control se basará en:

- *Características de los materiales*, tanto de los suelos a tratar como de la cal a emplear. Si esta última per-

(*) Vía seca.

(**) Extendido por vía húmeda.



manece almacenada más de dos meses, es conveniente comprobar nuevamente sus características antes de emplearla.

- *Correcto diseño del tratamiento* a realizar en función de los parámetros anteriores y de los objetivos a lograr. Dependerá, por tanto, del efecto perseguido, ya sea el secado de suelos con humedad natural excesiva, una modificación instantánea del suelo y/o una estabilización de la capa a largo plazo.
- *Correcta ejecución de la obra.* Se deberán controlar tanto las dosificaciones especificadas como las técnicas y elementos constructivos aplicados, así como la homogeneidad y calidad del mezclado final (apreciación visual, pH, etc.).
- *Comprobación y análisis final.* Es importante analizar todo el proceso seguido y los resultados obtenidos durante la vida útil de la obra.

7. Ejemplos de estabilizaciones con cal

Son numerosas las ejecuciones de los distintos tratamientos de suelos con cal que se han realizado durante los últimos años por toda España, o que aún se encuentran en fase de ejecución.

Por su importancia, podemos destacar:

- Autovía A-231 León – Burgos (GICAL – Junta de Castilla y León).
- Autovía A-11 Tordesillas – Zamora (Ministerio de Fomento).
- Autovía A-62 Salamanca – Frontera Portuguesa (Ministerio de Fomento).
- Autopista AP-61 San Rafael – Segovia (IBERPISTAS – Ministerio de Fomento).
- Autopista R-4 Madrid – Ocaña (Ministerio de Fomento).
- Autopista M-50 Circunvalación de Madrid (Ministerio de Fomento).
- Nuevas Pistas Aeropuerto de Barajas (AENA – Ministerio de Fomento).
- Autovía A-381 Jerez – Los Barrios (GIASA – Junta de Andalucía).

EMPLEO DE CAL HIDRATADA EN MEZCLAS BITUMINOSAS

I. Introducción

La cal hidratada o hidrato de cal se ha utilizado durante décadas como *polvo mineral* (en adelante *p.m.*) de las mezclas bituminosas. Aún hoy sigue utilizándose en Estados Unidos y está contemplado junto al cemento Portland como *p.m. de aportación*. Sin embargo, en nuestro país su uso ha ido desapareciendo y a la vez se han olvidado sus beneficiosos efectos sobre la mezcla bituminosa.

Varios pueden haber sido los factores que han causado esta regresión. Quizás el más determinante la falta de normalización frente a su competidor más directo, el cemento Portland. Sin embargo esta situación se ha corregido recientemente gracias a la progresiva industrialización y profesionalización del sector de fabricación de cales, que ha traído como consecuencia inmediata unos procesos de control de calidad estrictos, capaces de garantizar unas excelentes características de pureza, finura de molido y homogeneidad en el suministro.

Otro elemento que ha favorecido la caída en desuso del hidrato de cal en mezclas bituminosas ha sido la mejora de los ligantes bituminos. En efecto, propiedades como la resistencia a las deformaciones plásticas o la mejora de la adhesividad pasiva árido-ligante, que tradicionalmente se han atribuido a la incorporación del hidrato de cal, habrían mejorado en las últimas décadas gracias al empleo de ligantes modificados con polímeros. Y lo mismo podría decirse del problema del envejecimiento de mezclas bituminosas. No obstante, nuestras carreteras siguen teniendo problemas de deformaciones plásticas y de envejecimiento prematuro de sus capas bituminosas.

Recientes trabajos parecen poner de manifiesto que no todos los betunes modificados mejoran la durabilidad de las mezclas bituminosas^[4]. Cada día parece más urgente incorporar en los criterios de proyecto de mezclas bituminosas ensayos de envejecimiento, de modo que las mezclas que se pongan en obra no sólo tengan un buen comportamiento inicial (medido a través de la ley de fatiga de la mezcla bituminosa virgen, sin envejecer, sino también unas buenas características de durabilidad para que las propiedades iniciales de la mezcla se prolonguen en el tiempo.

Por ello la utilización de la cal hidratada como aditivo en la mezcla bituminosa, junto a otros polvos minera-



Foto 7. Extendido de mezcla bituminosa en caliente.

les de aportación o bien sustituyendo a aquéllos, puede ser una opción interesante (ver Foto 7).

2. Normalización y características del hidrato de cal como polvo mineral de aportación

En España se cuenta con la norma UNE 80503 *Cales: Hidróxido de calcio para utilización en mezclas bituminosas*^[2], que permite al sector industrial orientar la producción hacia a la obtención de un hidrato de cal de características definidas y al usuario exigir esas mismas especificaciones en el producto que recibe en obra.

Según esta norma, la cal hidratada a utilizar en mezclas bituminosas se denomina CL 90-S, UNE 80503. Los principales requerimientos se refieren a su composición ($\text{CaO} + \text{MgO} \leq 90\%$, $\text{MgO} \leq 5\%$, $\text{CO}_2 \leq 4\%$ y $\text{SO}_3 \leq 2\%$) y a su granulometría (retenido 0,09 mm $\leq 7\%$ y retenido 0,2 mm $\leq 10\%$). Esta norma tiene un grado de exigencia similar a la ASTM C1097-95^[1], "Standard Specification for Hydrated Lime for Use in Asphaltic-Concrete Mixtures". Ambas normas establecen los métodos de análisis químico a utilizar en la determinación del contenido de las distintas sustancias, de modo que el método de análisis no influya en los resultados y por consiguiente en el cumplimiento o no de la respectiva norma.

Para tener una idea más cercana a las características reales del hidrato de cal conviene disponer de una comparación con algunos productos utilizados habitualmente como p.m. en mezclas bituminosas. En la Tabla I, junto a las características del hidrato de cal se

muestran las de un cemento Portland y un p.m. calizo, procedente de la trituración de áridos. Sobre estos productos se realizaron los ensayos de densidad aparente en tolueno (NLT- 176/92), huecos del p.m. compactado en seco (NLT-177/94) y coeficiente de emulsibilidad (NLT-180/93).

En dicha tabla se observa como el hidrato de cal tiene una menor densidad que los demás polvos minerales estudiados, es decir, dentro de un fluido ocupa más espacio que los otros p.m. Ello supone, en principio, que la fillerización del betún se conseguirá con menos peso de hidrato de cal que de los otros polvos minerales. Consecuencias similares pueden extraerse de los resultados de huecos en el material compactado.

En cuanto al coeficiente de emulsibilidad, el valor obtenido con la cal hidratada es cercano al obtenido con el cemento. Un coeficiente de emulsibilidad bajo debe interpretarse en términos de mayor capacidad del betún para desplazar el agua previamente incorporada al p.m. Es decir, el cemento y la cal permiten que el betún desplace al agua con más facilidad que en el caso del p.m. calizo.

Sin embargo debe señalarse que el ensayo con cal incorporó 20 cm³ de agua en lugar de los 10 cm³ que se emplearon en el ensayo del cemento o en el del p.m. calizo. Este condicionante hace que los coeficientes de emulsibilidad de los tres materiales no sean estrictamente comparables, puesto que desplazar una mayor cantidad de agua (en el caso de la cal hidratada) resulta una condición más exigente que en los otros dos casos. Esta dificultad intrínseca del ensayo de coeficiente de emulsibilidad junto a la subjetividad con que se obtienen los resultados (a criterio del operario de laboratorio, que debe evaluar visualmente el aspecto de la mezcla de p.m., ligante y agua) han llevado a que el ensayo se emplee cada vez menos, e incluso haya desaparecido en la última revisión del artículo 542 del *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes*.

	Tipo de polvo mineral				
	NLT	Ud	Cal hidratada	Cemento	Polvo calizo
Densidad aparente en tolueno	176	g/cm ³	0,294	0,690	0,689
Huecos en material compactado	177	(1)	0,594	0,427	0,350
Coficiente de emulsibilidad	180	(1)	0,350 ⁽²⁾	0,250	0,750

(1) Adimensional. (2) Se emplearon 20 cm³ de agua en lugar de los 10 cm³ habituales.

Tabla I. Características de distintos tipos de polvo mineral.



3. EFECTOS DE LA CAL HIDRATADA EN LAS MEZCLAS BITUMINOSAS

Se irá mostrando a continuación cómo propiedades de las mezclas bituminosas tan importantes como la resistencia a las deformaciones plásticas, a la acción del agua o al envejecimiento se ven influenciadas por la presencia del hidrato de cal.

3.1 Efecto de la cal hidratada sobre la resistencia a las deformaciones plásticas de las mezclas bituminosas

La elevada superficie específica del hidrato de cal, su baja densidad aparente en tolueno y su alto índice de huecos compactado en seco hacen del hidrato de cal un p.m. con alta demanda de ligante. O dicho de otro modo: para fillerizar un cierto contenido de ligante (y disminuir así el riesgo de deformaciones plásticas en la mezcla bituminosa) se precisa menos cantidad de hidrato de cal que de otro p.m.

Así las cosas no extraña que la adición de este producto a la mezcla bituminosa reduzca su tendencia a las deformaciones plásticas, sobre todo cuando se sustituye a cualquier otro p.m. en peso, sin tener en cuenta las características de densidad aparente del hidrato de cal. O dicho de otro modo, se precisa menor aportación de cal hidratada que de otros polvos minerales de aportación para conseguir estabilizar la mezcla frente a las deformaciones plásticas.

Para comprobar las afirmaciones anteriores se han fabricado 3 másticos en laboratorio, utilizando como p.m. polvo calizo, cemento y cal respectivamente. Las densidades aparentes en tolueno de los tres p.m. fueron 0,556, 0,833 y 0,267 g/cm³ respectivamente. Para determinar los gramos de p.m. a añadir en cada mástico se tuvo en cuenta la densidad aparente en tolueno de modo que la relación polvo mineral/betún fuera volumétrica y no ponderal. En concreto, para una relación volumétrica polvo mineral/betún de valor 0,7 y un peso de amasada (betún + p.m.) de 300 g se tienen las ecuaciones siguientes:

$$P_b + P_{p.m.} = 300$$

$$\frac{P_b}{\delta_b} \cdot 0,7 = \frac{P_{p.m.}}{\delta_{p.m.}}$$

MÁSTICO	Betún (g)	P _{mineral} (g)	p.m. en volumen (%)	p.m. en peso (%)	T _{AyB} (°C)	Visc. @ 60°C (cP)*
Betún puro	300	-	-	-	50	3,07.105
Betún + polvo calizo	216	84	70	39	54	4,25.105
Betún + cemento	190	110	70	58	54	4,86.105
Betún + cal hidratada	253	47	70	18	53	4,25.105

(*) Medida en viscosímetro rotacional con una velocidad de corte de 0,680 s⁻¹.

Tabla 2. Características de tres másticos con un nivel de fillerización similar.

Donde:

P_b = Peso de betún

P_{p.m.} = Peso del polvo mineral

δ_b = Densidad aparente del betún

$\delta_{p.m.}$ = Densidad aparente en tolueno del p.m.

Resultando, que los gramos a añadir en cada mástico vienen dados por la expresión:

$$P_{p.m.} = \frac{300 \cdot \delta_{p.m.}}{1,47 + \delta_{p.m.}}$$

El objetivo de buscar una relación p.m./betún volumétrica es conseguir el mismo grado de fillerización del mástico. Dicho grado se midió a través de la temperatura de reblandecimiento (T_{AyB}) y de la viscosidad a 60 °C, parámetros ambos muy correlacionados con la propensión de una mezcla bituminosa a sufrir deformaciones plásticas: cuanto más alta es la temperatura de reblandecimiento y más alta la viscosidad a 60°C menores riesgos de deformaciones plásticas existen.

Las proporciones de betún y p.m. empleadas en cada mástico y los valores de T_{AyB} y viscosidad medidos en laboratorio para el betún original y los tres másticos se recogen en la Tabla 2.

Puede observarse en la Tabla 2 que a pesar de que la cal hidratada ha entrado en una proporción en peso mucho menor, el 18% frente al 39% del polvo calizo o al 58% del cemento Portland, en sus correspondientes másticos la temperatura de reblandecimiento y la viscosidad a 60 °C son similares en los tres casos, lo que pone de relieve que la cal puede emplearse en proporción menor que otros p.m., lo que tendría una

significación económica. El problema de las roderas puede controlarse con menor cantidad de cal hidratada que de otros p.m.

3.2. Efecto del hidrato de cal sobre la resistencia de las mezclas bituminosas a la acción del agua

Las cualidades del hidrato de cal frente al problema de la desmenuzamiento de los áridos y disgregación de la mezcla han sido señaladas tradicionalmente como una de las ventajas de este producto. La bibliografía al respecto es extensísima y permite concluir que la mejora obtenida respecto a las mezclas sin cal hidratada depende sobre todo de la naturaleza de los áridos. Las mezclas con áridos silíceos parecen las más beneficiadas. Se comenta a continuación sólo un ejemplo por motivos de brevedad.

Se trata de la utilización de hidrato de cal en la fabricación de mezclas drenantes⁽¹⁷⁾. Este tipo de mezcla bituminosa al disponer de poca arena es especialmente propenso a la disgregación. El ensayo Cántabro permite establecer un contenido suficiente de ligante que garantiza la no disgregabilidad de la mezcla. Cuando el ensayo Cántabro se hace tras inmersión en baño de agua a 60°C durante 24 horas se pone a prueba la resistencia de la mezcla bituminosa a la acción del agua.

El estudio referido⁽¹⁷⁾ compara la pérdida en Cántabro (en seco o tras inmersión) de mezclas con distintos aditivos. Se trataba de mezclas drenantes (PA 12), con árido grueso silíceo, arena caliza, p.m. calizo y un 2% de cemento como p.m. de aportación. Cuando se incorporaba un aditivo (como el hidrato de cal) se retiraba parte del cemento, de modo que los huecos en mezcla variasen lo menos posible.

Con los resultados que más interesan aquí se ha elaborado la Figura 2. En ella se muestra como al variar los contenidos porcentuales de hidrato de cal/cemento desde 0,0/2,0 hasta 1,5/0,5 las pérdidas en Cántabro tras inmersión experimentaron descensos apreciables. La presencia de tan sólo un 0,5% de hidrato de cal ya supuso un 20% de disminución en la pérdida en Cántabro tras inmersión.

El motivo de estos resultados se suele atribuir al hecho de que el betún asfáltico presenta una naturaleza ligeramente ácida al igual que los áridos silíceos, mientras que la cal

hidratada es de naturaleza básica, lo que mejora los fenómenos de adhesividad activa y pasiva entre áridos y ligante, tal y como han descrito con todo detalle Ishai et al.⁽¹⁸⁾.

En Francia y en Bélgica se ha comprobado la eficacia de introducir cal hidratada en las mezclas bituminosas drenantes. En Bélgica entre 1.983 y 1.985 se construyeron varios tramos de mezclas drenantes en la N-975 y la N-5 con betunes de penetración y un 1,5% de cal hidratada, o bien con betunes polímeros y sin cal. Estos tramos están situados en la N-975 y la N-5 y diez años después se comprobó que los tramos con betunes y cal presentaban un aspecto idéntico al de los tramos con betunes polímeros. En los Países Bajos sistemáticamente se añade un 1% de cal hidratada a las mezclas drenantes.

No obstante, este buen comportamiento no sólo tiene que ver con la mejora de la adhesividad, sino con otro fenómeno tanto o más importante que aquél: el envejecimiento de la mezcla bituminosa. A él se refiere el siguiente apartado.

3.3. Efecto del hidrato de cal sobre la resistencia al envejecimiento de las mezclas bituminosas

Agnusdei⁽¹⁵⁾ ha comprobado mediante espectrofotometría de infrarrojos que durante los procesos de envejecimiento se registra un incremento importante de grupos funcionales polares. En su experimento siguió la evolución de dos conjuntos de sustancias que se generan durante el envejecimiento:

- Grupos carbonilo (aldehídos, cetonas, ácidos, etc.), en la longitud de onda 1.692 cm⁻¹.

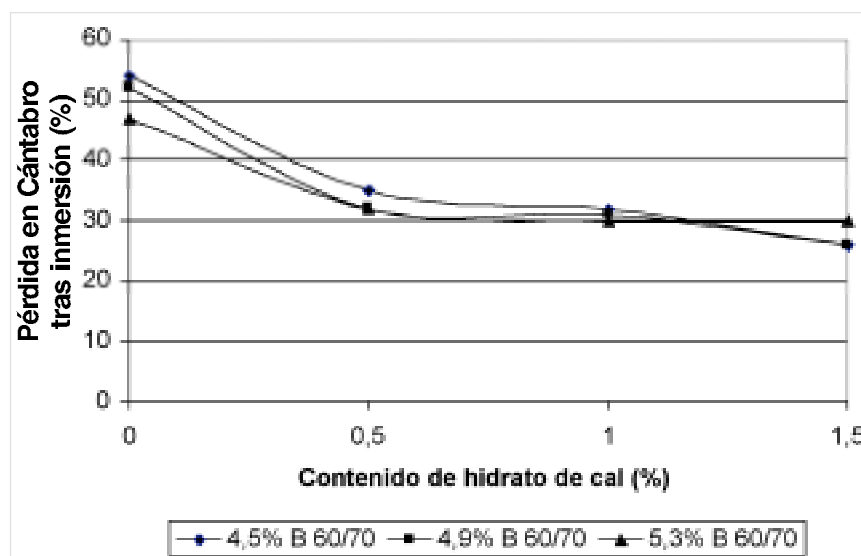


Figura 2. Pérdidas en Cántabro tras inmersión. Gallego et al.⁽¹⁷⁾

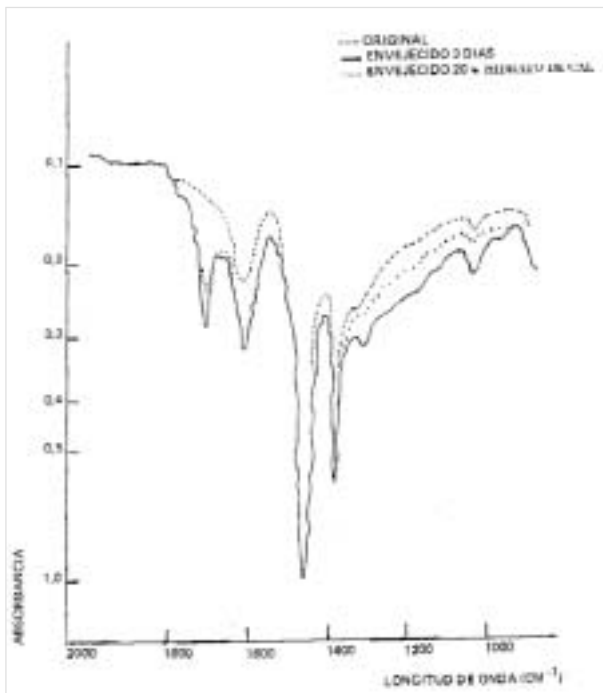


Figura 3. Espectrofotometría de infrarrojos. Agnusdei⁽¹⁵⁾

- Grupos sulfóxido, en la longitud de onda de 1.030 cm^{-1}

Esta técnica se aplicó a dos ligantes, uno de ellos puro y el otro tratado previamente con un 20% de hidrato de cal, lo que supone un 1% de hidrato sobre el peso de una mezcla bituminosa. El tratamiento consistió en el mezclado en atmósfera pobre de oxígeno a 150°C durante 6 horas.

Según muestra la Figura 3, en el betún previamente tratado con hidrato de cal la formación de estos dos grupos funcionales durante el envejecimiento fue menor que en el caso del betún puro, traducido en unas absorbancias menores en las longitudes de onda citadas. En definitiva, el tratamiento con hidrato de cal logra que el envejecimiento sea menos acentuado.

En la misma gráfica se observa que los asfaltenos (longitud de onda entre 1.340 y 900 cm^{-1}) registraron un incremento mayor en el betún que no se había tratado con hidrato de cal. El aumento es consecuencia de la mayor concentración de grupos funcionales polares que tienen la facultad de interaccionar con otros componentes del betún para formar asfaltenos, como en otro interesante estudio demostró Neuman⁽¹⁹⁾. De hecho, el incremento de asfaltenos en detrimento de maltenos y resinas ha sido un parámetro químico habitualmente utilizado cuando se estudia el envejecimiento de betunes.

El modo en que Agnusdei⁽¹⁵⁾ trató el betún, añadiéndole un 20% de cal hidratada y manteniendo la mezcla a 150°C en atmósfera pobre en oxígeno durante 6 horas, difícilmente puede asimilarse a los procesos en obra: ni la atmósfera pobre en oxígeno ni las 6 horas a 150°C son condiciones habituales en obra. Por lo tanto, queda la incertidumbre de si al añadir la cal hidratada en las condiciones habituales de una obra española la cal ejercerá su beneficiosa influencia sobre el envejecimiento en el mismo grado que si el tratamiento se realiza en condiciones difíciles de reproducir en obra.

4. Procedimientos en obra para incorporar la cal hidratada

Los procedimientos que habitualmente se emplean para la incorporación de cal en las mezclas bituminosas pueden clasificarse del siguiente modo:

- Incorporación a los áridos:
 - Pretratamiento de los áridos mediante una lechada agua/cal.
 - Adición a los áridos en la planta, en seco y antes de que aquéllos entren en contacto con el betún.
- Incorporación a la mezcla de betún y áridos durante los instantes que dura el amasado

El primer procedimiento, la incorporación a los acopios de áridos mediante una lechada de cal, se practica en Estados Unidos. La lechada, con una proporción de cal alrededor del 30%, se incorpora a los áridos para después acopiarlos; o bien en la central de fabricación, en la cinta que sale de las tolvas en frío en plantas discontinuas.

El segundo procedimiento consiste en incorporar cal hidratada en polvo al tambor secador mezclador en plantas continuas, o bien al mezclador en plantas discontinuas. En cualquiera de los dos casos la cal debe incorporarse previamente a que los áridos entren en contacto con el ligante.

El último de los procedimientos mencionados es el más simple: la incorporación a la mezcla bituminosa durante el amasado. Permite la utilización de sacos de cal fabricados en material termofundente, arrojados directamente al mezclador.

Sería necesario estudiar los efectos de la incorporación de la cal hidratada por uno u otro procedimiento, para comprobar la eficacia y la relación coste/beneficio de cada uno de ellos.



CONCLUSIONES

Con respecto al tratamiento de suelos arcillosos con cal viva o hidratada en cualquier obra de carreteras, ya sea en laderas, terraplenes, explanadas, firmes, plataformas, etc., las ventajas, tanto técnicas como económicas son:

- Posibilidad de reutilización de los suelos disponibles en la traza, disminuyendo la necesidad de préstamos y vertederos. Este aspecto, además de disminuir las afecciones medioambientales, disminuye los costes del movimiento de tierras, incidiendo especialmente en el transporte de materiales y en el tiempo de ejecución.
- La reducción del plazo de ejecución viene determinada también por la rapidez de las reacciones suelo-cal y el efecto secante producido. El Índice de Plasticidad disminuye notablemente y el suelo se vuelve más friable, aumentando inmediatamente su trabajabilidad. Además, el empleo de cal viva ayuda a secar rápidamente los suelos húmedos, facilitando su compactación.
- El empleo de cal incrementa la capacidad portante de los suelos aumentando su índice C.B.R. También aumenta las resistencias a tracción y a flexión. Por lo tanto, la mejora producida en las capas y explanadas estabilizadas permite reducir espesores y las posibilidades de fallo durante su vida útil.
- Otra ventaja muy importante de la estabilización con cal frente al empleo de otros conglomerantes, es que no presenta un fraguado rápido, lo cual permite una gran flexibilidad en la organización de las distintas fases de ejecución: mezcla, extendido, compactación, etc.

No obstante, para evitar la recarbonatación previa de la cal, debe realizarse el mezclado con el suelo antes de 8 horas, desde el momento del extendido. Además, con el fin de evitar la recarbonatación de la cal y su arrastre por el viento, conviene mezclar lo antes posible la cal extendida.

Por otro lado, puede concluirse que el empleo de cal hidratada en las mezclas bituminosas, en porcentajes alrededor del 1,0% del peso de los áridos, ejerce una beneficiosa influencia sobre la resistencia a las deformaciones plásticas, el efecto del agua sobre la adhesividad árido-ligante y la resistencia al envejecimiento de las mezclas bituminosas en que se incorpora.

Estos beneficios se deben, según los casos, a los siguientes mecanismos:



Foto 8. Extendido de mezcla bituminosa en caliente (MBC).

- Resistencia a las deformaciones plásticas: El valor elevado de la superficie específica del hidrato de cal y su baja densidad aparente hacen que el betún adquiera más viscosidad que si se emplean en la misma proporción ponderal otros polvos minerales. Para conseguirlo es suficiente añadir la cal a la mezcla bituminosa, sin que sea preciso el pretratamiento de los áridos.
- Resistencia a la desenvuelta por la acción del agua: El hidrato de cal hace que la superficie de los áridos (silíceos) se transforme en básica, generando así mayor afinidad por los radicales ligeramente ácidos que existen en el betún y favoreciendo la adhesividad árido-ligante. El hidrato se puede aplicar por vía seca, como un polvo mineral en el mezclador, pero es preferible el pretratamiento de los áridos mediante lechada agua/cal.
- Resistencia al envejecimiento: El hidrato de cal capta diversas sustancias catalizadoras de la oxidación que están naturalmente presentes en el betún. Además capta moléculas polares que se generan durante el envejecimiento y que de estar libres contribuirían al endurecimiento y rigidización del betún. Los tratamientos con hidrato de cal en los estudios que se han expuesto tienen unas condiciones difíciles de reproducir en obra por lo que resulta preciso un esfuerzo investigador para determinar si con las condiciones de obra se consiguen los mismos resultados.

En España los beneficios más interesantes serían los relativos a las deformaciones plásticas y al envejecimiento. Ya se ha dado el primer paso con la normalización de la cal hidratada a emplear en mezclas bituminosas (norma UNE 80503). Ahora es necesario que se estudien en proyectos españoles las ventajas de esta técnica, que con un coste bajo puede ser una opción interesante para mejorar las características de las mezclas bituminosas.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

1. Asociación Nacional de fabricantes de Cales y Derivados de España (ANCADE). "Manual de Estabilización de suelos con cal". Madrid, 1997.
2. Little, Dallas N. "Handbook for Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime". USA, 1995.
3. Eades, J.L., and Grim, R.E. "A Quick test to Determine Lime Requirements for Soil Stabilization". USA, 1966.
4. Norma ASTM C 977-00 "Specification for Quicklime and Hydrated Lime for Soil Stabilization". USA, 2000.
5. Grupo Calcinor, S.A. "Estabilización y tratamiento de Suelos con Cal". Guipúzcoa, 2000.
6. Junta de Andalucía, AEC. Varias Ponencias. "I Congreso Andaluz de Carreteras". Granada, 1998.
7. Junta de Andalucía, AEC. Varias Ponencias. "II Congreso Andaluz de Carreteras". Cádiz, 1999.
8. ANCADE, CEACOP. Varias Ponencias. "Jornadas sobre el uso de la Cal en la Estabilización de suelos en Andalucía". Córdoba, 2000.
9. Junta de Castilla y León, ANCADE, ACALINCO. Varias Ponencias. "Jornada sobre la Cal en la Mejora y Estabilización de suelos". Valladolid, 2001.
10. IECA, AEC, ATC. Varias Ponencias. "Ier Simposio Internacional sobre Estabilización de Explanadas y Reciclado In Situ de Firmes con Cemento". Salamanca, 2001.
11. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) – Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA). "Traitement des sols á la chaux et/ou aux liants hydrauliques". Guide technique. Paris, 2000.
12. Artículos 200 "Cales para estabilización de suelos" (OM 27/12/99) y 510 "Suelos estabilizados in situ" (OC 10/2002) del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3), de la D.G. de Carreteras del Ministerio de Fomento. España, 2002.
13. American Society for Testing and Materials (1995). ASTM C1097-95, Standard Specification for Hydrated Lime for Use in Asphaltic-Concrete Mixtures.
14. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (2001). UNE 80503 Cales: Hidróxido de calcio para utilización en mezclas bituminosas.
15. Agnusdei, J.O., losco, O.A. (1989). Acción de distintos tipos de rellenos minerales sobre la durabilidad de los cementos asfálticos. 5º Congreso Ibero-latinoamericano del Asfalto. Punta del Este, Uruguay.
16. Gallego, J., Del Val, M.A., Tomás, R. (2001). Envejecimiento en laboratorio de mezclas asfálticas fabricadas con betunes-polímeros. Aplicación al estudio de un caso. Carreteras, nº 116. I.S.S.N. 0212-6389.
17. Gallego, J., Tomás, R., Nosetti, A., Bianchetto, H., Daguerre Lisandro. (1999). Opciones técnicas y económicas para la obtención de mezclas porosas. 10º Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. Actas del Congreso. I.S.B.N.: 84-89875-08-1. Sevilla.
18. Ishai, I., Craus, J. (1977). Effect of the Filler on Aggregate-Bitumen Adhesion Properties in Bituminous Mixtures. Association of Asphalt Paving Technologists. Proceedings. Vol. 46.
19. Neuman, H.J., Roesler, R. (1970). Investigation of the Incorporation of Polar Substances in Bitumen. Bitumen, Teere, Asphalte, Peche, Vol. 21, N0. 12. ■



ANEXO 2: MANUAL DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CAL (ANCADE)

PRÓLOGO

Uno de los materiales históricamente más conocidos es la cal y su empleo en todo tipo de construcciones.

En la técnica actual de carreteras se busca intensamente el optimizar los productos y recursos disponibles, ahorrando energía y evitando en lo posible la agresión al ambiente.

Los materiales pétreos se obtienen con alto coste energético y un ataque al entorno, por ello las técnicas de estabilización de suelos y de reciclado de materiales antiguos cobra en todas partes un interés creciente.

El empleo de la cal en tratamientos del tipo anterior se verá reforzado con dos elementos imprescindibles: una normalización rigurosa de los productos existentes en el mercado y una normativa de calidad para el empleo.

El presente Manual viene a cubrir la necesidad de normativa y asesoramiento al utilizador, pudiéndose destacar la precisión, el rigor y la faceta pedagógica del mismo. Por todo ello hay que felicitarse dentro del mundo de la carretera de poder disponer de elementos de trabajo como el **Manual de Estabilización de Suelos con Cal** de la Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España (ANCADE).

Madrid, Noviembre de 1997

Juan Antonio Fernández del Campo
Presidente de la Asociación Española de la Carretera

ÍNDICE

	Página nº
1	LA CAL 1
1.1	ANTECEDENTES 1
1.2	LOS DIFERENTES TIPOS DE CAL 1
1.2.1	CALES AÉREAS 1
1.2.2	CALES HIDRÁULICAS 1
1.2.3	CALES UTILIZADAS PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS 1
1.2.3.1	CALES VIVAS 1
1.2.3.2	CALES APAGADAS O HIDRATADAS 1
1.2.3.3	CAL EN FORMA DE LECHADA 2
1.2.3.4	CLASIFICACIÓN SEGÚN LA NORMA UNE 80-502-97 2
1.3	CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTALES DE LAS CALES PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS. NORMATIVA 2
1.3.1	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS 2
1.3.2	CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS 2
	- Contenido en CaO
	- Contenido en MgO
	- Reactividad de la cal viva
	- Otros componentes minoritarios
1.3.3	ESPECIFICACIONES DE LA CAL PARA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS 2-3
1.3.4	MÉTODOS DE ENSAYO PARA CALES 3
1.3.5	OTRAS CARACTERÍSTICAS DE LAS CALES 3-4
2	LOS SUELOS 4
2.1	SUELOS APTOS PARA LA ESTABILIZACIÓN CON CAL 4
2.1.1	PARÁMETROS DE NATURALEZA 4
2.1.1.1	LA GRANULOMETRÍA O FINURA 4
2.1.1.2	LA PLASTICIDAD 4
2.1.1.3	EL HINCHAMIENTO 5
2.1.2	PARÁMETROS DE ESTADO 5
2.1.2.1	LA COMPACTACIÓN. EL ENSAYO PROCTOR 5
2.1.2.2	LA CAPACIDAD PORTANTE. EL ENSAYO CBR 5-6
2.1.3	CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS 6

ÍNDICE

Página nº

3	ACCIÓN DE LA CAL SOBRE LOS SUELOS. ÁMBITO DE APLICACIÓN	7
3.1	LA CAL COMO SOLUCIÓN	7
3.1.1	ACCIÓN SOBRE LOS SUELOS ARCILLOSOS	7
3.1.1.1	MODIFICACIÓN INMEDIATA DE LAS PROPIEDADES GEOTÉCNICAS	7-8
3.1.1.2	MODIFICACIONES A LARGO PLAZO DE LAS PROPIEDADES GEOTÉCNICAS	8
3.1.2	ACCIÓN SOBRE LA CRETA HÚMEDA	9
3.1.3	ACCIÓN SOBRE EL CONTENIDO DE AGUA	9
3.1.4	CASO DE SUELOS ARCILLOSOS CON EXCESO DE HUMEDAD	9-10
3.1.5	CASO DE SUELOS ARCILLOSOS SECOS	10
3.1.6	ÁMBITO DE APLICACIÓN DEL TRATAMIENTO CON CAL EN SUELOS ARCILLOSOS	10
4	LOS ESTUDIOS PARA EL TRATAMIENTO	11
4.1	LA NECESIDAD DE UN ESTUDIO ESPECÍFICO	11
4.2	ESTUDIO GEOTÉCNICO	11-12
4.3	IDENTIFICACIÓN DE LA CAL	12
4.3.1	CALES AÉREAS	12-13
4.4	OTROS ESTABILIZADORES BASADOS EN LA CAL	13
4.5	ESTUDIO DE FORMULACIÓN	13
4.5.1	CAL VIVA O CAL HIDRATADA	13-14
4.5.2	DOSIFICACIÓN DE LA CAL	14
4.5.2.1	CASO DE TERRAPLENES	14
4.5.2.2	CASO DE EXPLANADAS	14-15
4.5.2.3	CASO DE EXPLANADAS CON TRATAMIENTO MIXTO CAL-CEMENTO	15
4.5.2.4	CASO DE SUBBASES Y BASES	15
4.5.3	ENSAYO A ESCALA REAL	15
4.5.4	PLAZO DE EJECUCIÓN DE ESTUDIOS EN LABORATORIO	16
5	LAS TÉCNICAS DE EJECUCIÓN	17
5.1	CONDICIONES A TENER EN CUENTA	17
5.2	FORMAS DE TRATAMIENTO	17-18
5.3	COMPOSICIÓN DEL EQUIPO PARA EL TRATAMIENTO CON CAL	18
5.4	FASES DE PUESTA EN OBRA	18-19
5.5	TRATAMIENTO MIXTO CAL-CEMENTO	19

ÍNDICE

	Página nº
6	PREPARACIÓN DE LOS SUELOS Y ALMACENAMIENTO DE LA CAL 20
6.1	PREPARACIÓN DE LOS SUELOS 20
6.1.1	ESCARIFICACIÓN O ESPONJAMIENTO DE LOS SUELOS 20
6.1.2	AIREACIÓN DE LOS SUELOS 20
6.1.3	HUMIDIFICACIÓN DE LOS SUELOS 20-21
6.1.4	ELIMINACIÓN DE GRANDES TERRONES 21
6.2	ALMACENAMIENTO DE LA CAL 21
6.2.1	SUMINISTRO EN SACOS 21
6.2.2	SUMINISTRO A GRANEL 21-22
6.2.3	CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO Y ORGANIZACIÓN DEL SUMINISTRO 22
6.2.4	DURACIÓN LÍMITE DEL PRODUCTO ALMACENADO 22
6.2.5	PRECAUCIONES 22
6.2.6	ELECCIÓN DEL LUGAR DE ALMACENAMIENTO 22
7	EL EXTENDIDO DE LA CAL 23
7.1	FORMA DE PRESENTACIÓN DE LA CAL 23
7.2	MAQUINARIA DE EXTENDIDO DE CAL 23
7.2.1	CASO DE CAL EN POLVO ENSACADA 23
7.2.2	CASO DE CAL EN POLVO A GRANEL 23
7.2.2.1	EXTENDEDORA CON DOSIFICADOR VOLUMÉTRICO NO SERVODIRIGIDO CON LA VELOCIDAD DE AVANCE. 23
7.2.2.2	EXTENDEDORA CON DOSIFICADOR VOLUMÉTRICO SERVODIRIGIDO CON LA VELOCIDAD DE AVANCE. 23-24
7.2.2.3	EXTENDEDORA CON DOSIFICADOR VOLUMÉTRICO SERVODIRIGIDO CON LA VELOCIDAD DE AVANCE, CON CONTROL PONDERAL 24
7.2.3	LECHADA DE CAL 24
7.3	PRECISIÓN DE LAS EXTENDEDORAS 24
7.4	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LA EXTENDEDORA 25
7.5	NIVEL DE MANTENIMIENTO DE LA EXTENDEDORA 25
7.6	LA UTILIZACIÓN DEL EQUIPO 25
7.7	CANTIDAD DE CAL A EXTENDER 25
7.8	CONTROL DEL EXTENDIDO 25
7.8.1	1ª Fase AL COMIENZO DE LA OBRA 25
7.8.2	2ª Fase DURANTE LA OBRA 25
7.9	CONSIDERACIONES PRÁCTICAS 26
7.9.1	RENDIMIENTO DE UNA EXTENDEDORA 26
7.9.2	ELECCIÓN DE UNA EXTENDEDORA 26
7.9.3	PRECAUCIONES ESPECIALES 26

ÍNDICE

		Página nº
8	EL MEZCLADO	27
8.1	EL MEZCLADO DE LA CAL Y EL SUELO	27
8.2	EL MEZCLADO IN SITU. EQUIPOS	27
8.2.1	GRADAS DE DISCOS	27
8.2.2	VERTEDERAS O REJAS	27
8.2.3	HOJAS DE MOTONIVELADORA	27
8.2.4	ROTOBATOR	28
8.2.5	PULVIMEZCLADORAS	28-29
8.3	REDUCCIÓN DE LAS EMISIONES DE POLVO EN LAS OBRAS DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CAL	29-30
8.4	EL MEZCLADO EN INSTALACIÓN CENTRAL	30
8.5	EL MEZCLADO EN PLANTAS MÓVILES	31
8.6	CONTROL DE MEZCLADO	31
8.6.1	CONTROL DE LA PROFUNDIDAD DE MEZCLADO	31
8.6.1.1	DURANTE EL MEZCLADO	31
8.6.1.2	DESPUÉS DEL MEZCLADO	31
8.6.2	CONTROL DE LA HOMOGENEIDAD DE LA MEZCLA	31
8.6.2.1	FINURA OBTENIDA	31
8.6.2.2	HOMOGENEIDAD	31
8.7	CONSIDERACIONES PRÁCTICAS	32
8.7.1	RENDIMIENTO REAL DE UN MEZCLADOR	32
8.7.2	PRECAUCIONES ESPECÍFICAS	32
8.8	CARACTERÍSTICAS DE LOS PRINCIPALES EQUIPOS DE MEZCLADO	33
9	COMPACTACIÓN, TERMINACIÓN Y PROTECCIÓN DE LAS CAPAS ESTABILIZADAS CON CAL.	34
9.1	COMPACTACIÓN	34-35
9.2	PRECAUCIONES PARTICULARES	35
9.3	CONTROL DE LA COMPACTACIÓN	35
9.4	TERMINACIÓN Y PROTECCIÓN DE LAS EXPLANADAS	35-36
10	LA SEGURIDAD	37
10.1	NORMATIVA	37
10.2	PRECAUCIONES A TOMAR EN EL MANEJO DE LA CAL	37
10.2.1	ROPA DE TRABAJO	37
10.2.2	PROTECCIÓN DE LOS OJOS	37
10.2.3	PROTECCIÓN DE LAS VIAS RESPIRATORIAS	37
10.3	PRIMEROS AUXILIOS	37
10.3.1	QUEMADURAS E IRRITACIONES DE LA PIEL	37
10.3.2	CAÍDA DE CAL EN LOS OJOS	37

ÍNDICE

		Página nº
11	INTERÉS ECONÓMICO DE LA ESTABILIZACIÓN CON CAL	42
11.1	LAS VENTAJAS ECONÓMICAS DIRECTAS E INDIRECTAS	42
11.1.1	UTILIZACIÓN DE LOS SUELOS DE LA TRAZA EVITANDO LOS MATERIALES DE PRÉSTAMO	42
11.1.2	MEJORA DE LAS CONDICIONES DE TRABAJO Y DE LA PRODUCTIVIDAD	42
11.1.3	MEJORA DE LAS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	42
11.2	PARÁMETROS PRÁCTICOS QUE INFLUYEN SOBRE LOS COSTES	42
11.2.1	LA CAL	42
11.2.2	PREPARACIÓN DE LOS SUELOS	42
11.2.3	ALMACENAMIENTO Y EXTENDIDO	43
11.2.4	EL MEZCLADO	43
11.2.5	CONCLUSIONES	43



1-LA CAL

1.1 ANTECEDENTES

La estabilización de la arcilla con cal en la construcción tiene más de 5.000 años de antigüedad. Las pirámides de Shersi en el Tíbet fueron construidas con mezclas compactadas de arcilla y cal. En la China y la India a lo largo de la historia, se ha utilizado de varias maneras la estabilización con cal.

Sin embargo, fue en los EE.UU., a finales de 1940; cuando se aplicaron a las mezclas de cal y suelo las técnicas y ensayos de la mecánica de suelos que se desarrollaban en aquella época. El tratamiento de arcillas con cal comenzó en 1950, y la técnica aumentó su popularidad con gran rapidez. Se han construido miles de kilómetros de carreteras, así como aeropuertos principales como el de Dallas Fort Worth, sobre arcillas estabilizadas.

Esta técnica también se practica extensamente en Sudáfrica, Australia, Nueva Zelanda, Alemania, Suecia y Francia.

Desde entonces, la estabilización de los terrenos arcillosos con cal se ha convertido en una alternativa económicamente beneficiosa a los métodos tradicionales de construcción. Los proyectos típicos que se han beneficiado de la estabilización con cal, incluyen:

- Autopistas, carreteras principales y secundarias.
- Pistas de aterrizaje y de servicio en aeropuertos
- Aparcamientos y explanadas de fábricas
- Estabilización de laderas
- Caminos vecinales, pistas forestales y caminos rurales
- Vías férreas
- Recuperación de muelles en desuso
- Recuperación de terrenos contaminados
- Rellenos estructurales.

1.2 LOS DIFERENTES TIPOS DE CAL

La palabra cal es un término general con el que se designan formas físicas y químicas de las diferentes variedades en que pueden presentarse los óxidos e hidróxidos de calcio y magnesio.

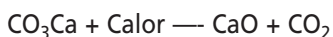
A efectos de clasificación se distinguen los siguientes tipos de cal:

1.2.1 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 CO₂ 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%.

1.2.2 CALES HIDRAÚLICAS: Endurecen en contacto con el agua. Obtenidas a partir de calizas que contienen arcillas (Sílice y Alumina). Durante la calcinación y la posterior hidratación se forman silicatos y aluminatos cálcicos de propiedades hidráulicas.

1.2.3 CALES UTILIZADAS PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS: Las cales utilizadas en la estabilización de suelos son CALES AÉREAS. Estas presentan las siguientes formas:

1.2.3.1 CALES VIVAS: Son cales aéreas que se componen principalmente de óxido de calcio y óxido de magnesio producidas por calcinación de la caliza.

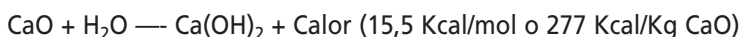


Se comercializan en grano (diferentes granulometrías) o molidas, incluso micronizadas. En contacto con el agua se hidratan siendo la reacción fuertemente exotérmica.

Cuando se utilizan calizas que también contienen en su composición carbonato de magnesio, una vez calcinadas se obtienen a la vez óxidos de calcio y de magnesio. Si el porcentaje de óxido de magnesio es > 5%, la cal se denomina CAL DOLOMITICA O DOLOMIA CALCINADA.

NOTA: Hay que tener en cuenta en la estabilización de suelos que el apagado de la cal dolomítica es más lento que el de la cal viva con porcentaje de óxido de magnesio <5%

1.2.3.2 CALES APAGADAS O HIDRATADAS: Son cales aéreas que se componen principalmente de hidróxido de calcio. Proviene de la hidratación controlada de cales vivas.



No dan reacción exotérmica en contacto con el agua y se comercializan en forma de polvo fino y seco o en lechada de cal (suspensión de agua y cal).

1.2.3.3 CAL EN FORMA DE LECHADA

Es la suspensión de cal apagada en agua. También puede obtenerse a partir de la cal viva que al mezclarla con agua dará cal apagada, formándose a continuación con el resto del agua la suspensión de lechada de cal. La proporción de cal apagada es tal, que tiene la apariencia de la leche, (150 a 400 g de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ por litro de agua). La cal puede ser utilizada bajo forma de lechada de cal en el tratamiento de los suelos cuando se quieran conseguir las siguientes ventajas:

- Supresión del polvo producido en el extendido de la cal
- Humidificación de los suelos secos.

La lechada de cal puede ser preparada en la propia fábrica o in situ, en depósitos o cubas equipadas de un sistema de agitación, a partir de cal viva o de cal apagada. Una vez preparada la misma, ésta se aplica directamente sobre el suelo.

1.2.3.4 CLASIFICACIÓN

Según la norma UNE 80-502-97 referente a CALES PARA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS, se establece el siguiente criterio de clasificación:

- CAL CLASE I.:** Cales vivas de alto contenido en calcio o cales vivas dolomíticas, en grano o micronizadas
- CAL CLASE II.:** Cales apagadas o hidratadas.

1.3 CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTALES DE LAS CALES PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS. NORMATIVA

1.3.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

FINURA: 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 el agua produce la cal hidratada lo que lleva, además, una autopulverización muy fina, incluso micronizada del producto. Además la finura puede intervenir en la reactividad de la cal.

1.3.2 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

EL CONTENIDO EN CaO: Es el componente fundamental de la cal. Puede estar, en forma de óxido CaO en las cales vivas, en forma de hidróxido $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en la cal apagada.

EL CONTENIDO EN MgO: Es igualmente interesante, ya que el óxido de magnesio posee en general una acción análoga a la del óxido de calcio. De igual manera puede estar en forma de óxido (MgO), o como hidróxido ($\text{Mg}(\text{OH})_2$)

REACTIVIDAD DE LA CAL VIVA: Indica la velocidad ó cinética de la reacción de hidratación. Es función de las características físicas y químicas del producto y depende de la porosidad de la cal, del grado de calcinación, de la materia prima (caliza) utilizada y de la finura de la cal en el momento del ensayo. El ensayo más empleado y conocido se basa en el carácter exotérmico de la reacción entre el CaO y el H_2O (Fig. 1).

- Otros componentes minoritarios de las cales son los carbonatos cálcico y magnesico que se evalúan mediante el contenido de CO_2 de las cales.

1.3.3 ESPECIFICACIONES DE CAL PARA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

Las especificaciones de los diferentes tipos de cales para ser utilizadas en la estabilización de suelos son objeto de la norma UNE 80-502-97. Las tablas que se incluyen a continuación contienen un resumen de las mismas.

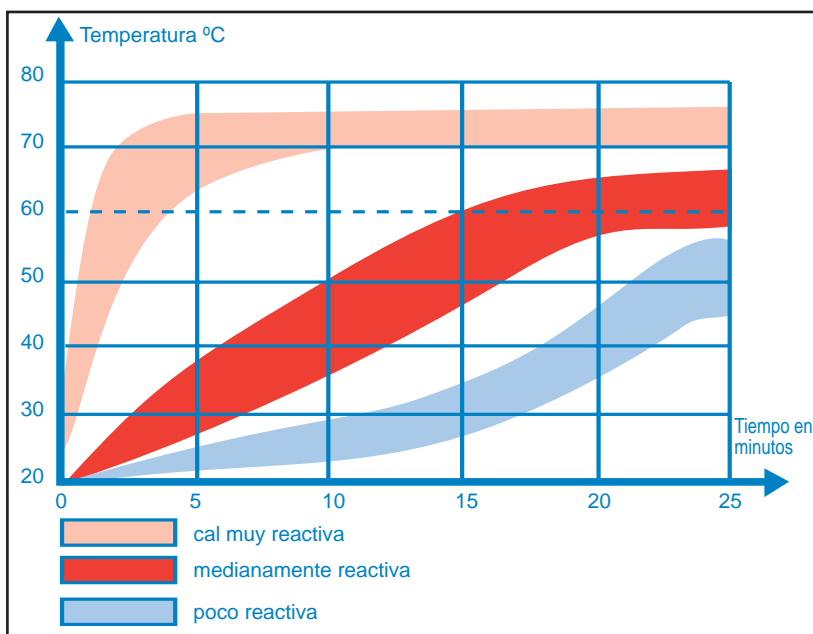


Fig. 1 - Curvas de apagado

Como se observa en la fig.1, la cal muy reactiva alcanza la temperatura de 60° C en tiempo igual o inferior a 5 minutos. Cuanto más alta sea la reactividad más rápida será su acción en la estabilización del suelo.

Tabla - 1 CAL CLASE I

CARACTERÍSTICAS	GRANO	MICRONIZADA
Contenidos en óxido de calcio y magnesio en muestras calcinada (1)	>90% en masa	
Contenido en dióxido de carbono en el punto de fabricación	<5% en masa	
Finura. Porcentaje acumulado retenido sobre:		
Tamiz UNE 6,3 mm	0%	0%
Tamiz UNE 0,2 mm	—	<10%
Reactividad. temperatura mínima:		
Cal viva con MgO < 5%	>60°C	
Cal dolomítica con MgO > 5%	>50°C	
El tiempo máximo para alcanzar la temperatura mínima en ambas	25 minutos	

(1) La determinación se realizará sobre muestra previamente calcinada en horno eléctrico a 975°C± 25°C

Tabla - 2 CAL CLASE II

CARACTERÍSTICAS	
Contenidos en óxido de calcio y magnesio en muestras calcinada (1)	>90% en masa
Contenido en dióxido de carbono en el punto de fabricación	<5% en masa
Finura. Porcentaje acumulado retenido sobre:	
Tamiz UNE 0,2 mm	<10%

(1) La determinación se realizará sobre muestra previamente calcinada en horno eléctrico a 975°C± 25°C

Así mismo, los artículos 200 "Cales aéreas", 204 "Cales para la estabilización de suelos", y 510 "Suelos estabilizados in situ con cal" del "Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes", (PG-3), vigente del Ministerio de Fomento reflejan lo anterior y las disposiciones normativas para la aplicación de la cal a la estabilización de suelos.

1.3.4 MÉTODOS DE ENSAYO PARA CALES

Los métodos de ensayo para las cales destinadas a la estabilización de suelos vienen recogidos en la Norma UNE 80-502-97. Los análisis químicos, granulométricos y de reactividad, se efectuarán de acuerdo con los procedimientos que define la norma.

Debido a las características del producto, se debe prestar especial atención al muestreo de las cales tanto en grano como molidas, teniéndose en cuenta los procedimientos señalados en la Norma UNE EN 459-2-95.

La recepción de las distintas clases de cales se hará de acuerdo con lo indicado en la "Instrucción para la recepción de cales en las obras de estabilización de suelos" vigente del Ministerio de Fomento

1.3.5 OTRAS CARACTERÍSTICAS DE LAS CALES

Densidad aparente	- Cal viva de 700 a 1.200 Kg/m ³ - Cal apagada de 300 a 650 Kg/m ³
Ángulo de talud natural	- Cal viva de 50 a 55° - Cal apagada 70°
Solubilidad en agua	Es muy pequeña y disminuye conforme aumenta la temperatura: - 1,2 g/l a 20°C para el CaO y 1,6 g/l para el Ca(OH) ₂ - 0,67 g/l a 80°C para el CaO y 0,9 g/l para el Ca(OH) ₂

2-LOS SUELOS

2.1 SUELOS APTOS PARA LA ESTABILIZACIÓN CON CAL

Se entiende por suelos a los materiales naturales constituidos por partículas o granos que pueden separarse fácilmente por simple trituración o eventualmente por la acción de una corriente de agua. Estas partículas o granos han sido generados por alteraciones mecánicas o fisicoquímicas de rocas madre de todas las naturalezas. Sus características pueden ser extremadamente variables según la naturaleza de la roca madre y sobre todo según el modo y grado de alteración (que se traduce por la presencia de fracción arcillosa más o menos importante y activa).

Es indispensable antes de comenzar cualquier trabajo con un suelo, tener el conocimiento más preciso posible sobre las características de los materiales que lo componen, de los problemas que estos materiales van a generar y de las soluciones que pueden adoptarse (por ejemplo el tratamiento de estabilización con cal).

Como norma general, se puede señalar que, para que la estabilización con cal sea eficaz, los suelos deben ser plásticos, y en este sentido se considera que, a partir de un Índice de Plasticidad, IP, igual o mayor de 10, el suelo es adecuado para reaccionar satisfactoriamente a su estabilización con cal, ya que éste es la clave para las reacciones químicas que proporcionan mejoras en las propiedades del suelo de forma inmediata y a largo plazo.

La caracterización de un suelo se lleva a cabo por medio de dos tipos de parámetros, conocidos como parámetros de naturaleza y parámetros de estado.

2.1.1 PARÁMETROS DE NATURALEZA

Se caracterizan porque no varían ni con el tiempo ni a lo largo de las manipulaciones que puedan realizarse a los suelos durante los trabajos, los más importantes son:

2.1.1.1 LA GRANULOMETRÍA O FINURA: Según la norma NLT-104, se realiza mediante un tamizado que permite conocer, para cada tamiz utilizado, el porcentaje en masa de partículas que pasan a través del mismo. Es importante conocer:

EL DIÁMETRO MÁXIMO.: (tamaño máximo de las partículas del suelo), que determinará la elección de la maquinaria más conveniente a utilizar así como el método de trabajo a emplear. Se puede afirmar que la operación de mezclado de suelos con diámetro máximo <50 mm se puede realizar con garantías suficientes de calidad y homogeneidad.

EL PORCENTAJE DE PARTÍCULAS QUE PASA POR EL TAMIZ UNE 80 μm : Permite, en cierta medida, evaluar el grado de su sensibilidad al agua y, junto con la plasticidad del suelo determinar su aptitud para la estabilización con cal.

2.1.1.2 LA PLASTICIDAD

Indica a la vez la cantidad y el grado de actividad de la fracción arcillosa que contiene un suelo.

Se puede medir con la ayuda de los siguientes parámetros (Fig. 2):

EL ÍNDICE DE PLASTICIDAD- (IP). Es el parámetro más utilizado y representa, de alguna forma, la

susceptibilidad de un suelo al agua y su comportamiento plástico. Su medición se realiza mediante la determinación de los límites de Atterberg (Normas NLT - 105 y 106) y se expresa como la diferencia entre el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP). En general un $IP < 12$ indica un suelo poco plástico y un $IP > 40$ indica un suelo muy plástico.

EL VALOR DEL AZUL METILENO (VA). Ensayo según la Norma NLT - 171, que consiste en medir la cantidad de azul metileno que es capaz de absorber la superficie de cada una de las partículas del suelo. El VA se expresa en gramos de azul de metileno por 100 gramos de suelo. En general un V.A. <2,5 indica un suelo poco plástico y un VA >8 indica un suelo muy plástico.

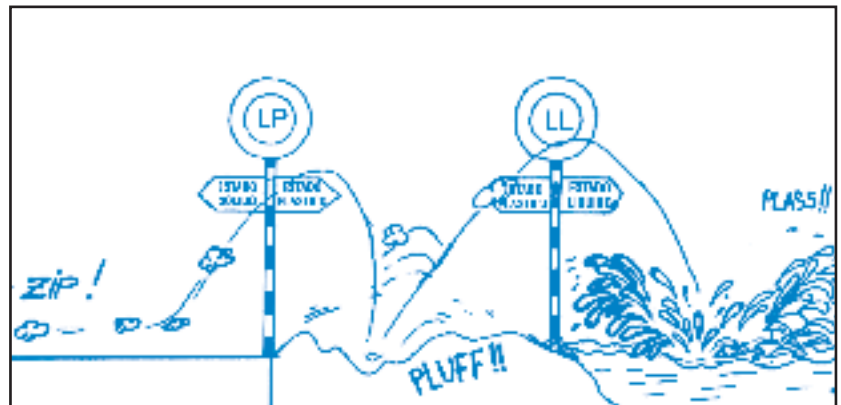


Fig. 2 - Plasticidad de los suelos.

2.1.1.3 EL HINCHAMIENTO

Es una característica propia de cada tipo de suelo. Se valora conforme a la Norma UNE 103601. Una estabilización efectiva con cal reducirá el hinchamiento del suelo a valores prácticamente nulos.

2.1.2 PARÁMETROS DE ESTADO

Estos parámetros no son propios de las características del suelo sino de las condiciones ambientales en que se encuentran. Para los suelos sensibles al agua, el parámetro de estado que determina todas las condiciones de los rellenos, terraplenes y explanadas de los viales es el ESTADO HÍDRICO. Su determinación no puede hacerse exclusivamente con el cálculo del contenido en agua natural, H , (según la Norma NLT - 102), sino que es necesario relacionarlo con el contenido de agua específico de suelo al que le corresponde un comportamiento particular. El método más corriente para indicar el estado hídrico de un suelo es referirse a los valores de los ensayos PROCTOR y CBR, realizados sobre cada suelo o clase de suelo a estudiar.

2.1.2.1 LA COMPACTACIÓN. EL ENSAYO PROCTOR: Cuando se compacta un suelo con una energía de compactación dada, se comprueba que su densidad seca (D), referida al suelo en estado seco, varía en función del contenido en agua (H) hasta alcanzar un máximo de densidad correspondiente a un contenido de humedad que se denomina óptimo. Para alcanzar igual densidad con una humedad

distinta a la óptima hay que emplear mayor energía de compactación.

La gráfica de la Fig. 3 representa la evolución de la densidad seca (D) en función de la humedad H . Los valores de D y H correspondientes al punto alto de la curva son los valores característicos del suelo para la energía de compactación empleada, y suelen servir de referencia en los pliegos de prescripciones.

En terraplenes se utiliza el ensayo PROCTOR NORMAL según la Norma NLT 107 y se les designa a estos valores como D_{OPN} y H_{OPN} .

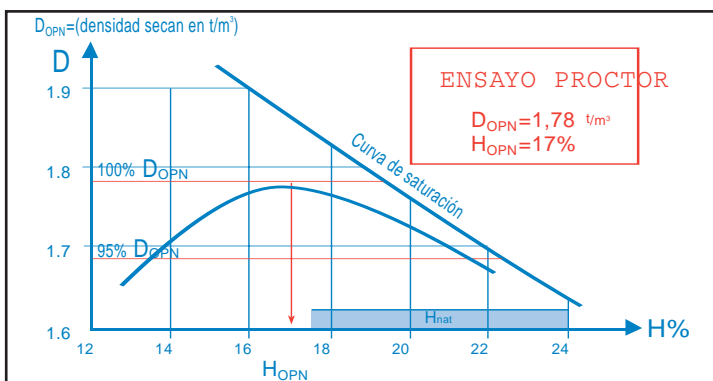


Fig. 3 - Curva del ensayo PROCTOR.

En las explanadas se utiliza el ensayo del PROCTOR MODIFICADO (según la Norma NLT 108), superior en energía al PROCTOR NORMAL y se obtienen los valores de D_{OPM} y H_{OPM} .

Algunos materiales poco sensibles al contenido en agua de compactación presentan una curva PROCTOR aplanada, otros al contrario, son más sensibles y presentan una marcada curva en campana. La densidad seca máxima sirve de referencia en la obra para calcular el grado de compactación según la fórmula: $T\% = D \times 100/D_{OPN}$ o D_{OPM}

donde D es la densidad seca alcanzada en obra. Como indicación, éste índice deberá ser:

$T > 95\%$ en terraplenes

$T > 100\%$ en explanadas.

Se aprecia la importancia a nivel práctico y económico de conocer la curva PROCTOR ya que permite determinar el estado hídrico del suelo por comparación de la humedad natural (H) con la humedad óptima (H_{OPN}):

Si $H < H_{OPN}$ Material seco que puede necesitar riego

Si $H > H_{OPN}$ Material húmedo que puede necesitar tratamiento con cal viva.

2.1.2.2 LA CAPACIDAD PORTANTE. EL ENSAYO CBR. Este ensayo permite evaluar la capacidad portante de un suelo.

El ensayo CBR (California Bearing Ratio), de origen americano, se realiza conforme a la Norma NLT-111 y consiste en medir la resistencia al punzonamiento de un suelo sobre las probetas confeccionadas por el procedimiento del ensayo PROCTOR y comparar los valores obtenidos con un valor de referencia patrón.

Se mide así la capacidad portante del suelo o lo que es lo mismo su capacidad de soportar una carga para cada pareja de valores de densidad-humedad. Se expresa por el índice portante CBR en % del

valor de referencia. Cuanto más elevado es el CBR más capacidad portante tiene el suelo.

NOTA: Existe un método operacional francés que permite, suprimiendo sobrecargas habitualmente utilizadas en el ensayo CBR, evaluar globalmente la capacidad portante y la aptitud a soportar el tráfico de la obra. El resultado se expresa por el IPI (Índice Portante Inmediato) calculado en % para cada pareja de valores densidad-humedad dados. (NFP94078)

Sobrepasando una cierta humedad el CBR e IPI decrecen pudiendo llegar a 0.

Esta demostrado que cuando el IPI alcanza valores inferiores a 5 ó 15 (según la naturaleza del suelo), la circulación de la maquinaria sobre la obra se torna imposible y en ciertos casos es absolutamente necesario un tratamiento de estabilización con cal viva.

En éste caso también se comprueba el interés de conocer el CBR ó IPI para tener una información clara del estado hídrico del suelo:

IPI elevado = Material con capacidad portante. Puede necesitar riego si esta seco.

IPI reducido = Material de poca capacidad portante. Puede necesitar tratamiento con cal viva si posee una humedad alta.

2.1.3 CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS

Una vez realizada la investigación de los suelos, es muy útil establecer una clasificación, por familias de materiales con comportamiento conocido, para establecer las condiciones de su empleo o utilización mediante tratamiento. Esta clasificación distinguirá los materiales rocosos de los suelos propiamente dichos y tendrá en cuenta el comportamiento de éstos materiales a la hora de definir sus condiciones de empleo, utilización o tratamiento más adecuado para ello tanto en rellenos y terraplenes como en explanadas.

Existen diferentes clasificaciones de suelos, siendo las más utilizadas las siguientes:

- P.R.A. (Public Road Administration U.S.A.)
- CASAGRANDE (Elaborada por Arthur Casagrande. Es la más conocida y adoptada por diversos organismos.
- L.C.P.C.- SETRA (Elaborada por los organismos franceses L.C.P.C. - SETRA en los años setenta, viene contenida en la norma francesa NFP 11300).
- ARTICULO 330 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de Carreteras y Puentes, (PG3), del Ministerio de Fomento.

Estas clasificaciones generalmente adoptan como criterios principales, los basados en la granulometría y plasticidad de los suelos, añadiéndose en algunas, los parámetros de humedad según el estado natural del suelo.

Las distintas clasificaciones presentan zonas que son susceptibles de correlacionarse entre sí.

En cuanto a su conocimiento para determinar si el tratamiento y estabilización con cal es el más adecuado, se puede poner la tabla indicada en la Fig. 4, aunque siempre que el Índice de Plasticidad (IP) sea superior a 10 puede esperarse un resultado satisfactorio del uso de la cal en la estabilización de los suelos.

Denominación de los suelos en los que el tratamiento y estabilización con cal es adecuado, (según las distintas clasificaciones)	CLASIFICACION			
	P.R.A.	CASAGRANDE	LCPC-SETRA	PG3
	A4	OL	A ₂	•Inadecuados próximos a Tolerables
	A5	OH	A ₃	
	A6	CL	A ₄	•Tolerables
	A7	MH	B ₆	

Fig. 4 - Denominación, según distintas clasificaciones, de los suelos adecuados para tratamiento y estabilización con cal.

3-ACCIÓN DE LA CAL SOBRE LOS SUELOS ÁMBITOS DE APLICACIÓN

3.1 LA CAL COMO SOLUCIÓN

En la construcción de carreteras, el aprovechamiento de los suelos naturales de la traza puede presentar dificultades debido a:

- El alto contenido de agua.
- La presencia de arcilla en los mismos.
- A la combinación de ambos elementos.

La importancia del contenido de agua es conocida por todos ya que, si es demasiado elevado, hace que la circulación de máquinas en obra sea difícil cuando no imposible y si es demasiado bajo la compactación resulta una operación difícil.

Los materiales que tienen arcillas en su composición, son conocidos por sus mediocres propiedades geotécnicas que, además, varían según las condiciones climáticas.

La cal aporta una solución interesante a la vez de económica a éstos problemas, ya que:

- La aportación de cal viva permite secar los suelos excesivamente húmedos.
- Utilizándola en sus diferentes formas (viva, apagada o en lechada), mejora y estabiliza las características de los suelos arcillosos a corto y largo plazo.
- Permite utilizar los suelos de la traza reduciendo o evitando el impacto ambiental debido a la extracción de otros suelos o al vertido de los procedentes de las excavaciones de la traza.

3.1.1 ACCIÓN SOBRE LOS SUELOS ARCILLOSOS

Los efectos de la cal sobre los suelos arcillosos pueden ser divididos en dos grupos principales:

- a) Debidos a reacciones rápidas (minutos/horas); es una estabilización por modificación (Fig. 5).
- b) Provenientes de reacciones a largo plazo (semanas/meses); pueden asimilarse a una estabilización por cementación.

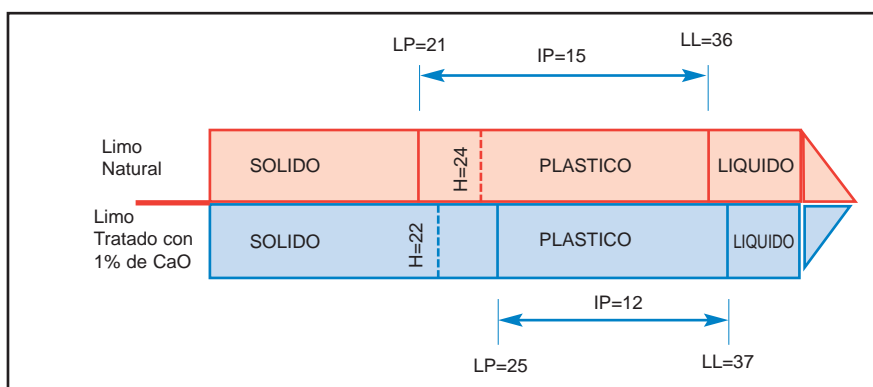


Fig. 5 - Acción de la cal sobre los límites de Atterberg.

Como consecuencia de los anteriores efectos, la acción de la cal produce un notable incremento de la resistencia y rigidez del suelo que pierde plasticidad y ductilidad.

La permeabilidad del suelo, que inmediatamente después del tratamiento podría ser considerado como un árido maleable que va cementando progresivamente con el tiempo, aumenta considerablemente a corto

plazo, pero progresivamente decrece a medida que van teniendo lugar las reacciones de cementación y, por tanto, se reduce la susceptibilidad al agua en gran manera, lo que es puesto en evidencia por las modificaciones del Índice de Plasticidad y de la retracción e hinchamiento del suelo.

3.1.1.1 MODIFICACIÓN INMEDIATA DE LAS PROPIEDADES GEOTÉCNICAS

El mecanismo de las reacciones rápidas es originado por los cambios fisicoquímicos debidos a la reacción de la cal con el suelo y que se producen por una suma de efectos complejos de cambios iónicos, neutralización y floculación.

Una vez incorporada la cal en el suelo, las finas partículas de arcilla se aglomeran en elementos más gruesos y friables. Este fenómeno se llama floculación y se explica por la formación de nódulos de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ entre

las finas laminas de arcilla, que provocan un intercambio iónico de los iones Na^+ de los suelos por los iones Ca^{++} de la cal.

En el laboratorio se comprueba por:

- disminución de la humedad natural del suelo (con cal viva).
- una disminución del índice de plasticidad (IP) o del valor del azul de metileno (VA) .
- aumento del límite plástico.
- disminución de la densidad máxima Proctor.
- un aumento del CBR
- un aplanamiento de la curva PROCTOR.

En obra se constata que los materiales húmedos pierden su carácter pegajoso y toman un aspecto arenoso. Su manipulación es más fácil y tanto su capacidad portante como su comportamiento en el extendido son netamente mejorados. En general una dosificación del orden del 1% de cal viva es suficiente en algunos casos para conseguir éstas modificaciones.

3.1.1.2 MODIFICACIONES A LARGO PLAZO DE LAS PROPIEDADES GEOTÉCNICAS

Los minerales de las arcillas son puzolanas naturales y tienen la capacidad de reaccionar con la cal añadida al suelo para producir compuestos cementantes.

La cal, al ser una base fuerte, eleva el pH del suelo por encima de 12 lo que produce un incremento en la solubilidad de sus componentes silíceos y aluminosos, que reaccionan con el calcio para formar silicatos cálcicos hidratados y aluminatos cálcicos hidratados similares a los formados en la pasta del cemento.

Esta reacción de tipo "Puzolánico", es progresiva con el tiempo y aumenta la impermeabilidad, la resistencia mecánica y la resistencia a las heladas.

En el laboratorio se constata por:

- aumento adicional del C.B.R.
- aumento de la resistencia al corte, a tracción y de compresión no confinada.
- una mejora de la estabilidad, disminuyendo la dilatación y la contracción
- una mejora de la resistencia a las heladas.

La duración de esta reacción depende de la temperatura ambiente y de la naturaleza de la arcilla. Se sitúa normalmente entre algunos meses y dos años (Fig.6).

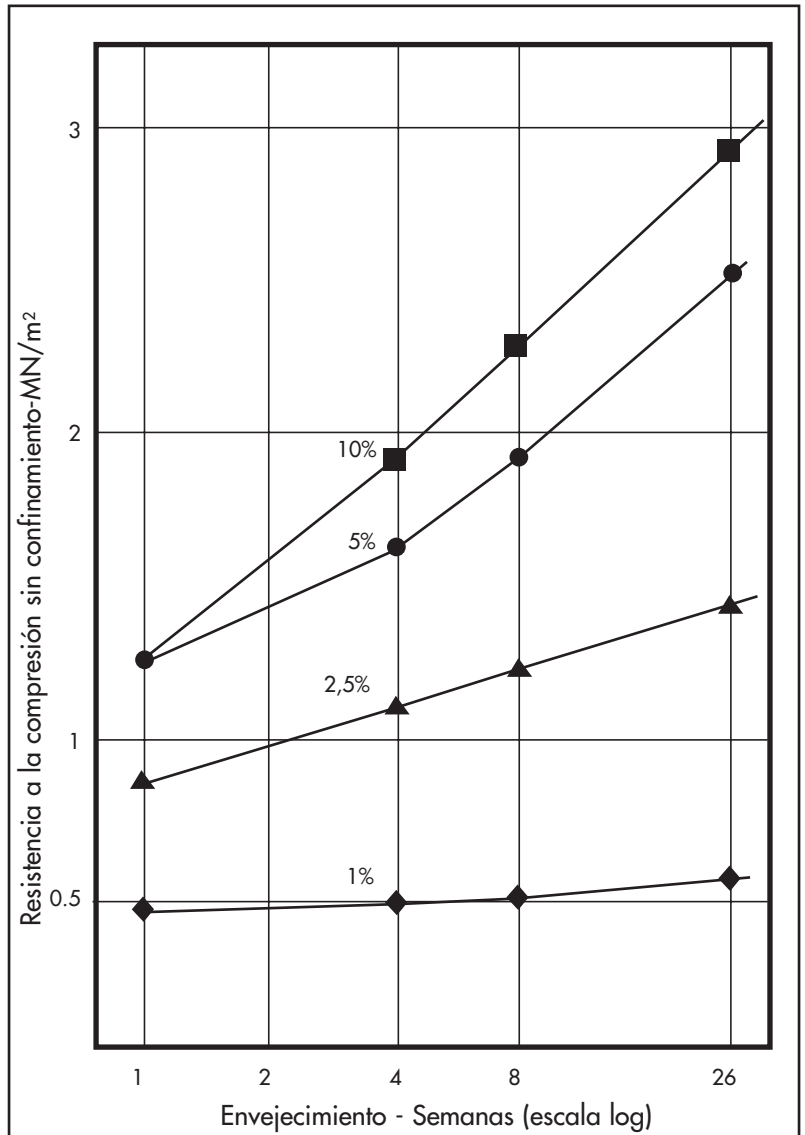


Fig. 6 - Incremento de resistencia con el tiempo en un suelo estabilizado con cal.



3.1.2 ACCIÓN SOBRE LA CRETA HÚMEDA

Definición

La creta es una roca sedimentaria blanca constituida por una caliza friable y blanda que contiene arcilla y resultante del depósito de organismos y de fragmentos detríticos menudos constituidos por carbonato de calcio. Es porosa, liviana, poco consistente y se caracteriza por una importante producción de finos durante su molienda. Cuando su contenido de humedad es elevado, éstos finos tienen el aspecto de una pasta.

Acción sobre el contenido de agua

Al igual que para los suelos arcillosos húmedos, la cal viva disminuye su contenido en agua bajo la acción combinada de tres fenómenos:

- aporte de producto seco.
- consumo de agua necesaria para la hidratación de la cal.
- evaporación del agua debido al calor generado en la reacción de hidratación.

En teoría, el aporte de un 1% de cal viva disminuye el contenido de humedad en cerca del 1%, pero en la práctica la evaporación producida durante la operación del mezclado puede bajar el contenido de agua hasta el 4 ó 5% si las condiciones meteorológicas son favorables durante el mezclado. La pasta de creta pierde entonces su carácter pegajoso y se vuelve arenosa mejorando su capacidad portante, lo que facilita su manipulación.

Modificaciones de las propiedades geotécnicas

La acción de la cal viva es doble:

- Produce un secado y aumento del pH que provoca la precipitación, bajo forma de cristales de calcita, (carbonato de calcio).
- Carbonatación progresiva de la cal tras su hidratación.

Se forma entonces una red de cristales de calcita que tapizan los nódulos de creta y constituyen progresivamente vínculos que aumentan la cohesión de la creta tratada.

En el laboratorio, se verifica por:

- Un aumento del C.B.R..
- El mantenimiento a un nivel elevado de su capacidad portante tras la inmersión prolongada en agua, gracias a la baja solubilidad de los cristales de calcita nuevamente formados.

Ámbitos de aplicación del tratamiento con cal de la creta húmeda

La aplicación de éste tipo de tratamiento es en la reutilización de cretas húmedas en terraplén. La acción simultánea sobre el contenido de agua y sobre las propiedades geotécnicas permite, para una dosificación de cal viva que varía entre el 1 y 3% (según el contenido de agua), transformar en minutos un material frágil, pastoso y sin consistencia, en un material arenoso, fácil de manipular y con una capacidad portante adecuada.

El tratamiento con cal puede servir igualmente para reutilizar las cretas húmedas en la realización de tongadas-soporte de nivelado de las explanadas. Si se requiere una mayor rigidez y consistencia, puede realizarse con las cretas húmedas un tratamiento mixto que consiste en un primer tratamiento con cal viva para disminuir el contenido de agua y mejorar sus propiedades geotécnicas y, en una segunda fase, realizar un tratamiento con cemento para la reutilización del material como explanadas o como bases rígidas.

3.1.3 ACCIÓN SOBRE EL CONTENIDO DE AGUA

Depende del tipo de cal utilizada que se determina en función del contenido de agua natural del suelo a tratar.

3.1.4 CASO DE SUELOS ARCILLOSOS CON EXCESO DE HUMEDAD

Se busca disminuir el contenido de agua para acercarse a las condiciones óptimas de reutilización. Para ello, se utiliza cal viva que disminuye el contenido de agua por la acción combinada de:

- aporte de producto seco.
- consumo del agua necesaria para producir la reacción de hidratación de la cal viva.
$$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{desprendimiento de calor}$$
- evaporación del agua del suelo debida al calor producido en ésta reacción.

La eficacia del tratamiento con cal viva es máxima cuando la humedad natural del suelo está en el intervalo de 1,3 a 1,1 H_{opn}, o cuando dicha humedad natural está próximo al contenido de agua correspondiente al Límite Plástico del suelo. Si la humedad natural es mayor que los valores citados anteriormente habrá que añadir mayores dosificaciones de cal viva para secar el suelo.



En teoría, el aporte de un 1% de cal viva disminuye el contenido de humedad en cerca del 1%. En la realidad, durante la operación del mezclado de la cal con el suelo se produce una importante aireación que suele acentuar la evaporación del agua. Por ello, está comprobado que el contenido de agua puede bajar hasta el 4 ó 5% con la adición del 1% de cal viva si las condiciones meteorológicas son favorables durante la operación de mezclado.

3.1.5 CASO DE SUELOS ARCILLOSOS SECOS

Se busca, mediante el tratamiento con cal, adecuar los materiales arcillosos con contenidos en agua próximos a la humedad óptima Proctor. En éste caso, la utilización de cal viva puede no ser recomendable ya que estos suelos podrían necesitar un riego posterior al mezclado para compensar la pérdida de agua producida en la hidratación de la cal y seguir manteniendo las condiciones óptimas para su compactación. En ciertos casos, éste riego puede ser costoso y difícil de realizar en obra por lo que se recomienda, en lugar de cal viva, la adición de cal apagada (que no disminuye la humedad del suelo) o de lechada de cal (si se quiere aumentar la humedad natural del suelo). En general para suelos secos, la lechada de cal es más ventajosa ya que el aporte de cal y de agua se realiza en una sola operación. Esto permite adaptar la fórmula de adición durante el mezclado variando la concentración de la lechada. Esta concentración se expresa en extracto seco porcentual de la siguiente forma:

$$ES = \text{Peso de cal apagada} \times 100 / \text{Peso de la lechada}$$

Los procedimientos de fabricación actuales permiten variar el ES entre 30 y 40%.

En definitiva la selección de cal viva y riego frente a la utilización de cal apagada o de lechada de cal deberá efectuarse en función del costo y rendimiento de cada opción.

3.1.6 ÁMBITO DE APLICACIÓN DEL TRATAMIENTO CON CAL EN SUELOS ARCILLOSOS

Cuando se dispone de suelos arcillosos con exceso de humedad, el tratamiento con cal viva permite transformar en unos minutos un material blando, pegajoso y sin consistencia, en un material friable, fácil de manejar y con una excelente capacidad portante. Este es el efecto inmediato, espectacular y bien conocido del tratamiento con cal viva que permite la reutilización, como material de relleno ordinario, de materiales inservibles.

Se pueden también aprovechar las mejoras que se producen a largo plazo con la estabilización a la cal, para realizar terraplenes o partidas más comprometidas como:

- terraplenes de gran altura.
- terraplenes en zonas inundables.
- uso en explanadas, etc.

En los suelos que reaccionen bien con la cal, la utilización del material se puede aplicar para caminos de obra, explanadas y en bases de carretera. Si la exigencia de las prestaciones por motivos de tráfico o climáticos es muy elevada y se requiere un endurecimiento rápido de las capas tratadas se puede realizar a continuación un tratamiento con conglomerantes hidráulicos.

Se procede entonces al tratamiento mixto, cal + cemento de los materiales arcillosos, que produce:

- En una primera fase, la cal modifica el estado del suelo, floclula las arcillas y vuelve friable los materiales.
- En la segunda fase nos encontramos con que los materiales están en condiciones ideales para poder ser tratados (con garantía de homogeneidad de mezclado) con un cemento que mejorará las prestaciones mecánicas del suelo a corto plazo.

4-LOS ESTUDIOS PARA EL TRATAMIENTO

4.1 LA NECESIDAD DE UN ESTUDIO ESPECÍFICO

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

- Las características de los suelos.
- El destino de los materiales tratados (rellenos, explanadas, bases/sub-bases, capas de rodadura). Para ello, es necesario un estudio geotécnico y de las características del suelo lo más preciso posible. Se puede realizar entonces el estudio de formulación que indica la dosificación de cal más idónea y el tipo de ésta más conveniente por las características de la obra.

Como en todo estudio de ingeniería civil, sus diferentes fases, sin ser particularmente complejas, deben ser realizadas e interpretadas respetando ciertas reglas que necesitan la intervención de personal experimentado.

4.2 ESTUDIO GEOTÉCNICO

Tiene el fin de proporcionar a partir de sondeos de reconocimiento y de pruebas de laboratorio, una descripción de los suelos principalmente para:

- Su agrupamiento en familias homogéneas y representativas de acuerdo con la clasificación correspondiente.
- Determinar las características geotécnicas con su estado hídrico posible en el momento de los trabajos.
- Acotar las zonas de cada tipo de suelo así como los volúmenes disponibles del mismo.

La profundidad y duración del estudio se determinarán en función de la importancia y complejidad del proyecto así como del buen conocimiento del contexto geológico.

El estudio debe indicar la presencia o no de los elementos susceptibles de influir en el tratamiento como:

- Materia orgánica,
- Sulfuros y Sulfatos, en este sentido, cuando los compuestos totales de azufre, expresados como sulfatos sobrepasen el 1% en masa del suelo original pueden causar en presencia de agua una reacción secundaria que origine hinchamientos y fisuración de la mezcla estabilizada, por lo que en este caso, se deberán realizar los ensayos previos oportunos en las condiciones más parecidas posibles a las que van a estar sometidos los suelos estabilizados en la obra.

La reacción anterior depende fundamentalmente de los siguientes factores:

- Tipo y solubilidad de los compuestos de azufre, (sulfuros oxidables y sulfatos).
- La cantidad total de sulfuros y sulfatos presentes.
- La cantidad y tamaño de las partículas de arcilla existentes y su naturaleza.
- La capacidad del suelo para absorber el agua existente encima de la superficie compactada y de que las aguas penetren en la capa estabilizada.

Los sulfatos también pueden estar contenidos en las aguas subterráneas, por lo que a veces es necesario analizar éstas.

La posibilidad de que las aguas subterráneas penetren en el suelo estabilizado con cal tiene una importancia fundamental. Para evitarlo, es esencial que el suelo estabilizado quede compactado con un porcentaje de huecos no superior al 5%, por lo que, para ello, deberá prestarse una gran atención a la humedad del suelo en el momento de la compactación.

En función de los resultados obtenidos, se pueden aplicar soluciones que eviten la penetración del agua o aceleren las reacciones agresivas antes de la compactación final a fin de evitar los efectos nocivos de dichas reacciones.

- Nitratos (abonos), en el caso de prever un tratamiento mixto cal + cemento.
- Cloruros (sal gema), etc., también para el caso de tratamiento mixto cal + cemento.

El estudio deberá permitir seleccionar las muestras más representativas de los diferentes materiales con las que se realizarán los estudios de formulación propiamente dichos.

Este estudio es fundamental a nivel del proyecto, puesto que de sus resultados se podrá deducir:

- Los materiales susceptibles de ser estabilizados y tratados con cal.

- En una primera aproximación, la dosificación de la cal y el tipo más indicado de ésta.
Entre las informaciones esenciales sobre las características de los suelos que debe contener el citado estudio, estarán:

- La granulometría del suelo, según la Norma NLT - 104.
- Porcentaje de suelo que pasa por el tamiz 0,080 UNE, según la Norma NLT 104
- Los límites de Atterberg del suelo según las Normas NLT 105 y NLT 106 y calculo del Índice de Plasticidad.
- El Ensayo Proctor Normal del suelo sin estabilizar según Norma NLT 107.
- La determinación del CBR del terreno sin estabilizar según Norma NLT 111.

NOTA: Utilizando los valores correspondientes al porcentaje de suelo que pasa por el tamiz 0,080 UNE y los límites de Atterberg, se puede calcular el llamado Índice de Grupo del suelo, que constituye uno de los valores empíricos utilizados para medir la mayor o menor adecuación del suelo para su tratamiento con cal.

El Índice de Grupo se calcula mediante la fórmula.

$$IG = 0,2 a + 0,005 a c + 0,01 bd$$

donde

a: El porcentaje del suelo que pasa por el tamiz 0,080 UNE y excede del 35% pero no supera al 75%, expresado como un número entero positivo (Estará entre 0 y 40)

b: El porcentaje del suelo que pasa por el tamiz 0,080 UNE y excede del 15% pero no supera el 55%, expresado como un número entero positivo (estará entre 0 y 40)

c: La cantidad en que el límite líquido es mayor de 40 sin exceder de 60, expresado como un número entero positivo (estará entre 0 y 20)

d: La cantidad en que el Índice de Plasticidad es superior a 10 sin exceder de 30, expresado como un número entero positivo (estará entre 0 y 20)

El siguiente ejemplo sirve como aclaración:

Un suelo que tiene el 65% pasando por el tamiz 0,080 UNE, un límite líquido de 32 y un Índice de Plasticidad de 13.

El Índice de Grupo se calcula como sigue:

$$a = 65 - 35 = 30$$

$$b = 55 - 15 = 40 \text{ (55 ha sustituido al valor del límite líquido de 65, porque el intervalo considerado es 15 - 55 para este cálculo)}$$

$$c = 0, \text{ puesto que el límite líquido es menor de 40.}$$

$$d = 13 - 10 = 3$$

$$IG = 0,2 \times 30 + 0,01 \times 40 \times 3 = 7,2 \text{ que redondeando al número entero más próximo da } IG = 7.$$

El valor del Índice de Grupo puede oscilar entre 0 y 20. Si el Índice de Grupo es igual o mayor que 4, el suelo puede ser ventajosamente estabilizado con cal.

Después de su tratamiento con cal, el Índice de Grupo del suelo estabilizado deber ser próximo a 0.

4.3 IDENTIFICACIÓN DE LA CAL

Es indispensable conocer perfectamente las características de la cal consideradas en el estudio de formulación, que, evidentemente, deberán ser idénticas a las de la cal que finalmente será utilizada en obra.

4.3.1 CALES AÉREAS

Las características de las cales aéreas para la estabilización de suelo son objeto de la norma UNE 80-502-97 (Ver Apartado 1.3.3).

Dado el carácter evolutivo de la cal en ambientes húmedos, se evitara la utilización de cales que hayan permanecido almacenadas en malas condiciones o cuando existan dudas sobre su buen estado de

conservación. En caso de duda, se deberá verificar:

PARA LAS CALES VIVAS

- la reactividad al agua. Su valor descenderá si ha habido hidratación y recarbonatación.
- el contenido en CO₂

PARA LAS CALES APAGADAS

- el contenido de CO₂. Un aumento de su valor indicará que ha habido recarbonatación.
- la humedad a 110°C.

EN LAS LECHADAS DE CAL, sus características (esencialmente su concentración), vienen determinadas en función de las demandas reales de los materiales en el momento de los trabajos. Por lo tanto, solamente se medirá en ellas:

- su concentración expresada en extracto seco (ES)

4.4 OTROS ESTABILIZADORES BASADOS EN LA CAL

Se trata de materiales especiales que comportan en su composición una cantidad importante de cal, convenientemente fabricados para responder a las necesidades específicas de las técnicas de construcción de carreteras. Es recomendable proceder a una identificación exhaustiva de estos productos, conforme a las normas o documentos técnicos, antes de su utilización en la obra.

Generalmente, se tratan de mezclas formadas por:

- escoria granulada de alto horno + cal + áridos
- cenizas volantes silico - aluminosas + cal + áridos
- cenizas volantes sulfo - cálcicas + áridos
- puzolanas molidas + cal + áridos.

En cualquier caso se recomienda identificar perfectamente estos tipos de materiales siguiendo los procedimientos en vigor.

4.5 ESTUDIO DE FORMULACIÓN

El principio general de un estudio de formulación, para un suelo dado, consiste en estudiar la evolución de los rendimientos mecánicos de la mezcla suelo-cal en función de:

- el tipo de cal (clase y dosificación)
- las características de la mezcla (densidad y humedad)
- tiempo de conservación
- modo de conservación (ambiente, inmersión, hielo, deshielo, etc)

En caso de presencia en el suelo de elementos capaces de perturbar la acción de la cal, el estudio de formulación debe permitir evaluar las consecuencias que pueden desprenderse y las medidas que deben adoptarse.

Si se tienen dudas al respecto, además del análisis de los componentes del suelo, se procederá a una prueba controlada en el laboratorio de la inmersión de la mezcla suelo-cal.

De este modo, el estudio de formulación concluye con la elección de la cal apropiada y de las dosificaciones a usar en función de cada aplicación (terraplenes, explanadas, sub-bases, bases, capas de rodadura) y de las prestaciones exigidas para cada tipo de aplicación.

4.5.1 CAL VIVA O CAL HIDRATADA: Tanto la cal viva como la cal hidratada se pueden utilizar para la estabilización de los suelos.

Las ventajas relativas de cada clase que aconsejara su elección son las siguientes:

- Para la cal viva:
 - Tiene mayor contenido de cal útil por unidad de masa que la cal hidratada. Para las cales altas en calcio, usadas en la estabilización de suelos según Norma UNE 80502/97, un 3% de cal viva equivale a un 4% de cal hidratada.
 - Reduce el contenido de humedad de los suelos húmedos.
 - Produce menos polvo que la cal hidratada.
 - Es más densa que la cal hidratada.

- Lo anterior reduce los costes de almacenamiento y transporte.
- Por contra, la cal viva exige mayores medidas de seguridad durante su transporte y puesta en obra.
- Para la cal hidratada:
 - Tiene un tamaño medio de partícula mucho más pequeño que el de la cal viva molida y se dispersa rápidamente en el suelo durante el mezclado
 - En condiciones de terreno seco, puede ser ventajoso añadir la cal hidratada o la lechada de cal si el resto del riego es suficientemente alto
 - Exige menos precauciones de seguridad que la cal viva.

4.5.2 DOSIFICACIÓN DE CAL

El procedimiento para encontrar la dosificación óptima de la cal, se basa en criterios de resistencia. El más utilizado es el índice de resistencia CBR.

Asimismo, se comparan los CBR del suelo sin estabilizar y el del suelo estabilizado con una dosificación de cal que permita obtener el CBR exigido para el suelo tratado. Esta comparación permitirá conocer la mejora del suelo conseguida con el tratamiento.

El procedimiento puede tener operativas diferentes según se trate el material para terraplén o para explanadas.

Un método rápido para determinar el porcentaje de cal con cierta aproximación es el que viene dado en la Norma A-55.M, C-977

4.5.2.1 CASO DE TERRAPLENES

Se busca la dosificación de cal capaz de conferir, al suelo a estabilizar, una capacidad portante inmediata y suficiente que permita soportar el tráfico de la obra y de conseguir las compactaciones proyectadas. Es la aplicación privilegiada de la cal viva.

Se puede utilizar la evolución del Índice Portante Inmediato (CBR sin sobrecargas), según la Norma Francesa NFP 94078, en función de la dosificación de cal para diferentes contenidos de agua representativos del estado natural. Los resultados se presentan en una tabla o traducidos en un ábaco indicando, para un contenido de agua dado, la dosificación necesaria de cal para obtener la capacidad portante necesaria que suele corresponder, en general, a un Índice Portante Inmediato > 10 para soportar el tráfico de obra.

También se puede buscar la dosificación en cal necesaria para que el suelo, tratado y compactado con la energía del ensayo Proctor Normal, alcance un valor CBR, (obtenido con punzonamiento inmediato a la confección de la probeta), suficiente para permitir una puesta en obra en buenas condiciones. El valor del CBR admisible generalmente está comprendido entre 5 y 15 según las características de la obra.

Por razones prácticas ligadas a la dimensión de los moldes de laboratorio, los estudios se hacen con la fracción 0/20 mm de los materiales.

Las dosificaciones de cal viva expresadas como porcentaje del suelo seco, normalmente recomendadas, varían entre 1 y 3% según el contenido de agua del suelo, o entre 2 y 4% de cal hidratada.

4.5.2.2 CASO DE EXPLANADAS

Cuando las arcillas del suelo reaccionan particularmente bien con la cal (caso de ciertas margas y margas-calcareas) se obtiene, después del tratamiento, unos resultados mecánicos suficientes para autorizar su utilización en explanadas, en estos casos se recomienda que:

Si el suelo está demasiado húmedo se use la cal viva para conferirle en primer lugar una capacidad portante inmediata, indispensable para una correcta circulación por la obra.

Si el suelo está seco se recurrirá a la cal apagada o a la lechada de cal.

En los dos casos, se estudia la evolución del CBR, después de la inmersión de las probetas durante cuatro días en agua, en función de la dosificación de cal para distintos contenidos en agua. En regiones templadas, sometidas a heladas poco intensas, la experiencia muestra que un CBR > 20,

obtenido tras la inmersión en agua, es suficiente para la utilización de estos materiales.

4.5.2.3 CASO DE EXPLANADAS CON TRATAMIENTO MIXTO CAL-CEMENTO

Se busca la dosificación capaz de conferir al suelo a estabilizar:

- en caso de humedad natural elevada, la capacidad portante inmediata suficiente para autorizar el tráfico sobre la obra.
- la resistencia mecánica final exigida para un material de explanada.

En realidad es utópico buscar una estabilización única que responda a éstas dos exigencias ya que el contenido natural en agua de los suelos es raramente constante y homogéneo.

La experiencia en este campo asegura que, un pre-tratamiento con cal de los suelos arcillosos húmedos o secos, facilita notablemente el tratamiento con otros ligantes hidráulicos (Tratamientos mixtos) y mejora en gran medida el nivel de los rendimientos finales.

En este caso, el estudio se descompone en dos fases sucesivas:

- Búsqueda de la capacidad portante inmediata.

Cuando el material es húmedo, es necesario hacerlo apto para soportar el tráfico de la obra. Es de nuevo un ámbito privilegiado para la cal. El estudio se realiza según el mismo método que para la utilización de los suelos en terraplenes.

- Búsqueda de la resistencia mecánica exigida

Se estudia la evolución de la resistencia mecánica del suelo tratado a 7, 28, incluso a 90 días según la rapidez de la reacción en función de la dosificación del cemento, de los márgenes supuestos de variación de los contenidos de agua y de las densidades y de los riesgos de helada o inmersión. El parámetro habitualmente considerado es la resistencia a compresión (R_c) medida en probetas cilíndricas:

Se proyecta en el futuro, pasar a la medida de la resistencia a la tracción (R_t) más representativa del modo de funcionamiento de las capas rígidas. Los valores de R_c y R_t a obtener, están ligados especialmente a la naturaleza de los materiales estudiados y a las condiciones climáticas a las que se verán sometidos después del tratamiento (inmersión, hielo, etc). De todos modos, se consideran admisibles $R_c > 1$ a 2 MPa (correspondientes aproximadamente a $R_t > 0,1$ a 0,2 MPa).

Con los limos se alcanzan generalmente estos resultados antes de 28 días para dosificaciones del orden del 1 al 2% de cal más 4 al 6% de cemento.

4.5.2.4 CASOS DE SUBBASES Y BASES

La tarea es la misma que la presentada en las explanadas, pero generalmente con niveles de exigencia (especificaciones) más altos. Los estudios son más amplios, ya que se presta un mayor interés a la resistencia a tracción R_t del material asociado al módulo de deformación E_t , parámetros utilizados en el dimensionamiento de las carreteras.

Además, si el proyecto lo justifica, se procede a un estudio de comportamiento a la fatiga.

Todo estudio de formulación debe estar precedido por una identificación de los suelos.

4.5.3 ENSAYO A ESCALA REAL

En ciertos casos, la presencia de piedras grandes, una proporción demasiado elevada de terrones gruesos o una plasticidad particularmente elevada, puede poner en duda la fiabilidad del estudio de laboratorio.

Si los medios técnicos y económicos lo permiten, se recurrirá a un tramo experimental a escala real, para estudiar y responder con una mayor precisión a diferentes cuestiones como:

- La posibilidad real de mezclado y la maquinaria a utilizar.
- El método de compactación, equipo a emplear y número de pasadas.
- La aprobación de los equipos y los métodos que han de utilizarse en la obra.

4.5.4 PLAZO DE EJECUCIÓN DE ESTUDIOS EN LABORATORIO

En el siguiente cuadro, se dá una estimación de los tiempos para la ejecución de los estudios en laboratorio de la estabilización de suelos con cal.

PLAZO DE EJECUCIÓN DE ESTUDIOS EN LABORATORIO			
OBJETO DEL ESTUDIO		CANTIDAD DE MATERIAL FRACCIÓN 0/20 mm	DURACIÓN
IDENTIFICACIÓN GEOTÉCNICA COMPLETA DEL SUELO		100 a 150 Kg	2 Semanas
ESTUDIOS DE FORMULACIÓN	TERRAPLENES	100 a 150 Kg	1 Semana
	EXPLANADAS	100 a 150 Kg	1,5 a 3 Meses
	SUB-BASES Y BASES	200 a 400 Kg	1,5 a 3 Meses

5-LAS TÉCNICAS DE EJECUCIÓN



5.1 CONDICIONES A TENER EN CUENTA

Cuando la conclusión final de un estudio es realizar el tratamiento con cal, debe hacerse una reflexión previa al comienzo de los trabajos. A parte de las consideraciones habituales que intervienen en la preparación de una obra, es necesario tener en cuenta un cierto número de aspectos específicos de la técnica tales como:

- El periodo de ejecución de las obras, donde se tendrá en cuenta la velocidad de reacción de los materiales a usar en el tratamiento y los riesgos de heladas o derivados del clima.
- La protección del personal de la obra y de las personas en las cercanías de los trabajos contra posibles perjuicios (ver CAPÍTULOS nº 6, 7 y 10).
- La elección del modo de tratamiento.
- La secuencia de las operaciones en casos de tratamientos mixtos cal + cemento ó cuando el espesor de la capa a estabilizar es superior a la profundidad de la acción del mezclador.
- Las modalidades de compactación y nivelación, la naturaleza de las protecciones superficiales a aplicar sobre las explanadas (ver CAPÍTULO nº 9)
- La preparación, si fuera necesaria, de los suelos a tratar (ver CAPÍTULO nº6)
- La constitución y el dimensionamiento del equipo para el tratamiento.

5.2 FORMAS DE TRATAMIENTO

La estabilización de suelos con cal puede hacerse principalmente de dos formas diferentes según el lugar y método de mezcla utilizado.

- a) Mezcla in situ.
- b) Mezclado en instalación central o en plantas móviles.

El tipo de suelo, la situación de la obra y la disponibilidad de equipos son parámetros fundamentales para la selección del método de tratamiento.

El mezclado en planta puede resultar idóneo si se está utilizando el suelo de préstamo de una cantera y se está tratando antes de su colocación. .

El sistema de mezclado in situ es el más extendido en Europa.

La estabilización in situ se realiza generalmente en el lugar donde va a estar el suelo estabilizado, bien directamente con el suelo excavado de la explanada o con material de préstamo depositado para el relleno de la excavación.

También, si es necesario, el material de préstamo o almacenado fuera del lugar final de colocación puede ser tratado primero con cal en su situación inicial y luego recogido, transportado y compactado en la zona a rellenar.

En este caso, no se debe permitir que el material tratado se seque durante su transporte, y se deberá cuidar que durante su recogida no se excave también suelo no tratado situado por debajo del citado material.

Las operaciones anteriores de transporte del suelo mezclado con la cal al lugar de puesta en obra y su colocación son maniobras que tienen, a su vez, una acción de mezcla y homogeneización.

En todos los casos, el material debe ser tratado y colocado por capas de espesor compatible con las operaciones de mezclado y compactación.

La estabilización in situ se realiza en las siguientes fases:

- 1ª fase: Escarificación o esponjamiento del suelo o del préstamo y su colocación en capas compatibles con el mezclador.
- 2ª fase: Adición y extensión de la cantidad, calculada en los estudios de laboratorio, de la cal mediante máquina, a partir de sacos o cisternas de polvo seco, de lechada de cal, etc, controlando la dosificación.
- 3ª fase: Mezclado del suelo y la cal en todo el espesor de la capa mediante las pasadas necesarias para lograr su homogeneidad. Se utilizan pulvimezcladores, rotabator, escarificadores, gradas de disco, etc.

Si el suelo ha sido mezclado con cal fuera de su lugar final de colocación, recogida y transporte al mismo.

4ª fase: Compactación y curado de la mezcla suelo cal con las máquinas apropiadas.

La estabilización en planta, se realiza según las siguientes fases:

1ª fase: Mezclado del suelo con una dosificación exacta de la cal en la mezcladora.

2ª fase: Transporte y puesta en obra en la capa correspondiente.

3ª fase: Compactación mecánica y curado de la forma habitual.

Este segundo método tiene sobre el primero las siguientes ventajas:

- El suelo se puede mezclar de una vez sin importar la profundidad de la capa que estará limitada solo por los medios de compactación y no por los de mezclado.
- Se reducen los tiempos de espera y cambios de maquinaria.
- La maquinaria de compactación es más versátil que la de mezclado por lo que es más frecuente su existencia en el parque de maquinaria.

5.3 COMPOSICIÓN DEL EQUIPO PARA EL TRATAMIENTO CON CAL

El equipamiento básico, es el siguiente:

- Silo de almacenamiento de la cal (Fig. 7)
- Si fuera necesario, un Buldozer o Motoniveladora de media potencia con rastrillo ó arado.
- Extendedora de la cal (Fig. 8).
- Mezcladora del suelo y la cal (Fig. 9)

A esto, se le añade el material propio de la realización de la obra:

En Terraplenes o Rellenos:

- Equipo de extracción + transporte (Buldozer + Pala mecánica)
- Buldozer para la explanación de las capas.
- Compactador/es.

En Plataformas, Explanadas, y Bases:

- Regadora
- Compactador/es
- Niveladora
- Equipo para la evacuación de los materiales excedentes después de la nivelación
- Material para la protección de la superficie.

5.4 FASES DE PUESTA EN OBRA

El tratamiento del suelo se utiliza en una gran variedad de materiales y con diversas técnicas de ejecución que se organizan según una sucesión de fases elementales que son:

- Preparación del suelo (disgregación, acción sobre la humedad, eliminación de terrones, etc).
- Almacenamiento de la cal.
- Extendido de la cal.(Si se usa la estabilización in situ).
- Mezclado del suelo con la cal.
- Colocación en capas.
- Compactado.
- Nivelación y protección de las capas.

Ocurre que éstas fases se encadenan sin movimiento de tierras cuando se estabilizan capas destinadas a soporte de edificios (hangares, almacenes, viviendas, etc), vías auxiliares (zonas de pabellones, etc) y cuando se trata de mejorar zonas inestables, explanadas en el fondo de una excavación.

En la mayoría de los casos, el tratamiento de los suelos se inscribe en un proceso global de optimización y



Fig. 7 - Transporte y almacenamiento de la cal.



Fig. 8 - Extendido de la cal.



Fig. 9 - Mezclado del suelo y la cal.

reutilización de materiales, que comporta tareas de extracción, de transporte y de nivelado de los materiales.

Por lo tanto es indispensable organizar los trabajos de forma que puedan responder lo mejor posible a las exigencias de la obra en cuanto a coste, rendimiento y calidad.

5.5 TRATAMIENTO MIXTO CAL + CEMENTO

Este tratamiento está reservado a los materiales arcillosos o cretáceos con vista a su utilización en explanadas y capas de carreteras ya que:

- La cal floclula las arcillas y seca los materiales húmedos
- El cemento aporta una rigidez rápida.

Es utópico esperar ganar tiempo, producción o rendimientos suprimiendo el pretratamiento con cal ya que ésta, facilita:

- El mantenimiento del suelo
- Las condiciones de circulación de maquinaria en obra (sobre todo a los extendedores del cemento)
- El mezclado con el cemento, permitiendo alcanzar la finura satisfactoria de los materiales y así, asegurar la homogeneidad del mezclado.
- La conservación de la eficacia del cemento

De todo ello se deduce que el pretratamiento con cal tiene un efecto beneficioso sobre los resultados mecánicos del suelo tratado. En la práctica el tratamiento con cal se realiza en excavación y así con el material tratado pueden hacerse una de éstas dos cosas:

- Ser trasladado, tratado con cemento y utilizado en relleno o
- Ser dejado en stock, a la espera de un tratamiento posterior con cemento.

En ambos casos, basta una compactación y una nivelación simple a la cota definitiva más un

ligero sobreespesor (10% del espesor de la capa como máximo) para conseguir la correcta uniformidad en la distribución del material.

El tratamiento con cemento se hace entonces de manera tradicional teniendo la precaución de verificar previamente que los contenidos de agua sean los correctos.

El margen de tiempo entre el tratamiento con cal y el tratamiento con cemento depende de la organización de la obra y la naturaleza del suelo, (arcillas duras o blandas, tamaño máximo de la granulometría del suelo). En todo caso, la reactividad y la finura de la cal viva normalizada para carreteras son tales, que pueden encadenarse ambos tratamiento en el mismo día, recomendándose un margen entre dos y cuatro hora entre ambos tratamientos.

6- PREPARACIÓN DE LOS SUELOS Y ALMACENAMIENTO DE LA CAL

6.1 PREPARACIÓN DE LOS SUELOS

Se trata de una serie de operaciones previas a las de tratamiento propiamente dichas, cuya ejecución puede condicionar el éxito de la obra tanto en lo relativo a su coste como en la calidad obtenida.

Puede distinguirse esencialmente:

6.1.1 ESCARIFICACIÓN O ESPONJAMIENTO DE LOS SUELOS

Esta operación permite mejorar los rendimientos de los mezcladores de manera notable. Se realiza con la ayuda de un riper de dientes múltiples montado sobre una niveladora o arrastrado por un tractor de oruga de mediana potencia (200 CV). El espesor así esponjado puede alcanzar los 50 cm. También pueden utilizarse escarificadores de gradas o de discos (Fig. 10).



Fig. 10. Escarificación del suelo

6.1.2 AIREACIÓN DE LOS SUELOS

Se recurre a las mismas máquinas que para el esponjado, pero el resultado está estrechamente ligado a las condiciones meteorológicas. Es importante evitar esponjar el suelo si las condiciones meteorológicas pueden cambiar rápidamente a lluvia. Un suelo esponjado facilitará la filtración del agua que podría superar en algunos casos el valor correspondiente al Proctor óptimo, lo que perjudicaría considerablemente la continuación de las restantes operaciones

6.1.3 HUMIDIFICACIÓN DE LOS SUELOS

Contrariamente a las ideas preconcebidas, se trata de una operación muy difícil de realizar con los medios tecnológicos que se poseen en la actualidad. Cuando se presentan suelos demasiado secos, se persigue una humidificación homogénea y controlada de la masa, pero frecuentemente no se dispone de medios de riego de la superficie con caudal suficiente y homogéneo. Por lo cual el método más común es una conjunción de:



Fig. 11. Almacenamiento de la cal.

- Esponjamiento de los suelos con escarificadores tradicionales ó mezcladores usados en el tratamiento.
- Regado por medio de sistemas de riego por gravedad, a presión o con bomba.

Cada una de éstas operaciones, puede repetirse según se crea conveniente. Desde hace algún tiempo los constructores de equipos de mezclado dotan, a éstos, con un sistema de inyección de agua que riega el material esponjado en su masa. El sistema está unido a una cisterna de agua que acompaña al mezclador, el caudal se controla mediante una bomba dosificadora servodirigida a la velocidad de avance y controlada por un caudalímetro. Se trata de un progreso notable que puede ampliar el campo de aplicación del tratamiento de suelos.

También se puede aprovechar ésta maquinaria para extender a la vez la cal y el agua en forma de una lechada cuya composición se ajuste a las necesidades del suelo a tratar. Para ello, se suele proceder de una de las dos formas siguientes:

- Extendido en superficie por una regadora tradicional, la lechada gracias a su tixotropía cuaja casi al instante. El agua no se evacua por los surcos o los puntos bajos. La repartición es más homogénea.
- Inyectado en la masa por el mezclador, se dispersa sin problemas para actuar rápidamente.

En ambos casos, el rendimiento global de la obra se ve mejorado gracias a la realización de dos operaciones en una.

6.1.4 ELIMINACIÓN DE GRANDES TERRONES

No existe una maquinaria verdaderamente operacional para eliminar los grandes terrones contenidos en los suelos arcillosos húmedos y por tanto pegajosos. Es necesario ante todo efectuar un pre-tratamiento general con cal viva para atenuar el carácter pegajoso.

En materiales del tipo grava, poco arcillosas, o en materiales arcillosos no pegajosos, puede utilizarse maquinaria de obras públicas como:

- Riper trasero en tractor de orugas
- Riper trasero en motoniveladora
- Riper intermedio en motoniveladora
- Rastrillos traseros en tractor agrícola
- Desterronador en tractor agrícola

En todos los casos se deberían eliminar sustancias perjudiciales como raíces, turbas, etc y piedras superiores a 75 mm.

6.2 ALMACENAMIENTO DE LA CAL

La cal para el tratamiento de suelos se presenta bajo la forma de polvo seco salvo algunas cales vivas que pueden utilizarse en grano (<6mm) o las lechadas de cal para suelos muy secos.

Estos productos pueden suministrarse en sacos o a granel.

6.2.1 SUMINISTRO EN SACOS

Para obras de pequeño volumen o en ensayos de pruebas de grandes obras, por razones prácticas la cal puede suministrarse en sacos paletizados (de 25 ó 50 Kg) o en big-bag (250, 500, 750 ó 1.000 Kg). El almacenamiento debe ser en zona cubierta bajo techo o toldo si no se dispone del mismo. En el caso de los palets, deben de suministrarse con funda de plástico impermeable. El extendido se realizará mediante cuadrículado de los suelos a estabilizar aportando a cada cuadrícula la cantidad calculada previamente.

6.2.2 SUMINISTRO A GRANEL

La mayor parte de las entregas se realizan a granel, por medio de camiones cisterna con descarga a presión de unas 25 Tm de carga útil o, en ciertas aplicaciones, en camiones cisterna para lechadas de cal o camiones volquete con lona impermeable para cales granuladas. Una vez en obra, la cal es transferida por vía neumática a baja presión (del orden de 0,2 Mpa) a los silos instalados en la obra. Se debe tener en cuenta las densidades aparentes tanto de la cal viva como de la cal apagada a la hora de dimensionar la capacidad de los silos de almacenamiento, así como el ángulo de talud para el caso de descarga por gravedad.

Para el almacenamiento en obra, se utilizan (Fig. 11):

- Silos horizontales, semi-móviles, de varias capacidades.
- Cisternas fijas. Su capacidad varia entre 25 y 55 m³
- Silos fijos generalmente verticales, de capacidades variables y que pueden alimentar a la maquinaria de extendido por presión o por gravedad.

6.2.3 CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO Y ORGANIZACIÓN DEL SUMINISTRO

Se recomienda e incluso se exige en ciertas obras, disponer de una capacidad de almacenamiento equivalente a dos días de actividad de la fase de tratamiento.

De esta forma, se dispondrá de unas reservas suficientes para cubrir cualquier falta.

En el caso de pequeñas obras, es posible alimentar directamente los extendedores sin pasar por los silos de almacenamiento. Esto requiere una perfecta coordinación entre el fabricante de cal, el transportista y la obra.

6.2.4 DURACIÓN LÍMITE DEL PRODUCTO ALMACENADO

La duración límite de los sacos en stock, depende del tipo de producto y de su protección. En ciertos productos como las cales apagadas, almacenadas en lugares secos y ventilados, su conservación es de varios meses.

En los almacenamientos a granel, la cal viva está en contacto permanente con el aire de vaciado y de llenado. Esta situación no es demasiado perjudicial en ambientes secos, pero empeora en los húmedos debido a que la cal viva puede hidratarse parcialmente o carbonatarse y no solamente perder sus propiedades, sino también, taponar los conductos de salida. Por esta razón, se aconseja limitar la duración del almacenamiento entre 15 días y un mes, dependiendo del tipo de cal y el clima.

6.2.5 PRECAUCIONES

Al realizarse el llenado y el vaciado de los silos por vía neumática, puede ocurrir que los finos de cal sean expulsados por las salidas del rebosadero durante la operación. Para evitar la dispersión de éstos finos en el aire y la formación de polvo, se recomienda conectar las salidas a filtros. Estos filtros pueden fijarse a los silos o colocarse en obra. Pueden distinguirse dos tipos de filtros:

- **FILTRO DE MANGAS:** Poseen una salida que desemboca en un recipiente con telas permeables al aire que retienen el polvo y pueden limpiarse o cambiarse regularmente.
- **FILTRO DE AGUA:** La salida desemboca en recipientes o fosos llenos de agua que retienen las partículas y evacuan el aire de vaciado.

Deberá verificarse el buen funcionamiento de los medios de transporte como son las bombas, filtros, mangas de conexión, ventiladores, etc, para mantener la seguridad del personal de obra y transporte.

6.2.6 ELECCIÓN DEL LUGAR DE ALMACENAMIENTO

Se deberán tener en cuenta las siguientes consideraciones:

ACCESIBILIDAD. El área de almacenamiento deberá ser accesible en todo momento para los camiones y extendedoras. Es por lo tanto necesario acondicionar un camino de acceso propio, que sea sólido e inalterable teniendo en cuenta las condiciones climáticas propias de cada región.

No olvidar que la cal puede estabilizar estos caminos o pistas de acceso.

PROXIMIDAD A LA OBRA. El área de almacenamiento deberá situarse próxima a la obra pero teniendo en cuenta los eventuales perjuicios que pudiera causar a viviendas o pastos aledaños y deberá tenerse en cuenta la dirección de los vientos dominantes.

DISPONIBILIDAD DE ESPACIO SUFICIENTE. El área de almacenamiento deberá tener una dimensión suficiente para recibir simultáneamente una extendidora y un camión de aprovisionamiento.

PRECAUCIONES A TOMAR. Como medida de precaución, es bueno instalar en las proximidades de los silos, así como en las zonas de trabajo, una reserva de agua así como colirio para el personal en previsión de incidentes. Por supuesto que éstas medidas no deben dispensar el cumplimiento de las normas de seguridad habituales, recogidas en el capítulo 10 "SEGURIDAD" de este manual (gafas de protección, mascarilla, guantes, etc).

7-EL EXTENDIDO DE LA CAL

7.1 FORMA DE PRESENTACIÓN DE LA CAL

A excepción de la lechada de cal y de las cales vivas granuladas (granos <6mm), la mayoría de las cales, utilizadas para la estabilización, se presentan en forma de polvo seco.

El método de aplicación utiliza maquinaria inspirada en los útiles agrícolas que extienden en la superficie del suelo una masa de cal por m² con cierta precisión.

7.2 MAQUINARIA DE EXTENDIDO DE CAL

7.2.1 CASO DE CAL EN POLVO ENSACADA

Cuando la superficie a tratar es reducida, es posible recibir suministros en sacos o big-bag. El extendido se realiza manualmente en dos etapas:

1ª Etapa: Colocación de los sacos en el terreno según el cuadrulado efectuado con anterioridad al objeto de cumplir la dosificación establecida.

2ª Etapa: Apertura de los sacos y extendido de la cal con rastrillo o rasqueta.

7.2.2 CASO DE CAL EN POLVO A GRANEL

Existen varios tipos de maquinaria de extendido que se describen a continuación:

7.2.2.1 EXTENDEDORA CON DOSIFICADOR VOLUMÉTRICO NO SERVODIRIGIDO CON LA VELOCIDAD DE AVANCE

Es una extendedora de la primera generación, que se regula en dos tiempos (Fig. 12):

- Primeramente se regula la cantidad de cal vertida por unidad de tiempo jugando con la apertura de una trampilla o con la velocidad de un sistema extractor.
- En segundo lugar se controla la velocidad de avance de la extendedora para esparcir la cantidad de cal deseada por m².

Su punto débil es, por supuesto, la imprecisión causada por las variaciones de la velocidad de avance en función del estado del terreno y de la destreza del conductor, lo que viene produciendo su progresiva sustitución por sistemas con mayor grado de automatización.



Fig. 12. Extendido de la cal.

7.2.2.2 EXTENDEDORA CON DOSIFICADOR VOLUMÉTRICO SERVODIRIGIDO CON LA VELOCIDAD DE AVANCE

La dosificación se regula por medio de un tambor alveolar o un sistema extractor (cinta o tornillo), cuya velocidad de funcionamiento está servodirigida por la velocidad de avance del motor de la extendedora. Además, en ciertos modelos recientes, la unidad de dosificación está separada de la cuba de almacenamiento por el sistema de alimentación de una tolva encargada de relentizar el flujo de la cal y así mejorar la precisión del extendido.

Las características de los modelos más frecuentes de este tipo se presentan en los siguientes esquemas:

- Dosificador volumétrico servodirigido a la velocidad de avance y vaciado por fluidificación y gravedad.
- Ejemplo: características del dosificador PANIEN

CARGA ÚTIL	ANCHURA DE EXTENDIDO	GAMA DE CAUDAL
15 m ³	2,40 m	6 a 30 kg/m ²

- Dosificador volumétrico servodirigido a la velocidad de avance y vaciado por fluidificación y gravedad.
- Ejemplo: características de dosificador STOCKMANU.

CARGA ÚTIL	ANCHURA DE EXTENDIDO	GAMA DE CAUDAL
12 m ³	2,30 m	7 a 30 kg/m ²

7.2.2.3 EXTENDEDORA CON DOSIFICADOR VOLUMÉTRICO SERVODIRIGIDO CON LA VELOCIDAD DE AVANCE Y UN CONTROL PONDERAL

Idéntico en su principio básico al modelo anterior. Este extendedor se distingue por los perfeccionamientos que lleva como:

- Regularización del vertido de la cal
- Registro de datos de funcionamiento
- Medidas de seguridad
- etc.

Además posee un control ponderal instalado gracias a unas balanzas electrónicas situadas debajo de la cuba.

Las fases de regulación se simplifican considerablemente y la precisión es mayor.

Dosificador volumétrico servodirigido con la velocidad de avance y vaciado por tornillo y gravedad, con control ponderal.

Un ejemplo de esta maquinaria es el siguiente: (Características del dosificador RABAUD).

CARGA ÚTIL	ANCHURA DE EXTENDIDO	GAMA DE CAUDAL
15 m ³	0,32 a 2,24 m	7 a 30 kg/m ²

7.2.3 LECHADA DE CAL

Se comporta como un líquido y por tanto puede ser extendida con la ayuda de una regadora de tamaño y caudal adaptados a la obra. Un dosificador volumétrico servodirigido a la velocidad de avance mejora la precisión del extendido.

7.3 PRECISIÓN DE LAS EXTENDEDORAS

Para una extendedora, se representa por el coeficiente de variación CV:

$$CV (\%) = \delta/p \times 100$$

siendo:

$$p = \text{valor medio de las pesadas (Kg/m}^2\text{)}$$

$$\delta = \text{desviación standard (dispersión de las pesadas sobre la media)}$$

A título indicativo, un CV del 10% significa que:

- Un 68% de las medidas están comprendidas entre 0,9 y 1,1 x p
- Un 95% de las medidas están comprendidas entre 0,8 y 1,2 x p
- Un 99% de las medidas están comprendidas entre 0,7 y 1,3 x p

En obra, es actualmente difícil descender por debajo de un CV de 10 a 20%. Solamente algunas extendedoras, entre las cuales se halla la de control ponderal, permiten alcanzar un CV del 5 al 10% en condiciones fiables y frecuentes.

7.4 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LA EXTENDEDORA

Intervienen equipamientos o disposiciones tales como:

- Altura de caída de la cal
- Indicadores de falta de cal
- Facilidad de regulación de la dosificación
- Posibilidad de asistencia a la conducción

7.5 NIVEL DE MANTENIMIENTO DE LA EXTENDEDORA

Una extendedora puede comenzar a fallar rápidamente si no se le hace un correcto mantenimiento. El mantenimiento debe centrarse en:

- Los conductos encargados de canalizar la cal hacia el suelo.
- El tambor alveolar que no debe estar taponado ni deformado
- Los aerodeslizadores para los sistemas de fluidificación
- El sistema de regulación del dosificado

7.6 LA UTILIZACIÓN DEL EQUIPO

Es el hacer saber al personal lo que está en juego. Debe vigilarse:

- El respeto de las consignas de velocidad de avance
- El buen recubrimiento de las bandas transversales y longitudinales
- Respeto del número de pasadas que hay que aplicar.

También en este aspecto, los dispositivos de asistencia a la conducción facilitan el trabajo del operador de la máquina.

7.7 CANTIDAD DE CAL A EXTENDER

Se calcula según la fórmula

$$M \text{ (Kg/m}^2\text{)} = P \times D \times E$$

Donde:

- P = Porcentaje de cal previsto, determinado por el estudio de estabilización
- D = Densidad seca medida in situ del suelo a tratar (Kg/m³)
- E = Espesor de mezclado en m. (dependiendo del equipo, de amasado y/o del espesor final de la capa tratada.

7.8 CONTROL DEL EXTENDIDO

Existen dos métodos:

- Pesadas periódicas de la cal recogida en recipientes o lonas dispuestas en el suelo antes del paso de la máquina. Es un método sencillo y rápido que no precisa más que un peso y recipientes o lonas de superficie conocida (< 1 m²)
- Control del peso total de la cal extendida dividido por la superficie cubierta. Es un método global basado en un control ponderal asociado a una medida de superficie que precisa de un equipo específico no siempre disponible en la obra (excepto si se dispone de una extendedora de control ponderal).

Estos dos métodos pueden aplicarse a las dos fases del extendido.

7.8.1 1ª Fase AL COMIENZO DE LA OBRA

Es necesario calibrar la extendedora y regularla a la dosificación deseada, se utilizan planchas de calibración.

Cuando se desconoce la extendedora o se busca una precisión particular (caso de explanadas y subbases de carreteras), se realiza la calibración sobre una plancha de prueba. Es un procedimiento más pesado ya que se requiere hallar el CV de la extendedora por medio de 30 a 50 pesadas de lonas de 1 m², como se ha indicado anteriormente.

7.8.2 2ª Fase DURANTE LA OBRA

Se trata de asegurar que la dosificación efectuada no sufre variación. Los controles deben efectuarse sobre la cantidad de cal extendida por m², pero también sobre el buen funcionamiento y correcta utilización del equipo de extendido.

7.9 CONSIDERACIONES PRÁCTICAS

7.9.1 RENDIMIENTO DE UNA EXTENDEDORA

La determinación del rendimiento de una extendedora debe tener en cuenta el ciclo completo de su funcionamiento:

- Carga de cal
- Trayecto silo-obra
- Extendido
- Trayecto obra- silo

Según la distancia silo-obra, el estado de las pistas y de los terrenos a tratar, el tiempo tardado por una extendedora de 15 m³ de capacidad para realizar el ciclo completo varía entre 1/2 y 1 hora.

7.9.2 ELECCIÓN DE UNA EXTENDEDORA

Depende por supuesto de la precisión requerida

Debe así mismo tenerse en cuenta las características operacionales de utilización tales como:

- Capacidad (las extendedoras varían entre 5 y 15 m³)
- Aptitud para circular sobre suelo no estabilizados pudiendo necesitar el uso de maquinaria todo-terreno
- Movilidad para los trayectos silo-obra
- Margen de caudal. Varía para las máquinas normales entre 6 y 30 Kg/m² y entre 5 y 60 Kg/m² en las más modernas
- Facilidad de regulación de la anchura de extendido
- Facilidad de conducción de los equipos

7.9.3 PRECAUCIONES ESPECIALES

Ya se han comentado anteriormente las medidas concernientes a la regulación, mantenimiento y utilización de las extendedoras con miras a obtener una mayor precisión.

Debe asimismo tenerse en cuenta otras precauciones para limitar los perjuicios que pueda ocasionar la emisión de polvo, como son:

- No trabajar cuando existan vientos fuertes.
- Trabajar con cabina cerrada, preferentemente presurizada
- Durante las operaciones de llenado y purga de las extendedoras acoplar las válvulas de rebose a filtros.
- Respetar las reglas de seguridad, indicadas en la CAPITULO nº 10.

IMPORTANTE

En caso de tratamiento con cal en terraplenes, es necesario tener en cuenta la posibilidad de ajustar las dosificaciones de cal establecidas en el estudio de laboratorio en función de las condiciones reales de ejecución de la obra, (condiciones climáticas, estado hídrico del suelo, etc) al objeto de evitar excesos inútiles de dosificación. El ahorro conseguido de este modo justifica la presencia de un laboratorio en obra cuando ésta es importante.

8-EL MEZCLADO



8.1 EL MEZCLADO DE LA CAL Y EL SUELO

Consiste en mezclar la cal una vez extendida con el material a estabilizar conforme a la finura y homogeneidad requeridas por la naturaleza de la labor a realizar (terraplenes, explanadas, subbases y bases, etc). La exposición siguiente se basa únicamente en los equipos utilizados habitualmente. En obras de pequeñas dimensiones, se pueden utilizar equipos más sencillos de tipo agrícola. Asimismo, se pueden utilizar algunas de las máquinas empleadas en los procesos de escarificado o de homogeneización del suelo. Los rendimientos que más adelante vienen indicados para cada equipo, son rendimientos horarios instantáneos que no tienen en cuenta los tiempos muertos ocasionados en las decisiones y organización de la obra.

8.2 EL MEZCLADO IN SITU. EQUIPOS

8.2.1 GRADAS DE DISCOS

Escogidas entre las más pesadas (4 a 8 Tm), en ocasiones lastradas, deben estar provistas de discos de gran diámetro (0,8 a 1,2m) para evitar que se vuelvan inoperantes rápidamente sobre el suelo escarificado.

Suelen ser arrastradas por potentes tractores (>300 CV) de orugas o neumáticos. En todo caso, la profundidad de acción, en el material no tratado, no pasa de 0,20 a 0,25m en el mejor de los casos. Se esperan progresos con equipos concebidos por empresas del sector de tractores de alta potencia. La anchura habitual es del orden de 2 a 3m.

Las gradas de discos pueden trabajar en suelos arcillosos, incluso cuando contienen piedras o bloques en proporciones notables. Sin embargo, su eficacia es crítica cuando debido a la dimensión de los bloques provoca que se atasquen entre los discos o se opongan a la penetración de útiles en el suelo (D máximo: 300 a 500mm).

Su ámbito de empleo es principalmente el tratamiento con cal de suelos arcillosos húmedos con miras a la utilización en rellenos y terraplenes, para mejorar las pistas de las obras o en zonas inestables. La disgregación obtenida, más bien pobre, no permite su utilización en explanadas, más que cuando se buscan resultados modestos.

La determinación del rendimiento tiene en cuenta la profundidad y la anchura de trabajo, así como la velocidad del tractor (2 a 4 Km/h) y el número de pasadas necesarias (entre 3 y 8). Suele variar entre una o dos centenas de m³/h en las formaciones plásticas con piedras grandes y alrededor de 600 m³/hora en limos poco plásticos.

8.2.2 VERTEDERAS O REJAS

Van ensambladas sobre un chasis y tiradas por potentes tractores de orugas (>300 CV). Las vertederas pueden ser de diversas formas (clásica, en roda, etc.) y poseer una disposición (ángulo de ataque, separación) que se adapte de la mejor manera posible a las características del material a tratar. Son por lo tanto arados de concepción tradicional, contruidos por las propias empresas de movimiento de tierras en función de sus experiencias y necesidades.

La profundidad de acción depende de la dimensión de las vertederas. Pueden alcanzar de 0,3 a 0,4m de material no esponjado para anchuras de 2 a 3 m.

Esta maquinaria está reservada a los suelos compactos. Dan excelentes resultados en el tratamiento con cal de cretas y materiales similares.

Al igual que en las gradas de discos, el cálculo del rendimiento tiene en cuenta la anchura y profundidad de trabajo, la velocidad de marcha (2 a 4 Km/h) y el número de pasadas (4 a 6). Se puede obtener rendimientos de 300 a 600 m³/h en las cretas tratadas con cal.

Existe una variante a éste tipo de equipo consistente en colocar en la parte delantera de un Buldozer, un rastrillo o un peine en el que la separación y forma de los dientes se determinan en función de los materiales a tratar. Esta maquinaria ha sido utilizada con elevados rendimientos para tratar morrenas glaciares con cal.

8.2.3 HOJAS DE MOTONIVELADORA

Iguales resultados que con las vertederas pueden conseguirse con la hoja de las motoniveladoras en posición de vertedera, o sea con una ligera inclinación hacia adelante y con el eje longitudinal de la hoja formando un pequeño ángulo respecto al plano del suelo. Esta maquinaria requiere un gran número de pasadas para que las mezclas sean uniformes.

8.2.4 ROTOBATOR

Sólo los más grandes de éstos equipos agrícolas pueden ser convenientes para el tratamiento de los suelos. Una serie de azadas fijadas sobre un cigüeñal penetran en el suelo y proyectan la tierra contra un cárter provisto de barrotes que amplifican su pulverización. Tirados por tractores de mediana potencia (100 CV), los rotobators más pesados tienen una profundidad de acción de 0,3 a 0,35 m para una anchura de trabajo de 2,5 a 3 m.

Su acción se ve limitada cuando la proporción de elementos >200 mm en el suelo es importante.

Su ámbito de empleo es idéntico al de las gradas de discos (suelos arcillosos húmedos), pero la calidad del mezclado es superior al de las gradas y más favorable en los casos de explanadas.

Los rendimientos oscilan entre los 100 y los 300 m³/h para velocidades de trabajo del orden de 0,5 a 1 Km/h.

8.2.5 PULVIMEZCLADORES (Pulverizadores de eje horizontal)

Son equipos autónomos, es decir con tractor y mezclador inseparables, especialmente concebidos para las necesidades de la técnica de la estabilización de los suelos (Fig 13).

El mezclador está formado por un árbol horizontal provisto de cuchillas o cavadoras. El conjunto gira a una velocidad del orden de 200 rpm en el interior de una cámara de mezclado con paredes de chapa gruesa, deslizándose por la superficie del suelo a mezclar.

La profundidad de corte se obtiene jugando con la posición del rotor con relación a la superficie. La finura de la disgregación depende de la velocidad de avance de la máquina y de la apertura de la trampilla trasera del cárter que permite ajustar el tiempo de estancia del material en la cámara de mezclado (Fig. 14).

El sentido de rotación del rotor tiene influencia sobre la calidad del mezclado. Una rotación en sentido inverso al del avance de las ruedas proporcionan mejores resultados (finura de disgregación y regularidad del espesor tratado). La potencia de las máquinas habitualmente utilizadas varía entre 300 y 450 CV. La anchura de corte entre 2 y 2,5 m y la profundidad del mezclado de 0,3 a 0,42 m. Algunos modelos pueden equiparse con sistemas de inyección de agua en la cámara de mezclado, así mismo, en los equipos más modernos de estos modelos la



Fig. 13. Regado y mezclado del suelo con la cal.



Fig. 14. Rotor con palas para el mezclado.



Fig. 15. Rotor con picas para el mezclado.

disposición de la cámara de mezclado y el tipo de rotor con picas (Fig. 15), permiten una mejora de la mezcla y una profundidad de mezclado hasta 0,5m.

Estos equipos trabajan en condiciones mecánicas aceptables cuando en los suelos no existan elementos superiores a 50 mm. En suelos blandos poco abrasivos (cretas, calizas blandas, etc) con tamaños superiores a 50 mm pero inferiores a 200 mm, pueden seguir siendo usados. Los útiles (cuchillas, cavadoras) son las principales piezas de desgaste en estos equipos, por lo que deben cambiarse periódicamente en función de la abrasividad del material y de la naturaleza del metal de fabricación (acero común, acero especial o carburo de tungsteno).

La elección de los útiles no debe hacerse considerando únicamente su precio, sino teniendo en cuenta igualmente la duración y el tiempo de reemplazo que puede conducir a inmobilizaciones frecuentes de los trabajos.

La calidad del mezclado (finura y homogeneidad) obtenido con éstos equipos es con mucho la mejor, con relación a los equipos descritos anteriormente y comparable a la obtenida en centrales fijas. Su empleo está recomendado para la realización de explanadas, plataformas, y en subbases y bases de carreteras y son perfectamente utilizables para el tratamiento de suelos poco escarificados reutilizados en rellenos y terraplenes.

Los rendimientos varían entre 400 y 200 m³/h, según se realicen 1 ó 2 pasadas para su utilización en terraplenes ó 2 ó 4 pasadas para su utilización en explanadas y tongadas de explanadas subbases y bases.

8.3 REDUCCIÓN DE LAS EMISIONES DE POLVO EN LAS OBRAS DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CAL

Las obras de estabilización de suelos con cal y/o conglomerantes hidráulicos así como el retratamiento en carreteras antiguas producen frecuentemente un ambiente pulverulento que es función de la finura de los materiales usados en la estabilización, de las condiciones atmosféricas y de las turbulencias provocadas por los materiales en movimiento.

Cuando el polvo producido se deposita en los alrededores de la obra sobre suelos húmedos o sobre seres vivos no protegidos, se produce generalmente una elevación importante de pH que puede causar algún perjuicio, que si bien suele ser normalmente de poca consideración y momentaneo, puede llegar, en algunos casos, a alcanzar valores no aceptables.

Para disminuir lo anterior, además de las prácticas ya conocidas como:

- Disponer de filtros adecuados en los transportes y almacenamientos de la cal, impidiendo cualquier fuga.
- Evitar reboses durante el llenado de las extendedoras, así como regular la altura de caída de la cal sobre el suelo para que no sea grande.
- Que no se produzcan turbulencias durante el mezclado debidos a los gases de escape de los vehículos.
- Tomando las precauciones necesarias frente a la acción de los vientos.
- Organizando la circulación de maquinaria y vehículos por la obra para reducir su incidencia en la producción de polvo.

se pueden aplicar modernos equipos de extendido y mezclado que prácticamente hacen desaparecer la producción de polvo en las operaciones de estabilización del suelo con cal.



Fig. 16. Tandem mezclador de lechada agua-cal WM400 y estabilizadora WR2500



Fig. 17. Mezclador movil agua-cal WM400

Un ejemplo de lo anterior lo constituye el tandem formado por un mezclador móvil de agua y cal y una estabilizadora que expande y mezcla con el suelo la lechada preparada en el mezclador móvil (Fig. 16 y Fig. 17).

El mezclador móvil está diseñado en forma de contenedor para montar sobre un remolque de cuatro ejes. Dispone de un depósito de agua y un silo para la cal, ambos de gran capacidad. Un microprocesador regula la aportación de agua y cal para fabricar la lechada en el mezclador según la relación porcentual prefijada.

La lechada de cal se bombea hasta la rampa de riego de la máquina estabilizadora proporcionalmente a su velocidad de avance, y que, de esta forma, expande la lechada de cal conforme a la dosificación prefijada y, mediante su rotor de picas de eje horizontal, la mezcla con el suelo en una profundidad que puede alcanzar hasta los 500 mm.

El tandem de equipos citados permite la estabilización con cal con las siguientes ventajas:

- El trabajo no viene afectado por las incidencias atmosféricas.
- La dosificación agua/cal es más exacta con la utilización del microprocesador.
- Al adicionar la cal en forma de lechada, se mejora su mezcla con el suelo.
- Los depósitos de amplia capacidad del mezclador permiten un trabajo más continuo.
- La supresión de polvo al utilizarse la lechada de cal evita:
 - La pérdida de cal, originada por cualquier movimiento de aire cuando se esparce en forma pulverulenta.
 - Como consecuencia de lo anterior la contaminación atmosférica en los alrededores de la obra.

8.4 EL MEZCLADO EN INSTALACIÓN CENTRAL

El mezclado en instalación central de materiales tratados con cal puede utilizarse si se va a utilizar material de aportación que requiere tratamiento, y es más eficaz con suelos más granulares como gravas arcillosas. El equipo de mezclado en instalación central suele consistir en una mezcladora trituradora de arcillas para asegurar que se produce un material uniformemente mezclado. Para esta aplicación no son adecuadas las



Fig. 18. Central mezcladora de arcilla de doble eje.(Belmix)

mezcladoras de tambor giratorio o basculante. El material estabilizado puede obtenerse en mezcladoras continuas o discontinuas, y los ingredientes pueden dosificarse por peso o por volumen, dependiendo de la especificación(Fig. 18).

El material mezclado en instalación central debe transportarse en medios cerrados diseñados para mantener el contenido de humedad y evitar la disgregación del material. Se recomiendan camiones volquetes con caja metálica y cubiertos con lonas.

El material tratado con cal debe extenderse por medios adecuados como una máquina de pavimentación para asegurar un buen control de la compactación y

regularidad de la superficie. En aplicaciones poco exigentes, puede utilizarse maquinaria provista de paletas o cucharas mecánicas, pero hay que tener cuidado ya que es más difícil conseguir los niveles y perfiles necesarios. Al final de cada día de trabajo, debe formarse una junta de construcción transversal vertical. Al empezar el nuevo día de trabajo, debe eliminarse todo el material suelto que haya alrededor de las juntas de construcción longitudinales o transversales y debe compactarse material nuevo en su lugar.

8.5 EL MEZCLADO EN PLANTAS MÓVILES

Este tipo de máquinas, cuyo funcionamiento general responde a los mismos principios de las anteriormente descritas, difieren de ellas en que el proceso de mezclado se realiza fuera del suelo, en una mezcladora especial que permita el amasado de todos los componentes y correcciones al suelo, bien por incorporación de otros materiales o bien por eliminación de tamaños no convenientes.

Las partes más importantes de una planta móvil son las siguientes:

- Escarificador o excavador del suelo, con husillos helicoidales o rotores de cuchillas.
- Elevador de cangilones o cadenas, para conducir el terreno excavado a las cribas o cinta alimentadora.
- Zona de alimentación del terreno a la mezcladora, que puede tener cribas para eliminar los tamaños excesivamente grandes o alimentadores auxiliares para incorporar suelos correctores, como arenas, gravillas, etc.
- Mezcladora de paletas donde se amasa el terreno excavado y eventualmente modificado con la cal y el agua.
- Depósitos auxiliares de cal y agua que a su vez están alimentados por camiones-silo, camiones-cisterna o cintas transportadoras móviles. La cal se transfiere al depósito auxiliar desde los camiones-silo con bombas neumáticas, lo mismo que desde los depósitos auxiliares a la mezcladora. La alimentación a los depósitos auxiliares, en forma de tolva se hace con cintas y desde las tolvas a la mezcladora con dosificadores de tornillo sin fin o con otros procedimientos mecánicos.
- Rampa de salida de la mezcla, que puede tener o no dispositivos de extensión transversal y siempre con compuerta de regulación de espesor.

8.6 CONTROL DE MEZCLADO

Antes del comienzo de los trabajos, cuando el equipo de mezclado no se conoce o existen dudas de su comportamiento con los materiales, se hará un tramo de prueba con el objeto de definir las variables de funcionamiento del equipo (velocidad, profundidad óptima de los útiles, nº de pasadas) en función de los objetivos fijados (finura de mezclado y espesor de las capas)

8.6.1 CONTROL DE LA PROFUNDIDAD DEL MEZCLADO

8.6.1.1 DURANTE EL MEZCLADO

Es posible evaluar visualmente la penetración de la herramienta en el suelo (discos, rejas, etc), medirla con la ayuda de una varilla graduada que se desplaza sobre una regla (pulverizador-mezclador) o por cualquier otro sistema que haya previsto el constructor de la maquinaria.

8.6.1.2 DESPUÉS DEL MEZCLADO

Es necesario hacer sondeos del suelo tratado; en general, un cambio de consistencia o de color, permite distinguir la profundidad de la acción. Se puede también proyectar fenolftaleína incolora sobre la pared del sondeo; el cambio de color a rojo, revela un medio muy básico que indica la presencia de cal.

Otro método consiste en hundir manualmente un penetrómetro en el suelo esponjado para localizar la superficie de transición.

8.6.2 CONTROL DE LA HOMOGENEIDAD DE LA MEZCLA

Este control se realiza a la vez sobre la finura obtenida y la correcta repartición de la cal.

8.6.2.1 FINURA OBTENIDA

Se aprecia visualmente, o en caso de duda, mediante un tamizado en seco. En los suelos finos (limos, arcillas poco plásticas) se busca una finura inferior a 10 y a 20 mm en explanadas y bases de carretera respectivamente.

8.6.2.2 HOMOGENEIDAD

Para un control riguroso, se necesita tomar muestras para análisis en laboratorio (composición química, resultados mecánicos), tareas que, por lo general, son largas y costosas. Lo normal es un control visual basado en la finura obtenida, color y consistencia y que será suficiente para tener una idea de la homogeneidad.



8.7 CONSIDERACIONES PRÁCTICAS

8.7.1 RENDIMIENTO REAL DE UN MEZCLADOR

Como se ha señalado anteriormente, los rendimientos indicados son rendimientos horarios instantáneos. El rendimiento real debe englobar los tiempos muertos ocasionados por:

- Los diversos movimientos en obra (trayecto, ida-vuelta, etc)
- Las dificultades de evolución sobre terrenos en malas condiciones
- Los tiempos de recambio de las piezas desgastadas
- El respeto al encadenamiento de las diferentes fases de la estabilización
- etc.

Por otra parte, podrá mejorarse el rendimiento reduciendo el desgaste de la maquinaria, preparando el suelo antes del mezclado, y especialmente disgregando los suelos compactos con ayuda de un ripper, rastrillo, etc, montados sobre niveladora o bulldozer de mediana potencia.

Así se obtienen los rendimientos siguientes en los limos mezclados con pulvimezclador:

- En terraplenes de 1.500 a 2.300 m³/día
- Explanadas y bases de 1.000 a 2.000 m³/días

8.7.2 PRECAUCIONES ESPECÍFICAS

La circulación de la mezcladora sobre la cal ya extendida, es inevitable en el estado actual de las técnicas de ejecución. Por lo tanto, es necesario prestar atención para no modificar la dosificación de la cal debido a los movimientos de la máquina, teniendo las siguientes precauciones:

- Limitando la velocidad de traslado
- Suprimiendo maniobras inútiles
- Vigilando que la velocidad del motor no cree perturbaciones que provoquen polvo.

Por otra parte, el mezclado ahueca enormemente los materiales que están junto a una y otra parte de la banda mezclada. Es imperativo, cuando se trata de bandas anexas, el entrar por lo menos 20 cm en la parte ya escarificada para no dejar el material no mezclado en los bordes de las bandas.

El mezclado debe realizarse sin demora tras la extensión de la cal.

En el caso de que el mezclado se haga en dos etapas; inicial y remezclado, debe procederse de la forma siguiente:

A continuación del mezclado inicial, el material tratado con cal debe ser igualado para darle forma y compactado ligeramente con objeto de reducir las pérdidas por evaporación, disminuir los posibles daños debidos a lluvias fuertes y reducir la carbonatación de la cal. Para esto, es adecuado una apisonadora de rodillo lisos de 2700 Kg. por metro de anchura.

El remezclado, cuando es necesario, debe llevarse a cabo con un rotobator o pulvimezclador. Después del acondicionamiento, el suelo debe ser suficientemente friable para conseguir el grado de finura deseado durante el mezclado final. Se debe lograr que un 95% pase el tamiz UNE 20 mm y al menos el 60% pase por el tamiz UNE 5 mm. Cuando sea necesario, se pueden aplicar más pasadas de la mezcladora para asegurar un mezclado uniforme, lo que normalmente se detecta por uniformidad del color, y la finura deseada. Durante el remezclado se puede añadir agua para asegurar que el contenido de humedad del material estabilizado es el óptimo, o está ligeramente por encima. Si es posible, el agua debe ser potable o para hormigonado y se debe evitar el agua ácida. El agua puede rociarse desde un camión cisterna o introducirse en el capó de la mezcladora a través de una barra rociadora por medio de un camión cisterna que trabaje en serie. Merece la pena observar que por cada aumento del 1% del contenido de humedad se necesitan unos 20 litros/m² de agua. Para mantener el contenido de humedad del suelo, debe añadirse agua equivalente a dos veces el peso de la cal viva.

Si la obtención de la granulometría demandada se vuelve difícil o imposible debido al carácter plástico y cohesionado del suelo, es recomendable proceder a un mezclado en etapas espaciadas entre 24 y 48 horas al objeto de dejar a la cal el tiempo necesario para deshacer los terrones de arcilla. En éste caso el suelo debe estar ligeramente compactado tras el primer mezclado, sobre todo si hay riesgos de precipitaciones.

8.8 CARACTERÍSTICAS DE LOS PRINCIPALES EQUIPOS DE MEZCLADO

TIPOS DE MAQUINARIA Y CARACTERÍSTICAS	UTILIZACIONES COMUNES	GAMA DE RENDIMIENTOS
<p>GRADAS DE DISCOS</p> <p>Modelos agrícolas pesados</p> <p>Modelos específicos Obra Pública (discos de 0,8 a 1,2 m)</p> <p>Tirados por tractores de P>50 CV</p> <p>Profundidad de mezcla: 20 a 25 cm</p> <p>Anchura de trabajo: 2 a 3 m</p>	<p>Suelos Arcillosos</p> <p>Tamaño. máximo :300 a 500 mm</p>	<p>200 a 600 m³/hora</p>

TIPOS DE MAQUINARIA Y CARACTERÍSTICAS	UTILIZACIONES COMUNES	GAMA DE RENDIMIENTOS
<p>VERTEDERAS</p> <p>Tirados por orugas de P > 300 CV</p> <p>Profundidad de mezcla: 30 a 40 cm</p> <p>Anchura de trabajo: 2 a 3 m</p>	<p>Suelos Arcillosos y Cretas</p> <p>Tamaño. máximo : 300 a 500 mm</p>	<p>300 a 600 m³/hora</p> <p>Según tipo de obra</p>
<p>ROTABATORS</p> <p>Modelos agrícolas pesados.</p> <p>Tirados por tractores de P>100 CV</p> <p>Profundidad de mezcla: 30 a 35 cm</p> <p>Anchuras de trabajo: 2,5 a 3 m</p>	<p>Suelos Arcillosos</p> <p>Tamaño máximo : <200 mm</p>	<p>100 a 300 m³/hora</p>
<p>PULVIMEZCLADORES</p> <p>Automotrices de (300 a 450 CV)</p> <p>Profundidad de mezcla: 30 a 50 cm</p> <p>Anchura de trabajo: 2 a 2,5 m</p>	<p>Adaptado a explanadas, bases y sub-bases de carreteras</p> <p>Tamaño máximo < 50 mm</p>	<p>200 a 600 m³/hora</p>

9-COMPACTACIÓN TERMINACIÓN Y PROTECCIÓN DE LAS CAPAS ESTABILIZADAS CON CAL

9.1. COMPACTACIÓN

La compactación de los materiales tratados se realiza tras su nivelación por medio de máquinas con hojas (bulldozer, niveladora), en capas de espesor compatible con los rendimientos de los compactadores ya sean éstos, de neumáticos, vibrantes o de pata de cabra (Fig.19 y Fig.20). La compactación de los suelos tratados, que se van a utilizar en explanadas y bases o sub-bases de carreteras debe ser particularmente cuidada; ésto implica la aplicación de una energía de compactación elevada debido a las dosificaciones de cal habitualmente utilizadas.



Fig. 19. Compactadora de pata de cabra.



Fig. 20. Compactadora de rodillos.

Para obtener el máximo desarrollo de la resistencia y durabilidad de la capa estabilizada, las mezclas suelo-cal deben compactarse adecuadamente. Los principios que gobiernan la compactación de las mezclas suelo-cal son los mismos que para el material no tratado. De forma similar, la maquinaria adecuada para la compactación del suelo no tratado es adecuada para compactar el suelo tratado. En general, la compactación inicial se realiza utilizando un rodillo de pata de cabra, seguido de una apisonadora lisa, para compactar la zona superior y dejar un acabado liso y cerrado, particularmente en el caso de explanadas.

Ambas apisonadoras pueden ser vibrantes para mejorar la eficacia, pero hay que tener cuidado para asegurar que no suba agua desde las capas inferiores como resultado de la vibración.

A diferencia de los materiales tratados con cemento, los suelos tratados con cal pueden compactarse hasta 2 ó 3 días después del mezclado. Sin embargo, no debe dejarse secar el suelo o la cal se carbonatará. Si la compactación final se va a retrasar entonces la superficie debe sellarse con un ligero apisonado o riego asfáltico.

Cuando se utilice cal viva, la compactación deberá realizarse, preferentemente, entre dos y cuatro horas después del mezclado a fin de dar tiempo a que toda la cal viva se haya hidratado.

Durante la compactación, las irregularidades de la superficie aparecerán y deberán corregirse con una última nivelación.

El comportamiento de un suelo fino tratado con cal es tal que la densidad seca obtenida es muy sensible a la energía de compactación y, tanto más, cuanto la dosificación en cal es mayor, (caso de explanadas)

Es muy importante que sea compactada la capa estabilizada en todo su espesor. Por esta razón, las capas a estabilizar tienen un espesor entre 0,3 m y 0,5 m.

9.2 PRECAUCIONES PARTICULARES

En el caso en que la dosificación de cal sea débil, por ejemplo donde se desea obtener un CBR poco elevado, entre 5 y 10, el índice CBR decrece cuando la energía de compactación sobrepasa un cierto valor, este efecto es debido a la aproximación al grado de saturación de la mezcla suelo-cal.

Sin embargo, cuando las dosificaciones en cal son relativamente altas, caso de explanadas, el índice CBR crece notablemente en función de la energía de compactación.

En ambos casos, debe tenerse en cuenta el contenido de agua natural del terreno y su magnitud respecto a la humedad óptima dada por los ensayos de laboratorio.

La compactación de explanadas, cuando estas recubren un suelo fino no tratado, puede llegar a ser difícil y, a veces, imposible por la falta de capacidad portante del suelo subyacente.

Estos factores hacen particularmente interesante la ejecución de tramos de prueba que, en función de las condiciones de la obra, permitan definir el espesor de las tongadas a compactar y definir la maquinaria para la compactación y sus condiciones de utilización.

Es necesario que con la compactación para el caso de explanadas, sub-bases y bases, se obtenga, en las mezclas suelo-cal, al menos un 100% de la densidad óptima dada por el ensayo Proctor Normal.

La compactación deberá comenzar, preferiblemente, inmediatamente después del mezclado, excepto en el caso de uso de cal viva donde es conveniente que la compactación tenga un retraso de algunas horas para favorecer la hidratación de la cal cuando no se tema la aparición de la lluvia.

En ningún caso, se retrasará la compactación más de cinco días a partir del mezclado final, siendo conveniente no pasar de 3 días.

9.3 CONTROL DE LA COMPACTACIÓN

La condición principal que debe obtenerse con la compactación es lograr el CBR especificado, por lo que la mezcla suelo-cal debe alcanzar una densidad tal que no haya peligros de hundimiento posterior.

Por ello, las medidas de densidad y humedad in situ permitirán controlar la densidad seca obtenida. Junto a lo anterior, la determinación del grado de porosidad y de saturación permitirá comprobar que no existirán debilitamientos de la resistencia del suelo tratado al desarrollarse presiones intersticiales bajo cargas.

Finalmente, el ensayo de placa de carga in situ evaluará la capacidad portante obtenida, considerando la incidencia en la misma de las variaciones encontradas en los ensayos de densidad.

9.4 TERMINACIÓN Y PROTECCIÓN DE EXPLANADAS

La explanada compactada, deberá ser curada durante un período de 3 a 7 días para permitir su endurecimiento antes de colocar la correspondiente capa de sub-base o base; el tiempo exacto deberá ser determinado en cada caso. El curado puede ser efectuado mediante una de las dos formas siguientes:

- manteniendo la superficie en condiciones húmedas mediante un regado ligero y compactando cuando sea necesario.
- mediante una membrana de curado formada por un sellado de la superficie de la explanada con un riego asfáltico que puede hacerse en varias fases hasta totalizar una dotación de 0,5 a 1,0 Kg/m² según el tipo de terreno.

Si la explanada ha pasado el invierno sin estar recubierta, se corre el peligro de que su parte superior este deteriorada por los efectos conjugados de la lluvia y los posibles ciclos hielo-deshielo.



La amplitud del deterioro dependerá de la compactación, de la edad del suelo estabilizado y de la dosificación en cal.

Para evitar lo anterior, una vez compactada la explanada deberá ser protegida mediante una de las siguientes formas:

- Con la aplicación de una película impermeable de curado si el tráfico que va a sufrir la explanada es poco intenso; en este caso, la terminación de la explanada se hará a la cota definitiva.
- Dando a la explanada un ligero sobreespesor (de 5 a 10 cm) que será suprimido por una nivelación definitiva antes de la puesta sobre ella de las siguientes capas de la carretera.

La nivelación de la explanada se hará por cepillado.

En caso de que se produzca una flecha importante, se podrá efectuar una nivelación con aporte de material, realizando previamente una escarificación con un espesor de aproximadamente 10 cm.

En el caso de obras de carreteras, han dado resultados satisfactorios para protección de capas tratadas (explanadas, sub-bases y bases), cuando van a permanecer sin recubrir durante largo tiempo o bajo condiciones atmosféricas adversas (lluvia, heladas, etc.); los siguientes tratamientos superficiales:

a) Si se espera un tráfico limitado a vehículos ligeros:

- Extensión de una emulsión catiónica con un 60% de betún asfáltico 80/100 a razón de 1,2 Kg./m²
- Extensión de una gravilla 4/6 o 6/10 a razón de 8 l/m²
- Sellado por compactador de neumáticos o rodillo no vibratorio

b) Si el tráfico previsto es pesado:

- Gravillonado a razón de 10 l/m² de gravilla 10/14 o 14/20 de roca dura, colocada mediante compactador de neumáticos o rodillo no vibratorio.
- Extensión de una emulsión catiónica al 60% de betún asfáltico 80/100 a razón de 1,2 Kg/m².
- Gravillonado a razón de 8 l/m² de gravilla 6/10.
- Sellado con compactador de neumáticos o, en su defecto, con rodillo no vibratorio.

En ambos casos, la protección de las capas debe comenzar tan pronto estén terminadas.

10-LA SEGURIDAD



10.1 NORMATIVA

Además de las Fichas de Seguridad de las cales viva y apagada, redactadas por ANCADE según la reciente Normativa Europea, que se incluyen como anejo al presente capítulo, es oportuno tener en cuenta las recomendaciones generales que deben de respetarse para el correcto manejo en obra de éstos productos.

10.2 PRECAUCIONES A TOMAR EN EL MANEJO DE LA CAL

El empleo de la cal, al igual que la mayoría de los materiales o productos químicos normales, no tiene peligro a condición de que se observen algunas precauciones simples. Se debe evitar que la cal viva entre en contacto con la piel; el riesgo de graves quemaduras es mínimo, aunque en contacto prolongado con la piel, cuando existe sudoración, puede causar irritaciones en las zonas donde la ropa está demasiado ajustada. En personas con pieles especialmente sensibles, se han producido dermatosis después de un contacto prolongado. Es conveniente lavar cuanto antes las zonas afectadas con abundante agua.

Las personas que poseen más riesgos de accidentes, son las encargadas de manipular los sacos de cal en la obra y/o de manejar los equipos de transporte, almacenamiento y extendido, por los que serán las que mayor atención deberán prestar al cumplimiento de las medidas de seguridad. El empleo de cal en sacos exige mayor atención en éste aspecto que el empleo de cal a granel. Por contra, con la lechada de cal los riesgos son mínimos, aunque los ojos deberán seguir siempre protegidos.

Es preciso esmerar las precauciones, durante el transporte en camiones de los productos, el llenado de los silos de almacenamiento y la carga de las extendedoras. Los siguientes consejos tienen como objetivo evitar que puedan producirse irritaciones y pequeñas quemaduras.

10.2.1 ROPA DE TRABAJO

Deberán tomarse las siguientes precauciones:

Llevar camisa de manga larga (no tolerar mangas recogidas ni cortas).

Llevar botas o zapatos que cubran el tobillo.

Llevar guantes.

No vestirse con ropa excesivamente ajustada en cuello y puños, porque el roce con la piel favorece la irritación de la misma. Una pequeña protección de tejido suave (algodón) puede ponerse alrededor del cuello para evitar la penetración de partículas de cal.

10.2.2 PROTECCIÓN DE LOS OJOS

Durante la manipulación de la cal se deben utilizar gafas de seguridad cerradas por los lados.

10.2.3 PROTECCIÓN DE LAS VÍAS RESPIRATORIAS

Aunque la inhalación del polvo de cal no es tóxica, si la atmósfera de trabajo está cargada de polvo de cal, se deben llevar mascarillas filtrantes. Las mascarillas que recubren el rostro son muy incómodas de llevar y no convienen en éstos casos. En la medida de lo posible, los vehículos destinados a trabajar en atmósferas cargadas con polvo de cal, deberán llevar cabinas estancas ligeramente presurizadas.

10.3 PRIMEROS AUXILIOS

Estos consejos de seguridad, se dirigen sobretodo a las empresas que utilizan la cal por primera vez, ya que las que tienen un personal conocedor del manejo de la cal no tienen ningún problema. En todo caso, no solo es importante tener en cuenta las mínimas precauciones a tomar antes del inicio de los trabajos, sino también velar por su cumplimiento.

De hecho, la cal no es más peligrosa para la epidermis que el cemento o el mortero. La cal en polvo es simplemente más fina y ligera y por lo tanto su dispersión con el venteo es mayor.

10.3.1 QUEMADURAS E IRRITACIONES DE LA PIEL

Lavar completamente con agua templada y jabón para eliminar cualquier rastro de cal y aplicar una pomada contra las quemaduras recubriendo con gasa esterilizada la zona afectada.

10.3.2 CAÍDA DE CAL EN LOS OJOS

Mantener el ojo abierto y aclarar inmediatamente con agua abundante.

Informar lo antes posible de toda quemadura o proyección de la cal a los ojos, para recibir atención médica.

CAL VIVA

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

(1º) - IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO Y DE LA EMPRESA

1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO

- * Nombre Químico - Óxido de Calcio.
- * Nombre Comercial - Cal viva o cal grasa.
- * Nº de registro CAS - 1305-78-8.
- * Nº EINECS - 215-138-9.
- * Nº EEC - No registrado.
- * Fórmula Química - CaO.
- * Estado Físico - Sólido, en diferentes granulometrias.
- * Peso Molecular - 56,08.

1.2 IDENTIFICACIÓN DEL FABRICANTE

- * Empresa
- * Dirección
- * Persona de contacto
- * Teléfonos
- * Fax

(2º) COMPOSICIÓN / INFORMACIÓN DE SUS CONSTITUYENTES

Sustancia de un solo componente, cal viva, óxido de calcio, con pequeños porcentajes de SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO y CO₃Ca, procedentes de la materia prima de carácter, caliza. Producto natural obtenido por calcinación a aprox. 1.000 °C de CO₃Ca.

(3º) - IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS

- * Irritante para la piel si existe sudor, mucosas y ojos.
- * No inflamable. En caso de incendio, éste producto no es inflamable.
- * Reacción exotérmica. En contacto con el agua, los ojos y la piel incluso con el sudor, la cal viva reacciona generando fuerte calor y aumento del pH que puede producir quemaduras en la piel, ojos y vías respiratorias.

* Símbolos de Peligro :

- Xi : irritante.
- R 41 : riesgo de lesiones graves en los ojos.
- R 37 : irrita las vías respiratorias.
- R 38 : irrita la piel.

(4º) - PRIMEROS AUXILIOS

- * SÍNTOMAS
- Inhalación : irritación, dolor de garganta, tos, estornudos.
- Ojos : irritación fuerte, lágrimas, quemaduras.
- Piel : irritación, picor, con sudoración quemaduras superficiales.
- Ingestión : irritación, dolor de garganta, dolor de estómago, calambres, diarrea, vómitos.

* PRIMEROS AUXILIOS/TRATAMIENTO

- Inhalación : respirar profundamente aire fresco.
- Ojos : lavar el ojo abierto lo antes posible con abundante agua fresca durante 15 minutos para eliminar las partículas. No neutralizar. Urgente atención médica
- Piel : retirar la ropa y lavarse bien con agua y jabón.
- Ingestión : beber abundante leche ó agua. Conseguir urgente atención médica.

(5º) - MEDIDAS EN CASO DE INCENDIO

- Producto no inflamable.
- Riesgo particular : en contacto con agua, desprende mucho calor. Reacción exotérmica. Puede ser riesgo para materiales inflamables.
- Precauciones en caso de incendio : evitar el agua utilizando agentes extintores en polvo.

(6º) - MEDIDAS DE SEGURIDAD PARA EVITAR ACCIDENTES

- Evitar el contacto con ojos y piel, usar botas de agua, guantes, gafas de seguridad y ropa de trabajo adecuada.
- No inhalar el polvo : usar mascarilla anti polvo en particular en lugares poco ventilados.
- Metodo de limpieza : evacuación mecánica seca. Las pequeñas cantidades se limpian con abundante agua vía desagües.
- Precauciones para el medio ambiente : El producto no debe derramarse sin control en el agua ya que aumenta el pH. Su efecto no resulta permanente.

(7º) - MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO

- Manipulación : en lugares ventilados.
- Almacenamiento : en lugares secos, protegidos de la humedad y separado de los ácidos y del agua.
- Ensacado : en sacos con protección a la humedad ó en bidones herméticos.

(8º) - CONTROL DE EXPOSICIÓN / PROTECCIÓN DEL PERSONAL

- Datos Técnicos : Valor límite tolerable en el aire 5 mg/m³.
- Protección respiratoria : Usar mascarilla antipolvo y en particular en lugares poco ventilados.
- Protección ocular : Usar gafas de seguridad.
- Protección de las manos : Usar guantes de seguridad.
- Protección de la piel : Usar ropa de trabajo adecuada. Camisas de manga larga y pantalón por encima del calzado.

(9º) - PROPIEDADES FÍSICAS y QUÍMICAS

- * Aspecto : blanco inodoro, fuerte carácter higroscópico.
- * pH : 12,4 en solución saturada a 25° C
- * Punto de ebullición : 2.850 °C.
- * Punto de fusión : 2.600 °C
- * Punto de inflamación : no inflamable.

- * Auto ignición : no auto inflamable.
- * Límites de inflamabilidad : ninguno.
- * Riesgo de explosión : ninguno.
- * Presión de vapor : no volátil.
- * Densidad real : 3.340 Kg/m³a 20 °C
- * Densidad aparente : 0,7 a 1,2 Kg/l

* Solubilidad :

- Soluble en ácidos, glicerina y soluciones de azúcar.
- Ligeramente soluble en agua :
 - A 20° C - 1,25 Kg/m³
 - A 100° C - 0,54 Kg/m³

CAL VIVA

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

(10º) - ESTABILIDAD DEL PRODUCTO Y REACTIVIDAD

- * Estabilidad : producto estable a todas las temperaturas y por tiempo indefinido si permanece aislado de la humedad y del CO₂.
- * Descomposición tº : no se descompone.
- * Evitar : lugares húmedos y la proximidad de ácidos.
- * Reactividad con ácidos : reacción exotérmica fuerte con los ácidos para formar sales de calcio con desprendimiento de calor.
- * Reactividad con agua : reacciona para formar hidróxido cálcico, desprendiendo calor.

$$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2 + 277 \text{ Kcal/Kg CaO}$$
- * Materiales a evitar : ácidos, agua.
- * Productos peligrosos de descomposición : ninguno.

(11º) - INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

- Producto no tóxico. Ver los puntos 3 y 4 sobre identificación de riesgos y primeros auxilios.

(12º) - INFORMACION ECOLÓGICA

- Sustancia de carácter básico que puede provocar un aumento de pH hasta 12,5 para concentraciones de 1,25 g/l de CaO. Este pH decrece rápidamente con la dilución formando hidróxido de calcio. El hidróxido de calcio de forma progresiva se solubiliza con el agua y se recarbonata formando carbonato de calcio CO₂Ca. El carbonato de calcio, tiene un carácter ecológico neutro.
- Vertidos accidentales en aguas superficiales, pueden causar daños en la vida acuática por elevación transitoria del pH y la temperatura.

(13º) - CONSIDERACIONES RELATIVAS A SU ELIMINACIÓN

- Desde el punto de vista medio ambiental, el producto puede ser eliminado sin peligro atendiendo a la información del punto nº 11. Su eliminación, no está sujeta a ninguna Legislación Europea.

(14º) - TRANSPORTE

- | | |
|--|--|
| * UN nº : 1.910 | UN : nº de las Naciones Unidas. |
| * ADR : no está incluido. | ADR : Acuerdos Europeos para el transporte por carretera de sustancias peligrosas. |
| * IMDG : Mencionado por su naturaleza química. | IMDG : Código internacional para transporte marítimo de mercancías peligrosas. |
| * IATA : Clase 8, grupo III | IATA : Asociación internacional para el transporte aéreo. |
| * RID : no está incluido. | RID : Transporte por ferrocarril de sustancias peligrosas.Regulación Internacional |

(15º) - REGLAMENTACIÓN

- | | |
|--|---|
| * Símbolo : X i - irritante. | * Normas de seguridad : |
| * Riesgos Particulares : | - S 2 : fuera del alcance de los niños. |
| - R 41 : riesgo de lesiones oculares graves en los ojos. | - S 8 : mantener protegido de la humedad. |
| - R 37 : irrita las vías respiratorias. | - S 24 : evitar el contacto con la piel. |
| - R 38 : irrita la piel. | - S 25 : evitar el contacto con los ojos. |
| | - S 26 : en caso de contacto con los ojos, lavar con abundante agua y con sultar al especialista. |
| | - S 38 : en caso de ventilación insuficiente, usar aparatos respiratorios adecuados. |
| | - S 39 : usar protección para ojos y cara. |

(16º) - INFORMACIÓN ADICIONAL

- La información ofrecida es complementaria de las hojas técnicas, pero no la sustituye y se basa en los conocimientos que se disponen y se ofrecen con la mejor intención.
 El usuario es totalmente responsable de los riesgos y peligros generados por el uso de este producto en su actividad.
 El usuario, es responsable de tomar las precauciones necesarias para usar el producto.
 De total conformidad con :
 - Acuerdo de la Directiva Europea 91/155 EEC modificada por la Directiva 93/112/EC de la Comisión en aplicación del artículo 10 de la Directiva 88/379/CEE del Consejo.
 - Equivalente técnicamente al borrador de la norma internacional ISO/DIS 11014 : 92
 - RD 363/1.995 del BOE 5/6/95

HIDRATO DE CAL

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

(1º) - IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO Y DE LA EMPRESA

1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO

- * Nombre Químico - Hidróxido de Calcio.
- * Nombre Comercial - Cal apagada ó hidratada, Hidrato de Calcio, Flor de Cal.
- * Nº de registro CAS - 1305-62-0.
- * Nº EINECS - 215-137-3.
- * Nº EEC - No registrado.
- * Fórmula Química - Ca(OH)2.
- * Estado Físico - Polvo fino.
- * Peso Molecular - 74,08.

1.2 IDENTIFICACION DEL FABRICANTE

- * Empresa
- * Dirección
- * Persona de contacto
- * Teléfonos
- * Fax

(2º) COMPOSICIÓN / INFORMACIÓN DE SUS CONSTITUYENTES

Sustancia de un solo componente, Hidróxido de Calcio ó Hidrato de Cal, con pequeños porcentajes de SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO y CO₃Ca, procedentes de la materia prima de carácter natural, caliza. Producto natural obtenido por mezcla de cal viva y agua.

(3º) - IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS

- * Irritante para la piel, mucosas y ojos.
- * Puede causar lesiones en la cornea.
- * No inflamable. En caso de incendio, éste producto no es inflamable.

* Símbolos de Peligro :

- Xi : irritante.
- R 36 : irrita los ojos.
- R 37 : irrita las vías respiratorias.
- R 38 : irrita la piel

(4º) - PRIMEROS AUXILIOS

- * SINTOMAS
 - Inhalación : irritación, dolor de garganta, tos, estornudos.
 - Ojos : irritación, lagrimas, quemaduras.
 - Piel : irritación, picor, con sudoración puede producir quemaduras superficiales.
 - Ingestión : dolor de garganta, dolor de estómago, calambres, diarrea, vómitos.

* PRIMEROS AUXILIOS/TRATAMIENTO

- Inhalación : respirar profundamente aire fresco.
- Ojos : lavar el ojo abierto lo antes posible con abundante agua fresca durante 15 minutos para eliminar las partículas. No neutralizar. Urgente atención médica
- Piel : retirar la ropa y lavarse bien con agua y jabón.
- Ingestión : beber abundante leche ó agua. Conseguir urgente atención médica.

(5º) - MEDIDAS EN CASO DE INCENDIO

- Producto no inflamable.
- Se descompone a 580 °C dando óxido de calcio y agua. El óxido de calcio no es inflamable pero genera calor en contacto con el agua y los ácidos.

(6º) - MEDIDAS DE SEGURIDAD PARA EVITAR ACCIDENTES

- Evitar corrientes fuertes y repentinas de aire que puedan ventear el producto.
- Medidas Personales : usar gafas con protección lateral, mascarilla anti polvo en particular en lugares poco ventilados, ropa de trabajo adecuada y guantes.
- Metodo de limpieza : Las pequeñas cantidades se limpian con abundante agua vía desagües.
- Precauciones para el medio ambiente : El producto no debe derramarse sin control en el agua ya que aumenta el pH. Su efecto no resulta permanente.

(7º) - MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO

- Manipulación : En lugares ventilados.
- Almacenamiento : En lugares secos, protegidos de la humedad.
- Transporte : Separado de los ácidos.

(8º) - CONTROL DE EXPOSICIÓN / PROTECCIÓN DEL PERSONAL

- Datos Técnicos : Valor límite tolerable en el aire 5 mg/m³.
- Protección respiratoria : Usar mascarilla antipolvo en lugares poco ventilados.
- Protección ocular : Usar gafas de seguridad.
- Protección de las manos : Usar guantes de seguridad.
- Protección de la piel : Usar ropa de trabajo adecuada. Camisas de manga larga y pantalón por encima del calzado.

(9º) - PROPIEDADES FÍSICAS y QUÍMICAS

- * Aspecto : polvo blanco inodoro.
- * pH : 12,4 en solución saturada a 25° C
- * Punto de ebullición : no aplicable.
- * Punto de fusión : Se descompone a 580 °C
- * Auto ignición : no auto inflamable.
- * Límites de inflamabilidad : ninguno.
- * Riesgo de explosión : ninguno.
- * Presión de vapor : no volátil.
- * Densidad real : 2.200 Kg/m³ a 20 °C
- * Densidad aparente : 0,3 a 0,6 Kg/l
- * Solubilidad :
 - Soluble en ácidos, glicerina y soluciones de azucar.
 - Ligeramente soluble en agua :
 - A 0° C - 1,85 Kg/m³
 - A 20° C - 1,65 Kg/m³
 - A 100° C - 0,71 Kg/m³

HIDRATO DE CAL

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

(10º) - ESTABILIDAD DEL PRODUCTO Y REACTIVIDAD

- * Estabilidad : producto estable, a temperatura ambiente poco soluble.
- * Descomposición tº : a 580 °C
- * Coeficiente de partición (n-octanol / agua) : no procede.
- * Reactividad : reacción exotérmica con los ácidos para formar sales de calcio.
- * Condiciones a evitar : reacciona con aluminio en presencia de agua
 $\text{Ca(OH)}_2 + 2 \text{Al} + 6 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(Al(OH)}_4)_2 + \text{H}_2$
- * Materiales a evitar : ácidos.
- * Productos peligrosos de descomposición : ninguno.

(11º) - INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

- Producto no tóxico. Ver los puntos 3 y 4 sobre identificación de riesgos y primeros auxilios.

(12º) - INFORMACION ECOLÓGICA

- Sustancia de carácter básico que puede provocar un aumento de pH hasta 12,5 para concentraciones de 1.600 mg/l.
- El hidróxido de calcio se solubiliza progresivamente y se recarbonata formando carbonato de calcio CO_3Ca . El carbonato de calcio, tiene un carácter ecológico neutro.
- Vertidos accidentales en aguas superficiales, pueden causar daños en la vida acuática por elevación transitoria del pH.

(13º) - CONSIDERACIONES RELATIVAS A SU ELIMINACIÓN

- Desde el punto de vista medio ambiental, el producto puede ser eliminado sin peligro atendiendo a la información del punto nº 11.
- Su eliminación, no está sujeta a ninguna Legislación Europea.

(14º) - TRANSPORTE

- | | |
|------------------------------------|--|
| * UN nº : 1.759 | UN : nº de las Naciones Unidas. |
| * ADG : no está incluido. | ADR : Acuerdos Europeos para el transporte por carretera de sustancias peligrosas. |
| * IMDG : Clase 8. | IMDG : Código internacional para transporte marítimo de mercancías peligrosas. |
| * IATA : Clase 8, grupo I, II, III | IATA : Asociación internacional para el transporte aéreo. |
| * RID : no está incluido. | RID : Transporte por ferrocarril de sustancias peligrosas.Regulación Internacional |

(15º) - REGLAMENTACIÓN

- | | |
|---|---|
| * Símbolo : X i - irritante. | * Normas de seguridad : |
| * Riesgos Particulares : | - S 2 : fuera del alcance de los niños. |
| - R 36 : irrita los ojos. | - S 8 : mantener protegido de la humedad. |
| - R 37 : irrita las vías respiratorias. | - S 24 : evitar el contacto con la piel. |
| - R 38 : irrita la piel. | - S 25 : evitar el contacto con los ojos. |
| | - S 26 : en caso de contacto con los ojos, lavar con abundante agua y con sultar al especialista. |
| | - S 38 : en caso de ventilación insuficiente, usar aparatos respiratorios adecuados. |
| | - S 39 : usar protección para ojos y cara. |

(16º) - INFORMACIÓN ADICIONAL

- La información ofrecida es complementaria de las hojas técnicas, pero no la sustituye y se basa en los conocimientos que se disponen y se ofrecen con la mejor intención.
- El usuario es totalmente responsable de los riesgos y peligros generados por el uso de este producto en su actividad.
- El usuario, es responsable de tomar las precauciones necesarias para usar el producto.
- De total conformidad con :
- Acuerdo de la Directiva Europea 91/155 EEC modificada por la Directiva 93/112/EC de la Comisión en aplicación del artículo 10 de la Directiva 88/379/CEE del Consejo.
 - Equivalente técnicamente al borrador de la norma internacional ISO/DIS 11014 : 92.
 - RD 363/1.995 del BOE 5/6/95.

11-INTERÉS ECONÓMICO DEL TRATAMIENTO DE LA ESTABILIZACIÓN CON CAL

11.1 LAS VENTAJAS ECONÓMICAS DIRECTAS E INDIRECTAS

En construcción, la utilización de un determinado material o procedimiento constructivo se hace, casi siempre, por razones económicas. El caso de los tratamientos y estabilizaciones de suelos con cal es un claro ejemplo de como puede alcanzarse, al mismo tiempo, una solución técnica y económicamente correcta, con ventajas adicionales de tipo medioambiental. Entre las ventajas obtenidas están las que se citan a continuación.

11.1.1 REUTILIZACIÓN DE LOS SUELOS DE LA TRAZA, EVITANDO LOS MATERIALES DE PRÉSTAMO

Como los recursos, en éste aspecto, son cada vez más limitados y el impacto sobre el medio ambiente es considerable, las ventajas que se obtendrán son:

- No se requieren préstamos.
- Se evitan operaciones de transporte y acopios.
- Mejor aprovechamiento de terrenos marginados.
- Mejor gestión de los recursos naturales.

11.1.2 MEJORA DE LAS CONDICIONES DE TRABAJO Y DE LA PRODUCTIVIDAD

Al facilitarse la circulación de la maquinaria en obra y reducirse las paradas por malas condiciones atmosféricas, lo que implica:

- Una disminución de los costes de la obra.
- Un mejor cumplimiento de los plazos de ejecución.
- Un aumento de la rentabilidad de las obras, que pueden estar listas para su uso en menos tiempo.

11.1.3 MEJORA DE LAS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Las capas estabilizadas suelen utilizarse para sustituir a otras capas constituidas por materiales que no se encuentran en la traza o cercanos a la obra pero, en muchos casos, la estabilización produce una mejora de las características de la capa donde:

- La mejora de los materiales permite reducir las cantidades de los mismos.
- Se aumenta la duración de las estructuras, disminuyendo sus costes de mantenimiento.

11.2 PARÁMETROS PRÁCTICOS QUE INFLUYEN SOBRE LOS COSTES

11.2.1 LA CAL

Durante los estudios previos, una vez conocida la capacidad portante a obtener, la dosificación de cal se determina en función de los contenidos de agua estimados y capacidad portante deseada.

Durante la ejecución de la obra, el conocimiento en tiempo real de la humedad de los suelos, permite ajustar mejor las dosificaciones. Esta actuación conduce al cálculo de la dosificación óptima. Las características y especificaciones de la cal vienen definidas por la Norma UNE 80-502.-97

11.2.2 PREPARACIÓN DE LOS SUELOS

La escarificación previa de los suelos compactos y arcillosos contribuirá a la mejora de los rendimientos del mezclado.

11.2.3 ALMACENAMIENTO Y EXTENDIDO

El área de almacenamiento se acondicionará cerca del lugar de tratamiento para disminuir los costos de transporte.

La precisión del equipo que realice el extendido es un factor de ahorro apreciable, ya que evita las posibles sobre-dosificaciones, negativas en el aspecto técnico y económico

11.2.4 EL MEZCLADO

La calidad del mezclado se determinará en función de cada parte de obra considerada. Para aplicaciones en explanadas, subbases y bases, el mezclado deberá ser de calidad utilizando pulvimezcladores de eje horizontal.

El uso del tandem mezclador móvil-estabilizadora permite evitar la formación de polvo y, por tanto, además del beneficio sobre el medio ambiente, se evita la pérdida económica que significa el desaprovechamiento de la cal que se va en forma de polvo

En caso de terraplenes y rellenos será suficiente con mezclados más someros (gradas de discos, etc).

11.2.5 CONCLUSIONES

Por las ventajas que presentan el tratamiento con cal (y cal + cemento), su utilización se recomienda cada vez con mayor frecuencia, en los siguientes casos:

- Optimización de la reutilización de los materiales.
- Materiales húmedos.
- Plazos de realización cortos.
- Trabajos en periodos de mal tiempo.

TABLA COMPARATIVA DE LOS COMPONENTES DEL COSTO A CONSIDERAR

Solución de "ESTABILIZACIÓN CON CAL"	Solución de "PRÉSTAMO"
Suministro de cal Almacenamiento de la cal Preparación de los suelos Extendido de la cal Mezclado Nivelación y compactación * Extracción * Transporte	Costo del material de préstamo - permisos de extracción - costo de extracción Costo de reacondicionamiento: del terreno de los acopios del terreno de los préstamos Costo de transporte Sobrecoste de construcción y de mantenimiento de las vías de servicio en las obras Costo de caballeros: - incluye la extracción y acarreo a un vertedero del material no usado Costo de puesta en obra: - extendido y humectación en su caso - compactación

ANEXO 3: LISTADO DE FABRICANTES DE CALES Y DERIVADOS (ANCADE)

• NORMATIVA •

Norma armonizada, de obligatorio cumplimiento.

UNE-EN 459-1:

Cales para la construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad.

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.

Las Cales para la construcción deben tener obligatoriamente, a partir del 1 de Agosto de 2003 el **Marcado CE** para su comercialización y uso. El **Marcado CE** significa que la Cal que lo posee es conforme con la **Norma Armonizada UNE-EN 459-1**.

Normas específicas sobre la Cal para obras de Ingeniería Civil.

Además de tener el **Marcado CE** y cumplir la **Norma Armonizada UNE-EN 459-1**, deberán seguir las normas siguientes:

UNE 80 502:

Cales vivas o hidratadas utilizadas para la mejora y/o estabilización de suelos.

UNE 80 503:

Cal hidratada para usar en mezclas asfálticas.

• USOS PRINCIPALES DE LA CAL •

Construcción:
Ingeniería Civil y
Obras Públicas.

Siderurgia y
Metalurgia.

Tratamiento
de aguas
y gases.

Industrias
Químicas.

Agricultura.



ASOCIACIÓN NACIONAL DE
FABRICANTES DE CALES Y
DERIVADOS DE ESPAÑA

Miembro de:



ANCADE • Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España
Goya, 23 - 3ª derecha - 28001 Madrid • Teléfono 914 261 291 - Fax 914 315 799
ancade@accurretera.com

Goya, 23 - 3ª derecha - 28001 Madrid • Teléfono 914 261 291 - Fax 914 315 799
ancade@accurretera.com



• LISTADO DE MIEMBROS •

- 1 **ANDALUZA DE CALES, S.A.** (● ● ●) 8 **CALES DE LA PLANA, S.A.** (● ● ●)
Ctra. Morón-Montellano km 3 La Pedrera s/n
41530 Morón de la Frontera (Sevilla) 12592 Chilches (Castellón)
Tfno: 95-4851112 - Fax: 95-4852959 Tfno: 964-590105 - Fax: 964-583046
- 2 **CAL DE CASTILLA, S.A.** (● ● ●) 9 **CALES DE LLIERCA, S.A.** (● ● ●)
Ctra. de Valencia km 31 17853 Argelaguer (Girona)
28500 Arganda del Rey (Madrid) Tfno: 972-687020 - Fax: 972-687416
Tfno: 91-8715481 - Fax: 91-8700867
- 3 **CAL GOV, S.A.** (● ● ●) 10 **CALES DE PACHS, S.A.** (● ● ●)
Ctra. Fuente de Santiago km 2,5 Montaña de San Jaime, afueras
41560 Estepa (Sevilla) Tfno: 93-8903011 - Fax: 93-8903689
Tfno: 95-5912600 - Fax: 95-5912899
- 4 **CAL INDUSTRIAL, S.A.** (● ● ●) 11 **CALES PASCUAL, S.L.** (●)
Pedro I, 19-21 Ctra. Valencia-Ademuz km 9,3
31007 Pamplona (Navarra) 43980 Paterna (Valencia)
Tfno: 948-268511 - Fax: 948-170202 Tfno: 96-1321273 - Fax: 96-1324358
- 5 **CALERA DE ALZO, S. L.** (● ● ●) 12 **CALESTEP, S.L.** (● ● ●)
Egileor Auzoa, 101 Pozo de li Albujea s/n
20268 Alzo (Guipúzcoa) 41560 Estepa (Sevilla)
Tfno: 943-653243 - Fax: 943-654895 Tfno: 95-5912696 - Fax: 95-5912908
- 6 **CALERAS DE SAN CUCAO, S.A.** (● ● ● ●) 13 **COMPañA ESPAñOLA DE INDUSTRIAS ELECTROQUÍMICAS (CEDIE), S.A.** (● ● ● ●)
33425 Agüera-San Cuaao Avda. de Galicia, 20
de Llanera (Asturias) 32300, O Barco de Valdeorras (Orense)
Tfno: 98-5770858/5770133 Tfno: 988-682000 - Fax: 988-682010
Fax: 98-5770825
- 7 **CALERAS GUIPUZCOANAS S.A.** (●) 14 **DERIVADOS CALCICOS, S.A. (BECSA), (● ● ●)**
Egileor Auzoa, 101 Pònt Major-Despoblado, 14
20268 Alzo (Guipúzcoa) 17007 Girona
Tfno: 943-653243 - Fax: 943-654895 Tfno: 972-207350/209893
Fax: 972-213636

• LISTADO DE MIEMBROS •

- 15 **DOLOMITAS DEL NORTE, S.A.** (● ● ●) 16 **TUDELA-VEGUÍN, S.A.** (● ● ● ●)
Barrio de Santullán s/n Argüelles 25
39706 Castro Urdiales (Cantabria) 33003 Oviedo (Asturias)
Tfno: 942-879294 - Fax: 942-879300 Tfno: 98-5981100 - Fax: 98-5981105

- Cal viva: obtenida mediante la calcinación de rocas calizas puras.
- Cal hidratada o apagada: producida por la hidratación de la cal viva.
- Dolomía calcinada: fabricada a partir de rocas dolomíficas (Carbonatos de calcio y magnesio).

