

**1Explanadas estabilizadas y capas de firme tratadas con cemento.
Aspectos prácticos**

Madrid, 18 de Mayo de 2.005

**CRITERIOS DE SELECCIÓN Y DOSIFICACIÓN EN LOS
TRATAMIENTOS CON CAL**

Juan Diego Bauzá Castelló

Profesor Asociado – E.T.S.A. Universidad de Sevilla

CRITERIOS DE SELECCIÓN Y DOSIFICACIÓN EN LOS TRATAMIENTOS CON CAL

1.- INTRODUCCIÓN

Esta conferencia, enmarcada en una jornada sobre tratamiento de materiales con cemento, está enfocada a la aplicación de la cal para la mejora de suelos predominantemente arcillosos, sin entrar a considerar otros usos y posibilidades de dicho tratamiento que deben ser objeto de estudios particulares. En ella se repasan los conceptos básicos que gobiernan el tratamiento de los suelos con cal, precisos para su aplicación y diseño.

2.- LA MODIFICACIÓN DE LOS SUELOS ARCILLOSOS CON CAL

La adición de cal a un suelo con una fracción de partículas finas relevante modifica su comportamiento por una conjunción de sus propiedades. En este apartado se describen los mecanismos que intervienen en este proceso, que se resume fundamentalmente en dos manifestaciones típicas:

- a) Una modificación de la textura del suelo; y
- b) Un incremento de su resistencia.

Estos hechos se producen en mayor o menor medida según el tipo de suelos, su granulometría y mineralogía, y el de la cal empleada, en función de su riqueza y actividad. Su justificación está en la alteración del estado natural de ambos materiales por las reacciones químicas que se producen en la interacción de sus estructuras.

Los mecanismos que conducen a estas modificaciones pueden descomponerse en una serie de reacciones diferenciadas que justifican mediante su combinación el efecto final. Estas reacciones tienen características temporales y de alcance dispares.

2.1.- Mecanismos de interacción de la cal sobre un suelo

En la mezcla de la cal con un suelo arcilloso se producen dos tipos de reacción que se pueden agrupar según sus manifestaciones en:

- a) Una **modificación “inmediata”** de las condiciones de granulometría, textura y compacidad originada por:
 - * Intercambio de iones entre la arcilla y la cal
 - * Floculación de las partículas de arcilla
 - * Reducción de la cantidad de agua adsorbida por la arcilla
- b) Una mejora de las **características resistentes** del suelo a medio y largo plazo, producida por:
 - * Reacción puzolánica de cementación

* Carbonatación

Amén de por los tipos de efectos, es posible definir una serie de diferencias entre los grupos citados que justifican la clasificación expuesta.

Una primera diferencia entre ambos grupos de mecanismos es, como se ha citado, su carácter temporal, ya que las modificaciones de textura son casi inmediatas, mientras que las resistentes suelen conllevar un plazo mayor.

La segunda diferencia estriba en su generalización. Mientras que el primer grupo de modificaciones es aplicable a casi todos los tipos de suelos arcillosos, las mejoras de resistencia se producen en mayor o menor medida, o incluso no llegan a ocurrir, en función de la mineralogía y tipos de suelos.

Finalmente, la tercera gran diferencia es la necesidad de cal precisa para alcanzar los efectos. En la mayoría de los casos la frontera o delimitación a partir de la cual se inicia el segundo grupo de mecanismos es la cantidad de cal. Puede decirse que las primeras dosis de cal van destinadas a la modificación de la textura y granulometría, y que para mejorar las características resistentes es preciso superar esta primera proporción. En caso contrario, no existirá adición activa o cal que facilite dichas reacciones.

A continuación se detalla cada uno de los efectos citados, sus fundamentos, consecuencias y limitaciones.

2.2.- El intercambio iónico

Cuando la cal toma contacto con las arcillas los cationes de calcio tienden a reemplazar a aquéllos otros que están adsorbidos en la superficie de sus partículas, dispersos en lo que se ha llamado la capa doble. Desplazan así a cationes monovalentes usuales en las arcillas naturales, como los de sodio, potasio o magnesio. Como consecuencia clara de ello, además, se reduce el espesor de la capa doble.

Hay que citar también que la disminución del espesor de la capa doble que se produce por la sustitución de un catión de la serie por otro situado más a su derecha lleva a una capa doble más estable. Esto se entiende si se piensa que quedan menos cationes que puedan modificar esta nueva configuración.

2.3.- Floculación y aglomeración de partículas

Como se ha citado, el fenómeno del intercambio iónico por cationes de mayor valencia reduce el espesor de la capa doble de la arcilla. Ello genera que se reduzca pues la zona de alta presencia de cationes que separa una partícula de otra, tanto por concentración como por repulsión eléctrica. Por tanto se consigue que se aproximen las partículas y esto da lugar a nuevas fuerzas de atracción entre ellas.

El hecho de que se pongan en contacto nuevas partículas de arcilla y se generen fuerzas de atracción entre ellas origina unas nuevas agrupaciones de

partículas que antes estaban dispersas o separadas formando flóculos o conjuntos de partículas.

Este mecanismo se favorece evidentemente con una mayor concentración de electrólito o de cationes a intercambiar en el medio en que se encuentran las partículas de arcilla. Pero también se favorece por la presencia de valores altos de pH en el medio, como el que aporta especialmente la presencia de la cal.

2.4.- Modificación de la textura y consistencia

El fenómeno de la floculación descrito tiene además una consecuencia indirecta de gran importancia sobre las estructuras de los suelos arcillosos. Se basa esta consecuencia en que la aglomeración de las partículas se produce desordenando la estructura laminar estable que hasta ese momento presentaba la arcilla.

Como conclusión de todo este conjunto de mecanismos de alteración de la forma y distribución de las partículas, se obtiene que un suelo arcilloso de comportamiento característico plástico, ante la adición de cal experimenta los siguientes fenómenos descritos:

- * Una estabilización del desequilibrio eléctrico de las partículas que elimina la propensión a modificaciones en el suelo;
- * Una reducción de la importancia de la capa doble y del contenido de agua adsorbida en torno a las partículas que reduce su susceptibilidad a los cambios de humedad;
- * Un aumento de los huecos en la masa suelo-cal con respecto al volumen inicial del suelo;
- * Un desorden de las partículas que le lleva a un comportamiento menos cohesivo basado en el rozamiento de las partículas del suelo.

Con relación a este último aspecto hay que citar que el desorden y cambio de comportamiento conlleva una mayor consistencia entendida ésta como un aumento en la capacidad portante del suelo.

Hay finalmente que recordar que tal y como se dijo en la introducción a este apartado, en todos los fenómenos descritos hasta ahora no ha intervenido el tiempo como factor condicionante. Se trata de mecanismos que actúan de manera casi inmediata y que se producen por el mero hecho de la mezcla entre un suelo arcilloso y la cal. No obstante, hay que resaltar la necesidad de que la cal llegue a todas y cada una de las partículas que configuran el suelo. También hay que recordar que aunque los mecanismos descritos se producen de manera casi universal para todas las arcillas existen factores diferenciales según la mineralogía típica de cada una de ellas.

2.5.- La reacción puzolánica

Como se ha descrito, las arcillas son minerales que contienen en su

estructura importantes cantidades de sílice y alúmina y otros elementos de sustitución como el hierro, magnesio, etc.. En estas circunstancias es posible decir que las arcillas son productos naturales con propiedades puzolánicas. Estas propiedades se basan en que bajo condiciones de pH altos pueden provocar un efecto consistente en la reacción de la cal con la sílice y alúmina para producir productos cementantes.

En el caso de la mezcla de arcilla y cal, la sílice y alúmina procedentes de las partículas de arcilla al entrar en contacto con la cal, que proporciona el medio básico, lleva a formar silicatos y aluminatos de calcio hidratados. Estos productos son parecidos a los que se generan durante el fraguado del cemento portland.

Pero existe otro factor condicionante para la producción de las reacciones químicas descritas: La fuente de sílice y alúmina. En función de la mineralogía de las arcillas su disponibilidad será mayor o menor, así como también su capacidad de disolución. Por tanto, no todas las arcillas son susceptibles de manifestar estas reacciones en la misma proporción y, como consecuencia, el efecto de ella dependerá del tipo de material presente.

Otro aspecto a considerar de esta reacción es la intervención del factor tiempo, a diferencia de los mecanismos inmediatos que se han descrito en los apartados anteriores. La producción de la reacción puzolánica es un proceso lento y que avanza con los días, siendo necesarias varias semanas para que se alcance un efecto sustancial o casi completo. Con ello se introduce además un nuevo factor condicionante no contemplado a la fecha y que se estudiará mas adelante: Las condiciones de humedad y temperatura en que se desarrolla la reacción a lo largo de los primeros días. Es lo que se conoce como las condiciones de curado.

La manifestación o consecuencia de la reacción puzolánica en una arcilla es la aparición de unos productos cementantes que se establecen entre las partículas de las arcillas que implican unos enlaces físicos mucho más fuertes que los eléctricos descritos hasta ahora. Por ello, el efecto se manifiesta no ya sólo en mejoras de valores tales como el ángulo de rozamiento interno o la resistencia a la penetración, sino incluso en cambios drásticos en la resistencia a compresión de los materiales, que pasan de ser suelos o materiales sueltos a conglomerados.

2.6.- Carbonatación de la cal

Un fenómeno que, si bien no está asociado a la interacción del suelo con la cal es preciso mencionar como un efecto final de la mezcla es la carbonatación de la cal sobrante en el tratamiento.

Tan sólo cabe en este punto mencionar que, como se describió al tratar las propiedades de la cal, el proceso de su formación es una reacción reversible. Por ello, la exposición de los hidróxidos de calcio al dióxido de carbono puede dar lugar a la reconstrucción de los carbonatos de los que se originó la cal. Evidentemente, esta posibilidad de reacción de los hidróxidos resta actividad a la cal ya que detrae de la misma parte del principio activo que

debe reaccionar con las arcillas.

3.- EFECTOS DE LA APLICACIÓN DE LA CAL

Como consecuencia de la combinación de los mecanismos descritos en el apartado anterior, la aplicación de cal a un suelo arcilloso origina una modificación en las propiedades físicas características de su comportamiento inicial.

Si bien ya se ha mencionado que en función de la mineralogía del suelo y de la proporción y forma de aplicación de cal se producen unos u otros procesos en mayor o menor medida, es posible resumir y englobar los efectos más genéricos de la mejora en los que siguen:

- * Reducción de la humedad natural del suelo
- * Modificación de la granulometría
- * Aumento de la permeabilidad
- * Mayor trabajabilidad
- * Reducción del índice de plasticidad
- * Reducción del potencial de cambios volumétricos
- * Modificación de las características de compactación
- * Aumento inmediato de la consistencia
- * Mayor resistencia a medio y largo plazo

3.1.- Reducción de la humedad natural del suelo

Es evidente que este efecto sólo se produce cuando la cal se aplica en forma de cal viva en polvo. El proceso, ya descrito en las propiedades de la cal se basa en que para la hidratación de los óxidos de calcio existentes en la adición y su conversión en hidróxidos cálcicos, se toma el agua precisa de la presente en la masa del suelo. Además, y dado que la reacción que se produce es exotérmica, el propio calor producido en la hidratación facilita la evaporación del exceso de humedad. Es, al fin y al cabo, la producción del apagado de la cal en el suelo húmedo que se quiere secar.

3.2.- Modificación de la granulometría

Un segundo efecto importante que se produce en la aplicación de la cal a suelos arcillosos es la modificación de su granulometría. Este hecho se justifica en los mecanismos de floculación y aglomeración de las partículas que se originan por el intercambio iónico en la superficie de las mismas.

3.3.- Aumento de la permeabilidad

Sin embargo, el efecto anterior de modificación de la granulometría sí puede ser apreciado de forma indirecta en otros cambios de propiedades físicas asociadas a la distribución granulométrica de un suelo: Es el caso de la permeabilidad.

El aumento de permeabilidad inmediato de los suelos por la aplicación de la cal no es sin embargo un efecto especialmente conocido o aprovechado en las obras. Y aunque la importancia ante procesos de consolidación de suelos o susceptibilidad ante el agua podría ser relevante, ello se debe a que existe un factor atenuante de este aumento a largo plazo. En efecto, si bien la permeabilidad aumenta en los primeros momentos de aplicación de la cal, fenómenos posteriores que induzcan a una disolución, sustitución o lavado de los iones de calcio que han originado esta nueva estructura más permeable pueden llevar a una posterior caída de la permeabilidad a medio o largo plazo.

3.4.- Mayor trabajabilidad

Las consecuencias del posible secado de la masa del suelo, de la reducción del volumen de partículas pequeñas, de la pérdida de las fuerzas de unión entre partículas de arcilla y de la alteración de la disposición ordenada y laminar de la misma suele ser un aumento de la trabajabilidad de los suelos arcillosos por la aplicación de la cal. El efecto que se logra es la conversión de un suelo típicamente cohesivo en otro de comportamiento característica tipo granular, más arenoso.

3.5.- Reducción del índice de plasticidad

Una de las principales manifestaciones de la aplicación de la cal en los suelos arcillosos es la reducción de la plasticidad, característica ilustrativa y diferencial de este tipo de suelos.

Esta reducción, justificada por los mismos mecanismos descritos en los puntos anteriores, se manifiesta y cuantifica mediante una reducción de los límites de Atterberg, determinación usual en el mundo de la construcción. Más concretamente la aplicación de la cal provoca de manera generalizada un aumento del límite plástico sin afectar al límite líquido. Tan sólo parece verse este afectado en las primeras veinticuatro horas desde la aplicación de la cal, pero en todo caso, en menor proporción que el límite líquido. Como consecuencia de ello, se identifica una reducción en el conocido como índice de plasticidad, diferencia aritmética entre los límites líquido y plástico.

Esta reducción que se ha dicho que es generalizada para todas las arcillas, se manifiesta no obstante en mayor medida en los suelos con mayor plasticidad. Así suelos más plásticos consiguen, a igualdad de cal aplicada, una más importante reducción de la plasticidad.

Otra característica de este efecto es que es progresivo, es decir, se incrementa con la cantidad de cal aplicada. A más cal, mayor reducción de la plasticidad. Sin embargo, esta reducción no es lineal sino regresiva o asintótica, tendiendo a un límite a partir del cual el aumento de cal no produce

reducciones sustanciales ni mucho menos proporcionales de la plasticidad del suelo.

Esta propiedad de reducción de la plasticidad de un suelo, como manifestación de multitud de fenómenos es una de las más empleadas y perseguidas en las obras de construcción. Asimismo es una de las más controladas por ser su determinación fácil y proporcionar un sencillo indicador de otra serie de propiedades más complejas de cuantificar.

3.6.- Reducción del potencial de cambios volumétricos

Otra consecuencia práctica de los fenómenos de reducción de la capa doble y el agua entre las partículas de las arcillas logradas con la aplicación de la cal es la disminución de la susceptibilidad de las mismas al agua, entendida principalmente ésta como la propensión a los cambios de volumen ante modificaciones del nivel de humedad del suelo.

El conjunto de reacciones entre la cal y las partículas de arcilla sirven no sólo para reducir el nivel de humedad en las mismas, sino incluso para fijar en este nivel de humedad de una manera más estable y evitar su reducción o aumento ante aportes externos. Con ello se reduce el riesgo que esta reducción o incremento puede tener en el volumen del suelo, y que en caso contrario se traducirían en expansiones o retracciones del mismo.

Este efecto conlleva que el tratamiento con cal de un suelo potencialmente expansivo sirve para conseguir importantes reducciones del riesgo de hinchamiento y retracción del mismo.

La utilidad de este efecto es clara y de gran espectro dada la importante magnitud de los daños ocasionados en la construcción por las arcillas expansivas. No obstante, su limitación clara estriba en que sólo se mejora aquélla parte del suelo que es sometida al tratamiento y que ello supone la manipulación y mezclado de la masa a tratar.

3.7.- Modificación de las características de compactación

Otra consecuencia de las alteraciones granulométricas que la aplicación de la cal genera en los suelos arcillosos es la modificación de los valores característicos que relacionan los estados de humedad del suelo y su densidad, que son los que rigen su proceso de compactación.

La redistribución de las partículas en fracciones de mayor tamaño hace que ante una misma energía de compactación sea posible obtener una menor densidad máxima. La justificación es puramente geométrica y similar a la referida al tratar el aumento de permeabilidad. Un mayor tamaño de partícula media supone una mayor proporción de huecos entre las mismas, incluso una vez que éstas han llegado a poner todas en contacto y distribuirse de la manera más eficiente.

Otra consecuencia en las propiedades de compactación de la aplicación de la cal es el aumento de la humedad necesaria para conseguir la densidad

máxima asociada a un nivel de energía dado, o lo que se conoce como “humedad óptima”.

Finalmente, la aplicación de la cal a un suelo origina una menor sensibilidad en su compactación a la humedad que se aplica. Así, a idéntica diferencia de humedad con respecto a la óptima para una energía dada, la reducción de la densidad que se obtiene es menor en los suelos tratados que en los originales. Esto se manifiesta en un aplanamiento de la curva que se deduce del ensayo de compactación próctor, que se convierte en otra más abierta.

3.8.- Aumento inmediato de la consistencia

La reordenación de las partículas provocada por la ruptura de la distribución laminar y la reducción de la capa doble se manifiesta, como ya se ha dicho, en varios efectos en cuanto a alteración de las propiedades físicas de los suelos arcillosos. Pero también tiene una manifestación en las propiedades mecánicas de los mismos.

Esta manifestación se presenta como un incremento de lo que se podría llamar su capacidad portante, por diferenciarla del aumento de resistencia que se ilustrará en el siguiente apartado y cuyas características son radicalmente diferentes.

La manifestación más típica de este aumento de la consistencia de un suelo es el incremento del C.B.R. que se produce en el mismo ante el aumento de cal. Tal y como ya se ha cuantificado en otros efectos, el incremento del C.B.R. es una consecuencia general para todos los suelos analizados. Se puede observar que el aumento es muy rápido para pequeños porcentajes de cal aplicado y la progresión, aunque en ocasiones reduce la velocidad de aumento con la cantidad de cal, aparece con una tendencia creciente casi indefinida.

3.9.- Mayor resistencia a largo plazo

El único efecto de entre los mencionados en el que interviene lo que se ha llamado la reacción puzolánica se plasma en un incremento muy importante de la resistencia de un suelo a medio o largo plazo por la aplicación de cal. Este efecto se basa en la formación de productos cementantes en la matriz de partículas de la arcilla que establece enlaces de rigidez y resistencia mucho mayores que las inicialmente existentes.

A diferencia de la ganancia en la consistencia que se ha descrito como un fenómeno inmediato de aplicación de la cal justificado por el incremento en el rozamiento interno, el efecto de la reacción puzolánica se basa en un aumento muy sustancial de la cohesión interna de las partículas.

Como se ha citado éste es un fenómeno cuya ocurrencia está condicionada a diversos factores:

- * La disposición de sílice y alúmina en la arcilla en cantidad suficiente;

- * La posibilidad de liberación de la misma;
- * La presencia de un medio con pH adecuado para su liberación;
- * La existencia de cal libre en cantidad suficiente para la reacción;
- * Unas condiciones de humedad y temperatura que favorezcan la misma; y
- * El transcurso de un plazo suficiente para la reacción.

Las manifestaciones de esta reacción se centran un aumento muy significativo de la resistencia en cualquiera de sus manifestaciones, del módulo de elasticidad que regula su comportamiento y de la durabilidad o susceptibilidad a la degradación del material. Así es posible cuantificar en un suelo mejoras relativas de resistencia al añadirle cal en ensayos de compresión, simple o confinada, corte y flexotracción. Estos ensayos son en general los empleados para comprobar las características de los suelos tratados con cal a largo plazo, dado que los otros indicadores, como sería el C.B.R., son menos ilustrativos y proporcionan una distorsión en la interpretación de los resultados obtenidos.

Consecuentemente con el incremento de resistencia estática que es posible medir de la aplicación de cal a un suelo, también es posible deducir una mejora de su resistencia a fatiga. Esta resistencia, vinculada de manera usual mediante formulaciones empíricas a valores de resistencia estática, experimenta un incremento que, en principio puede cuantificarse en forma similar a aquélla.

Pero los efectos no se producen en la misma magnitud ni en todas las arcillas, ni con las mismas proporciones de cal. Ni tan siquiera el plazo de aparición de los resultados es idéntico, en caso de que así se produzcan.

La ganancia de resistencia en los suelos mediante la adición de cal es el único efecto de los mencionados en este apartado que requiere un proceso de curado. Esta mejora requiere un plazo en que va desde varios días a incluso meses. En comparación con el fraguado y endurecimiento del cemento, el tratamiento con cal suele precisar bastante más tiempo para alcanzar un mismo nivel de eficacia en sus resultados. Plazos indicativos para obtener efectos de incremento estable de resistencias con cal suelen estar entre los 28 y 360 días. Incluso algunos autores justifican incrementos de resistencia transcurridos varios años desde la aplicación de la cal.

Estos plazos, en ocasiones tan prolongados, ilustran la importancia de asegurar las condiciones de conservación o mantenimiento del suelo si se persigue lograr este efecto en su tratamiento con cal.

Finalmente, hay que insistir en que, al igual que se ha mencionado en otros efectos de la aplicación de la cal, el logro de una mejora como es la resistencia en la masa de un suelo arcilloso sólo es posible garantizarlo si la mezcla y acción de la cal se puede extender homogéneamente a toda la masa del suelo.

4.- TIPOS DE MODIFICACIÓN DE SUELOS MEDIANTE CAL

Conocidos ya los efectos que la adición de cal origina sobre un suelo arcilloso y los mecanismos que provocan dichos efectos, es importante diferenciar dos grandes grupos de posibles tratamientos en función de dichos efectos.

4.1.- La mejora de suelos

Se entiende como mejora de suelos con cal al proceso que persigue la obtención de un material con una rango de clasificación mayor dentro de una escala dada mediante la aplicación de dicha cal.

La mejora de suelos con cal persigue sólo el aprovechamiento de las modificaciones y efectos que la cal produce sobre el suelo de manera inmediata o, en todo caso, a corto plazo. Este aprovechamiento puede sin embargo requerir una durabilidad en los efectos o, sencillamente, ser preciso durante una parte de la vida de la obra.

Ejemplos de aplicación de los procedimientos de mejora de suelos con cal se pueden reconocer en las siguientes ocasiones:

- * Secado de suelos húmedos en fondos de excavación
- * Reducción de polvo en pistas sin pavimentar
- * Empleo de materiales plásticos en núcleos de terraplenes
- * Aumento del C.B.R. de un suelo para su uso en capas de coronación
- * Reducción del potencial expansivo de capas de asiento
- * Refuerzo temporal de pistas de obra para permitir el tránsito de vehículos

En el diseño y control de la mejora de suelos con cal es suficiente la realización de ensayos básicos de los usuales en el ámbito de la construcción. Los efectos y utilidad del tratamiento se cuantifican mediante el control de características indirectas con puede ser la realización de los límites de Atterberg, la determinación del C.B.R. o el ensayo de compactación próctor.

Los tratamientos de mejora de suelos pueden realizarse con pequeños porcentajes de cal añadidos al mismo, sin que sea normalmente necesario el empleo de altas proporciones. Valores de 1 al 3 por ciento de cal añadido sobre el suelo son así usuales. Los efectos que se consiguen suelen ser directamente proporcionales a dichas cantidades.

El empleo de la mejora de suelos es una buena alternativa ante limitaciones de disponibilidad de suelos aptos en las cercanías de las obras o condicionantes medioambientales para préstamos o vertederos en las mismas. La aplicación de cantidades limitadas de cal suele ser una solución económicamente competitiva en estas situaciones.

4.2.- La estabilización de suelos

Explanadas estabilizadas y capas de firme tratadas con cementos. Aspectos prácticos.

Criterios de selección y dosificación en los tratamientos con cal

Madrid 2005

Por diferencia con la mejora, la estabilización de suelos con cal es el proceso que persigue la alteración del comportamiento mecánico de un material para conseguir una resistencia estructural que podría decirse es impropia de dicho tipo de material.

Dado que en la mejora de suelos también produce alguna ganancia en consistencia, en ocasiones se establece la frontera entre estos procesos en función de un límite de incremento. Así algunos autores establecen la diferencia en una ganancia mínima de resistencia a la compresión simple sobre el valor inicial del suelo de $3,5 \text{ kg/cm}^2$.

La estabilización de suelos con cal persigue los que se derivan de la reacción puzolánica entre la cal y los suelos arcillosos, que se producen siempre a largo plazo. En este proceso es crítico el comportamiento y mantenimiento de las condiciones de curado del material para asegurar la producción de la reacción en su totalidad. De igual manera es muy importante asegurar la durabilidad en los efectos ante acciones externas como pueden ser las sollicitaciones, las heladas, el ataque por sustancias disueltas agresivas, el lavado del medio, etc..

Los ejemplos más frecuentes de aplicación de los procedimientos de estabilización de suelos se centran en la construcción de capas de subbase y base para pavimentos de viales y carreteras, infraestructuras de ferrocarriles y pistas de aeropuertos.

El diseño de una estabilización con cal requiere un estudio previo en detalle con medios en ocasiones inusuales que avale el efecto de la reacción puzolánica más allá de las simples apariencias o ensayos indirectos. En este sentido es indispensable realizar un estudio mineralógico del suelo de partida para asegurar la disposición de la sílice y alúmina precisas para la reacción. Pero también es aconsejable el empleo de ensayos de caracterización mecánica complejos e incluso de evolución a largo plazo de los tratamientos. Así se emplean estudios mediante difracción de rayos X, ensayos triaxiales, de corte directo o de medición de presiones de hinchamiento aplicados ocasionalmente sobre muestras con procesos de curado de varios días, semanas y meses de duración e incluso bajo condiciones de curado artificial acelerado.

Los tratamientos de estabilización de suelos suelen requerir porcentajes altos de cal, dado que las primeras dosis de la misma se emplean en los mecanismos de mejora y que es indispensable la disposición de cal libre en cantidad suficiente para mantener las reacciones puzolánicas perseguidas. Se suelen proyectar así tratamientos de estabilización con valores siempre superiores al 3 por ciento de cal, llegando incluso a valores del 8 y 10 %.

Normalmente el empleo de este tipo de tratamientos suele estar asociado a la imposibilidad física de disponer de materiales alternativos, dado que el coste de estabilizaciones con contenidos de cal como los mencionados suele ser prohibitivo en caso contrario. Además los procesos constructivos para los tratamientos de estabilización suelen requerir medios específicos y aplicaciones sucesivas que incrementan dicho coste.

5.- FACTORES CONDICIONANTES EN EL TRATAMIENTO CON CAL

En la aplicación de cal a un suelo con el objeto de conseguir una mejora o una estabilización del mismo existen una serie de factores de los que depende el éxito del tratamiento. La mayoría de ellos se deducen de los propios mecanismos de la interacción de la cal con las arcillas, pero hay otros factores que se pueden denominar externos cuya relevancia es preciso también considerar.

De entre todos los factores que afectan a la eficacia de un tratamiento con cal pueden ser extraídos los más relevantes, y agrupados según estén asociados a:

- a) La composición del suelo:
 - * Su contenido en arcilla
 - * Las características mineralógicas de la arcilla
 - * El contenido en materia orgánica
 - * El contenido en sulfatos solubles
- b) La plasticidad del suelo
- c) El pH del medio en que se produce el tratamiento
- d) El proceso de ejecución:
 - * La disgregación y homogeneidad de la mezcla
 - * La dificultad de compactación
 - * La humedad de compactación
- e) La presencia de agua:
 - * Por su agresividad
 - * Por los fenómenos de lixiviado

En el diseño de los tratamientos con cal, mejora y estabilización, es preciso cuantificar y evaluar estos factores en la medida en que de ellos dependerá el éxito de la aplicación.

6.- NORMATIVA QUE REGULA EL TRATAMIENTO CON CAL EN ESPAÑA

Desde el punto de vista normativo es interesante realizar un repaso del conjunto de documentos que, desde los años setenta, han ido regulando la posibilidad de aplicación y especificaciones exigidas al tratamiento de suelos con cal en el ámbito de las carreteras.

En este repaso es posible encontrar tres grandes grupos de normas o disposiciones reguladoras, que podríamos agrupar en:

- a) Las clasificaciones de suelos recogidas en los pliegos generales por cuanto afectan, aunque someramente, a los materiales susceptibles de

tratamiento, y que se sentran en el **Artículo 330 del Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG-3)**.

- b) Las instrucciones de firmes, que especifican el posible uso de este tipo de materiales y sus limitaciones (**Instrucciones 6.1.IC-6.2.IC**)
- c) Las especificaciones recogidas en cuanto a características y condiciones a exigir a los materiales, tanto a la cal como al suelo y al producto final del tratamiento (**Artículo 512 Suelos estabilizados in situ del PG-3**).
- d) Las normas que regulan la producción y caracterización del conglomerante, la cal (**Artículo 200 Cal aérea del PG-3**).

6.1.- Artículo 512 Suelos estabilizados in situ del PG-3

Con la publicación en septiembre de 2.002 de la Orden Circular 10/2002 se produjo la última modificación a las especificaciones establecidas para el tratamiento de suelos con cal en el ámbito español de las carreteras. Lo más sustancial en primera instancia de esta modificación es la unificación de los tratamientos de suelos con cal y cemento, que pasan a induirse en un mismo artículo, el 512, derogando por tanto el 510 vigente hasta dicha fecha.

En cuanto a los cambios que dicho texto introdujo en las especificaciones sobre la situación previa, hay que comentar los siguientes:

- a) **Definición:** Incluye el uso específico (“disminuir la susceptibilidad del suelo al agua o aumentar su resistencia”), y que se empleará para la “formación de la explanada”
- b) **Tipo de cal:** No se especifica el tipo, frente a la tendencia anterior
- c) **Granulometría del suelo:** Se mantienen los límites de cernido acumulado (UNE-EN 933-2):
 - Tamiz UNE 80 mm : 100 %
 - Tamiz UNE 0,063 mm: $\geq 15\%$
- d) **Composición del suelo:** Se limita la composición química estableciendo que no deben contener “en ningún caso materia orgánica, sulfatos, sulfuros, fosfatos, nitratos, cloruros u otros compuestos químicos en cantidades perjudiciales”. En especial se limita:
 - Contenido en materia orgánica (UNE 103204):
 - < 2% para S-EST 1
 - < 1% para S-EST 2
 - Contenido en sulfatos solubles (UNE 103201): < 1% en peso
- e) **Plasticidad del suelo:** Se mantienen las limitaciones existentes (UNE 103104):

Explanadas estabilizadas y capas de firme tratadas con cementos. Aspectos prácticos.

Criterios de selección y dosificación en los tratamientos con cal

Madrid 2005

- S-EST 1: I.P. ≥ 12
- S-EST 2: $12 \leq \text{I.P.} \leq 40$

rebajándose la recomendación del tratamiento en dos fases a suelos con índice de plasticidad superior a 40

f) **Características del suelo estabilizado**: Se prescribe, en función del tipo de suelo, las siguientes características:

CARACTERÍSTICA	UNIDAD	NORMA	TIPO DE SUELO	
			S-EST 1	S-EST 2
Contenido de cal	% en masa del suelo seco		≥ 2	> 3
Índice CBR a 7 días		UNE 103502	> 6	> 12
Densidad (P. Modificado)	% de la densidad máxima	UNE 103501	> 96 (**)	> 97

(**) Para la capa de coronación de la categoría de explanada E1 definida en la Norma 6.1-IC de Secciones de firme, este valor será del noventa y siete (97%)

Además se establece que:

El suelo estabilizado no presentará ni asiento en el ensayo de colapso (NLT-254) ni hinchamiento en el ensayo de expansión (UNE 103601).

No deben presentar riesgo de meteorización, alteración física o química ni disoluciones por agua (NLT-326).

g) **Equipo para la ejecución**: Se prescribe, como principal novedad que:

En vías de tráfico alto (T00 a T1) o en obras de gran superficie hay que emplear equipos integrados de disgregación-dosificación-distribución-extensión.

Se empleará preferentemente la cal en forma de lechada, salvo en obras pequeñas o cuando se persiga secar el suelo

Se exige un alto grado de automatización y precisión para los equipos de extendido

Se detallan los equipos a emplear en la compactación

h) **Disgregación de la mezcla**: Se debe satisfacer que:

La totalidad de los grumos sean inferiores a 80 mm

La eficacia de la disgregación (proporción cernido en obra del material húmedo sobre cernido en seco del material seco) no debe ser inferior a los valores siguientes para cada tipo y tamiz de referencia (UNE-EN 933-2):

Tipo de suelo	Disgregación mínima	
	Tamiz 25 mm	Tamiz 4 mm
S-EST 1	100 %	80 %
S-EST 2	100 %	60 %

En caso contrario se realizará el tratamiento en dos etapas exigiendo en la primera:

Grumos inferiores a 50 mm

Humedad de compactación superior a la óptima entre 2 y 10 %

La aplicación por fases se complementará con un curado de entre 24 horas y 7 días, evitando la carbonatación de la cal

- i) **Ejecución de la mezcla:** Se realizará antes de una hora de la distribución de la cal
- j) **Curado:** Se puede prescindir del curado si se compacta la capa con rodillos de más de 25 toneladas de peso
- k) **Tramo de prueba:** Se hace obligatorio, con una longitud mínima de cien metros
- l) **Tolerancias geométricas:** Se limitan a 30 mm en núcleos y 25 mm en coronación de explanadas

m) Limitaciones de ejecución:

La temperatura debe estar entre 5 y 35 °C

No se debe realizar con precipitaciones atmosféricas intensas

Se limita la extensión en forma de polvo con viento excesivo

- n) **Criterios de aceptación:** Se emplean como parámetros de comparación los valores teóricos, sin reducción alguna. En cada lote se comprobará:

Densidad: Densidad media superior a la exigida (sobre 7 determinaciones)

No más de dos resultados individuales inferiores en un 2%

CBR: Media superior al valor especificado

Ningún valor individual inferior en un 20% al teórico

Espesor: No inferior al teórico

No más de dos valores inferiores en un 10% al teórico

6.2.- Resumen del tratamiento en la normativa española

Del análisis de la normativa anterior y su evolución con el tiempo, cabe extraer las siguientes conclusiones:

a) En relación a las instrucciones de firmes:

- Ninguna de ellas contempla la posibilidad de emplear los suelos tratados con cal como capa constituyente de la estructura del firme propiamente dicha
- El tratamiento que en ellas se hace del suelo-cal es siempre similar o equiparable al del suelo estabilizado con cemento
- Su empleo permite la obtención, en diversas composiciones, de explanadas del tipo E1 y E2, pero nunca la E3
- Se propugna el empleo de los tratamientos como capa de separación sobre materiales de baja calidad
- Se establecen espesores mínimos y máximos de estas capas que, en las últimas versiones, alcanzan valores de 25 a 30 centímetros
- Si se intentase realizar una traducción o equivalencia de los espesores de suelos “equivalentes” que en dichos catálogos podría ser sustituidos por los tratamientos con cal, se observan datos tales como los siguientes:

6.1-IC y 6.2-IC:	15 cm S EST-1 =	30-50 cm S.Adecuado
	5 cm S EST-2 =	15-25 cm
	S.Seleccionado	
O.C. 10/2.002:	25 cm S EST-1 =	35 cm S.Tolerable
		37-60 cm S.Adecuado
		25 cm S.Seleccionado
	30 cm S EST-1 =	50 cm S.Adecuado
		35 cm S.Seleccionado
	25 cm S EST-2 =	55 cm S.Seleccionado
		35 cm S.Seleccionado(3)
	30 cm S EST-2 =	40 cm S.Seleccionado(3)

Si bien se observa una evolución creciente hacia una mayor consideración de la capacidad portante de los tratamientos, existe una clara dispersión en su concepción y equivalencia que hace confusa su aplicación mediante este sistema de “catálogo”

- Finalmente hay que decir que en estos textos no se permite la consideración de una mayor capacidad estructural a los suelos tratados que la estrictamente exigida para su aceptación (CBR = 6 -12), infravalorando en cierta manera la potencialidad del tratamiento

b) En relación a las especificaciones técnicas de los tratamientos de suelos con cal, hay que mencionar que:

- Se establecen limitaciones en forma de exclusión para la selección de los suelos aptos para el tratamiento, frente a otras posibilidades que permitan evaluar su aptitud de manera positiva
- Se ha producido con el paso del tiempo una mayor consideración de los factores que intervienen en el tratamiento
- No se define aún cuantitativamente los factores negativos que pueden afectar al tratamiento (sulfatos, materia orgánica, etc.) más que con limitaciones abstractas o muy conservadoras
- Las prescripciones de ejecución han sufrido un notable avance, aunque se han recogido en el último texto de manera conjunta con los tratamientos con cemento, complicando la aplicación de los rasgos diferenciales de este tipo de tratamiento

c) Finalmente, en relación a las especificaciones para la cal, tan solo hay que comentar que se tiende a una mayor normalización del producto, lo que evidentemente redundará en la calidad y garantía de los tratamientos a aplicar.

6.3.- Otra normativa autonómica

Si bien no es habitual que la normativa de rango local o regional recoja las especificidades de estos tipos de tratamiento, son interesantes de mencionar a estos efectos los tratamientos específicos que se recogen en los dos textos de administraciones autonómicas siguientes:

- La **Instrucción para el Diseño de Firmes de la Red de Carreteras de Andalucía**, de la Dirección General de Carreteras de la Junta de Andalucía, editada como Orden Circular 1/99; y
- Las **Recomendaciones de Proyecto y Construcción de Firmes y Pavimentos** de la Dirección General de Carreteras e Infraestructuras de la Junta de Castilla y León.

6.3.1.- La Instrucción de firmes de la Junta de Andalucía

La Instrucción de la Junta de Andalucía realiza un tratamiento especial de las estabilizaciones de suelos, planteando sus principales campos de actuación, de manera específica para:

- **Tratamiento de suelos plásticos en los fondos de desmontes y en las capas de asiento de los terraplenes; y**
- Aumento de la capacidad soporte de las capas de asiento, o disminución de sus espesores.

Desarrolla también de manera concreta las prescripciones para el tratamiento de suelos con cal, estableciendo las siguientes:

- a) **Granulometría del suelo:** Se recomiendan como valores límites:
Pasa tamiz 0,080 mm \geq 35 % (Nunca menos del 15 %)
- b) **Plasticidad:** Se recomienda para suelos con índice de plasticidad superior a 18
- c) Apunta que para conseguir una mejora notable de la capacidad soporte se puede emplear un **tratamiento mixto** con adición de cemento
- d) Especifica que los tratamientos deben realizarse con **cal aérea apagada**, en forma de polvo o en lechada, recomendando ésta para los suelos secos
- e) Indica que la **presencia de materia orgánica (>2%)** puede eliminar el efecto de la estabilización

En cuanto a su tratamiento como material, define las clases SC-1 y SC-2, idénticas inicialmente a las S-EST 1 y S-EST 2 de la norma estatal. No obstante presenta una serie de ventajas adicionales en la aplicación de los tratamientos como es la de permitir su empleo en “capas de asiento” para la obtención de las máximas categoría de “explanadas” (si bien este concepto no se emplea directamente en dicha Instrucción). Con esta posibilidad se eleva indudablemente la responsabilidad y categoría de las capas en que se permite aplicar el tratamiento de suelos con cal.

La consecuencia y prueba evidente de esta consideración es la gran profusión de los tratamientos de suelos con cal producida en los últimos años en la comunidad andaluza, apoyada por estas mayores posibilidades.

6.3.2.- Las Recomendaciones de firmes de Castilla y León

Otra interesante aportación es la introducida por este texto que de nuevo se mueve en la línea de la Instrucción andaluza en cuanto a que permita a los tratamientos de suelos con cal un comportamiento estructural de mayor responsabilidad.

Así contempla que *“con dotaciones adecuadas de conglomerante es posible utilizar los suelos sometidos a un tratamiento mixto cal-cemento como subbase e incluso como base para tráfico ligeros”*.

En la definición de los materiales mantiene la clasificación estatal (S-EST 1 y S-EST 2).

En cuanto a las prescripciones que establece, las más significativas son las siguientes:

- a) **Granulometría del suelo:**
 - No deberán contener elementos de tamaño superior a 80 mm
 - Pasa tamiz 0,080 mm \geq 15 % (No mayor del 35 % para E2)
- b) **Plasticidad:** El índice de plasticidad cumplirá lo siguiente:
 - No será inferior a 12
 - No será superior a 40 para explanadas E2
 - Cuando sea superior a 50 se realizará el tratamiento en dos etapas
- c) Los suelos deben estar **exentos de material vegetal**
- d) Permite el **empleo de cal viva**, con las consideraciones pertinentes de maquinaria, seguridad y plazos de ejecución
- e) Permite el empleo en **espesores** de 20 a 30 centímetros, superiores a los admitidos a esa fecha por la normativa estatal vigente
- f) Finalmente, establece recomendaciones constructivas, en la línea de las vigentes en la norma estatal

7.- EL DISEÑO DE TRATAMIENTOS DE SUELOS CON CAL

En este apartado se persigue plasmar las pautas que deben marcar la técnica del diseño de dichos tratamientos. Como principal referencia en este apartado hay que citar especialmente la Guía Técnica “*Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques*” del Laboratoire Central des Ponts et Chaussées y del Service d’Études Techniques des Routes et Autoroutes, publicada en enero de 2.000 como uno de los documentos más recientes y aproximados a la problemática a tratar hasta la fecha.

7.1.- Objeto del tratamiento de los suelos con cal

Un primer paso, conocidos los efectos de la cal sobre los suelos, es identificar el objeto del tratamiento perseguido. Como ya se ha dicho, no es lo mismo pretender una “mejora” de un suelo que una “estabilización”. Por ello, no debe ser el mismo proceso el que se aplique o guíe el diseño, ejecución y control de tratamientos tan diversos.

7.2.- Los materiales que intervienen en el tratamiento

7.2.1.- Identificación de los suelos

Explanadas estabilizadas y capas de firme tratadas con cementos. Aspectos prácticos.

Criterios de selección y dosificación en los tratamientos con cal

Madrid 2005

Desde el punto de vista global mencionado, es evidente que el diseño de un tratamiento de suelos con cal requiere analizar y conocer las propiedades del mismo.

Los parámetros que se emplean usualmente para caracterizar los suelos son la granulometría, plasticidad y composición química.

La mayoría de las clasificaciones de suelos aplicadas en la actualidad, y concretamente la española, incluye las identificaciones relacionadas con la excepción de la evaluación de algunos componentes químicos. Bastaría por tanto la clasificación convencional de un suelo para poder aplicar el primer paso en el proceso.

En el aspecto último citado de la composición química, como ya se ha comentado al tratar el tema de los sulfatos, hay que indicar que si bien ya es práctica habitual el análisis de los suelos a tratar, su interpretación, representatividad y especificación se hace compleja por la vía convencional. Desde este punto de vista es recomendable abordar ensayos de comportamiento, más que simples ensayos de identificación, que sirvan para evaluar riesgos en cada caso concreto y para asegurar la representatividad del mismo. Así hay que mencionar que en el Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (L.C.P.C.) se ha puesto en marcha un “*ensayo de evaluación de la aptitud de un suelo para su tratamiento con cal o ligantes hidráulicos*” definido por la norma NF P 94-100 que con toda seguridad marcará una pauta a seguir en este proceso. La idea básica consiste en evaluar directamente en probetas de tamaño adecuado el comportamiento de la mezcla bajo la acción del agua, controlando el hinchamiento.

7.2.2.- Estado de los suelos

Desde el punto de vista del diseño y aplicación en la obra de un tratamiento de suelos es muy importante conocer su estado hídrico por cuanto condiciona:

- a) La elección de los productos o presentaciones de los mismos más idónea, pudiendo por ejemplo precisar aplicaciones que sequen o que añadan humedad al suelo;
- b) La eficacia de las reacciones previstas, que conllevan procesos de disolución y dispersión que hay que asegurar; y
- c) Las condiciones de puesta en obra, tanto desde el punto de vista de la rodadura de la maquinaria como del de la eficacia de las operaciones de mezcla, compactación, nivelación, etc.

Desde este punto de vista el parámetro que es preciso conocer es la **humedad natural** del suelo empleado como indicador, además de su propio valor absoluto, del conocido como índice de consistencia:

$$\text{Índice de consistencia (I)} = \frac{W_L - W_{\text{NAT}}}{W_L - W_P} = \frac{\text{Límite Líquido} - \text{Humedad Natural}}{\text{Límite Líquido} - \text{Límite Plástico}}$$

Este índice es de especial interés en los suelos plásticos con alto contenido en finos, por lo que aplicación a los suelos arcillosos es clara.

7.2.3.- La cal a emplear en los tratamientos

Una vez seleccionada la cal como ligante a emplear en el tratamiento, como opción más ventajosa por su idoneidad técnica y/o económica, es evidente que hay que definir las características del producto a aplicar. En consonancia con lo establecido en la normativa actual y según ya se ha expuesto, esto supone establecer:

- d) **El tipo de cal**, de entre los establecidos en la normativa, concretamente en el Artículo 200 del PG-3, en el caso español;
- e) **Su presentación** en forma de polvo o lechada, viva o hidratada, según las posibilidades técnicas, volumen de obra y objeto del tratamiento; y
- f) Las propiedades de la cal, entre las que hay que citar y prever su contenido en cal (en forma de óxidos de calcio y magnesio), su finura y reactividad.

En este último aspecto, la verificación no será precisa si se emplea un "producto certificado".

7.2.4.- Otras consideraciones

Del estudio de los factores que influyen en la eficacia de los tratamientos se deduce que, en caso de existir sospecha de la influencia de factores externos adicionales habrá también que realizar investigaciones y análisis sobre aspectos como la presencia de aguas agresivas, los riesgos de los fenómenos de lixiviado y la posible presencia de hielo.

7.3.- Metodología de los estudios geotécnicos

Un estudio geotécnico para el diseño del tratamiento de suelos con cal debe permitir dos objetivos fundamentalmente:

- a) **Identificar en cada zona el tipo de material** presente, la dispersión de sus características, su disposición en la estratificación natural y la cantidad de material que puede o debe ser tratada, ya sea in situ, ya sea en forma de préstamo.
- b) **Establecer la dosificación adecuada** de cal para el efecto perseguido, mediante los ensayos de aptitud y el análisis de

comportamiento de las mezclas de suelo representativas y cal en proporciones diferentes.

Con ellos se debe poder definir no sólo la idoneidad y volumen de las unidades de obra a ejecutar, sino también las especificaciones adecuadas a la misma y a las condiciones en que se ejecutará. La profundidad de cada una de estas fases estará en función del nivel de exigencia y alcance del estudio.

7.3.1.- La caracterización geotécnica de las formaciones

Desde el punto de vista del estudio de los tratamientos de suelos con cal, la realización de los estudios geotécnicos de los materiales presentes no tiene singularidad alguna en cuanto a la mecánica de reconocimiento y ensayos. Por tanto, son de aplicación los criterios usuales de muestreo y ensayos para clasificación que se emplean usualmente en las obras de tierra.

Sin embargo, un aspecto que cobra especial relevancia en este tipo de estudios es asegurar el nivel de consistencia y representatividad de las muestras seleccionadas que se emplearán en los estudios de dosificación.

Una vez recopilada la información geotécnica obtenida y representada en la cartografía adecuada, suele evidenciarse la implicación sucesiva de una misma formación en varias zonas de la obra o la aparición de una misma formación en grandes extensiones. Parece lógico unificar formaciones o suelos para reducir la magnitud de los estudios a acometer al objeto, por ejemplo de no complicar en exceso los cambios de equipos y los tramos de prueba.

Para proceder a esta "simplificación" más allá de la zonificación estricta aportada por el estudio geológico-geotécnico, es preciso, aunque se hayan analizado inicialmente cuantas muestras y materiales diferentes se hayan detectado en las obras, poder agruparlas en "familias homogéneas" o "formaciones tipo" representativas sobre las que se deberán concentrar los estudios de dosificación.

Esta agrupación requiere la definición de dos criterios fundamentales para asegurar la representatividad de los materiales seleccionados para su ensayo:

- a) El número mínimo de muestras a reconocer para caracterizar de manera consistente una formación; y
- b) El rango en el que se considera que un grupo de muestras pertenecen a una misma "familia homogénea", o, a la inversa, la dispersión máxima admisible a un material para prever su tratamiento de manera uniforme como una misma unidad de obra.

No definir y aplicar estos conceptos pueden llevar a hacer inviable una unidad de obra proyectada cuando en la fase de ejecución, debido al mayor grado de control y reconocimiento lógico de la misma, se detecten cambios en la composición, estado o características del suelo que hagan desaconsejable el tratamiento proyectado.

En este sentido, la Guía Técnica “*Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques*” del L.C.P.C.-S.E.T.R.A. proporciona como criterios prácticos los valores y reglas recogidos en la siguiente tabla como **guía de aplicación para el dimensionamiento de los estudios de reconocimiento**:

NÚMERO MÍNIMO DE ENSAYOS NECESARIOS PARA CARACTERIZAR UN YACIMIENTO				
Volumen de material (V)	Tipo de ensayos	Formación conocida y homogénea (***)	Formación conocida y medianamente homogénea	Formación desconocida
V < 10.000 m ³	Identificación (*)	1	3	9
	Estado (**)	2	4	16
V de 10.000 m ³ a 100.000 m ³	Identificación (*)	V / 10.000	3 * V / 10.000	9 * V / 10.000
	Estado (**)	2 * V / 10.000	4 * V / 10.000	16 * V / 10.000
V > 100.000 m ³	Identificación (*)	10	30	90
	Estado (**)	20	40	160

(*) Ensayos que permiten clasificar los suelos

(**) Número de ensayos supuesto que las condiciones de ensayos son representativas de la época de trabajo previsible

(***) Se deberá identificar como "conocida" por un técnico geotécnico con experiencia en las formaciones locales

En cuanto a la dispersión admisible de los resultados obtenidos, la mencionada Guía Técnica del L.C.P.C. establece que es recomendable realizar un análisis de la dispersión obtenida en los resultados de densidad máxima del ensayo Próctor Normal para evaluar la homogeneidad de un yacimiento sobre el que se pretende diseñar un tratamiento unificado.

Si de la aplicación de los criterios anteriores de muestreo y análisis estadístico se condujera la imposibilidad de asegurar un mínimo de homogeneidad en las formaciones, se deberían plantear, según el nivel del estudio, las posibilidades de intensificación de los reconocimientos o, incluso, de abandono de la técnica de tratamiento propuesta por su posterior inviabilidad en obra.

7.3.2.- El estudio de dosificación de los tratamientos con cal

El estudio de dosificación de un tratamiento de suelo con cal, u obtención de la fórmula de trabajo, debe desarrollarse de manera que, partiendo de un estudio geotécnico de una formación dada considerada homogénea y de unas muestras representativas de la misma, sea posible definir:

- a) La aptitud del suelo para el tratamiento propuesto;
- b) La dosificación y fórmula de trabajo adecuada;

- c) Las condiciones de ejecución y puesta en obra acordes con la dosificación;
- d) La sensibilidad del tratamiento a las variaciones en las hipótesis; y
- e) El comportamiento a medio y largo plazo del tratamiento

A continuación se define el proceso y aspectos concretos que deben regular los estudios de dosificación de tratamientos de suelos con cal, si bien es claro que, según ya se ha mencionado, el alcance de los mismos deberá ser acorde en intensidad y fases al objeto y magnitud de la cuestión analizada.

- a) El primer paso a abordar, según ya se ha mencionado, es la verificación de la **aptitud del suelo para el tratamiento propuesto**, más allá de la simple clasificación del mismo. Si bien en la normativa española no se incluye la prescripción de realizar ningún ensayo de este tipo, ya se ha mencionado que la tipología de los ensayos de clasificación y sus condiciones de ejecución (tamaño de probetas, duración de ensayos, condiciones de conservación, etc.) no son adecuados para detectar o descartar la producción de los principales fenómenos patológicos que siembran la duda sobre este tipo de tratamientos en el estado actual de la técnica.

En este sentido, la Guía Técnica del L.C.P.C.-S.E.T.R.A. propone, como ya se ha comentado, la realización sistemática para cada propuesta de tratamiento de un ensayo específico de idoneidad, el regulado por la norma francesa NF P 94-100. Se trata de un ensayo para evaluación de hinchamiento cuya interpretación se resume en la tabla siguiente para el caso del tratamiento de suelos con cal:

CRITERIOS DE INTERPRETACIÓN DEL ENSAYO DE APTITUD DE UN SUELO PARA EL TRATAMIENTO CON CAL (NORMA NF P 94-100)	
APTITUD	HINCHAMIENTO VOLUMÉTRICO G_v (%)
Adecuado	< 5
Dudoso	$5 \leq G_v \leq 10$
No apto	≥ 10

- b) La segunda etapa a cumplir es la **obtención de la fórmula de trabajo** para un tratamiento de suelo con cal, bien por la vía de la simple verificación de una dotación determinada, bien

por la estimación del valor óptimo para alcanzar unas características determinadas de la mezcla.

Para las dotaciones de cal propuestas, bien como objetivo bien como horquilla de estudio, se deberán determinar los valores de CBR obtenidos y, a la vista de ellos, aprobarlo definitivamente o seleccionar el óptimo correspondiente. De este estudio deberán extraerse, los siguientes valores de referencia, que constituyen la denominada “fórmula de trabajo”:

- La dosificación mínima de conglomerante, indicando la clase de cal, referida a la masa total de suelo seco y, en su caso, por metro cuadrado (m^2) de superficie;
 - El contenido de humedad de la mezcla en el momento de su compactación;
 - La compactación a obtener, mediante el valor mínimo de la densidad que se debe admitir en obra; y
 - El índice CBR a siete días (7 d) asociado a los valores de humedad y densidad de referencia adoptados.
- c) **Las condiciones de ejecución y puesta en obra acordes con la dosificación** deberán permitir estimar el comportamiento del material y determinar los valores de referencia para su ejecución y compactación.

La primera comprobación a realizar es la de las **condiciones de compactación**. Esta parte del estudio se debe basar en las condiciones de humedad natural en que es previsible que sea ejecutado el tratamiento y limitar la posible horquilla de aplicación del mismo. Se debe contar para ello con información suficiente y adecuada no sólo del estado hídrico del material, sino incluso de la programación de las obras y de las previsiones meteorológicas para esa época por cuanto pueden alterar significativamente dicho estado.

El objeto de esta fase es verificar que en el momento de inicio del tratamiento y para la fórmula de trabajo adoptada los suelos no tendrán una humedad ni tal alta que dificultarán su mezcla y trabajabilidad ni tan baja que impedirán su compactación adecuada.

Una segunda parte del estudio persigue evaluar los **plazos máximo y mínimos** que deben transcurrir entre cada una de las operaciones a realizar. Estos plazos deben tener en cuenta, además de la naturaleza de los fenómenos que intervienen en el proceso de tratamiento, las temperaturas previsibles en la época del mismo, dada su influencia ya mencionada sobre las reacciones implicadas. En caso de no realizarse estudios específicos, y para temperaturas entre 5 y 35 °C, es usual recomendar plazos que no superen los límites siguientes:

- Ejecución de la mezcla: No más tarde de una hora (1 h) desde la extensión de la cal
- Compactación de la mezcla: De cuatro a seis horas (4 - 6 h) desde el mezclado
- Curado de la mezcla: De tres a siete días (3 - 7 d), salvo que sea cubierta por otra superior

En este sentido es conveniente la realización de estudios de evolución de la densidad máxima en función del tiempo transcurrido desde el amasado hasta la compactación en el ensayo Próctor de referencia.

- d) **La sensibilidad del tratamiento a las variaciones en las hipótesis previstas.** Este estudio debe servir para evaluar las previsibles variaciones que se obtendrán en la obra en caso de que los valores medios estimados de dotación de cal, densidad y humedad de compactación previstas fluctúen. Se basará en el análisis comparativo de dichos parámetros para el caso en que se dispongan de datos suficientes, por ejemplo por haberse ensayado y estudiado más de una dotación de referencia.

Como conclusión de este estudio podrán fijarse los rangos en los que serán admisibles o no las capas ejecutadas o, incluso, las penalizaciones a aplicar en caso de mermas de calidad. Estas penalizaciones podrán venir expresadas, por ejemplo, en forma de rebaja de la categoría supuesta en las hipótesis de dimensionamiento.

Una posibilidad para simplificar este estudio, aunque es muy pesimista, se basa en analizar la resistencia y comportamiento de una mezcla en unas condiciones límites, como pueden ser analizar probetas elaboradas bajo las siguientes condiciones:

- Dotación: 90 % de la dotación de la fórmula de trabajo
 - Densidad de ejecución: 95 % de la máxima del ensayo Próctor
 - Humedad de compactación: De 0,9 a 1,1 la humedad óptima
- e) El comportamiento a medio plazo del tratamiento se centra en la previsión del comportamiento de la mezcla ante las dos principales incidencias que pueden presentarse en las primeras edades de la misma: El paso del tráfico y la aparición del hielo.

En la cuestión referente al **comportamiento de la capa ante el paso del tráfico**, es usual establecer plazos de limitación de tráfico o valores mínimos de resistencia a alcanzar que aseguren la inalterabilidad. Si bien en la normativa española no se establecen rangos ni limitaciones para ello, hay que indicar que como referencia que la Guía Técnica del L.C.P.C.-S.E.T.R.A. establece que la

resistencia estará asegurada si se cumplen las dos condiciones siguientes:

$$C.B.R. \geq 20$$

$$C.B.R. \geq I.P.I.$$

Una última condición especial dentro de este ámbito es la verificación del comportamiento de la mezcla ante el riesgo de heladas, en caso de que este sea previsible en la obra. Si bien no existen normas generales para evaluar esta incidencia y se suele recomendar que no se aplique el tratamiento si existe el riesgo de que la capa sea afectada por el fenómeno del hielo, la Guía Técnica del L.C.P.C.-S.E.T.R.A. establece como recomendación que éste se prevea no aparezca antes de que la capa tenga una edad mínima de tres meses y que, a dicha edad, tenga una resistencia a compresión simple (sobre probeta de dimensiones $h=10$ cm y $d=5$ cm compactada al 98,5% PN) que cumpla:

$$RC \geq 2,5 \text{ Mpa}$$

7.3.3.- Diferentes niveles de estudio de dosificación

Como ya se ha comentado, el alcance del estudio de dosificación del tratamiento puede no ser tan completo como el descrito anteriormente. La necesidad de cumplimentar todas las fases o etapas será consecuencia de una serie de factores y condicionantes cuya consideración deberá marcar es te alcance.

En este sentido, la Guía Técnica del L.C.P.C.-S.E.T.R.A. ha establecido un protocolo de actuación que regula los estudios de dosificación en tres niveles de complejidad cuya selección se realiza en función de los siguientes factores:

- a) El tipo de dimensionamiento del firme y la participación en él de la capa a estabilizar (supuesto que se trata de una capa de "couche de forme" según su nomenclatura);
- b) El nivel de conocimiento y experiencia existente en obras similares; y
- c) El interés de una optimización económica de la dosificación.

Según estos factores, es posible seleccionar el nivel adecuado a cada tipo de estudio. Las diferencias de concepto y alcance de cada uno de los niveles mencionados son las siguientes:

- a) **Nivel 1:** Persigue **verificar que para una fórmula de trabajo** dada a priori, basada en otras experiencias, se obtienen los efectos pretendidos. En caso negativo, deberá abordarse un estudio de nivel 2.
- b) **Nivel 2:** Su objetivo es determinar la dosificación de cal que proporciona una mezcla o producto que satisface las características mecánicas requeridas al material en la disposición y espesor estructural proyectado. También se debe evaluar la incidencia de las posibles

variaciones en el contenido de cal sobre el comportamiento de la mezcla y, en base a ellas, **optimizar la dosificación**. Es la solución apta para el caso de dimensionamiento de firmes o explanadas mediante la aplicación de “catálogos”.

- c) **Nivel 3**: Un estudio de este nivel persigue, par a una o diferentes fórmulas de trabajo, **determinar las características mecánicas** que pueden ser aplicadas en el modelo de cálculo de manera que se optimice técnica y económicamente la estructura del firme. Su aplicación más evidente es en el caso que se realicen cálculos analíticos para el dimensionamiento del firme, y requiere para ser coherente la aplicación de un estudio geotécnico en profundidad, unas especificaciones constructivas detalladas, la aplicación de un sistema de aseguramiento de la calidad y la posibilidad de corregir las previsiones del cálculo en base a las posibles dispersiones obtenidas “in situ”.

La tipología o alcance de cada una de las etapas descritas anteriormente, así como su forma de aplicación según se trate de un estudio de u nivel u otro, se esquematiza en la tabla siguiente:

ALCANCE DE LAS DISTINTAS FASES SEGÚN EL NIVEL DE ESTUDIO			
FASE	NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3
Ensayo de aptitud del suelo	Imprescindible		
Dosificación de la cal	Viene propuesta por experiencias similares	Hay que buscar el valor óptimo	
Estudio de la fórmula de trabajo	Para el porcentaje propuesto	Al menos para dos o tres porcentajes diferentes en función de la experiencia	Salvo conocimiento especial es probable que se pretise estudiar más de tres porcentajes
Condiciones de compactación	Comprobación de: * IP (**) * Humedad de ejecución	Igual que para el nivel 1, se realizará la comprobación para cada porcentaje que se decida estudiar. Si son menos de tres porcentajes los estudiados, bastará con estudiarlo para el valor más probable	Se estudiarán los valores obtenidos para cada porcentaje previsto, analizando los valores obtenidos
Plazos de trabajabilidad	Hay que estudiarlo o adoptar valores estándar		
Comportamiento bajo el paso de tráfico	Comprobación de los valores de IP - CBR		
Comportamiento bajo hielos (Si existe este riesgo)	Comprobación de la resistencia a compresión simple		
Estudio de sensibilidad ante las variaciones de dosificación	---	Realizar para cada parámetro por separado o evaluar unas condiciones críticas extremas	Realizar para cada una de las condiciones Proctor correspondientes y para cada dosificación seleccionada
Dosificación seleccionada	Lo prevista si cumple las comprobaciones realizadas. Si no, se pasará a estudio de nivel 2	La más baja que permita asegurar las comprobaciones anteriores	Se realizará los cálculos de la dosificación elegida, con los valores de resistencia más desfavorables desde el punto de vista del análisis de sensibilidad

(*) Basados en la Norma Francesa NF P 98- 231 que estima el plazo según dos métodos alternativos: Por la evolución de la densidad máxima con el tiempo y por la velocidad de propagación de ondas.

(**) "Índice Portante Inmediato", obtenido según se recoge en la norma francesa NF P 9-078

7.3.4.- Estudios simplificados de tratamiento de suelos

Tan sólo en ocasiones limitadas , justificadas por el volumen, tipología y condiciones de obra, es recomendable eludir el proceso completo de estudio y dosificación de tratamiento de suelos con cal en aras a optimizar los recursos y plazos.

Esta casuística puede comprenderse fundamentalmente en las siguientes condiciones:

- Obras de alcance limitado**, en las que se pretenda tratar volúmenes reducidos, inferiores a cinco mil metros cúbicos de suelos.

Explanadas estabilizadas y capas de firme tratadas con cementos. Aspectos prácticos.

Criterios de selección y dosificación en los tratamientos con cal

Madrid 2005

- b) **Obras para vías de tráfico reducido**, que no van a ser sometidas a solicitudes importantes. En este sentido, podrían considerarse como tales aquellas en que el tráfico previsible no supera el de la propia ejecución de la obra (caminos de acceso a zonas residenciales, vías de tráfico ligero, pistas forestales de zonas sin explotación continuada, vías de tráfico limitado, desvíos provisionales, etc.).
- c) **Obras sobredimensionadas**, en las que no se prevea desarrollar la totalidad de las características mecánicas previstas para el suelo tratado. Este concepto puede adoptarse cuando, frente a la previsión de un comportamiento del suelo tratado, se adopte en el dimensionamiento una categoría inferior (de explanada o de material) a la prevista.

En estos casos, el estudio de selección del ligante y dosificación del tratamiento de los suelos podrá basarse en experiencias previas, propias o adquiridas, de tratamiento de materiales similares al afectado. Asimismo, el estudio geotécnico que sea empleado para la aplicación del concepto de "materiales similares" deberá ser acorde al alcance del estudio, pero en ningún caso será obviado.

Parece obvio que en el caso del diseño simplificado de este tipo de tratamientos no es recomendable en ningún caso la aplicación de porcentajes mínimos de cal, inferiores al dos por ciento, por cuanto éstos requieren procesos de mezclado y estudios detallados dado el bajo nivel relativo de adición.

Como reglas generales de aplicación práctica para este tipo de casos, es posible ilustrar algunos tratamientos u efectos posibles basados en los resultados contenidos en apartados anteriores. A sí para suelos arcillosos con porcentaje de finos superiores al 75 % y valores de:

$$\text{Límite líquido} < 75$$

$$12 < \text{Índice de plasticidad} < 35$$

es previsible obtener efectos del orden de magnitud de los recogidos en la tabla siguiente:

EFECTOS DE DISTINTOS TRATAMIENTOS CON CAL SOBRE SUELOS ARCILLOSOS			
CARACTERÍSTICA	PORCENTAJE DE CAL APLICADA (%)	EFEECTO	OBSERVACIONES
Humedad natural	1 % (*)	Reducción del 1 %	
Índice de Plasticidad	2 %	.P. mezcla < 20	I.P. original < 30
	3 %	.P. mezcla < 15	I.P. original < 30
Hinchamiento	3 %	Eliminación del riesgo	Salvo compuestos químicos nocivos (SO ₂ , Cl, etc.)
Densidad máxima ensayo Proctor Normal	2 %	Reducción 50 a 100 g/cm ³	
Índice C.B.R.	2 %	Superior a 5	
	3 %	Superior a 10	
Resistencia a compresión simple	3 %	Incremento de 1 kg/cm ²	Curado 7 días

(*) Relación en peso de cal aplicada en forma de cal hidratada en polvo

(**) La relación se refiere a cal viva

El hecho de indicar estos valores, ciertamente conservadores, no supone en ningún caso que no sea fácil o posible su mejora. Pero el empleo de los mismos como referencia debería en todo justificarse mediante correlaciones menos genéricas y más particularizadas al material a tratar.

Evidentemente será preciso evaluar de manera proporcionada los condicionantes locales específicos que pudieran influir en el tratamiento previsto, tales como presencia de hielo, contenido de compuestos agresivos (yesos, sulfatos, etc.), nivel freático, etc..

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANCADE Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España (2.002): ***"M anual de estabilización de suelos con cal"***, Madrid.
- Baryla J.M., Chenais, V., Gavois, L. Y Havrd, H. (2.000): ***"Effet de sulfates et sulfures sur des marnes traitées à la chaux et au liant routier sur un chantier autoroutier"***. "Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées" vol 224, París.
- Escario, V. (1.989): ***"Terraplenes y pedraplenes"***. M.O.P.U., Madrid.
- Fernández, C. (1.982): ***"Mejoramiento y estabilización de suelos"***. Editorial Limusa, México.
- Hunter, D. (1.988): ***"Lime-induced heave in sulfate-bearing clay soils"***. "Journal of Geotechnical Engineering", ASCE vol. 114, nº 2.
- Jimenez, J.A. y De Justo, J.L. (1.975): ***"Geotecnia y cimientos"***. Editorial Rueda, Madrid.
- Little, D. N. (1.99 5): ***"Stabilization of pavement subgrades and base courses with lime"***. Kendall/Hunt Publishing Company, Dubuque (Iowa).
- Litte, D.N. y Petry, T.M. (1.992) : ***Recent development in sulfate-induced heave in treated expansive clays"***. "Second Interagency Symposium on Stabilization of Soils and Other Materials", Metairie (Louisiana).
- Mitch ell, J.K. y Dematas, D (1.990): ***"Clay soils heave caused by lime-sulfate reactions"***. ASTM Symposium, San Francisco.
- Ortuño, L. (2.002): ***"Estabilización de suelos con cal. Consideraciones básicas para proyecto"***. Madrid.
- Perrin, L.L.: ***"Expansion of lime-treated clays containing sulfates"***, "7th International Conference on Expansive Soils.
- Rico, A. y Del Castillo, H. (1.977): ***"La ingeniería de suelos en las vías terrestres"***. Editorial Limusa, México.
- Snedker, E.A. (1.996): ***"M-40 - Lime Stabilisation Experiencias"***. "Lime Stabilisation. Tomas Telford", London.
- Suprenant, B.A. y McDonald, D.: ***"Soil stabilization in a sulfate environment"***

TEXTOS NORMATIVOS DE REFERENCIA

INSTRUCCIONES Y TEXTOS DEL MINISTERIO DE FOMENTO (MOPU)

Instrucción 6.1.IC 1975 de "Firmes Flexibles" aprobada por Orden Ministerial de 12 de Marzo de 1976 del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo.

Explanadas estabilizadas y capas de firme tratadas con cementos. Aspectos prácticos.

Criterios de selección y dosificación en los tratamientos con cal

Madrid 2005

Instrucción 6.2.IC 1975 de “Firmes Rígidos” aprobada por Orden Ministerial de 12 de Marzo de 1976 del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo.

Instrucción 6.1 y 2-IC sobre secciones de firme, aprobada por Orden Ministerial de 23 de Mayo de 1989 (B.O.E. del 30 de Junio).

Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG-3/75) aprobado por Orden Ministerial de 6 de Febrero de 1976 (BOE del 7 de Julio), con sus sucesivas modificaciones, en especial las recogidas en las siguientes:

Orden Circular 297/88T sobre estabilización de suelos in situ y tratamientos superficiales con ligantes hidrocarbonados, de 29 de Marzo de 1988

Orden Ministerial FOM 1382/2002, de 16 de mayo, por la que se actualizan determinados artículos del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes relativos a la **Construcción de Explanaciones, Drenajes y Cimentaciones** (BOE, de 11 de julio), del Ministerio de Fomento

Orden Ministerial FOM/891/2004, de 1 de marzo (BOE, 6/4/2004), **sobre secciones de firme y capas estructurales de firmes**, de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento

Orden Ministerial de 27 de Diciembre de 1.999 por la que se actualizan determinados **artículos del pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes en lo relativo a conglomerantes hidráulicos y ligantes hidrocarbonados** (B.O.E. del 22 de enero de 2.000)

OTRAS INSTRUCCIONES ESPAÑOLAS

Instrucción para el Diseño de Firmes de la Red de Carreteras de Andalucía, de la Dirección General de Carreteras de la Junta de Andalucía, editada como Orden Circular 1/99

Recomendaciones de Proyecto y Construcción de Firmes y Pavimentos de la Dirección General de Carreteras e Infraestructuras de la Junta de Castilla y León

NORMAS AENOR

AENOR Asociación Española de Normalización y Certificación (1.996): **“UNE-ENV 459-1. Cales para construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad”**. Madrid.

AENOR Asociación Española de Normalización y Certificación (1.995): **“UNE-ENV 459-2. Cales para construcción. Parte 2: Métodos de ensayo”**. Madrid.

INSTRUCCIONES Y NORMAS EXTRANJERAS

Explanadas estabilizadas y capas de firme tratadas con cementos. Aspectos prácticos.

Criterios de selección y dosificación en los tratamientos con cal

Madrid 2005

AFNOR (1.997): ***“Norme NF P 94-100. Essai d’évaluation de l’aptitude d’un matériau au traitement à la chaux et aux liants hydrauliques”***. Paris.

SETRA-LCPC (1.992): ***“Réalisation des remblais et des couches de forme. Guide technique”***. Paris.

SETRA-LCPC (2.000): ***“Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des remblais et des couches de forme. Guide technique”***. Paris.

BSI British Standards Institute (1.990): ***“B.S.I. 1.924-1,2: Stabilized materials for engineering purposes”***., London.