EL TRATAMIENTO DE SUELOS ARCILLOSOS MEDIANTE CAL

Juan Diego Bauzá Castelló

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN 5

LOS MATERIALES ARCILLOSOS EN LAS OBRAS DE CONSTRUCCIÓN 9

1.- La presencia de suelos arcillosos 9

2.- Definición y problemática de las arcillas 10

3.- Propiedades de las arcillas 11

3.1.- Estructura mineral de las arcillas 12

3.2.- La capacidad de cambio de la arcilla 15

3.3.- Cargas superficiales 16

3.4.- La capa doble 17

3.5.- Tamaño de las partículas 19

4.- Tipos de arcillas 20

5.- Los suelos arcillosos 20

6.- Propiedades de los suelos arcillosos 22

7.- Efectos de los suelos arcillosos sobre las construcciones 23

8.- Efectos de las construcciones sobre los suelos arcillosos 24

TRATAMIENTO DE LOS SUELOS ARCILLOSOS 28

1.- Procesos de tratamiento de suelos arcillosos 29

2.- Sustitución por otros suelos 30

3.- Mezcla con otros suelos 31

4.- Recompactación de los suelos 32

5.- Control de las condiciones de humedad 34

6.- Mezcla con conglomerantes 35

7.- Mezcla con otros productos estabilizadores 37

LA CAL PARA EL TRATAMIENTO DE SUELOS 38

1.- Antecedentes 38

2.- Definición y procedencias 38

3.- Funciones de la cal 40

4.- Tipos de cal 41

5.- Presentación de la cal 42

6.- Propiedades de la cal 45

7.- Normativa sobre la cal 47

8.- Clasificación de la cal 47

9.- Ensayos para caracterización de las cales 49

LA MODIFICACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON CAL 52
1.- Mecanismos de interacción de la cal sobre un suelo 53
2.- El intercambio iónico 54
3.- Floculación y aglomeración de partículas 55
4.- Modificación de la textura y consistencia 56
5.- La reacción puzolánica 59
6.- Carbonatación de la cal 62

EFECTOS DE LA APLICACIÓN DE LA CAL 63
1.- Reducción de la humedad natural del suelo 66
2.- Modificación de la granulometría 67
3.- Aumento de la permeabilidad 67
4.- Mayor trabajabilidad 69
5.- Reducción del índice de plasticidad 70
6.- Reducción del potencial de cambios volumétricos 73
7.- Modificación de las características de compactación 75
8.- Aumento inmediato de la consistencia 78
9.- Mayor resistencia a largo plazo 80

TIPOS DE MODIFICACIÓN DE SUELOS MEDIANTE CAL 85
1.- La mejora de suelos 88
2.- La estabilización de suelos 90

FACTORES CONDICIONANTES EN EL TRATAMIENTO DE SUELOS CON CAL 92
1.- Contenido en arcillas del suelo 93
2.- Características mineralógicas de la arcilla 94
3.- Contenido en materia orgánica 95
4.- Contenido en sulfatos solubles 95
5.- Plasticidad del suelo 98
6.- pH del medio 99
7.- Disgregación y homogeneidad de la mezcla 99
8.- Dificultad de compactación 101
9.- Humedad de compactación 102
10.- Presencia de aguas agresivas 103
11.- Fenómenos de lixiviado 103
12.- Acción del hielo 104

EFECTO DE LA PRESENCIA DE SULFATOS EN LOS SUELOS A TRATAR CON CAL 106
1.- Antecedentes 107
2.- Descripción de los casos de patología más importante 108
3.- Conclusiones de la patología descrita 121
4.- Mecanismos que intervienen en el proceso 125
4.1.- Las reacciones entre la cal y los sulfatos 125
4.2.- Condicionantes para la reacción entre la cal y los sulfatos 131
4.3.- Características de los productos generados 136
4.4.- Efecto sobre las estructuras de firme 138
5.- Recomendaciones constructivas y de diseño 140
5.1.- Estudios previos de caracterización elemental o de los componentes 142
5.2.- Estudios específicos de hinchamiento de las mezclas 147
5.3.- Modificación del proceso constructivo 154
NORMATIVA QUE REGULA EL TRATAMIENTO DE SUELOS CON CAL EN ESPAÑA 157
1.- Clasificaciones de suelos 157
1.1.- Artículo 330 del PG-3/75 158
1.2.- O.C. 326/00 sobre geotecnia vial 159
2.- Instrucciones de firmes 160
2.1.- Instrucciones 6.1.IC y 6.2.IC - 1975 de firmes flexibles y rígidos 160
2.2.- Instrucción 6.1-I.C. y 6.2-I.C. de secciones de firmes (1.989) 163
2.3.- O.C. 10/2002 sobre secciones de firmes 164
3.- Especificaciones técnicas de los tratamientos de suelos con cal 166
3.1.- Artículo 510 Suelos estabilizados in situ con cal del PG-3/75 167
3.2.- O.C. 297/88T sobre estabilización de suelos in situ y otros 169
3.3.- Artículo 512 Suelos estabilizados in situ según la O.C. 10/2002 172
4.- Normas que regulan las cales para tratamientos de suelos 176
4.1.- Artículo 200 Cal aérea del PG-3/75 177
4.2.- Artículo 200 Cales para estabilización de suelos (OM 27/12/99) 178
5.- Resumen del tratamiento en la normativa española 180
6.- Otra normativa autonómica 183
6.1.- La Instrucción de firmes de la Junta de Andalucía 183
6.2.- Las Recomendaciones de firmes de Castilla y León 185
EL DISEÑO DE TRATAMIENTOS DE SUELOS CON CAL 187
1.- Objeto del tratamiento de los suelos con cal 187
2.- Los materiales que intervienen en el tratamiento 188

2.1.- Identificación de los suelos 188
2.2.- Estado de los suelos 191
2.3.- La cal a emplear en los tratamientos 192
2.4.- Otras consideraciones 193
3.- Metodología de los estudios geotécnicos 193
3.1.- Objeto del estudio geotécnico 194
3.2.- Alcance del estudio geotécnico 195
3.3.- La caracterización geotécnica de las formaciones 197
3.4.- El estudio de dosificación de los tratamientos de suelos con cal 201
3.5.- Diferentes niveles de estudio de dosificación 209
3.5.- Estudios simplificados de tratamiento de suelos 212

MÉTODOS DE EJECUCIÓN 215
1.- Técnicas de ejecución de los tratamientos de suelos con cal 215
2.- Fases del proceso constructivo 216
2.1.- Excavación y escarificado del suelo 218
2.2.- Disgregación 221
2.3.- Suministro de la cal 222
2.4.- Aplicación de la cal 225
2.5.- Humectación 231
2.6.- Mezclado 233
2.7.- Nivelación 237
2.8.- Compactación 238
2.9.- Curado 239
3.- Secuencias típicas del tratamiento de suelos in situ 240
4.- El tratamiento en central 243
5.- Los trenes de tratamiento o plantas móviles 244
6.- Los equipos compactos de estabilización 245
7.- Las inyecciones de cal en profundidad 246

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 248

TEXTOS NORMATIVOS DE REFERENCIA 250

INTRODUCCIÓN

La presencia de materiales en el terreno natural que originan efectos nocivos sobre las construcciones podría decirse que es casi una característica inherente a las mismas. El hecho de que la ubicación o el trazado de una obra no pueda condicionarse sólo a la existencia de un sustrato de soporte adecuado hace que, en numerosas ocasiones, no quede más remedio que asumir estos efectos perjudiciales como un mal menor.

Dentro del grupo de los materiales que afectan negativamente a las obras que sobre ellos se construyen destacan en el territorio español los materiales arcillosos, por su extensión y por la tipología de sus daños. Los efectos provocados por estos materiales, asociados a sus características resistentes, sus cambios de estado, su deformabilidad o sus cambios volumétricos son ampliamente conocidos en el sector de la construcción española desde tiempos remotos.

Si bien los daños que originan los suelos arcillosos sobre las construcciones no son los más aparatosos ni los más llamativos, podríamos con casi toda seguridad afirmar que son los que más repercusiones tienen sobre las mismas en cuanto al número de incidencias e, incluso, en cuanto al coste de reparación. ¿Quién no puede mencionar un caso conocido y cercano de fisuración por arcillas expansivas o de deformación de una vías por un blandón?.

Desde el punto de vista ingenieril, una vez asumida esta circunstancia, es preciso estudiar cómo minimizar los riesgos y limitar la influencia de dichos materiales sobre la obra proyectada. El desarrollo de las posibles soluciones suele pasar, bien por la actuación directa sobre los materiales nocivos, bien por actuaciones indirectas sobre las estructuras proyectadas,

adaptando su tipología, las cargas que transmite, o incluso el proceso constructivo.

Evidentemente, una posibilidad es evitar la presencia de los materiales perjudiciales mediante su sustitución o remoción. Sin embargo, a menudo en las grandes obras de infraestructuras esto supone el movimiento de enormes volúmenes de suelo con un coste directo excesivamente elevado. Y esto sin contar que, además, suele ser necesaria la aportación de otro material, a veces sin especial calidad pues su única misión es ser "inerte", lo que hace que el coste a asumir pase a ser también desproporcionado.

A estos condicionantes económicos hay que unir desde hace unos años, la creciente preocupación por el medio ambiente que ha llevado a considerar de manera crítica la creación de grandes vertederos o préstamos en las obras de construcción. Y esto sin pensar que, en ocasiones, hay que proyectar obras en espacios naturales de indudable valor, protegidos o no, donde esta consideración, más que un deber moral debe ser una obligación.

El ingenio para resolver esta problemática ha llevado no sólo a buscar soluciones novedosas sino incluso a rescatar del pasado algunas más tradicionales cuya práctica estaba casi abandonada, y éste es el caso de la mejora de los suelos arcillosos con cal.

España es un país donde la fabricación de cales es una industria extendida y su uso, al menos en la edificación, es habitual y tradicional. Sin embargo, la aplicación de la cal en la construcción de infraestructuras, a pesar que haber intentado resurgir en ocasiones singulares, no lo ha conseguido hasta hace poco con éxito.

A pesar de que el empleo de la cal en la mejora de los suelos es una solución empleada desde hace muchos siglos y de eficacia indudable, es posible pensar que la falta de conocimiento técnicos sobre los efectos de la misma, el carácter artesanal que parte de la

industria de fabricación de cales ha transmitido al sector y, quizás, el elevado coste de la solución ante otras alternativas no tan denostadas hasta la fecha han hecho que el empleo de la mejora de suelos con cal no haya pasado en las últimas décadas de haberse ilustrado con simples pruebas o aventuras singulares que nunca han trascendido poco más allá del entorno directo de la obra en que se ha aplicado.

No obstante, parece que ha llegado el momento de poner de nuevo sobre la mesa las posibilidades, riesgos y ventajas de una solución que, cuando se analiza con todos los criterios que se precisan para estudiar con objetividad y profundidad una alternativa técnica supera ampliamente las exigencias más duras. Y esto es evidente por la creciente preocupación en el sector por la investigación de esta solución, por la aparición de normas y textos técnicos que en los diversos países están surgiendo y por el interés que cualquier acto o jornada al respeto suscita en el mundo de la construcción.

Pero esta evidencia también provoca una clara necesidad. Aunque parece que el uso de la mejora de suelos con cal está "despertando" y cada vez se aplica en más obras de grandes infraestructuras, lo que se refleja en los índices de consumos de la industria, sigue sin existir un cuerpo normativo o ni siquiera técnico o descriptivo de la técnica, sus normativas, medios de ejecución y efectos, tanto beneficiosos como de los posibles riesgos. Además la simple traducción o transposición de textos o publicaciones foráneas no es suficiente: La singularidad de los suelos españoles y la climatología que los afecta, la diferente normativa en cuanto a ensayos y requisitos en las obras, así como incluso las diferencias en los procesos constructivos usuales o el parque de maquinaria a disposición de las empresas, hace que no sea válida la simple aplicación de referencias o experiencias extranjeras.

En este sentido, este documento pretender recopilar, ordenar e ilustrar cuantos

conocimientos son precisos para el diseño de una mejora de suelos arcillosos mediante la aplicación de cal en el entorno normativo y productivo español.

Dentro de las múltiples posibilidades de esta técnica, el presente documento se centra en el empleo de la cal en las grandes obras de infraestructura, aunque no con carácter excluyente, sino más bien referencial. El desarrollo de la investigación, de la maquinaria de ejecución, el estudio de la patología y la publicación de normativas en este campo suele ser más frecuente en este subsector de la construcción y, por tanto, quizás sea aquí donde hay que situar los primeros documentos o referencias que, como ya se ha dicho, son fácilmente extensibles a otros subsectores como lo han sido otros estudios precedentes en áreas dispares.

Además, este documento está enfocado 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.

LOS MATERIALES ARCILLOSOS EN LAS OBRAS DE CONSTRUCCIÓN

Frente a los otros grandes grupos usuales de materiales, bien rocosos bien suelos limosos o granulares, los materiales arcillosos se distinguen por un comportamiento y unas características que los hacen objetivo especial de los procesos de mejora.

En este apartado se repasan someramente las nociones básicas y principios necesarios para comprender la utilidad y los mecanismos que intervienen en dichos procesos.

1.- La presencia de suelos arcillosos

Como se ha avanzado, la presencia de materiales naturales y su influencia en las obras de construcción es casi inevitable. Pero más concretamente, la utilización de los suelos, como materiales locales fácilmente excavables y de uso sencillos, hace que su profusión y presencia en el entorno de cualquier obra sea incluso provocada.

Es fácil encontrar suelos, entre los que puede haber materiales arcillosos con casi toda seguridad, en las diversas partes de una obra, ya sea de edificación, ya de cualquier otro tipo. Así por ejemplo pueden formar parte de los:

a) **Materiales subyacentes** a la obra: En concreto bajo las cimentaciones de edificios y como asiento de terraplenes o estructuras de tierra;

b) **Materiales de aportación**: En que es posible que se hayan empleado como:

* Rellenos bajo construcciones, por motivos tales como la falta de materiales

mejores, motivos económicos o medio ambientales;

* Rellenos en los trasdoses de muros y estructuras de contención; e incluso como

* Capas con funcionalidad específica, resistentes o impermeables por ejemplo, de estructuras en los que se disponen estos suelos en sustitución de otros, evidentemente, de peor calidad.

c) **Materiales adyacentes** a las estructuras u obras, configurando los taludes de excavaciones o los taludes naturales del entorno.

2.- Definición y problemática de las arcillas

Inicialmente no hay en absoluto que hablar de los materiales arcillosos como proscritos en las obras ideales de construcción ni como materiales indeseables. Esta denominación, si bien es excesivamente genérica, no debe llevar a confusión. Podemos entender los materiales arcillosos como aquéllos que poseen una parte relevante de suelos cohesivos y que como tales condicionan su comportamiento. Sin que sea preciso presuponer que éste va a ser deficiente, sino que, en ocasiones, incluso puede ser deseable como elemento de mayor estabilidad o impermeabilización, por ejemplo, frente a los restantes materiales existentes en las obras o en el terreno.

Se pueden definir como arcillosos aquellos suelos en cuya composición granulométrica tienen un peso especial las partículas pequeñas, cifradas éstas en las de tamaño inferior a dos micras. Estas partículas están compuestas en su mayoría por minerales arcillosos, silicatos de hierro, aluminio, magnesio, etc., originados por la alteración química de otros minerales

originales.

Esta especial singularidad en cuanto al tamaño y composición de las partículas se plasma en un comportamiento dependiente de fenómenos más cercanos a las teorías moleculares que a las macroscópicas. Adquieren así en este tipo de suelos gran relevancia conceptos como la superficie específica de las partículas, la carga de las partículas y las atracciones e intercambios iónicos, conceptos que se manejan más raramente en la caracterización y funcionamiento de los restantes materiales empleados en las obras (materiales granulares, limos, áridos, etc.).

3.- Propiedades de las arcillas

Desde el punto de vista que interesa a este documento en cuanto a la mejora de los suelos con cal para evitar sus efectos nocivos sobre las construcciones, se repasan a continuación los conceptos básicos que justifican los fenómenos que originan dichos daños y en los que se fundamenta la mejora.

Evidentemente no es objeto del presente el desarrollo de la teoría completa y exhaustiva sobre los suelos arcillosos, sino más bien sentar las bases para la comprensión y el diseño de las soluciones que se basan en la mejora de suelos.

En esta línea, es posible destacar algunos conceptos o características básicas que diferencian y justifican el comportamiento de los materiales arcillosos, que son:

a) Su estructura mineral;

b) La capacidad de cambio de las mismas;

c) Las cargas superficiales de las partículas de arcilla;

d) La “capa doble”; y

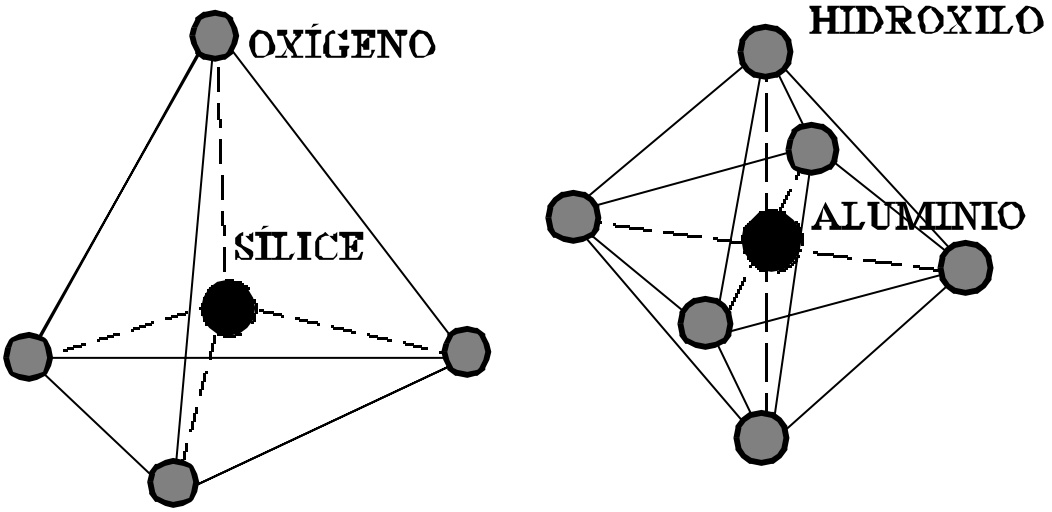
e) El tamaño de las partículas que las constituyen.

A continuación se describen dichas nociones.

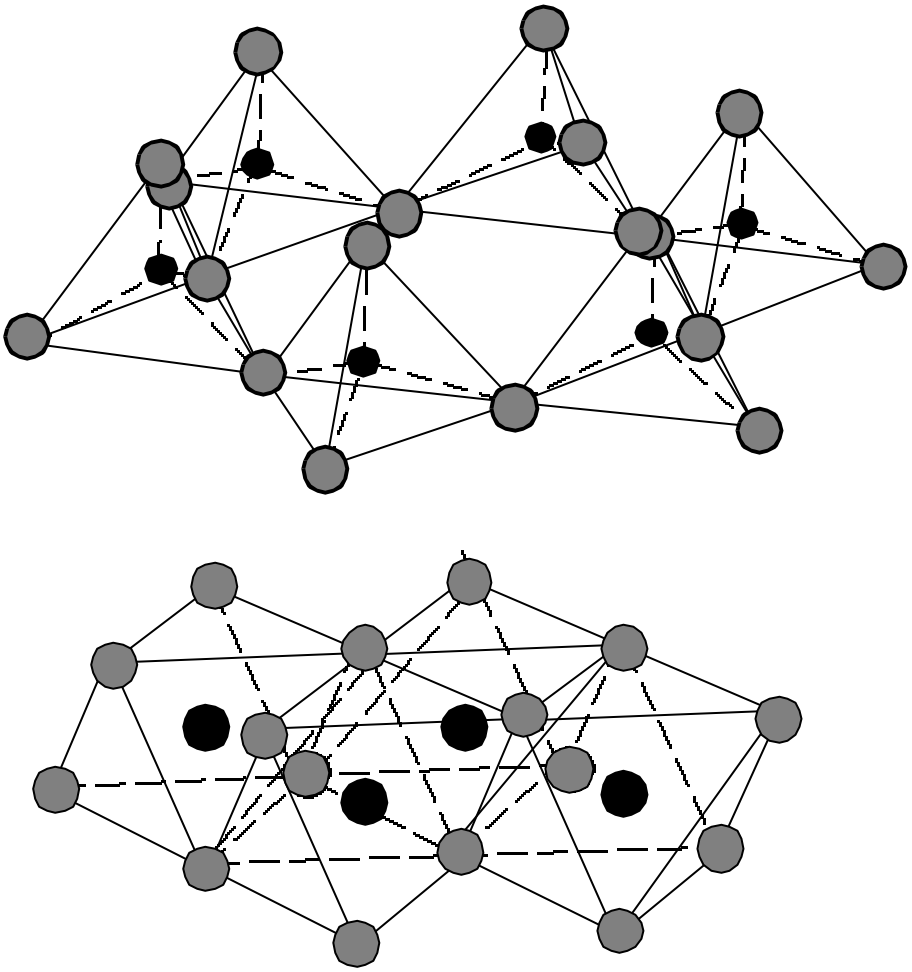
3.1.- Estructura mineral de las arcillas

Las partículas de arcillas se componen por agrupaciones moleculares sencillas asociadas en estructuras más o menos complejas de disposición repetitiva.

Los esquemas básicos de agrupación se componen de láminas muy delgadas de unidades de mallas tetraédricas y octaédricas. Las unidades tetraédricas se componen de iones de sílice rodeados por cuatro átomos de oxígeno equidistantes del mismo constituyendo los vértices de la forma geométrica. Las unidades octaédricas las forman seis grupos hidroxilos (OH) en los vértices rodeando a un átomo de aluminio o magnesio.

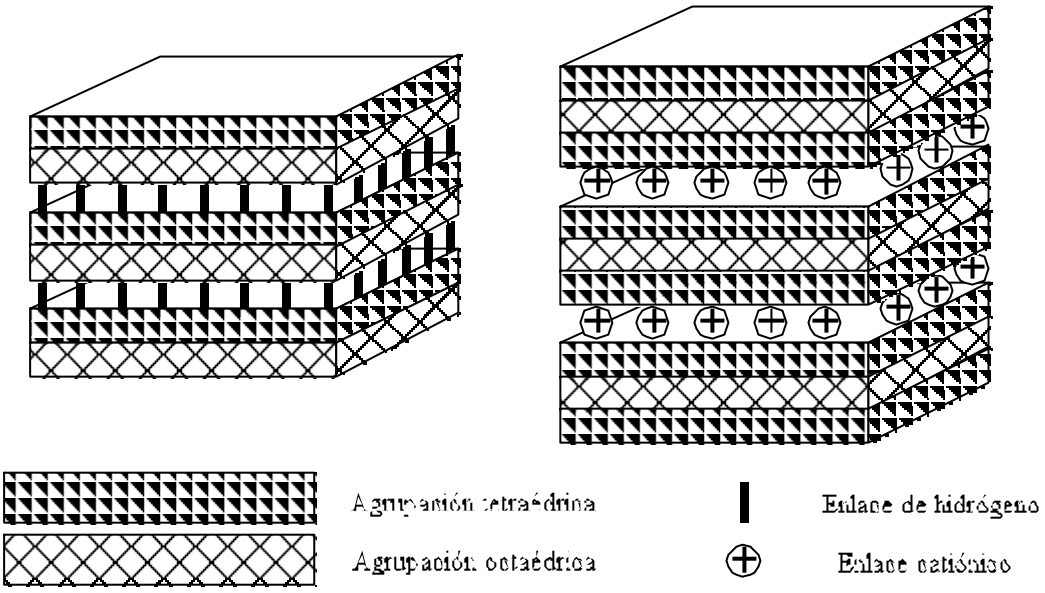


Estas unidades se combinan entre ellas compartiendo caras de los octaedros o vértices de los tetraedros para formar estructuras del tipo laminar, anular o lineal. Estas estructuras pueden en teoría extenderse indefinidamente en el espacio mediante la reproducción de los esquemas elementales. Las estructuras laminares son las más representativas y frecuentes de los suelos arcillosos.



A su vez, este esquema básico se reproduce mediante la yuxtaposición de multitud de láminas dispuestas en paralelo y unidas a su vez por enlaces de hidrógeno o cationes. Estas

estructuras laminares son también típicas y repetitivas. El esquema de unión se basa en que una o varias capas de mallas octaédricas o tetraédricas comparten una de las caras o planos de átomos y agrupadas así en láminas compuestas se establecen los enlaces. En estas composiciones las atracciones entre láminas simples son mucho más fuertes que los enlaces entre las compuestas.



La diferencia de las fuerzas de unión en las distintas superficies de contacto justifica en parte los comportamientos que después se describirán en los suelos arcillosos.

La gran variedad de disposiciones que es posible componer basándose en las unidades básicas descritas, así como las distintas posibilidades de ubicar cationes o aniones diferentes tanto en el interior de las mallas como en los enlaces entre láminas, genera la diversidad de los minerales arcillosos que es posible encontrar en la naturaleza: Caolinitas, halloysitas, montmorillonitas (esmectitas), vermiculitas, illitas, sepiolitas, etc..

Finalmente hay que citar que las configuraciones y estructuras que se han descrito y que constituyen las partículas de arcilla no son eléctricamente neutras y presentan un desequilibrio de las cargas. El hecho de que las agrupaciones elementales se basen en formas tetraédricas u octaédricas no significa que estén totalmente equilibradas eléctricamente, sino que éstas son las formas que minimizan las fuerzas de repulsión que puedan existir entre los átomos.

3.2.- La capacidad de cambio de la arcilla

Un fenómeno muy común en las estructuras laminares tetraédricas y octaédricas descritas es su propensión a la sustitución de los iones de sílice o aluminio por otros de menor carga o valencia positiva. Esto provoca una deficiencia de cargas que se refleja en una carga negativa en la superficie de la lámina. La sustitución se justifica por la aparición de cationes más afines a la estructura que los que inicialmente la componen.

Este fenómeno, que suele presentarse más frecuentemente con los cationes, hace que exista un riesgo constante de sustitución en cualquiera de las estructuras que son susceptibles de ello mientras pueda presentarse ante el mineral un catión de mayor afinidad que el previamente existente. Es lo que se conoce como la "capacidad de cambio" de los minerales arcillosos.

Dependiendo de los tipos de agrupaciones, según los iones que compongan las mallas y sus estratificaciones, habrá más o menos posibilidad de adsorción de los llamados "cationes de cambio". La gran superficie específica de las partículas arcillosas aumenta además esta posibilidad de adsorción. Por otra parte, la posible rotura de las estructuras laminares en partículas pequeñas también aumenta esta propensión al provocarse en los bordes rotos la

presencia de cargas desequilibradas.

La capacidad de cambio es una característica de cada tipo de mineral arcilloso. A más capacidad de cambio, más reactividad con potenciales aportadores de cationes y, consecuentemente, mayor carga negativa superficial en las partículas de la arcilla. Así ocurre con las montmorillonitas, que tienen una capacidad de cambio hasta diez veces superior a otros tipos como son las caolinitas.

Finalmente, hay que citar que un aumento del pH del entorno aumenta la capacidad de cambio de cationes de un material dado, mientras inhibe o reduce la de aniones.

3.3.- Cargas superficiales

Como consecuencia de los fenómenos de desequilibrio eléctrico en las unidades elementales y del intercambio iónico en las estructuras de los suelos arcillosos, es usual que se presenten dos circunstancias con gran importancia en cuanto a su comportamiento eléctrico:

a) En primer lugar, en las estructuras laminares compuestas suelen quedar cargas negativas libres, o deficiencias de cargas positivas, debidas a sustituciones en las estructuras de iones, que se manifiestan en sus caras “paralelas”; y

b) En segundo lugar, aparecen cargas positivas o negativas en los bordes que se originan por la rotura de las láminas.

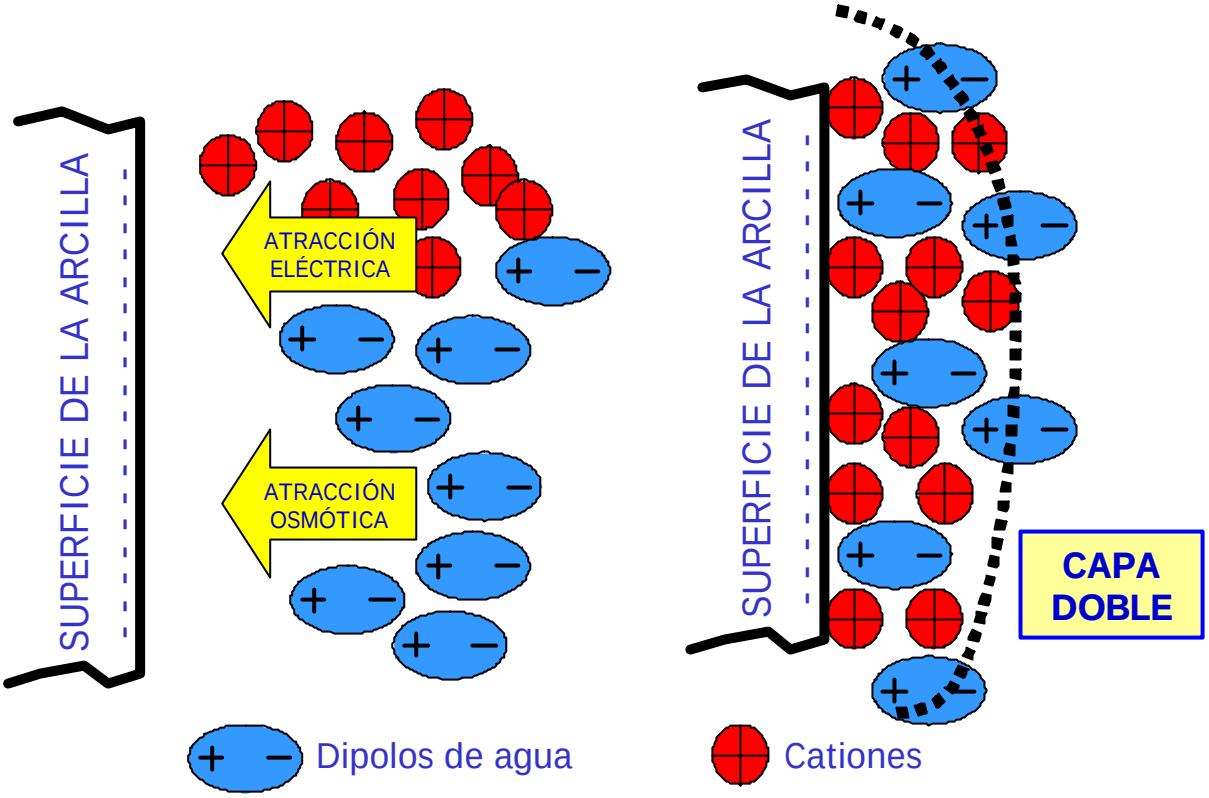
El primero de los fenómenos es característico de algunos tipos de arcillas especialmente activos, como las montmorillonitas, mientras que el segundo es casi genérico para todas las arcillas. Además, en cuanto a este segundo tipo hay que decir que a menor tamaño de partícula aumenta el nivel de cargas insatisfechas, debido esto a una mayor rotura de las

grandes láminas estructurales y por tanto un mayor número de enlaces rotos.

3.4.- La capa doble

El comportamiento eléctrico superficial de las arcillas tiene como se ha visto varias consecuencias. Así, el desequilibrio de cargas superficiales descrito se neutraliza mediante la atracción de cationes externos que se sitúan en la superficie de los minerales arcillosos o entre las láminas que los componen. Esto a su vez genera una concentración salina en las mismas.

Sin embargo, la atracción de cationes a la superficie de las arcillas es un fenómeno opuesto a la tendencia de los mismos a distribuirse de manera uniforme en el medio, evitando concentraciones diferenciales. Si la arcilla se encuentra en un medio acuoso, ante la presencia de agua libre en el contorno, ésta tiende por ósmosis a aproximarse a la superficie de las partículas, cargada de cationes, para diluir su mayor contenido salino. Con ello, finalmente se consigue que los cationes se dispersen en el entorno de las partículas de manera que su concentración aumenta progresivamente en dirección perpendicular hacia su superficie. Se crea así una especie de "doble capa" eléctrica: La negativa de la superficie y la positiva proporcionada por la agrupación de cationes en su proximidad, que da nombre a este fenómeno característico de las arcillas.



Se puede delimitar así la capa doble como la zona que existe entre la superficie de la partícula de arcilla y la distancia a la misma en que la concentración de cationes es igual a la del medio en que se encuentran. Su espesor por tanto es igual a la distancia dentro de la cual existe potencial eléctrico en el entorno de la partícula. Este espesor dependerá también del tamaño relativo de los cationes en relación con su valencia o capacidad para equilibrar las cargas superficiales.

El agua o medio en dicho entorno, que se encuentra unida a los iones, se encuentra bajo una fuerza de atracción conjuntamente con ellos, orientándose incluso como una molécula dipolar.

El efecto de la entrada o incorporación de agua a la capa doble provoca importantes cambios de volumen que se traducen en el conocido efecto de la expansividad de las arcillas.

3.5.- Tamaño de las partículas

Como ya se ha citado los suelos arcillosos están compuestos por partículas muy pequeñas, menores de 2 micras. Una característica añadida a este tamaño y que se deduce de la estructura laminar descrita es que, además, tienen una gran superficie específica en relación con los restantes materiales. Así es usual hablar de superficies específicas de hasta varias centenas de metros cuadrados por cada gramo de material.

Esto hace que cualquier fenómeno o propiedad que afecte a su contorno o superficie, como los que se han descrito, adquiera especial relevancia en el estudio de las arcillas.

Pero también hay que citar que el tamaño de las partículas está condicionado por los enlaces y cargas eléctricas entre las unidades y láminas que las componen, por lo que es característica de cada tipo de arcilla.

Así, se ha citado que los enlaces de cationes suponen conexiones bastante más débiles, por ejemplo, que las uniones entre láminas que comparten planos de átomos. Como consecuencia, aquellas arcillas con alta capacidad de cambio, en las que el desequilibrio de cargas ha llevado a una alta concentración de cationes en su superficie que configurará la unión entre capas, tendrán unas fuerzas de unión entre las mismas relativamente débiles. Por tanto, el riesgo de rotura de enlaces y de fraccionamiento de partículas es mayor.

Es el caso de las montmorillonitas, que se ha visto tienen una alta capacidad de cambio, muy superior a las caolinitas. Por ello, el tamaño medio de sus partículas es bastante inferior y, además, la superficie específica muy superior.

4.- Tipos de arcillas

En función de estas características descritas es posible prever la gran variabilidad de las arcillas y de sus características. Si bien en el ámbito ingenieril suelen tratarse hasta más de una decena de tipos de arcillas, la realidad es que tres de estos tipos concentran usualmente la caracterización más frecuente de las mismas: La caolinita, la illita y el grupo de las montmorillonitas (esmectitas).

Sus propiedades diferenciales pueden ilustrarse en la siguiente tabla que recoge valores de distintos autores para los grupos extremos:

	Caolinita	**Montmorillonita**
Enlace entre láminas	Hidrógeno (“fuerte”)	Cationes (“débil”)
Carga superficial	Baja	Alta (10:1)
Superficie específica	10 - 15 cm^2 / g	800 - 1.200 cm^2 / g
Capacidad de cambio de cationes	2 - 15 meq / 100 g	75 - 150 meq / 100 g
Plasticidad	Baja	Alta

Las características de las illitas son intermedias entre las apuntadas para los otros dos grandes grupos.

5.- Los suelos arcillosos

Evidentemente cuando en una construcción se emplea o afecta a un suelo éste suele estar compuesto por una serie de materiales más o menos dispares que hacen que casi nunca se presente, por ejemplo, una arcilla en estado puro. Es usual encontrar suelos compuestos o agrupaciones, por ejemplo, limoso-arcillosas, arcillo-arenosas, etc..

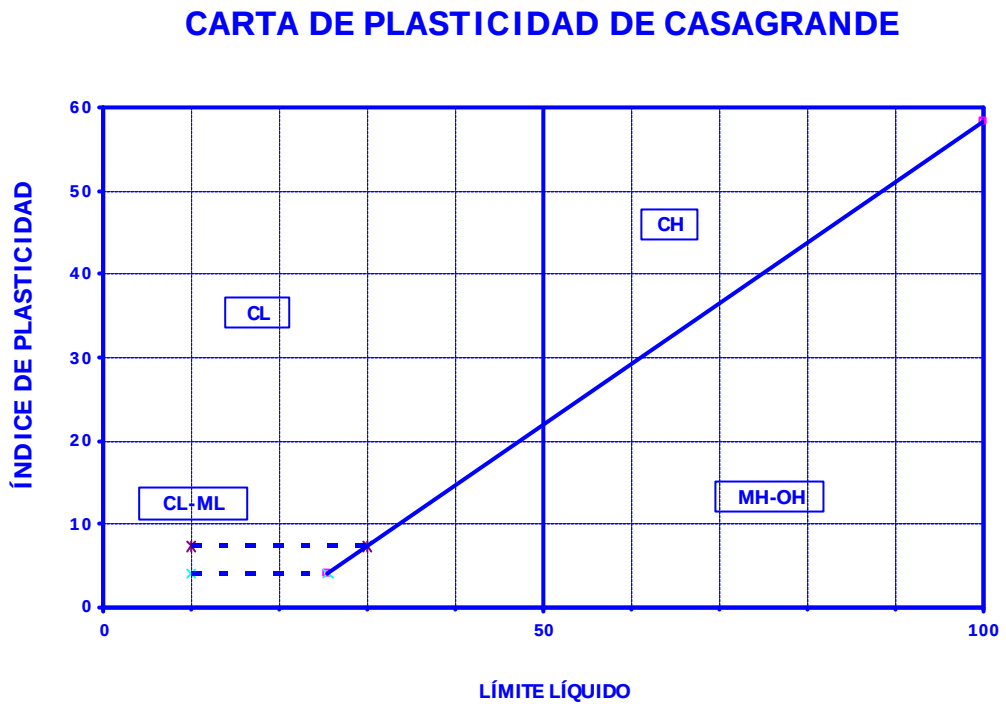
En función de la proporción dominante en cada suelo sus características estarán más

o menos condicionadas por uno u otro material, presentando así comportamientos más o menos elásticos, cohesivos, drenantes, etc. según la fracción principal.

Cuando en un suelo la fracción condicionante es la de partículas arcillosas, sus propiedades físicas y mecánicas a escala macroscópica están dominadas por las características de estas partículas que se han descrito anteriormente. Dado que no es usual la realización de reconocimientos microscópicos sobre los materiales, la clasificación de un suelo se hace usualmente mediante el análisis de este comportamiento. Por ello se emplean para la identificación de suelos los ensayos en los que más influyen estas características, que indican casi de manera inequívoca el riesgo o la presencia de los fenómenos descritos.

Ensayos que usualmente sirven para clasificar los suelos son el análisis granulométrico y en especial de las fracciones dominantes, las determinaciones de plasticidad mediante los límites de Atterberg, la determinación del equivalente de arena, los ensayos de potencial de hinchamiento, los ensayos químicos sencillos y los ensayos de compactación. En base a ellos se establecen la mayoría de las clasificaciones de suelos que hoy en día se emplean para las obras de infraestructuras y de edificación.

Una primera aproximación a la caracterización de los suelos y, en especial, a la identificación de los suelos arcillosos es la clasificación conocida como de Casagrande. En ella, partiendo de los resultados de la determinación de los límites de Atterberg se clasifican los suelos según se recoge en el ábaco siguiente:



En él ya se tiene una primera selección que indican cuáles son los suelos que se pueden considerar como arcillosos (tipo “C”) sobre los que los fenómenos estudiados tienen especial influencia.

No obstante hay que insistir como se ha dicho que esta simple clasificación no aporta información de las características mineralógicas del suelo que diferencia claramente suelos que en ella podrían agruparse en entornos similares.

6.- Propiedades de los suelos arcillosos

Las principales peculiaridades de los suelos arcillosos en su comportamiento como material estructural derivadas de su estructura y composición se pueden resumir en los siguientes puntos:

a) Comportamiento diferente según el nivel de humedad;

b) Afinidad por el agua, manifiesta en mayor o menor grado según su mineralogía;

c) Inestabilidad volumétrica;

d) Baja resistencia y capacidad portante;

e) Baja permeabilidad; y

f) Compresibilidad dependiente del tiempo de aplicación de la carga

7.- Efectos de los suelos arcillosos sobre las construcciones

Como consecuencia de estas características y vistas las funciones que los suelos arcillosos adquieren en las obras de construcción, es posible identificar una serie de efectos sobre las mismas que se producen de manera directa. Fundamentalmente se pueden clasificar según sigue:

a) **Perturbación de los procesos constructivos** que se manifiesta en:

* Falta de trabajabilidad,

* Dificultades para el drenaje, y

* Sensibilidad a las condiciones meteorológicas desfavorables;

b) Introducción de **incertidumbres en la estimación de resistencias**, dado que normalmente un incremento en las condiciones de humedad suele repercutir en el reblandecimiento de los suelos y la disminución de su resistencia;

c) Incremento de los **movimientos diferidos** o de consolidación debido a la dificultad

para eliminar el exceso de agua bajo situaciones de modificación de cargas por su baja permeabilidad;

d) Movimientos asociados a **cambios volumétricos** por diferencias de humedad, que pueden originarse por causas:

* Naturales, como cambios en el nivel freático o en las condiciones atmosféricas del entorno, o

* Artificiales, por el reajuste de las humedades empleadas en el proceso constructivo a las condiciones ambientales finales;

e) **Deformaciones plásticas** del asiento de las construcciones; y

f) **Erosión** y degradación de su superficie a la intemperie, manifestados por los cuarteos y agrietamientos característicos de ciclos de sequedad y humedad, que afecta negativamente a su durabilidad y a su estabilidad.

8.- Efectos de las construcciones sobre los suelos arcillosos

Pero de igual modo es posible identificar unos efectos indirectos o inducidos por las construcciones que hacen que las consecuencias anteriormente mencionadas se amplifiquen en su magnitud o se compliquen con efectos secundarios, inicialmente imprevistos. Ello se debe a que las construcciones producen sobre los suelos en que se asientan o que las circundan fenómenos que se pueden agrupar en:

a) **Variación de las condiciones de contorno**, que se plasman en:

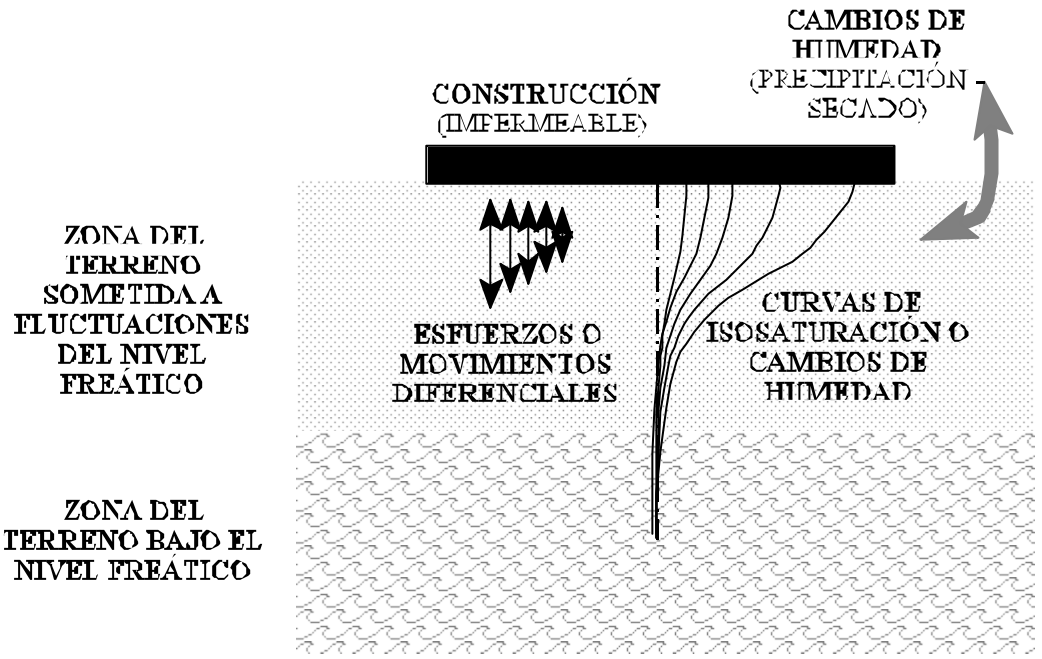
* Cambios en la **geometría**: Se alteran los espesores naturales de los estratos

o capas de manera diferencial, en especial por excavaciones como las producidas en sótanos y desmontes a media ladera.

* Cambios en las condiciones de **drenaje** originados por la **impermeabilización** de la superficie de contacto de los suelos parcial o totalmente con el ambiente exterior. Es lo que se conoce como el "efecto de borde" cuya ilustración más evidente se produce en la construcción de una zona pavimentada impermeable sobre un suelo arcilloso, que genera zonas de comportamiento diferenciado ante cambios de humedad:

- La central o cubierta, aislada de los cambios meteorológicos; y

- La de "borde", expuesta a ellos.



* Cambios en el drenaje por la **apertura de nuevas superficies de contacto con el exterior**. Este efecto, originado fundamentalmente en los cajeos y excavaciones genera el secado de capas profundas y su exposición a las condiciones meteorológicas;

* Cambios en las tensiones provocados por la **descompresión del terreno** fundamentalmente por excavación, lo que puede inducir levantamientos por el efecto de descarga; y finalmente

* **Variaciones en el equilibrio hídrico** (succión), como la que suele producirse cuando en una excavación se elimina la capa activa. Esto provocará una desecación en la franja superior de la rasante final para generar una nueva capa activa y que rompa la estabilización de condiciones que pudiera haberse alcanzado en una zona del sustrato.

b) **Incrementos de humedad por filtraciones:** Este efecto, que en ocasiones es no deseado y en otras es de alguna manera intencionado provoca la entrada de agua en los materiales en mayor medida que la que existía antes de la construcción a través de vías preferentes o localizadas. Suele originarse en casi todo tipo de obras y ejemplos comunes son:

* En firmes y pavimentos: Grietas, juntas calzada-arcén, medianas, cunetas, obras de drenaje deficientes, etc.

* En edificios y zonas urbanizadas: Las redes de saneamiento y alcantarillado, sótanos, jardines, etc.

* En muros: Las grietas en el relleno, drenajes en trasdoses, etc.

TRATAMIENTO DE LOS SUELOS ARCILLOSOS

Como se ha visto, la presencia de suelos arcillosos, frecuentemente inevitable, suele ocasionar una serie de problemas y riesgos sobre las construcciones que el técnico proyectista o director de unas obras debe evitar o, al menos, atenuar.

Las formas de actuar ante la presencia de materiales problemáticos en el subsuelo suelen agruparse en tres grandes grupos de medidas, una vez que se ha comprobado la imposibilidad de cambiar el emplazamiento de la obra o que su coste es superior al daño o efecto a evitar. Estas son las que siguen:

a) La eliminación o sustitución de los materiales, ya en su totalidad ya parcialmente, por materiales aptos o menos sensibles;

b) La modificación o tratamiento de los suelos mediante diversos mecanismos para hacerlos menos sensibles a los agentes que le hacen comportarse deficientemente; y

c) La modificación de la tipología estructural para evitar que los efectos del comportamiento de dichos materiales afecten a la misma.

Sin embargo estas soluciones, en la mayoría de las ocasiones, no consiguen eliminar el efecto nocivo en su totalidad. Bien, por ejemplo, porque no es posible sustituir todo el material, bien porque no es rentable o justificable la modificación del mismo o de la estructura hasta los extremos precisos, la realidad es que las soluciones citadas y que se describirán a continuación suelen constituir tan sólo paliativos parciales. Por ello es preciso pensar en estas medidas como actuaciones de tipo más preventivo que correctivo y que se aplican casi siempre

de forma combinada.

1.- Procesos de tratamiento de suelos arcillosos

Los dos primeros grandes grupos de soluciones citados anteriormente incluyen todas las posibles actuaciones que conllevan la manipulación de los suelos para su adaptación a las necesidades constructivas. En estos grupos se centra el presente documento y, por tanto, el contenido que se detalla a continuación.

Los principales mecanismos que se aplican para el tratamiento de los suelos arcillosos y la reducción de sus efectos perjudiciales sobre las construcciones se pueden agrupar en actuaciones mediante procesos físicos o procesos químicos.

Los más frecuentes en España son los siguientes:

a) Procesos físicos:

* Sustitución por materiales menos sensibles

* Mezcla con otros materiales

* Recompactación de los suelos

* Control de las condiciones de humedad

b) Procesos químicos:

* Mezcla con conglomerantes

* Mezcla con otros productos estabilizadores

Con la salvedad de la sustitución de suelos y el control del drenaje, el resto de las soluciones persiguen de una u otra manera modificar la masa del suelo arcilloso para convertirla en otra masa más rígida bien por la modificación de la disposición de las partículas bien por modificación de sus uniones.

Existen otros mecanismos como pueden ser las inyecciones volumétricas o el tratamiento eléctrico mediante ósmosis que por su limitada aplicación no son objeto de este apartado más allá de su simple mención.

A continuación se describen someramente los procesos mencionados como paso de entrada al tema que afecta en más profundidad este documento que es la estabilización de suelos mediante la mezcla con cal.

2.- Sustitución por otros suelos

En ocasiones existe la posibilidad de la eliminación de los suelos arcillosos más allá del nivel que la explanación exige.

En estos casos la solución más intuitiva y fácil para evitar los problemas de los suelos arcillosos es la sobreexcavación, remoción y sustitución de los mismos por materiales menos sensibles. Sin necesidad de recurrir a materiales selectos, esta sustitución será efectiva en cuanto se eliminen no todos los efectos de los suelos arcillosos, sino los que afectan a la estructura a construir.

Pero esta posibilidad no siempre se plantea en las obras. Con frecuencia existen limitaciones económicas, medioambientales o incluso técnicas que limitan este recurso. Es el caso de obras pequeñas, de obras en zonas protegidas en las que es difícil encontrar un

vertedero o un préstamo adecuado para la sustitución o, por ejemplo, de obras en las que los suelos arcillosos se encuentran bajo el nivel freático y esto complica su extracción.

Además, como ya se ha comentado, también es frecuente que la potencia o espesor de las capas de suelos arcillosos bajo o junto a las construcciones sea superior a la que es viable eliminar. En este caso, habría que estudiar el espesor mínimo efectivo que es preciso sustituir para hacer realmente efectiva la actuación.

Ejemplos de sustitución son las sobreexcavaciones bajo cimentaciones de edificios y terraplenes que se rellenan posteriormente de materiales granulares, escolleras, etc. para mejorar las condiciones de cimentación o trabajabilidad de las obras.

También se podría considerar una sustitución la coronación de un terraplén por un material mejor cuando el núcleo de dicho terraplén se ha construido con suelos arcillosos.

3.- Mezcla con otros suelos

Una segunda solución frecuente para la problemática de los suelos arcillosos es su mezcla mecánica con otro tipo de suelos para modificar sus características.

Estas mezclas suelen realizarse con suelos arenosos o, en general, granulares ya que son los que en mejor medida pueden corregir los efectos de las arcillas. El proceso se basa fundamentalmente en la alteración granulométrica del suelo mediante la adición de partículas gruesas y la consiguiente dilución del efecto de las partículas finas características de las arcillas.

Con estas mezclas, convenientemente estudiadas y diseñadas, se eliminan fundamentalmente los efectos de plasticidad y de higroscopicidad que afectan al comportamiento mecánico de los suelos arcillosos y, en especial, a su dependencia del nivel de

humedad. También se aumenta con este efecto la componente de fricción o rozamiento entre partículas que contribuye a la capacidad portante o resistente de los suelos. Esta componente es menos sensible a la presencia de agua que la cohesión entre partículas, por lo que otro de los efectos conseguidos es una mayor resistencia y más estabilidad de la misma.

Este mecanismo es bien conocido en el campo agrícola para la mejora de fincas y en la construcción de vías y pistas rurales en las que la única tecnología disponible es la maquinaria agrícola de gradeo y extensión de tierras y el único material asequible es el suelo, de mejor o peor calidad.

La mezcla como mecanismo a gran escala puede sin embargo emplearse incluso mediante su realización en centrales fuera de la obra para conseguir mejores condiciones de homogeneidad y mezclado.

4.- Recompactación de los suelos

En ocasiones los efectos perjudiciales de los suelos arcillosos se deben a una estructura o disposición en cierto modo disgregada o poco densa que no permite su empleo o uso como asiento de construcciones. Esto puede deberse a la propia descompresión del terreno por la excavación, a su meteorización por la exposición ambiental o, sencillamente, a que las condiciones de preconsolidación en las que se encuentra el material no son adecuadas.

En estos casos a veces basta como solución o actuación ante dicha disgregación la densificación mediante la recompactación del material para modificar su estructura y comportamiento. Esto hace que el material obtenido sea menos compresible, más resistente y por tanto menos deformable que el inicialmente presente.

Sin embargo, esta actuación es delicada porque los efectos que se pueden lograr pueden ser contrarios a los perseguidos si no se controla correctamente. Así, si un material arcilloso se compacta en exceso se puede llegar a obtener una reorientación de la estructura existente, dando lugar a otra laminar muy estratificada en caras paralelas a la de la compactación. Estas estructuras suelen ser mucho más sensibles a los efectos de atracción de agua y por tanto a los posibles hinchamientos y efectos perjudiciales posteriores.

Por ello, los niveles de recompactación de suelos arcillosos suelen requerir un estudio específico para determinar las condiciones de humedad y energía de compactación que minimizan su sensibilidad posterior.

Otra singularidad de las arcillas es que su baja permeabilidad condiciona los tiempos de efectividad de los procesos de compactación, al ser éstos función de la posibilidad de desalojar el agua de los huecos que se persigue reducir con la densificación y la velocidad a que ese desalojo se realiza. Por ello el estudio anterior debe contemplar lo que se conoce como el proceso de consolidación bajo el mecanismo de compactación que se aplique.

Los métodos empleados para la recompactación de suelos arcillosos son a veces singulares dadas las características especiales de los mismos. Así, incluso la propia compactación mecánica suele realizarse empleando rodillos especiales del tipo conocido como "pata de cabra" dotados de protuberancias que facilitan la salida del agua y concentran las tensiones transmitidas. Otros métodos singulares son el empleo de impactos rápidos de alta energía, mediante golpeo con maza o explosivos, o incluso la compactación que podría llamarse natural o precarga a medio plazo mediante la sobrecarga a niveles superiores a los estrictamente precisos para acelerar la consolidación.

Mención especial requiere el caso de la recompactación de los suelos arcillosos para su impermeabilización superficial. Esta solución, que encaja tanto en este epígrafe como en el siguiente persigue fundamentalmente aprovechar las condiciones de continuidad y limitación de poros y huecos que presentan las arcillas bajo ciertos niveles de densidad.

5.- Control de las condiciones de humedad

Una de las soluciones más frecuentes en la construcción para la limitación de los efectos nocivos de los suelos arcillosos consiste en actuar sobre el entorno para intentar controlar sus condiciones de humedad.

Esto se debe además a que como ya se ha citado casi nunca puede evitarse que queden materiales sin corregir y sobre ellos se adoptan estas medidas paliativas.

El principio de este mecanismo de actuación se basa en mantener constantes las características de las arcillas manteniendo fijo su nivel de saturación. En efecto, en ocasiones el problema no es la baja capacidad portante, las deformaciones excesivas o la inestabilidad por sí mismas, sino el riesgo de la variabilidad del comportamiento de las arcillas ante las modificaciones en su saturación.

Para ello lo que suele hacerse en las obras es controlar el flujo de agua desde el exterior de la misma hacia la parte que afecta a la construcción. Y este control se puede realizar, fundamentalmente, mediante captaciones o mediante barreras que impidan el acceso de los flujos.

Ejemplos de soluciones de este tipo son:

* Drenajes mediante zanjas perimetrales en construcciones junto a laderas o taludes;

* Drenajes transversales en terrenos sometidos al agua en su superficie (firmes);

* Impermeabilización de masas de suelo arcilloso mediante láminas y membranas;

* Impermeabilización mediante capas de materiales en su coronación;

* Impermeabilización de taludes; e

* Impermeabilización de recintos en profundidad mediante pantallas de inyecciones.

Un caso especial de la corrección de las condiciones de humedad es el drenaje de las masas arcillosas para permitir la salida del agua intersticial que se ubica entre las partículas ante eventuales incrementos de la presión. Esta solución, si bien se ejecuta mediante la modificación de las condiciones de drenaje, puede enmarcarse entre las que en el apartado anterior persiguen a recompactación o densificación de los suelos. Este mecanismo es el principio que gobierna los drenajes verticales mediante pilotes de grava o bandas drenantes empleados para el control de la consolidación en suelos arcillosos ante cargas verticales.

6.- Mezcla con conglomerantes

El mecanismo del tratamiento de los suelos arcillosos mediante la adición de productos conglomerantes es quizás una de las soluciones tecnológicamente más avanzadas, pero también una de las más caras.

Quizás por ello su empleo se ha restringido hasta la fecha a grandes obras públicas o actuaciones singulares en las que el papel de los suelos tratados excedía de ser un simple sustrato de apoyo de construcciones y pasaba a adquirir responsabilidad estructural. Este es el caso de las capas de firmes de suelos estabilizados.

Las soluciones más frecuentes en este tipo de actuación son las que se conocen genéricamente como estabilizaciones, desarrolladas además con conglomerantes hidráulicos: Cal y cemento.

El principio de estos tratamientos se basa en la alteración del comportamiento de las arcillas mediante fenómenos de intercambio iónico y de modificación física de la estructura de sus partículas por las peculiaridades que tanto la cal como el cemento desarrollan en su contacto con las mismas y con el medio en que se mezcla, el agua. Se consigue así unificar en un sólo mecanismo gran parte de los efectos que se han estudiado en los anteriores, añadiendo los procesos químicos beneficiosos. En resumen se obtiene:

* Una floculación de partículas que da al suelo una estructura granular;

* Mayor fricción interna y por tanto, mayor resistencia directa;

* Menor susceptibilidad al nivel de saturación;

* Concentración de poros, lo que provoca una mejor evacuación del agua intersticial;

* Mejor aptitud para la compactación o densificación convencional;

* Modificación del nivel de acidez del agua que altera las fuerzas entre las partículas;

* Intercambios iónicos que estabilizan el riesgo de futuros cambios.

Se añade a estos mecanismos el efecto conglomerante a medio o largo plazo que tanto la cal como el cemento tienen y que aporta una rigidez a la mezcla muy superior a la del suelo primitivo.

Dado que la mezcla con cal es el objeto de este documento no se tratará en mayor extensión en este apartado esta solución.

7.- Mezcla con otros productos estabilizadores

Finalmente hay que citar que existen ciertos tratamientos conocidos también como estabilizaciones mediante la adición de compuestos químicos que modifican fundamentalmente el comportamiento eléctrico de las arcillas y su susceptibilidad al intercambio iónico, reduciendo por tanto sus riesgos.

Un ejemplo es el uso de productos defloculantes que convierten al suelo en hidrófobos. También se pueden incluir aquí los ligantes hidrocarbonados en forma de emulsiones.

Su uso es muy limitado y, además, los efectos que se obtienen no parecen especialmente perdurables, por lo que su aplicación no se ha extendido con la rapidez que podría derivarse de unas ventajas inicialmente tan atractivas.

Fundamentalmente se han usado para el sellado y tratamiento de superficies de caminos o pistas rurales construidas con materiales cohesivos o arcillosos.

LA CAL PARA EL TRATAMIENTO DE SUELOS

1.- Antecedentes

La cal es uno de los conglomerantes hidráulicos con mayor historia en el mundo de la construcción. Durante siglos se ha empleado con profusión como tal en morteros de albañilería, así como para enfoscados y revocos. En los últimos decenios su uso se ha extendido a la mejora de suelos para su estabilización en vías y explanaciones.

La justificación de estas referencias tan ancestrales está probablemente en que su producción se basa en procesos naturales aplicados sobre materiales naturales presentes en el medio de manera frecuente.

2.- Definición y procedencias

En efecto, como término genérico la cal es un producto compuesto de óxidos e hidróxidos de calcio y magnesio que procede de la calcinación de minerales calizos y dolomíticos. También suele contener óxidos de silicio, aluminio e hierro en función del material básico de procedencia:

$$CaO - Ca(OH)_2 - MgO - Mg(OH)_2 - SiO_2 - AlO_2 - Fe_2O_3$$

En el proceso de calcinación, los minerales compuestos por carbonatos cálcicos y magnésicos, en proporciones variables según la calidad y tipología del mineral base dan lugar, ante la aplicación de calor, a la formación de óxidos de cal y/o magnesio, que es el producto buscado, con desprendimiento de dióxido de carbono.

Las reacciones químicas siguen el siguiente esquema:

$$CaCO_3 + Calor \rightarrow CaO + CO_2$$

$$CaCO_3 \cdot MgCO_3 + Calor \rightarrow CaO \cdot MgO + CO_2$$

Una característica especial de estos procesos es que la temperatura de la reacción debe ser suficientemente alta para lograr la disociación de los carbonatos. Son así precisas a presión atmosféricas temperaturas superiores a 1.300ºC que, además, deben prolongarse durante tiempo suficiente para asegurar la reacción. También es importante para la formación de la cal que durante la reacción el dióxido de carbono que se genera pueda ser evacuado.

El producto directamente obtenido de esta reacción es el que se conoce como "cal viva". Para la consecución de un buen producto es necesario que el mineral de origen sea de gran pureza en cuanto al contenido de carbonatos. Pero evidentemente en el proceso de calcinación influyen otra serie de factores físicos del mineral que deben asegurarse para obtener una calidad adecuada del producto. Estos factores son, fundamentalmente, la granulometría y superficie del mineral expuesto a calcinación, su porosidad y densidad.

Un segundo paso o estadio de avance en la producción de derivados de la cal es el proceso de hidratación que es posible aplicar sobre la cal viva. Si al óxido de calcio/magnesio obtenido se le añade agua en cantidad suficiente, se origina la formación de hidróxido de calcio/magnesio mediante un fenómeno que se resume químicamente en las siguientes reacciones:

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca\,(OH)_2 + Calor$$

$$CaO \cdot MgO + H_2O \rightarrow Ca\,(OH)_2 \cdot MgO \text{ ó } Ca\,(OH)_2 \cdot Mg\,(OH)_2 + Calor$$

El producto de esta reacción se conoce como “cal apagada”, y el proceso es el popular y conocido mecanismo del “apagado de la cal”. Como se ha recogido en las expresiones anteriores, las reacciones de apagado son altamente exotérmicas, con un desprendimiento de calor de unas 277 kcal/kg de óxido en el caso de los carbonatos cálcicos.

En todas las reacciones anteriores se han barajado minerales que no son sólo caliza puras, sino que se ha contemplando la posibilidad de la presencia de carbonatos magnésicos, o dolomías. Pues bien, el mayor o menor contenido en carbonatos u óxidos magnésicos condicionará la pureza o tipo de cal y, por añadidura, su actividad o capacidad para empleo en diversas aplicaciones.

El constituyente activo de la cal es el óxido de calcio libre (CaO) y su contenido será, por tanto, el que condicione la calidad y en consecuencia, la actividad de la misma.

3.- Funciones de la cal

La principal utilidad de las cales se centra en que mezcladas con agua forman una pasta que mejora las características de manejo de los materiales a los que se aplica y, a mayor plazo, aumenta su consistencia y resistencia.

El primer fenómeno contribuye a la trabajabilidad de los materiales, morteros y suelos fundamentalmente, mediante la modificación de sus propiedades de plasticidad, capacidad de retención de agua y penetración.

En cuanto al segundo fenómeno, se basa en procesos químicos más o menos complejos y diferenciados según el material a que se aplique y el tipo de cal que se emplee.

El mecanismo básico consiste en la carbonatación de los hidratos de carbono en contacto con el dióxido de carbono atmosférico, que le lleva a aumentar la resistencia y durabilidad de los materiales.

4.- Tipos de cal

Una primera clasificación de los tipos de cal ya se ha citado anteriormente y se basa en la composición del mineral básico que es sometido a calcinación. Así, según la proporción de carbonatos magnésicos en relación con el total de carbonatos, se puede clasificar en:

* **Cales de alto contenido en calcio**: Procedentes de material base de $CaCO_3$, con no más del 5 % de $MgCO_3$. Se componen pues, fundamentalmente de óxidos de calcio; y

* **Cales dolomíticas**: Procedentes de material base con contenidos de más del 5 % de $MgCO_3$. Se componen de óxidos de calcio y magnesio.

Inicialmente tantos los óxidos de magnesio como los de calcio tienen acciones análogas. No obstante, la diferencia entre ambos tipos puede establecerse en que las cales dolomíticas son menos solubles en el agua y que el fenómeno de la hidratación es más lento en ellas que en las cálcicas. Esto hace que en el empleo de las cales dolomíticas, al aplicarlas en vía acuosa se desprenda menor cantidad de oxido de calcio libre que con las calizas y que la reacción conglomerante perseguida en su aplicación sea más lenta, lo que puede incluso hacerla ineficaz en ciertos usos.

Otra posible clasificación es la que se deduce de los procesos de obtención y materiales de origen. En este sentido se pueden dividir en:

*__Cales hidráulicas__: Obtenidas a partir de calizas que contienen arcillas (sílice y alúmina) por su calcinación y posterior hidratación. Además de hidróxido cálcico incorporan silicatos y aluminatos cálcicos. Tienen propiedades hidráulicas, es decir, endurecen con el agua. El dióxido de carbono atmosférico contribuye a este proceso de endurecimiento adicionalmente.

* **Cales aéreas:** Compuestas de óxido e hidróxido de calcio y magnesio, que endurecen en contacto con el CO_2 del aire. No tienen propiedades hidráulicas, es decir, no endurecen con ella. Se obtienen de rocas calizas con más del 95% de carbonatos

5.- Presentación de la cal

Como se ha descrito en el primer punto, la cal como principio activo es posible obtenerla o presentarla como:

* **Cal viva**, u óxido de calcio/magnesio procedente directamente del proceso de calcinación. Se presenta en forma de grano o molidas en polvo, incluso micronizadas, ya que esta forma supone que no se ha hidratado el producto de la calcinación

* **Cal apagada**, procedente de la hidratación de la cal viva, compuesta por hidróxidos de calcio/magnesio. Como tal es posible presentarla en forma de pasta, lechada o suspensión de cal en agua, o incluso en forma de polvo seco.

La principal diferencia entre ambas formas de presentación es el riesgo en la aplicación. El manejo de cal viva debe asumir que su contacto con el agua, aunque sea estrictamente con la humedad propia del medio en que se va a aplicar o incluso con la atmosférica, va a generar la reacción de hidratación de los óxidos, que se ha descrito como fuertemente exotérmica.

Esto lleva asociado el consiguiente riesgo que este fenómeno tiene en la seguridad del personal que realiza la aplicación, fenómeno sobradamente conocido en el popular proceso del "apagado de la cal".

Otra diferencia estriba en que en la presentación de la cal viva, por su propia composición química (CaO), existe más proporción del principio activo por unidad de peso que en la cal apagada ($Ca(OH)_2$), que contiene en su estructura una molécula extra de agua que no aporta ventajas a la actividad de la cal. La diferencia es posible cuantificarla si se tiene en cuenta que en la cal viva, con peso molecular de 56, todo es óxido de calcio, frente a la cal apagada, que tiene un peso molecular de 74. Esto se plasma en que es preciso aplicar más de un treinta y dos por ciento (32%) adicional de cal apagada sobre una cantidad inicial de cal viva para asegurar disponer de la misma proporción de óxido de calcio o principio activo. Esta proporción evidentemente se refiere a formulaciones puras, y es susceptible de variación en función de la pureza de las cales de referencia.

Por otra parte, la idea de que la cal apagada es menos pura que la viva no es del todo cierta. Si bien no se abordan en este texto los procesos de fabricación, hay que citar que el apagado de la cal se produce industrialmente en procesos en continuo que finalizan con una clasificación de las partículas secas mediante aire. Esto produce una autopulverización muy fina de materiales que sirve además para eliminar impurezas. Además hay que tener cuenta que se puede clasificar adicionalmente el material en función de su granulometría para distintos usos.

Cuando la cal se presenta en forma de lechada hay que suponer que se ha producido el apagado de la misma, bien de manera previa, bien en la elaboración de la lechada. En este caso, parte del agua aplicada se destinará a la hidratación y la restante constituirá el medio

acuoso. Las lechadas habitualmente manejadas tienen una proporción de 150 a 400 g de hidróxido de calcio por litro de agua. Pueden elaborarse en la propia central de fabricación de la cal o en instalaciones provisionales mediante mezcla y agitación de la misma en depósitos al efecto.

De manera esquemática se recogen las ventajas e inconvenientes de cada una de las formas de presentación en la siguiente tabla:

Forma	Ventajas	Inconvenientes
Cal viva (polvo)	* La proporción de óxido de calcio es más alta para igual peso * Se puede usar para el secado del soporte o medio * Permite trabajar en más épocas del año (la cal "calienta" el suelo) * Ahorra costes de transporte * Al tener mayor densidad aparente su almacenamiento es más económico * Su aplicación es más rápida que en lechada	* Es un material inestable para su almacenamiento * Su aplicación es peligrosa * Genera la emisión de polvo en la extensión * Requiere normalmente la aplicación de agua posterior para su empleo y para su apagado
Cal apagada en polvo	* No presenta riesgos de aplicación * Su aplicación es más rápida que en lechada	* Requiere más cantidad para proporcionar la misma actividad que la cal viva * Genera la emisión de polvo en la extensión
Cal apagada en lechada	* Sirve para humectar el soporte o medio que lo recibe a la vez que se aplica * Es más fácil asegurar una distribución homogénea	* Su transporte se encarece porque se mueve agua * Requiere incorporar medios especiales de almacenamiento y extensión

La cal en cualquiera de sus formas es un producto de color blanco, en mayor o menor

intensidad según su pureza. Este color es más blanco en las cales que en los minerales de origen y, a su vez, lo es más en las apagadas que en las cales vivas de las que proceden.

6.- Propiedades de la cal

La cal tiene una serie de características relevantes desde el punto de vista de su uso y comportamiento como conglomerante adicionado a otros materiales:

a) **Densidad aparente:** Alcanza valores, según la forma de presentación, que oscilan entre:

- Cal viva: 700 - 1.200 kg/dm^3
- Cal apagada: 300 - 1.000 kg/dm^3

frente al peso específico del óxido de calcio puro que toma valores superiores a 3 kg/dm^3, asumiendo una porosidad nula.

b) **Finura** de grano cuando se emplea en forma de polvo. Como se ha citado, la eficiencia de las reacciones depende de la concentración de las soluciones y a menor tamaño de partícula, más superficie específica y más concentración. Además, la finura influye en sus condiciones de transporte y aplicación. Normalmente las cales comerciales tienen un contenido entre el 75 y el 95 por ciento de material con un tamaño inferior a 200 µm.

c) **Solubilidad en agua**: Aunque es pequeña, una característica importante es que disminuye al aumentar la temperatura. Dado que la disolución en agua supone la hidratación de la cal, los valores más representativos serán los aportados para la cal

apagada. Valores característicos de solubilidad del $Ca(OH)_2$ en agua destilada a 20ºC expresados en peso con relación a la solución total rondan los 1,6 g/l, mientras que a 0ºC aumenta a 1,8 g/l y a 100ºC se reduce hasta 0,7 g/l. Estos valores son muy superiores a la solubilidad de los carbonatos. Esta solubilidad puede verse afectada por la presencia de sales en el medio que, en la mayoría de las ocasiones, aumentan los valores medios mencionados.

d) Aportan al medio en que se aplican un **carácter básico**, elevando su pH. Este incremento es además muy rápido incluso para bajos contenidos de cal. Así, las soluciones de cal en agua a 25ºC tienen valores de pH que oscilan entre 11 para muy bajas concentraciones y hasta 12,45 en sus valores máximos. Esta circunstancia de elevación del pH es importante porque en la mayoría de las ocasiones proporciona un medio idónea para la reacción de la cal con otros minerales del medio, lo que repercute en sus efectos conglomerantes.

e) La cal es un producto **reactivo con el CO_2**: Se carbonata ante la presencia de dióxido de carbono, como ocurre en la atmósfera, ya se encuentre en forma de cal viva o de hidróxido cálcico. Ello se debe a que la reacción de su constitución es reversible. Por tanto, la exposición prolongada de cal a la atmósfera puede restar efecto a su acción si no se produce ésta antes de la carbonatación. Hay que tener en cuenta que la carbonatación es un fenómeno superficial y, por tanto, su efecto se incrementará al aumentar la finura de la cal.

d) Finalmente, otra propiedad a destacar de la cal es su posibilidad de reacción con numerosos productos y, en especial desde el punto de vista de este documento, la **reacción con la sílice (SiO_2) y la alúmina (Al_2O_3)**: En determinadas condiciones

se producen reacciones complejas que derivan en la formación de aluminatos y silicatos de comportamiento indeseado.

Estas propiedades descritas de manera aislada combinan frecuentemente sus efectos para potenciar o minimizarlos. Así, por ejemplo, el aumento de la temperatura, que reduce la solubilidad, influye en que sea precisa más cal para obtener un cierto nivel de basicidad o pH en el medio. De igual manera una reducción de la finura influye en la solubilidad negativamente. También hay que citar que las cales dolomíticas, menos solubles, proporcionan pH inferiores a concentraciones similares.

7.- Normativa sobre la cal

La definición, clasificación y especificaciones de la cal para su uso en construcción están reguladas en España por la norma experimental UNE-ENV 459 "Cales para construcción", versión oficial en español de la norma europea correspondiente. Tiene a su vez dos partes:

* Parte 1: "Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad" (1.996)

* Parte 2: "Métodos de ensayo" (1.995)

Esta norma anula y sustituye desde su publicación, a la hasta entonces de aplicación Norma UNE 80-501 Experimental (1.993).

8.- Clasificación de la cal

Las cales para construcción según esta normativa se clasifican por tipos fundamentales según su composición y procedencia. Éstos se identifican por unas claves según sigue:

* CL = Cal de alto contenido en calcio

* DL = Cal dolomítica, o dolomía calcinada hidratada

* HL = Cal hidráulica

A su vez se dividen en clases bien por su contenido en óxidos de calcio y magnesio, bien por su resistencia a compresión en el caso de las cales hidráulicas:

Cal de alto contenido en calcio	**Dolomía calcinada**	**Cal hidráulica**
CL 90	DL 85	HL 2
CL 80	DL 80	HL 3,5
CL 70		HL 5

Los requisitos para cada grupo en esta clasificación se recogen en la siguiente tabla:

Tipos de cal	**CaO+MgO**	**MgO**	**CO_2**	**SO_3**	**Cal útil**	**Resistencia a compresión (N/mm^2)**	
						7 días	**28 días**
CL 90	≥ 90 %	≤ 5 % (1) - (3)	≤ 4 %	≤ 2 %	--	--	--
CL 80	≥ 80 %	≤ 5 % (1)	≤ 7 %	≤ 2 %	--	--	--
CL 70	≥ 70 %	≤ 5 %	≤ 12 %	≤ 2 %	--	--	--
DL 85	≥ 85 %	≥ 30 %	≤ 7 %	≤ 2 %	--	--	--
DL 80	≥ 80 %	≥ 5 % (1)	≤ 7 %	≤ 2 %	--	--	--
HL 2	--	--	--	≤ 3 % (2)	≥ 8 %	--	2 a 5
HL 3,5	--	--	--	≤ 3 % (2)	≥ 6 %	≥ 1,5	3,5 a 10
HL 5	--	--	--	≤ 3 % (2)	≥ 3 %	≥ 2	5 a 15 (4)

NOTAS:

Valores expresados en % en masa.

Los valores son aplicables a todas las clases de cal. Para las cales vivas estos valores corresponden a las condiciones de "como suministrado"; para el resto de las clases de cal (hidrato de cal, pastas de cal, cales hidráulicas) los valores se refieren al producto anhidro y seco.

(1) Para estabilizaciones de suelos ≤ 10 %

(2) Son admisibles contenidos de SO_3 superiores al 3 % e inferiores al 7 % si se demuestra estabilidad de volumen a los 28 días de curado en agua

(3) Un contenido de MgO superior al 7 % es admisible si la estabilidad de volumen por el método dado en la Norma EN-459-2 es "pasa"

(4) Si HL 5 tiene una densidad aparente inferior a 0,90 kg/dm^3 se permite que tenga una resistencia no superior que 20 N/mm^2

Los valores anteriores se determinan según los métodos y procedimientos establecidos en la norma UNE-ENV 459 "Cales para construcción. Parte 2: Métodos de ensayo".

Finalmente, hay que indicar que la norma permite la presencia de aditivos en las cales, estableciendo no obstante el límite del 0,1 % sobre el peso total a partir del cual es necesario que sea declarado.

9.- Ensayos para caracterización de las cales

Las principales características de las cales para construcción y los métodos de ensayos para su determinación vienen fijados en la norma UNE-ENV 459 "Cales para construcción. Parte 2: Métodos de ensayo". A modo de enumeración, éstas son las principales determinaciones:

* **Muestreo** . . . . . UNE-EN 196-7

* **Análisis químico**:

Contenido de óxidos de calcio y magnesio (CaO-MgO) . . . . . UNE-EN 196-2

Contenido de óxido de magnesio (MgO) . . . . . UNE-EN 196-2

Contenido de dióxido de carbono CO_2) . . . . . UNE-EN 196-21

Método volumétrico alternativo . . . . . UNE-ENV 459-2

Pérdida por calcinación . . . . . UNE-EN 196-2

Contenido en SO_3 . . . . . UNE-EN 196-2

Contenido en cal útil . . . . . UNE-ENV 459-2

* **Ensayos físicos**:

Resistencia a compresión . . . . . UNE-EN 196-1 (Con modificaciones)

Finura . . . . . UNE-EN 196-6

Estabilidad de volumen . . . . . UNE-EN 1963-3

Método alternativo según el tipo de cales . . . . . UNE-ENV 459-2

Tiempo de fraguado . . . . . UNE-EN 196-3

Retención de agua . . . . . UNE-ENV 459-2

Determinación del contenido de aire . . . . . UNE-ENV 459-2

Densidad aparente . . . . . UNE-ENV 459-2

Rendimiento . . . . . UNE-ENV 459-2

Reactividad . . . . . UNE-ENV 459-2

Agua libre . . . . . UNE-ENV 459-2

Las normas de la serie UNE-EN 196, que son las que regulan las propiedades y métodos de ensayos para cementos son en gran parte de aplicación al caso de las cales para construcción y, de hecho, se han utilizado como base para la elaboración de la más específica

UNE-ENV 459.

LA MODIFICACIÓN DE 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 las propiedades que se han descrito para ambos materiales.

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.

Si bien es cierto que no existe unanimidad entre los técnicos sobre la totalidad de los mecanismos que intervienen en la reacción entre la cal y las partículas arcillosas de un suelo, sí es posible describir, y así se hace a continuación, los esquemas más generalmente aceptados y que justifican el comportamiento final obtenido.

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 ya citada entre ambos grupos de mecanismos es 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 en función de la mineralogía y tipos de suelos, siendo posible incluso que no se produzcan en algunos.

Finalmente, la tercera gran diferencia es la proporción 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.- 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.

Esta sustitución es un fenómeno que está gobernado fundamentalmente por criterios de valencia de los cationes y de tamaño de los mismos. De manera genérica se puede decir que cuando ante una partícula de arcilla con un tipo de cationes adsorbidos en su superficie se presentan otros de mayor valencia o tamaño existe una propensión a dicha sustitución. Esto se debe a que esta sustitución compensa de manera más efectiva los desequilibrios eléctricos de las partículas arcillosas y reduce la concentración diferencial de iones en la capa doble. Como consecuencia clara de ello, además, se reduce el espesor de la capa doble.

Así es posible relacionar una serie de cationes que son desplazados unos por otros en orden según sigue:

$$Li^{+} \rightarrow Na^{+} \rightarrow H^{+} \rightarrow K^{+} \rightarrow NH_4^{+} \rightarrow Mg^{++} \rightarrow Ca^{++} \rightarrow Al^{+++}$$

donde " ➜ " equivale a "es sustituido por".

Es evidente que a mayor concentración de cationes en el medio de los más altos de la serie, se producirá una mayor sustitución de los inferiores de la serie.

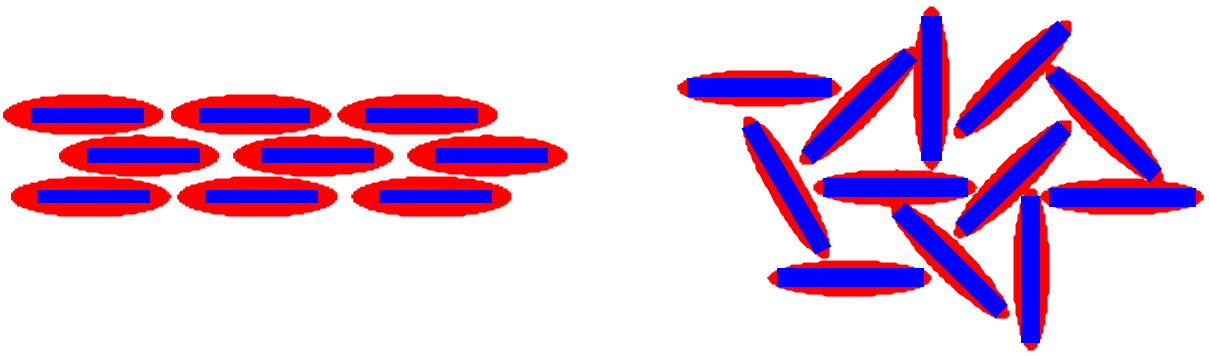
Hay que citar también que la disminución del espesor de la capa doble que se produce por la sustitución de un catión de la serie por otro situado más a su derecha lleva a una capa doble más estable. Esto se entiende si se piensa que quedan menos cationes que puedan modificar esta nueva configuración.

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.

Concretamente, la cercanía de las partículas aproxima caras diferentes de las superficies planas que las conforman. Así los bordes de las mismas, extremos cargados eléctricamente por un desequilibrio fruto de la rotura de las cadenas o anillos, se ponen en contacto con las caras en las que la carga la producen los cationes adsorbidos.

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. Esta mayor sustitución en medio básico se justifica en la propiedad ya citada en el estudio de las arcillas de aumentar su capacidad de intercambio iónico en medios con altos valores de pH.

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.

Si la agrupación típica se componía de partículas planas iguales, evidentemente su distribución más estable es la de una ordenación de tipo paralelo en la que el único espacio

entre las partículas se reduce casi estrictamente a la anchura de la capa doble. Si esta estructura se transforma en una distribución más anárquica con contactos oblicuos entre bordes y caras, se origina un desorden entre las partículas que, además, conlleva una mayor proporción de huecos.

A su vez, el comportamiento flexible y direccional que es fácil pensar en una estructura laminar en la que el contacto está lubricado por el agua en la capa doble, se transforma ahora en un comportamiento más isotrópico y basado en un rozamiento entre partículas. Esto hace que se sustituya el comportamiento de un suelo tipo plástico por otro más friable, cercano al comportamiento de los suelos granulares.

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;

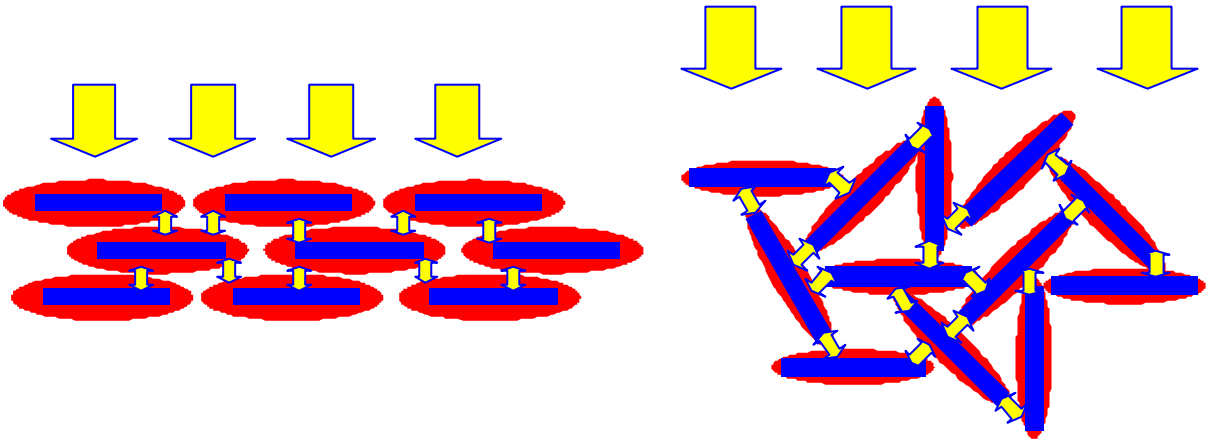
* Una reducción de la importancia de la capa doble y del contenido de agua adsorbida en torno a las partículas que reduce su susceptibilidad a los cambios de humedad;

* 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. El hecho del paso del comportamiento cohesivo al basado en la fricción de las partículas lleva aparejado esta mejora que no hay que mencionarla como un mecanismo de modificación sino como un efecto de los descritos y como tal se desarrollará posteriormente. No obstante, el concepto es intuitivamente fácil de explicar: Mientras que en una estructura ordenada de placas o partículas laminares la mayor resistencia es la ortogonal a la dirección de dichas placas y se basa en el solape o enfrentamiento físico entre dichas placas, en una distribución anárquica e isotrópica, la transmisión y reparto de tensiones en la masa de las partículas es mayor. Por tanto, el mero hecho de que más partículas colaboren en la reacción ya aumenta la resistencia. Si a esto se une que el efecto de lubricación del agua en la capa doble también se ha reducido, es más clara aún la mejora obtenida.



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. Esto es evidente, pero también es complicado. Los suelos arcillosos, por su propia constitución son suelos poco permeables en los que es difícil asegurar la entrada de un medio líquido. Pero sin esta mezcla íntima, que debe asegurarse en la aplicación de la cal, los procesos no serán completos y, probablemente, sean ineficaces en la masa total del suelo a modificar.

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. Y uno de los principales es la afinidad por el intercambio iónico que es la base de los procesos mencionados. Por tanto, no es de esperar que los efectos sean iguales en todas ellas, sino más bien que serán proporcionales a esta capacidad y que sus consecuencias también lo sean a las características iniciales de plasticidad, susceptibilidad, etc..

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.

El proceso se rige por las siguientes reacciones:

$$Ca^{++} + OH^{-} + \text{Sílice de la arcilla} \rightarrow \text{Silicato cálcico hidratado}$$

$$Ca^{++} + OH^{-} + \text{Alúmina de la arcilla} \rightarrow \text{Aluminato cálcico hidratado}$$

Para que la reacción se produzca y mantenga es imprescindible que se den dos factores:

a) Que haya cal libre disponible; y

b) Que se liberen la sílice y la alúmina de al arcilla, para lo que es preciso que se mantenga un pH alto en el medio.

Ambos factores son posibles en una mezcla suelo y cal, pero como ya se ha dicho, es necesario que el contenido de ésta sea suficiente. Y esto significa que una vez producidos los fenómenos de sustitución catiónica descritos anteriormente debe permanecer en el medio principio activo suficiente para esta reacción. Luego la aparición de esta reacción es función de la proporción de cal empleada en la mezcla en relación con el suelo, pudiendo incluso no llegar a producirse si no se alcanza el umbral mínimo necesario. Así por ejemplo, si no se alcanza la basicidad precisa en el medio por insuficiencia de cal, puede que no se disuelvan los elementos puzolánicos que van a dar lugar a la reacción. Y, de igual manera, mientras haya suficiente cal libre para mantener el pH y reaccionar con la sílice y alúmina, se podrá producir la reacción.

pH	**Solubilidad (milimoles / litro)**	
	Sílice (SiO_2)	**Alúmina (Al_2O_3)**
4	≈ 2	≈ 0
8	≈ 2	≈ 0

> 10	6 - 10	> 10

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.

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.

El proceso de la carbonatación de la cal disponible es un proceso lento y que no suele completarse ni incluso a altas temperaturas. No obstante, el agua actúa como un catalizador que propicia esta conversión junto con la mayor superficie específica de la cal disponible.

La carbonatación puede inducir a error si se considera como un fenómeno de mejora dado que en ella no interviene el suelo sino que, al contrario, resta potencialidad al proceso al eliminar parte de la cal disponible.

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

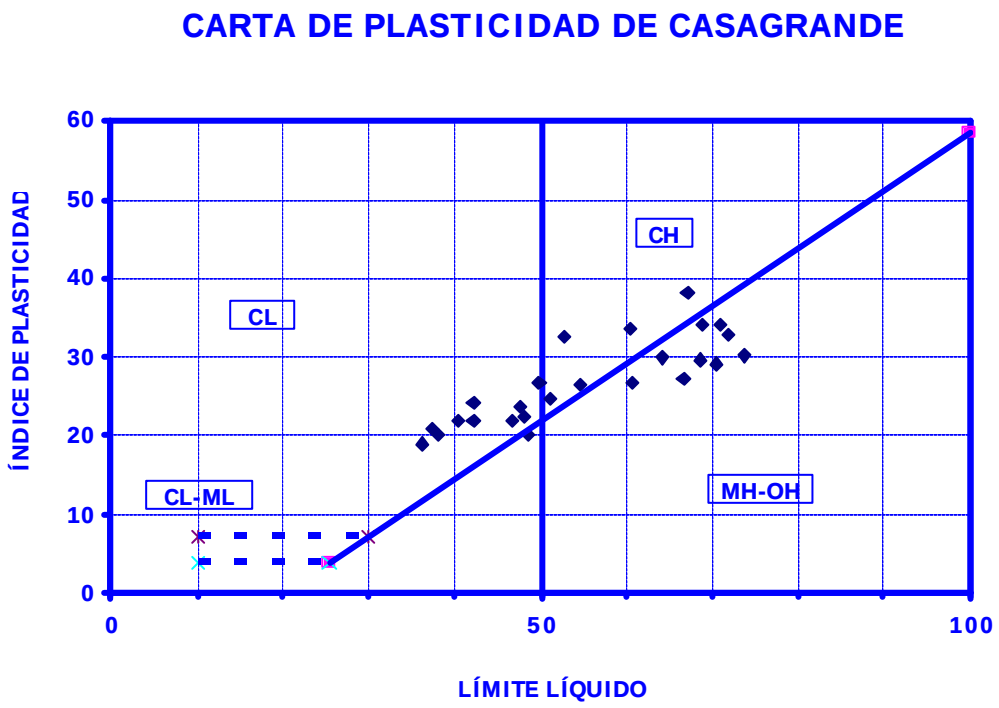
* Aumento inmediato de la consistencia

* Mayor resistencia a medio y largo plazo

A continuación se describen, cuantifican e ilustran estos efectos.

Si bien es cierto que alguno de estos efectos no es perceptibles mediante los ensayos usualmente empleados en el control de construcción, en los que sí lo son se incluyen también una serie de resultados. Éstos provienen en especial de análisis realizados a materiales de obras diversas en la Comunidad Autónoma de Andalucía. Sin que dichos resultados pretendan establecer reglas o proporciones estrictas, ilustran de manera clara las tendencias y efectos que se producen en los suelos por la aplicación de la cal, así como la progresión de estos efectos según el tipo de suelos y la cantidad de cal aplicada.

La familia de datos que se proporcionan en los siguientes apartados corresponde a muestras de suelos que, según la clasificación de Casagrande cubren un amplio espectro en el entorno de los suelos arcillosos y se ilustran en el ábaco a continuación:



Geológicamente los materiales son descritos como arcillas con tubotomaculum

pertenecientes al complejo tecto-sedimentario mioceno o surco turbídítico de la unidad del Campo de Gibraltar.

Los resultados más detallados de las características de identificación de cada una de estas muestras se recogen en la tabla siguiente:

MUESTRA	CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL BASE									
	% PASA TAMIZ UNE			CLASIF.	LÍMITES DE ATTERBERG			PRÓCTOR NORMAL		C.B.R. (100% PN)
	20,0	2,0	0.08		Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad	Densidad Máxima	Humedad Óptima	
M.1	100,0	100,0	96,8	MH	60,7	33,8	26,8	1,59	19,9	0,8
M.2	100,0	100,0	99,3	MH	68,9	35,1	33,9	1,44	29,5	1,0
M.3	100,0	100,0	86,5	CL	37,4	16,7	20,7	1,71	16,8	3,8
M.4	100,0	100,0	83,,0	CH	52,8	20,4	32,4	1,65	18,1	2,6
M.5					36,3	17,4	18,9			
M.6					38,1	18,0	20,1			
M.7	100,0	100,0	97,4	MH	64,2	34,3	29,9	1,62	21,2	2,9
M.8	96,0	92,0	65,0	CL	42,2	20,5	21,7			
M.9	100,0	99,0	87,7	ML	48,7	28,7	20,0			
M.10	100,0	99,0	80,0	CH	60,5	26,9	33,6	1,59	23,1	2,0
M.11	100,0	100,0	75,3	CH	49,8	23,1	26,7	1,69	17,3	3,0
M.12	100,0	100,0	76,0	CH	51,0	26,3	24,7			
M.13	96,0	95,0	91,0	MH	71,1	37,1	34,0	1,44	29,7	2,0
M.14	100,0	100,0	70,0	CL	46,8	25,0	21,8	1,72	16,7	4,2
M.15	100,0	95,0	48,0	CL	42,2	18,0	24,2			
M.16	97,0	93,0	64,0	CL	47,7	24,0	23,7			
M.17	100,0	94,0	91,0	MH	66,7	39,4	27,3	1,43	26,8	1,6
M.18	100,0	99,0	66,0	CL	40,6	18,9	21,7			
M.19	100,0	96,0	82,4	CH	54,6	28,0	26,6			
M.20	100,0	99,0	87,4	CH	67,1	28,9	38,2			
M.21	100,0	95,0	94,0	CL	48,1	25,8	22,3			
M.22	100,0	71,0	69,4	MH	72,0	39,4	32,6	1,52	20,6	0,6
M.23	100,0	100,0	99,0	MH	73,9	43,8	30,1			
M.24	100,0	99,0	97,0	MH	70,4	40,5	29,2	1,45	24,3	1,6
M.25	100,0	100,0	99,5	MH	68,7	39,2	29,5			

Hay que indicar que en las tablas y gráficos que se recogen en los apartados siguientes para ilustrar el efecto de la cal sobre los suelos, el contenido en cal expresado corresponde a la relación ponderal aplicada en forma de cal apagada o hidróxido de calcio sobre peso de suelo.

1.- Reducción de la humedad natural del suelo

Un primer efecto de la aplicación de la cal en ciertas formas a un suelo es su secado o la reducción de la humedad.

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.

El principal inconveniente de este mecanismo o proceso es que la reacción de hidratación que se produce es altamente exotérmica, y en ella se desprende una importante cantidad de calor que puede afectar al personal que trabaja en la obra si no se disponen las convenientes medidas de seguridad. Además, este riesgo existe durante todo el proceso de manipulación previa y aplicación de la cal, ya que su empleo en forma de polvo implica que incluso la humedad del ambiente pueda llegar a producir la hidratación antes de llegar a tomar contacto la cal con el suelo.

No obstante, el hecho de que exista un riesgo no supone que no pueda ser aplicado, y actualmente lo es de forma controlada en numerosas obras.

De manera orientativa es posible evaluar la reducción de humedad de un suelo en un 2 o un 3 % por la adición de un 1 % de cal.

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.

No obstante este efecto, con ser importante, no suele ser apreciado como consecuencia directa en las propiedades físicas de las arcillas. Esto se debe a que esta modificación granulométrica se produce en las fracciones características de las arcillas, de tamaño inferior a 2 micras, mientras que los tamaños mínimos que usualmente se controlan en las obras suelen ser de 0,080 milímetros (80 micras), equivalente a la abertura del último tamiz usado para realizar ensayos de granulometría. Tan sólo si se realizan ensayos de granulometría por sedimentación pueden detectarse estos cambios, y la verdad es que esto es realmente inusual.

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 hecho de la modificación de la distribución de tamaños de las partículas y de la reducción de las fuerzas de atracción eléctricas y osmóticas entre ellas hace que se generen una serie de huecos mayores entre ellas y que se reduzca su higroscopicidad. Ello hace que la aplicación de la cal origine una aumento inmediato de la permeabilidad de un suelo.

Mientras que el fenómeno de la reducción de las fuerzas de atracción se basa en procesos de intercambio iónico y de reducción de la capa doble, el aumento de huecos es un simple proceso físico justificado geométricamente en que en una masa o conjunto de partículas de mayor tamaño la proporción de espacio entre los contactos de dichas partículas es evidentemente mayor.

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. En ocasiones incluso puede llegar a reducirse la permeabilidad inicial del suelo. Si se considera que las ventajas del aumento de la permeabilidad suelen perseguir mejoras a largo plazo, esta circunstancia limita el efecto inicial conseguido y su aplicabilidad.

Algunos autores han apuntado también que la posible producción de la reacción puzolánica y la generación de productos cementantes entre las partículas de las arcillas suelen evitar esta pérdida a medio plazo de la permeabilidad al fijar los cationes responsables de la misma y frenar su posible sustitución. Otros sin embargo atribuyen a estas reacciones la pérdida posterior del incremento de permeabilidad adquirido.

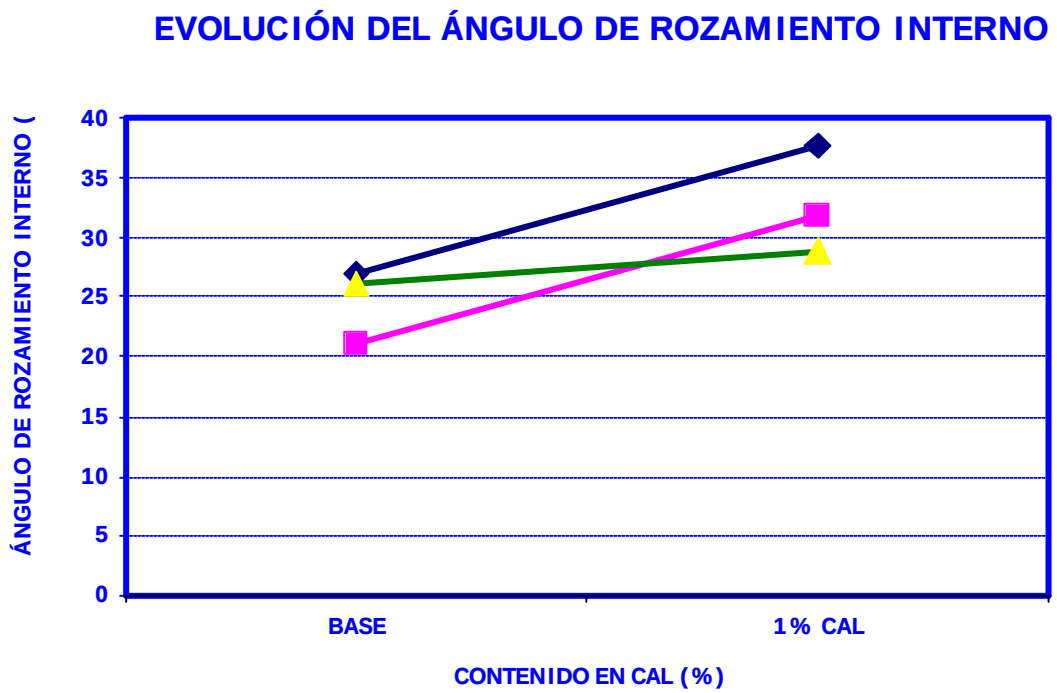
Por todo ello y dado que no existe unanimidad en estos hechos o justificaciones, la

realidad es que el efecto de la mejora de la permeabilidad es aún puesto en cuestión y no suele ser un objetivo usual en las propuestas de modificación de suelos con cal.

4.- Mayor trabajabilidad

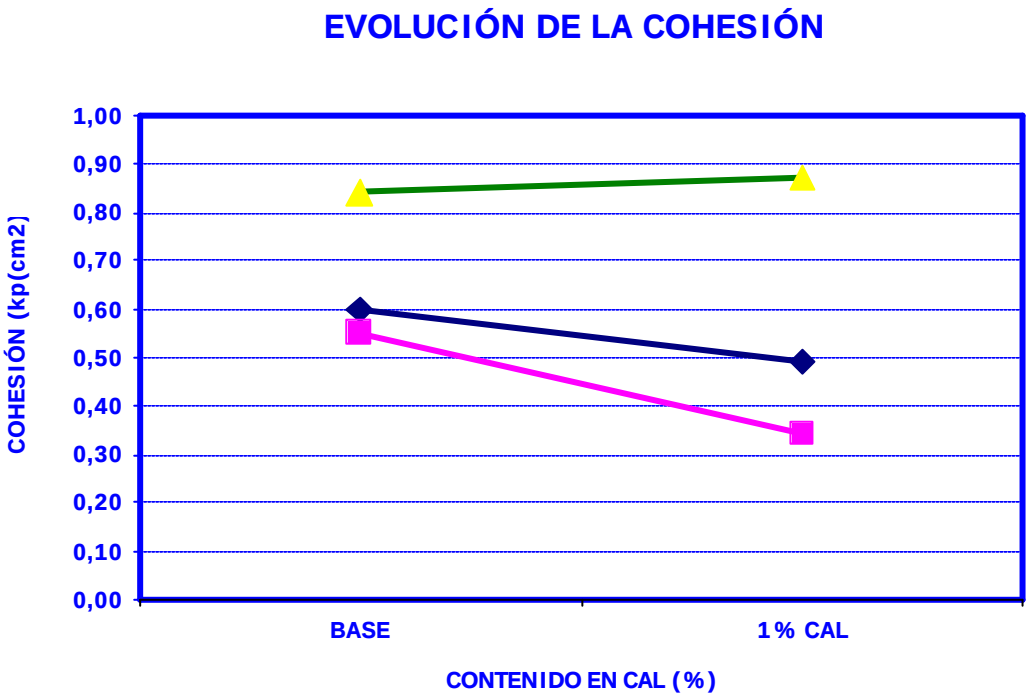
La consecuencia del posible secado de la masa del suelo, de la reducción del volumen de partículas pequeñas, de la pérdida de las fuerzas de unión entre partículas de arcilla y de la alteración de la disposición ordenada y laminar de la misma suele ser un aumento de la trabajabilidad de los suelos arcillosos por la aplicación de la cal.

Los efectos de estas modificaciones se traducen como se ha dicho en una pérdida de cohesión y un incremento de rozamiento interno que se pueden ilustrar en la evolución de las muestras bajo los ensayos de corte directo:



La consecuencia se logra es la conversión de un suelo típicamente cohesivo en otro de comportamiento característica tipo granular, más arenoso. Esto se manifiesta en una mejor disgregación del suelo, una más fácil humectación, mejor distribución del agua en el mismo, una mejor extensión y mayor propensión a la compactación ordenada y uniforme del material que permite que se emplee en una obra con mayor seguridad y garantía.

Esta ventaja o mejora en la puesta en obra de un suelo al tratarlo con cal, que es principalmente consecuencia de los efectos anteriores, es fundamental cuando se plantea el empleo de materiales arcillosos, aunque su alcance no suele medirse o expresarse con control



o ensayo alguno.

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 éste 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.

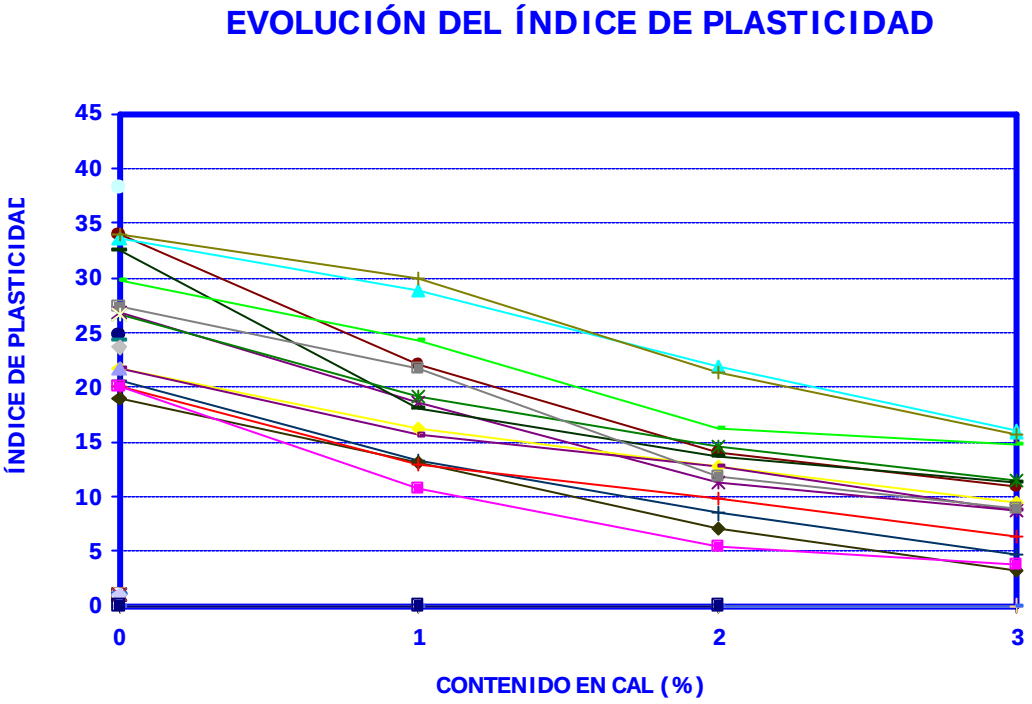
Esta reducción que se ha dicho que es generalizada para todas las arcillas, se manifiesta no obstante en mayor medida en los suelos con mayor plasticidad. Así suelos más plásticos consiguen, a igualdad de cal aplicada, una más importante reducción de la plasticidad.

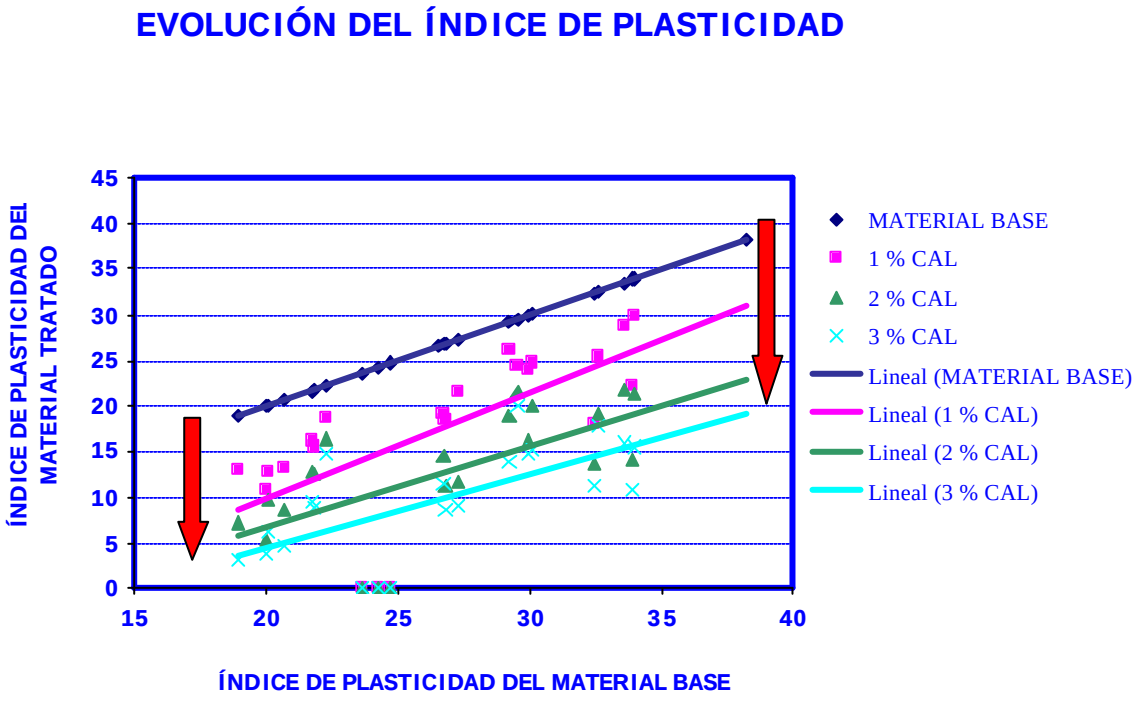
Otra característica de este efecto es que es progresivo, es decir, se incrementa con la cantidad de cal aplicada. A más cal, mayor reducción de la plasticidad. Sin embargo, esta reducción no es lineal sino regresiva o asintótica, tendiendo a un límite a partir del cual el aumento de cal no produce reducciones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

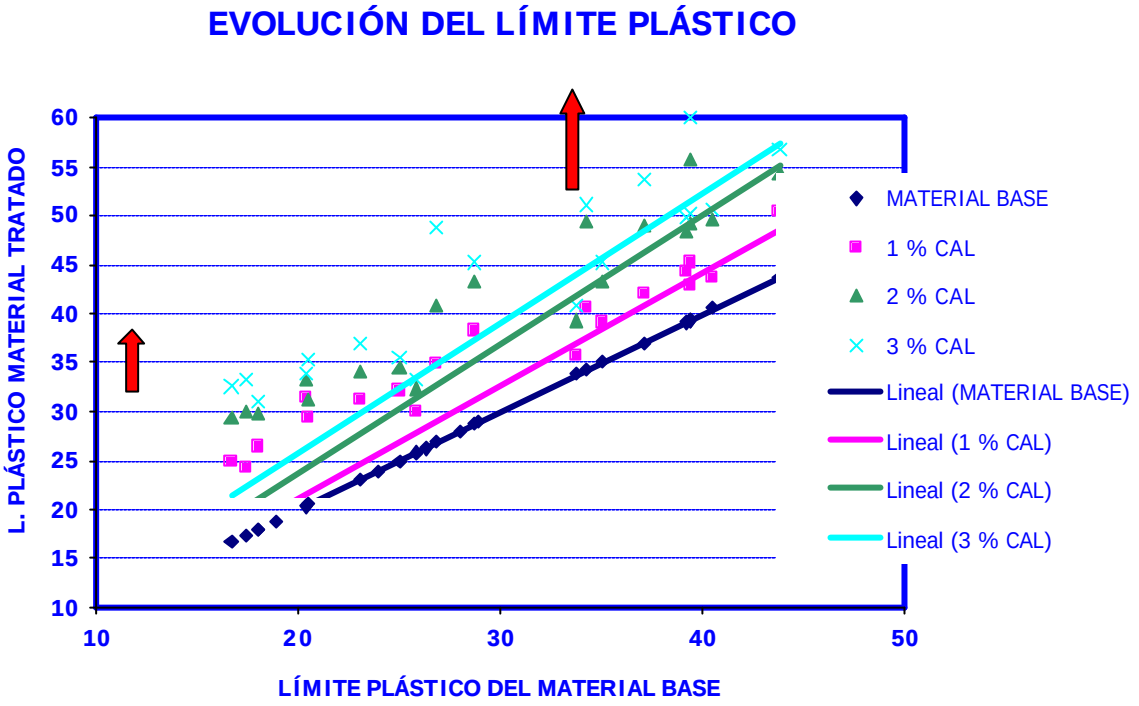
Este límite es, en ocasiones, la eliminación casi total de la plasticidad del suelo, que suele conseguirse en ocasiones.

En las gráficas siguientes se ilustran para las muestras referidas las proporciones de reducción de los límites y el índice de plasticidad, expresados tanto en relación con el valor primitivo como al porcentaje de cal empleado sobre peso de suelo. En ellas, se observan las tendencias descritas, así como la universalidad de los procesos, detectados incluso en los

materiales con menores propiedades plásticas.







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.

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

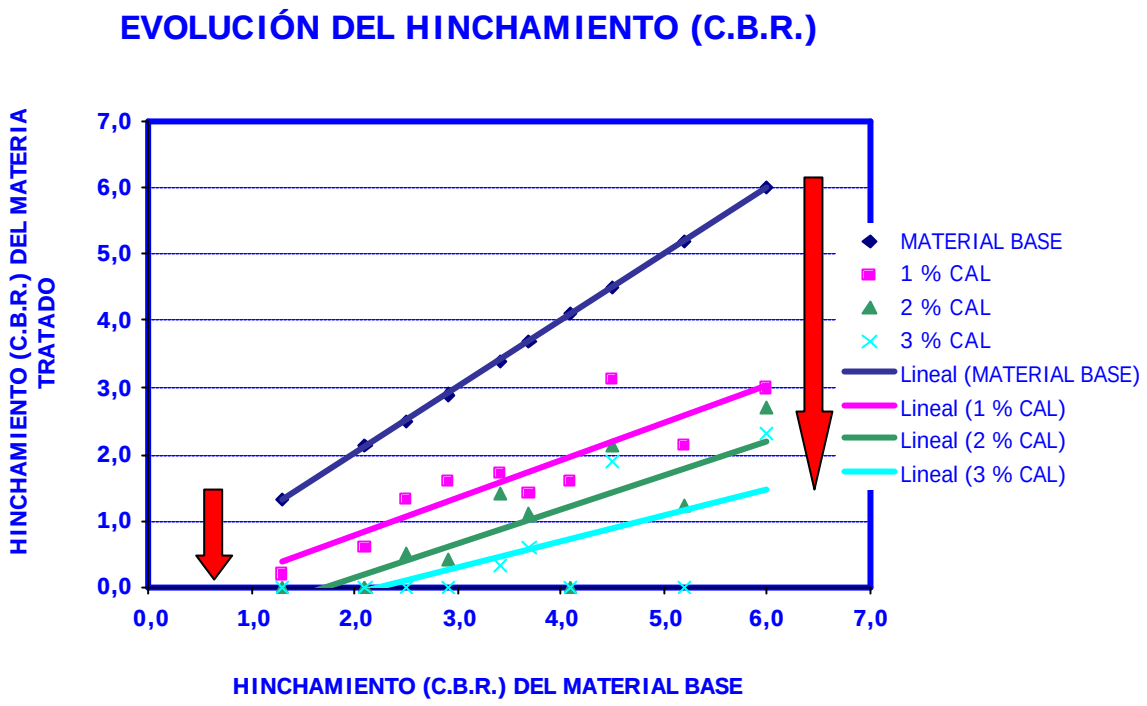
cambios de volumen ante modificaciones del nivel de humedad del suelo.

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.

Estas reducciones son casi inmediatas y sus efectos son drásticos: Se elimina en su casi totalidad el riesgo en la masa de suelo tratada con poca cantidad de cal. Tan sólo hay que tener en cuenta, como ya se ha citado, que se trata de una modificación que requiere una alteración a nivel de partículas, por lo que es muy importante asegurar el mezclado y que la cal llegue a todas las zonas de suelo susceptibles de presentar problemas de hinchamiento o retracción. Así como en otros efectos, como la trabajabilidad o la permeabilidad, pudiera bastar una manifestación macroscópica, en este es importante llegar al nivel de partícula si se quiere reproducir la mejora que se manifiesta en los ensayos de laboratorio.

Una ilustración del efecto de reducción del hinchamiento es la determinación del mismo que se realiza en el ensayo del C.B.R., cuyos resultados se ilustran en la gráfica siguiente:



Si bien existen ensayos cualitativos y cuantitativos más determinantes, los resultados anteriores como ejemplo del efecto en un ensayo de amplia difusión en el ámbito de la construcción sirven como ilustración del mismo.

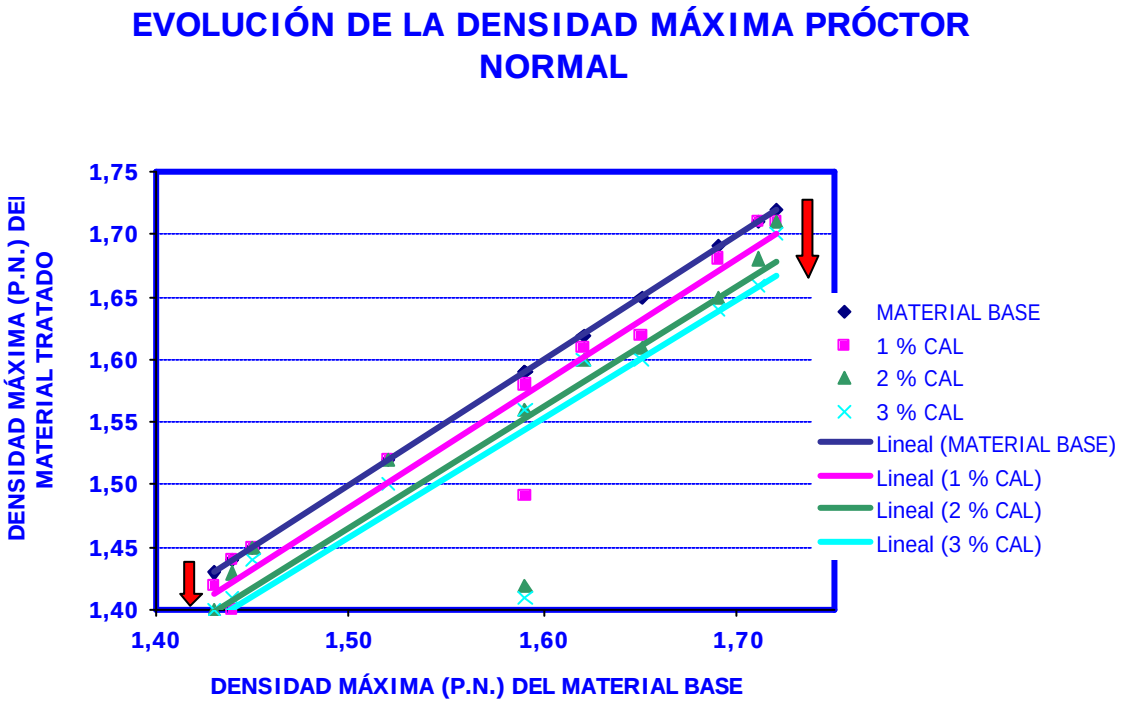
La utilidad de este efecto es clara y de gran espectro dada la importante magnitud de los daños ocasionados en la construcción por las arcillas expansivas. No obstante, tiene la limitación de que sólo se mejora aquélla parte del suelo que es sometida al tratamiento y que ello supone la manipulación y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

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 ponerse todas en contacto y distribuirse de la manera más eficiente.

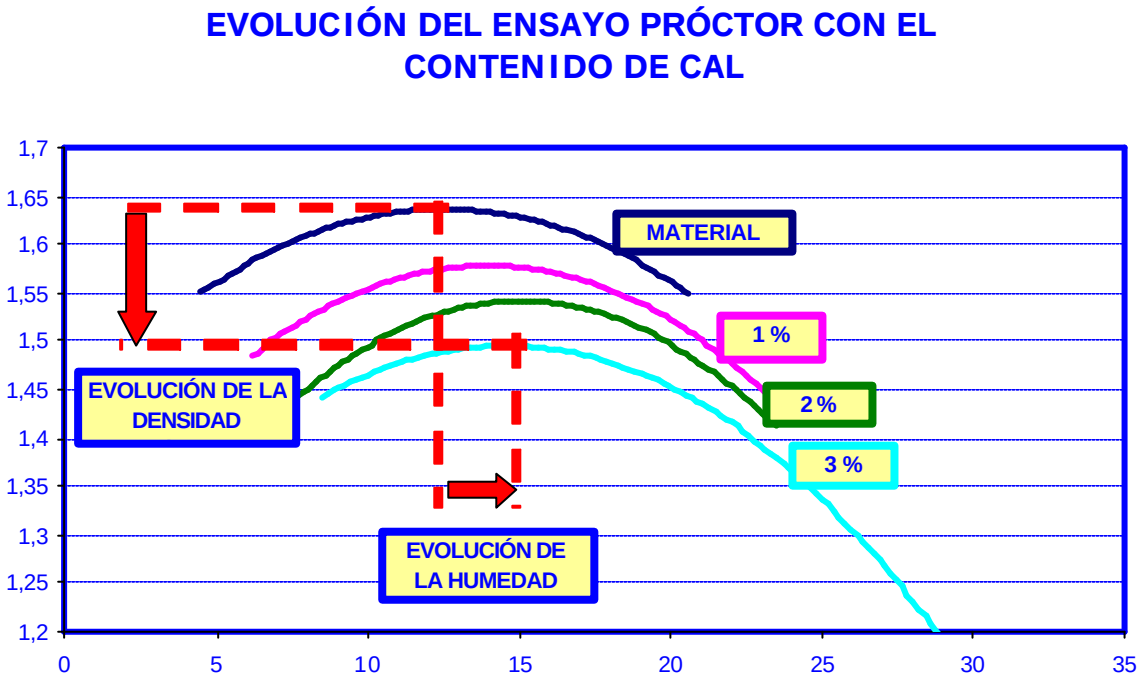
En el gráfico siguiente se ilustra este efecto, y puede verse además que es casi universal para todos los suelos. También se observa que las mayores reducciones iniciales se atenúan con el incremento de la cal aplicada. Es claro que llega un momento en que los procesos de aglomeración y floculación de partículas alcanzan un efecto máximo a partir del cual apenas se obtiene progresión ante un aumento de la cal aplicada.



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”.

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 manifieste en un aplanamiento de la curva que se deduce del ensayo de compactación próctor, que se convierte en otra más abierta.



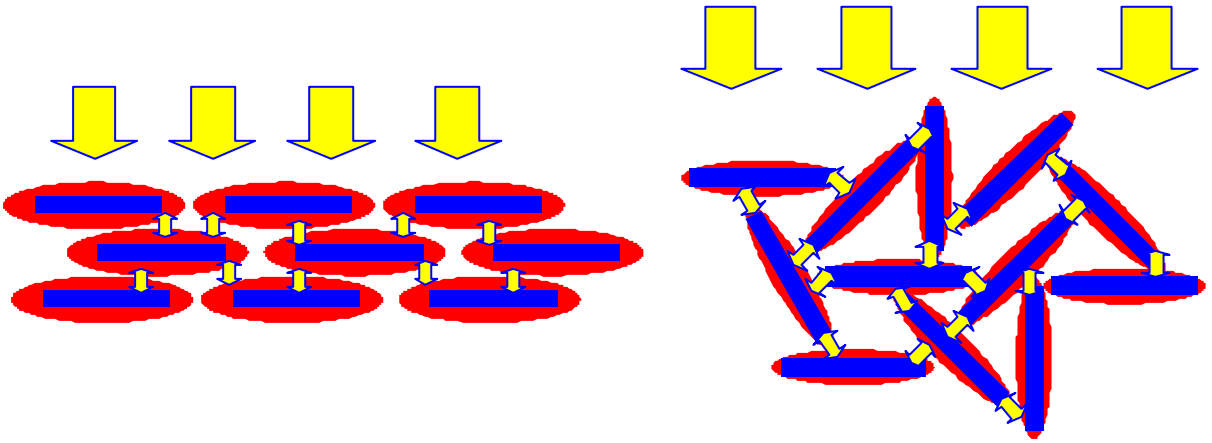
Finalmente hay que citar que el efecto de la modificación de las condiciones de compactación que se obtiene en un suelo arcilloso es mayor cuanto mayor sea la plasticidad del suelo inicial. Dado que como se ha dicho la plasticidad es un índice muy ilustrativo del tipo de arcilla, parece evidente que el efecto de floculación y aglomeración que justifica este fenómeno tenga mayores consecuencias en las arcillas de menor tamaño de partícula, más superficie específica y mayor capacidad e intercambio iónico.

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.

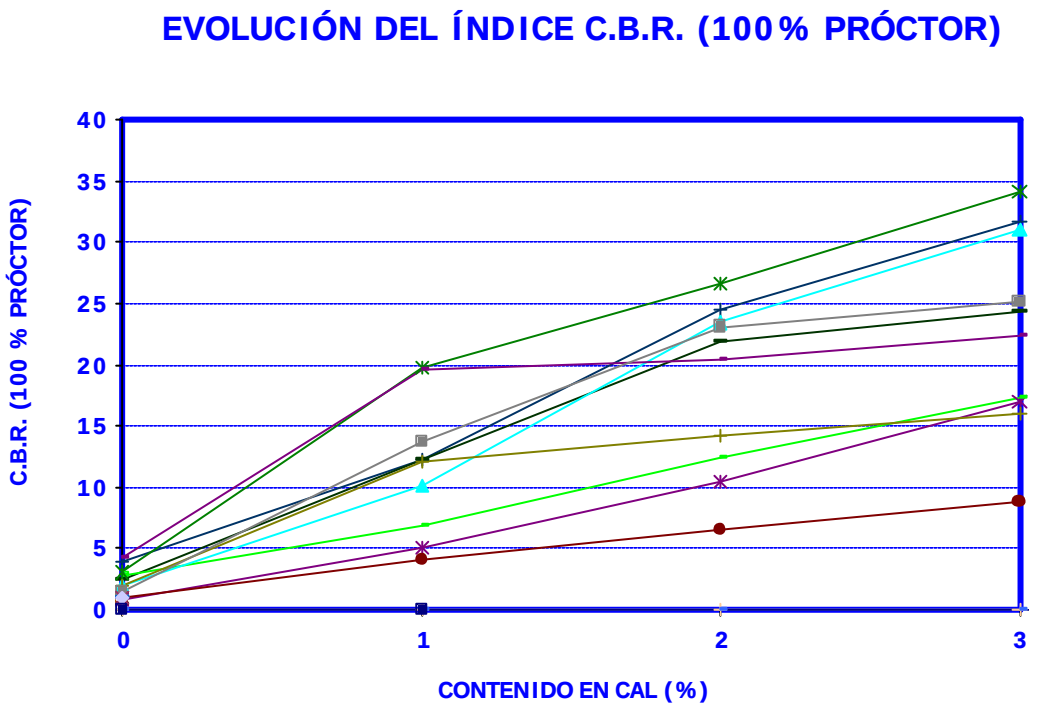
Intuitivamente, el aumento de la capacidad portante se basa principalmente en que la nueva distribución de partículas del suelo permite una mayor redistribución de las tensiones ante solicitaciones exteriores. El desorden introducido en la masa del suelo hace que el reparto se pueda producir entre más partículas y en direcciones diferentes a las simplemente ortogonales que se generan ante una estructura laminar. Además, ello hace que incluso intervenga la resistencia propia de las partículas, mientras que en la estructura laminar sólo colaboran las fuerzas entre ellas.



La manifestación más típica de este aumento de la consistencia de un suelo es el

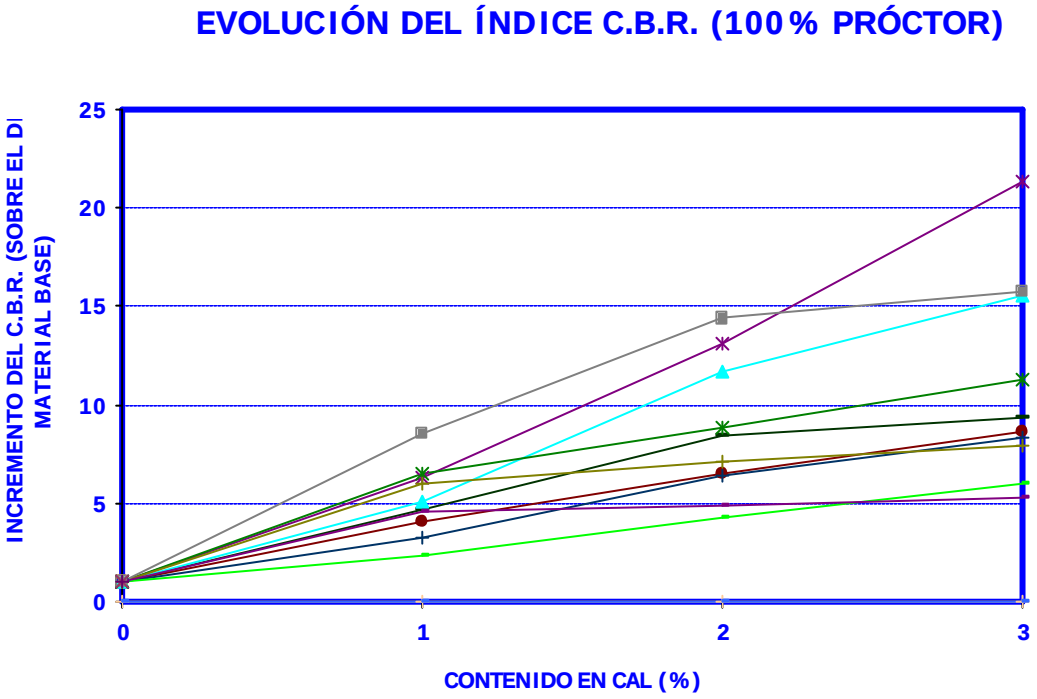
incremento del C.B.R. que se produce en el mismo ante el aumento de cal. El ensayo de determinación del C.B.R. es uno de los más usuales y intuitivamente asociado a la resistencia al corte inmediata del suelo. Además, gran parte de las formulaciones empíricas para el dimensionamiento tanto analítico como mediante ábacos de firmes y estructuras de tierra se basan en el C.B.R..

Los efectos de la mejora obtenida por la aplicación de la cal se ilustran en los gráficos siguientes que recogen resultados de ensayos a las muestras referidas en este apartado.



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, al menos en los porcentajes de cal contemplados en estos ensayos.

El aumento de la consistencia que se ha descrito y cuantificado mediante el ensayo del C.B.R. no se produce sólo en la magnitud que mide dicho ensayo. En general esta mejora se extiende tanto a las características de resistencia en otras condiciones, la compresión simple y el ángulo de rozamiento interno o resistencia al corte, como a las condiciones de rigidez y deformación del suelo mejorado con respecto al original, que se cuantifican en un incremento del módulo de elasticidad del mismo.



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;

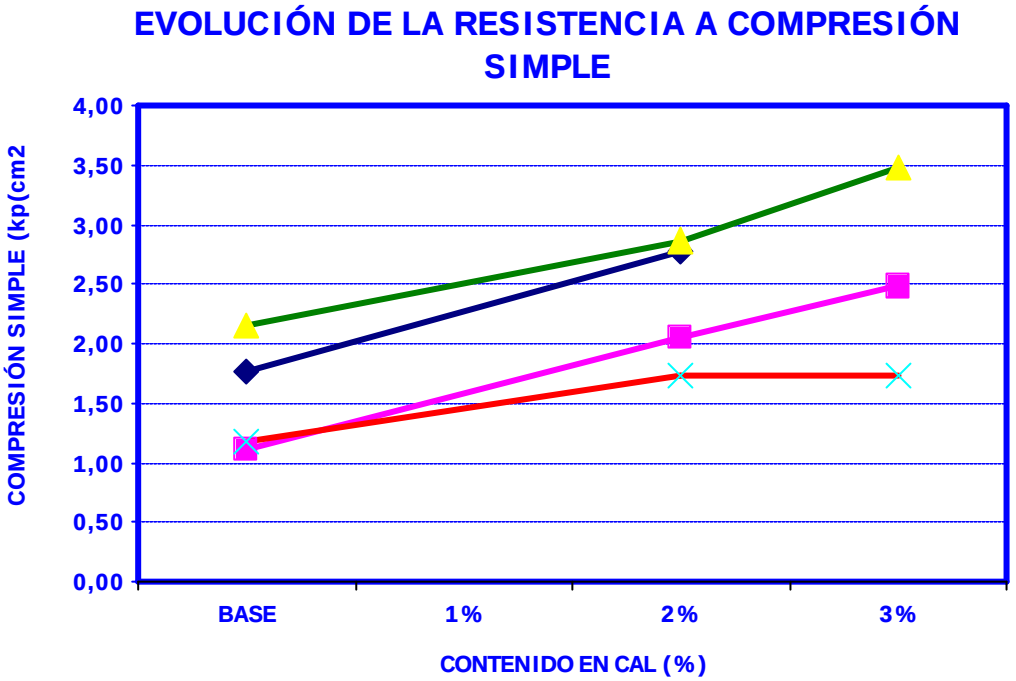
* La existencia de cal libre en cantidad suficiente para la reacción;

* 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.

Un ejemplo del incremento de la resistencia a compresión simple sobre muestras de suelo tratadas ensayadas con un período limitado de curado (7 días) apunta ya las mejoras que pueden obtenerse mediante esos procesos:



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.

Al contrario de los que ocurre en los efectos que se han denominado inmediatos y cuya producción es casi universal, es difícil proporcionar datos representativos de las modificaciones de las características resistentes de un material por el efecto de la reacción puzolánica. En aquéllos, la mayoría de los materiales presentan comportamientos similares e, incluso, como se ha visto es posible aplicar regresiones e interpolaciones que sirvan para prever fenómenos o respuestas al tratamiento. Sin embargo, la particularidad de los fenómenos que se deducen de la reacción puzolánica, la diferente tipología de las arcillas experimentadas por los investigadores de referencia en la materia, principalmente extranjeros, y la notable diferencia en las cantidades de cal empleadas en cada país, hacen inicialmente inválidas sus conclusiones para aplicación directa en el caso de los suelos y construcciones en España.

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.

TIPOS DE MODIFICACIÓN DE SUELOS MEDIANTE CAL

A esta altura del documento, 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.

Se ha explicado e insistido en los apartados anteriores en que los efectos de la aplicación de la cal no son todos universales. Dependen en primer lugar de la reactividad del suelo ante la cal, que está condicionada por su mineralogía. En segundo lugar dependen de la cal empleada, concretamente de su pureza, de su forma de aplicación y de su cantidad.

Igualmente se han dividido los efectos entre aquéllos que se producen de manera inmediata y los que requieren un mayor plazo, asociados a un curado y basados en la reacción puzolánica de cementación. Se ha explicado que los efectos inmediatos, que llevan asociados una mejora en la trabajabilidad fundamentalmente, también implican una cierta mejora de consistencia, pero que es sustancialmente inferior a la provocada por los denominados efectos a largo plazo.

Por ello, es evidente que no todos los tratamientos de modificación de un suelo arcilloso mediante la aplicación de cal son iguales ni pueden, por tanto, perseguir los mismos objetivos. Entendiendo los tratamientos como procesos ingenieriles específicos tendentes a resolver un problema concreto de una obra no cabe pensar en la cal como una antídoto universal o solución tipo comodín a cualquiera de ellos. Cada suelo y cada problema son diferentes y como tales deben ser tratados de manera diferenciada.

No es lo mismo plantearse la necesidad de secar un suelo, que la de mejorar la rodadura del mismo durante las obras, la de reducir sus futuros movimientos por hinchamiento o la de aumentar su resistencia para dotarlo de funciones estructurales.

Y, por tanto, la solución no puede ser la misma. Si bien es cierto que la modificación de suelos con cal permite plantearse soluciones a muy diversos problemas y con alcances progresivos que dan lugar a un gran abanico de soluciones, es necesario dividir o clasificar estas soluciones ya que su diseño, concepción y condicionantes las hacen, en algunas de sus posibilidades, completamente diferentes.

No pueden establecerse los mismos criterios de diseño, ejecución o conservación para tratamientos diferentes ya que, en principio, los productos que se van a obtener son también diferentes.

Es pues necesario dejar de hablar genéricamente de lo que hasta hace poco se denominaba la "estabilización de suelos con cal" para empezar a dar apellido a esta estabilización, o mejor aún, dar nombres diferentes a procesos diferentes. Establecer esta nueva nomenclatura cuando ya existe una tradición indiferenciada en el sector es difícil, y más aún cuando para ello hay que recurrir a matices o acepciones secundarias.

La tendencia actual de los distintos autores enfoca la clasificación de los mecanismos de mejora de suelos con cal en dos grandes grupos de procesos:

* Los que persiguen una modificación de los materiales para alterar sus características y propiedades con vistas a conseguir una mejor o más adecuada calidad de los mismos para un propósito determinado.

* Los que persiguen un cambio de su comportamiento destinado a asignarle una misión estructural de mayor relevancia que la que el suelo tendría por sí mismo.

En el primer grupo estarían todas aquellas operaciones que pretenden hacer aptos para algún propósito a unos suelos inicialmente inadecuados. Estos son, por ejemplo, los que pretenden que un fondo de excavación sea transitable o los que persiguen que un suelo no tenga un hinchamiento crítico para una construcción determinada. En definitiva, los que persiguen mejorar la calificación del suelo en cualquiera de las escalas o clasificaciones actualmente empleadas en la construcción.

En el segundo caso estarían fundamentalmente los procesos que pretenden que un suelo se comporte como un material estructural tipo conglomerado, es decir, con una resistencia a compresión impropia de un material suelto o incluso con resistencia a flexotracción. Es el caso del empleo de suelos en capas de subbase o incluso de bases para firmes y cimientos.

Ambos procesos tienen motivaciones similares, ya se vieron en los primeros apartados, y los procesos de obtención son sustancialmente parecidos. Pero no deben conocerse de igual manera.

Atendiendo a esta necesidad, en este documento se han clasificado estos grupos de tratamiento diferenciándolos entre los de **mejora de suelos** aplicado a los primeros procesos y los de **estabilización de suelos**, reservando así el nombre convencional para el segundo grupo.

Esta reserva del nombre de estabilización para la modificación con fines estructurales se entiende que es más acorde a su primitiva concepción. Salvo en aplicaciones específicas o

de ámbito reducido, lo cierto es que en la documentación técnica disponible hasta la fecha en nuestro país, la estabilización de suelos con cal no perseguía ni abordaba lo que se puede entender como mejoras. Y ello podría deberse fundamentalmente a que los problemas medioambientales de obtención de suelos aptos no eran tan imperiosos como actualmente y la desproporción del coste de la mejora con cal sobre sus resultados sin considerar estos condicionantes era desorbitada.

A continuación se matizan las diferencias fundamentales entre ambos tipos de tratamientos, claves para su diseño y definición. Debe quedar claro que no es lo mismo diseñar uno u otro tratamiento y que, consecuentemente, las dotaciones, sistemas de aplicación, métodos de ejecución y de control deben ser diferentes en cada caso.

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 los ensayos básicos usuales en el ámbito de la construcción. Los efectos y utilidad del tratamiento se cuantifican mediante el control de características indirectas como pueden ser la determinación de los límites de Atterberg, del índice 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.

No obstante, aunque al diseñar una solución de mejora de un suelo con cal no se suele contar con el incremento de las propiedades obtenidas a largo plazo, sí es necesario adoptar las medidas oportunas para evitar que el paso del tiempo elimine las ventajas obtenidas, en caso de que sean trascendentes. Así, será preciso en especial estudiar las condiciones de drenaje del material para evitar procesos de lixiviado o ataques químicos que redunden en una pérdida de dichas ventajas.

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.

2.- La estabilización de suelos

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 la mejora de suelos también produce alguna ganancia en consistencia, aunque no sea perseguida, 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 kg/cm^2.

La estabilización de suelos con cal persigue provocar los efectos 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 solicitaciones, 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 o de 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 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.

FACTORES CONDICIONANTES EN EL TRATAMIENTO DE SUELOS 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. A continuación se repasa el alcance y consecuencias de estos factores, así como su influencia en el tratamiento. Si bien algunos de estos factores ya se han tratado al exponer los principios del tratamiento de suelos con cal, en este apartado se insistirá someramente en recalcar su importancia.

1.- Contenido en arcillas del suelo

El primer factor que condiciona la eficacia de un tratamiento con cal es la necesidad de la presencia de arcilla. Aunque esta afirmación pudiera parecer una perogrullada, la realidad es que la aplicación de cal a un suelo sin arcilla o con una presencia insuficiente de este tipo de material es ineficaz, es decir, no produce mejora de sus características. Al menos en los términos en que en este texto se trata.

Las mejoras descritas, basadas en la interacción de la cal sobre las partículas micrométricas de las arcillas o en la reacción con la sílice y alúmina característica de ellas, no

pueden producirse sin su presencia.

Así, si la cal reduce el porcentaje de finos por floculación, para ello es preciso que haya finos que flocular. De igual manera la arcilla es la fuente de sílice y alúmina necesaria para el efecto puzolánico que justifica la estabilización de suelos con cal. Por tanto, sin arcilla, no hay reacción puzolánica y, por tanto, no hay estabilización.

En términos generales suele establecerse que para que tenga eficacia una estabilización es necesario que el suelo contenga al menos el diez por ciento de arcilla, o expresado en otros términos, un diez por ciento de finos en la parte más baja de su granulometría según el ensayo convencional.

2.- Características mineralógicas de la arcilla

Como se ha insistido ya en distintos apartados de este texto, la eficacia del tratamiento con cal de un suelo depende del tipo de arcilla que constituye mineralógicamente el suelo a tratar.

Distintas arcillas poseen distintas características de tamaño de partícula, superficie específica, capacidad de intercambio de iones, plasticidad y, en conjunto, reactividad ante la cal. En función de ellas no sólo será o no factible la adición de cal con un determinado objetivo, sino que incluso las cantidades precisas variarán sustancialmente.

Así, por ejemplo, recordando propiedades descritas, no es lo mismo tratar suelos con alto contenido en caolinita, arcilla poco plástica y poco reactiva, que otros con abundancia en montmorillonita, mucho más plástica y reactiva. De manera análoga, las arcillas sódicas o potásicas, iones fácilmente desplazables por el calcio, son potencialmente más proclives a

manifestar con mayor proporción los efectos de la aplicación de la cal.

No obstante, las diferencias que se deducen por este factor afectan fundamentalmente a los tratamientos de estabilización de suelos, basados en la reacción puzolánica. Por ello, para asegurar este tipo de tratamiento se ha citado ya la necesidad del estudio mineralógico de los compuestos que constituyen la fracción arcillosa del suelo a tratar.

3.- Contenido en materia orgánica

Un factor no muy bien conocido pero cuya importancia es destacada por diversos autores es la presencia de materia orgánica en el suelo.

La materia orgánica está constituida por partículas complejas que pueden adsorber cationes de calcio o reaccionar con el suelo, inhibiendo así la reacción superficial de la cal con las partículas de arcilla y la reacción puzolánica.

El fenómeno es complejo y está muy condicionado por la naturaleza del suelo y por la de la materia orgánica presente en él. Si bien no parece existir una regla fija en el límite del contenido de materia orgánica que induce esta inhibición, puede decirse que contenidos inferiores al uno por ciento no presentan problemas.

No obstante, dado que el principal efecto de la materia orgánica es la reducción del efecto de estabilización, hay que insistir que en estos casos procede un estudio específico en laboratorio que pondere la eficacia del tratamiento, más allá de simples reglas orientativas.

4.- Contenido en sulfatos solubles

El contenido en sulfatos solubles en suelos es un factor cuya influencia ha despertado

un gran interés en los últimos años por asociarse a él importantes casos de patología en firmes de carreteras construidos mediante estabilización con cal.

Sin entrar en especial en un desarrollo pormenorizado del proceso, aún en discusión en ámbitos de investigación, es posible apuntar las líneas que gobiernan la influencia de este factor en la estabilización de suelos.

La interferencia de los sulfatos en la reacción puzolánica es un efecto ya conocido en el fraguado del cemento portland por lo que, dado que el proceso de la reacción de la cal y la arcilla se ha descrito como la formación de productos similares, es previsible una interferencia también similar. En resumen, la presencia de sulfatos ante una cierta proporción de cal libre y de alúmina puede originar una reacción que lleva a la formación de sulfato-aluminatos de calcio hidratados. Entre los productos que se pueden generar en esta reacción destacan dos formas:

* La ettringita, caracterizada por su alto contenido en sulfatos; y

* El monosulfoaluminato, de bajo contenido.

La formación de estos compuestos conlleva la generación de unas partículas aciculares de tamaño creciente que generan importantes presiones de hinchamiento en la masa en la que se forman, con valores de hasta 2.000 kg/cm^2 . Así, tanto el incremento de volumen que se genera en su creación, como la forma de aguja de las partículas, originan la rotura de la estructura preexistente en el suelo. La reacción de formación de estos productos en suelos arcillosos es rápida y tan sólo requiere la presencia adicional de los sulfatos y de la cal precisas.

Estos procesos si se producen en una masa de suelo estabilizada con cal en la que la reacción puzolánica ya ha tenido lugar pueden llevar a la destrucción de los enlaces constituídos

y, por tanto, a la pérdida del efecto de la estabilización.

Como se ha citado, aún no es del todo conocida la solución al problema. No obstante, dados los principios que gobiernan el proceso de la formación de estos productos nocivos, si parece que pueden adoptarse medidas preventivas para evitar su aparición. Estas medidas afectan al proceso constructivo y de conservación de los materiales y son fundamentalmente las siguientes:

a) Acelerar su formación: Dado que se conocen los componentes que dan lugar a la reacción, la cal y los sulfatos del suelo, y que los daños suelen presentarse por su producción a posteriori, se plantea en primer lugar provocar la formación artificial de los productos antes de la finalización de las capas. Para ello es pues fundamental:

* Dosificar y estabilizar con exceso de cal para que quede cantidad libre disponible y suficiente para provocar la reacción; y

* Construir las capas con exceso de humedad para que todos los sulfatos solubles sean movilizados y puedan reaccionar con la cal.

b) Evitar su formación: Dado que esta reacción se produce al solubilizar los sulfatos parece que la solución más sencilla es disponer la capa o material de un drenaje adecuado que impida el acceso de agua y la consiguiente disolución.

En todo caso, es muy importante para el tratamiento de suelos con presencia de sulfatos una muy correcta disgregación y homogeneización de la mezcla de suelo y cal. Sólo así se evitará almacenar grumos o depósitos incontrolados sin disolver, ya de cal ya de sulfatos, que puedan reaccionar ante potenciales situaciones futuras peligrosas.

5.- Plasticidad del suelo

Otro factor condicionante del tratamiento de los suelos con cal es la plasticidad del material base. En el proceso de la aplicación de la cal a un suelo arcilloso se produce la paradoja de que mientras que los efectos de la cal sobre una arcilla son mayores a más plasticidad inicial de ésta, más difícil es conseguir que dichos efectos lleguen a afectar a toda la masa o, en definitiva, a ser efectivos.

Este hecho se debe en principio a que la plasticidad de un suelo condiciona su trabajabilidad y, por tanto, la de la mezcla perseguida. Un suelo excesivamente plástico plantea serias dificultades para su manipulación y, más aún, para su mezcla con otro producto.

Lo normal en suelos muy plásticos es que el nivel de humedad sea alto de partida y que se requiera su disminución. Pero la propensión y posibilidad para eliminar el nivel de saturación sobrante es baja, ya que la atracción del agua en la capa doble es fuerte, y mayor, en general, a más plasticidad de la arcilla. Es por tanto preciso para aplicar cal a un suelo muy plástico conseguir que libere la humedad en exceso y que permita por tanto la entrada de la cal. Como se ha mencionado, si además se pretende aplicar ésta mediante lechada o mezcla con agua, el problema se acentúa.

La recomendación usual es que se proceda a realizar una primera aplicación de cal con poco agua, o en polvo si es posible, de manera que se logre el primer efecto de secado de la arcilla y reducción de su plasticidad. En una segunda fase puede ya aplicarse la cantidad restante de cal según la dosificación prevista, así como el agua de compactación estipulada.

A nivel orientativo, es usual proponer esta doble aplicación para suelos con valores del índice de plasticidad superiores a 30.

6.- pH del medio

En el estudio de las propiedades de las arcillas y su reacción de la cal se ha citado que aquéllas necesitan un medio básico, con pH alto, para asegurar el intercambio iónico y promover la reacción puzolánica que justifica en última instancia todos los fenómenos del tratamiento de suelos con cal.

En este tipo de tratamientos, este medio básico lo proporciona la cal, que es capaz de elevar los valores del pH en la mezcla hasta entornos del 12,45.

Por tanto, esta elevación del pH no sólo es un indicador del proceso sino que también es un factor condicionante de su progreso. Es preciso, si se quiere asegurar el mantenimiento de las reacciones y su estabilización, asegurar el del pH del medio. Hay pues que evitar que posibles disoluciones o alteraciones por agentes externos lo reduzcan y provoquen la paralización de los fenómenos perseguidos.

Hay que citar que el valor del pH, por estas características citadas, suele ser usado en ocasiones como indicador indirecto de la idoneidad de la mezcla y de la efectividad del tratamiento, bien realizado en laboratorio bien in situ. Así un valor alto del pH asegura que resta cal libre y que, por tanto, se deben haber producido las reacciones perseguidas.

7.- Disgregación y homogeneidad de la mezcla

Al igual que se ha explicado en cuanto a la plasticidad de los suelos arcillosos, la eficacia de la disgregación del material base, influye en la capacidad de la cal de llegar a todas las partículas.

Como se ha recalcado en los anteriores apartados la efectividad de la aplicación de la

cal se basa en asegurar que ésta llega a toda la masa del suelo. Si en éste permanecen grumos o agrupaciones de partículas estancas a la entrada del agua y de la cal, no es posible el contacto y, por tanto, la reacción.

El resultado de una aplicación de cal con una insuficiente disgregación del material es que se tendrán masas o bloques de mayor o menor tamaño, en los que no ha sido posible su rotura y la cal sólo se ha aplicado en la superficie exterior de la misma. Evidentemente, los riesgos y efectos nocivos del interior de dicha masa en cuanto a plasticidad, expansividad, etc. permanecen latentes en esta masa. Dado que lo usual es que los pequeños bloques sin tratar se reproduzcan en todo el volumen del suelo, parece lógico pensar que la eficacia de la aplicación de la cal será así limitada, si no nula.

La solución a este problema suele ir a menudo más allá de la necesidad de emplear medios especiales para la construcción. Ni siquiera la maquinaria más sofisticada es a veces suficiente para disgregar el material con la eficiencia requerida en una sola aplicación. El proceso habitual responde al esquema de ripado y escarificado del suelo con una eventual compactación una vez secado al aire libre que provoque la rotura de los bloques escarificados. Pero este proceso a veces se muestra insuficiente para lograr de una pasada el propósito perseguido. Por ello suele recomendarse, más que el empleo de medios específicos, la realización de proceso de manera reiterada en series sucesivas hasta conseguir un nivel de disgregación adecuado.

La disgregación de un material suele medirse en relación con el tamaño máximo de grumos que permanece tras el ripado o a la proporción de finos obtenida en la obra frente a la que es posible obtener en el laboratorio mediante el secado y cernido del material.

En estas ocasiones, al igual que ocurre con la problemática de los suelos muy plásticos, se suele proponer la aplicación de la cal en varias dosis parciales durante las diversas pasadas del equipo de escarificado. Así, las primeras dosis contribuyen además a la disgregación por los fenómenos físicos ya descritos, amén de los puramente mecánicos aportados por el proceso de ripado y compactación.

8.- Dificultad de compactación

Los factores de plasticidad y dificultad para la disgregación de los suelos arcillosos que se han comentado anteriormente suelen ir acompañados de otro factor crítico en la ejecución de capas tratadas con cal: La dificultad para la compactación. Normalmente los suelos arcillosos plantean dos tipos de problemas para poder alcanzar el nivel de compactación deseado.

El primero de ellos se atribuye a que son suelos que suelen presentarse en ocasiones muy húmedos, y, como se ha citado, en condiciones de plasticidad y trabajabilidad muy deficientes. Si estos suelos requieren adicionalmente añadirles agua para su compactación es fácil entender el problema. Las soluciones en estos casos son similares a las descritas en aparatados anteriores.

La segunda situación problemática que complica la compactación de suelos arcillosos es que con frecuencia se ubican sobre capas inferiores relativamente blandas, bien del mismo material con grado de saturación superior, bien de cualquier otro material en malas condiciones, por ejemplo, bajo el nivel freático.

Cuando se tiene que compactar un suelo sobre un lecho o estrato inferior de muy baja capacidad portante, ésta resulta casi imposible por falta de reacción a la energía transmitida por el carro de compactación. En estas ocasiones la solución pasa por el empleo de métodos

constructivos especiales que permitan no ya sólo compactar la capa, sino incluso poder proseguir con la construcción de la estructura de tierra diseñada. Son soluciones usuales en estos casos la preparación de plataformas con escollera, aportación de materiales inertes con alto peso específico, pilotados con troncos de madera, etc.. En general se trata de soluciones ajenas al tratamiento con la cal, pero sin cuya aplicación puede perderse la efectividad del tratamiento.

9.- Humedad de compactación

Otro factor condicionante en el diseño y la ejecución de los tratamientos de suelos con cal es la humedad que se aplica para la compactación del mismo.

Este factor, que ya es importante en cualquier suelo, lo es más aún en las mejoras y estabilizaciones, en que el agua añadida tiene la misión de aportar y sustituir o incluso disolver los cationes y sustancias que posibilitan la mejora. Hay que recordar que en el tratamiento de suelos con cal el agua no es sólo el lubricante de las partículas en la compactación, sino que también es el medio que transporta el principio activo.

En estos tratamientos es siempre recomendable la aplicación de agua por encima del nivel establecido como humedad óptima en el ensayo de compactación próctor de referencia. Esta recomendación, válida para cualquier suelo, lo es más en estos casos porque un exceso de humedad limitado:

a) Reduce los posibles hinchamientos posteriores ya que se supone que la capa doble de las partículas habrá alcanzado su nivel máximo y no se prevén posible aumentos en la misma; y

b) Disuelve los posibles sulfatos que pudieran generar el efecto perjudicial mencionado en el apartado anterior correspondiente.

10.- Presencia de aguas agresivas

El último gran grupo de factores condicionantes en la aplicación de cal a un suelo es el que se asocia a los efectos de la presencia de agua en el terreno.

En primer lugar, la presencia de aguas agresivas por sus contenidos excesivos en sales puede interferir en la reacción puzolánica o en la sustitución de los cationes adsorbidos en las partículas de arcilla. Por ello, es preciso conocer la composición y contenido de iones en las aguas freáticas que son susceptibles de afectar al material tratado.

Un caso especial y muy frecuente dentro de esta posible agresividad es la aportación de sulfatos que puedan interferir en la reacción puzolánica con la formación de ettringita y monosulfoaluminato ya descrita. Es evidente que a la hora de analizar este posible factor, ya detallado, no es suficiente analizar el suelo y la presencia de sulfatos solubles en el mismo. Habrá también que contar con el posible aporte de éstos a través de las aguas de infiltración que pudieran afectar al material tratado.

11.- Fenómenos de lixiviado

Un segundo efecto del agua que hay que considerar como un factor condicionante en el tratamiento de suelos con cal es que puede influir en la durabilidad de la estabilización o la mejora.

Como ya se ha comentado, algunos de los procesos movilizados en el tratamiento son reversibles, en especial, por ejemplo, la sustitución catiónica. Si el contenido en sales o iones

del agua que afecta a una masa de suelo es susceptible de provocar la sustitución de los enlaces o afectar a los productos cementantes es evidente que la durabilidad del tratamiento debe ser puesta en cuestión.

Este efecto además puede verse agravado si existen corrientes o flujos continuos de agua afectando al material, que pueden ocasionar por ejemplo, el arrastre de productos, disolución de compuestos, disminución del pH del medio que facilita la reacción y rebaje de la concentración catiónica representativa de los enlaces generados en el conjunto suelo-cal.

12.- Acción del hielo

Un último factor a considerar, también consecuencia de la presencia del agua en el suelo, es el riesgo de helada y los efectos de los ciclos típicos hielo-deshielo.

Cuando se tiene un suelo estabilizado con cal, en el que se ha formado una estructura de productos cementantes más o menos rígida integrada en la matriz del suelo hay que tener en cuenta la posible presencia de agua rellenando los poros de dicha matriz. Si existe el riesgo climatológico de que el agua pase a estado sólido éste fenómeno lleva asociado un incremento de volumen que puede repercutir en la rotura de los enlaces formados si el nivel de resistencia es bajo.

El efecto del hielo no merece más comentarios o precauciones que los que son precisos en cualquier producto conglomerado. Su incidencia será, como se ha dicho, proporcional al nivel de resistencia alcanzado con la estabilización: A mayor resistencia, menor posibilidad de rotura o pérdida de propiedades.

Es importante recordar que en ocasiones el proceso de endurecimiento o ganancia de

resistencia de los suelos estabilizados con cal suele durar varios años. Si los ciclos de hielo y deshielo se producen durante la fase de endurecimiento es posible que en las fases intermedias el suelo recupere parte de la resistencia perdida y que se produzca un reajuste del mismo de manera que los efectos finales sean incluso inferiores a los esperados.

En cuanto a las consecuencias del deshielo hay que mencionar que el paso a estado líquido de la zona helada no suele producirse de manera simultánea sino progresiva. Este hecho suele ocasionar una saturación repentina de zonas puntuales que puede empeorar el comportamiento del suelo tratado por cualquiera de los fenómenos ya citados. Además, este efecto nocivo puede verse agravado si se considera que los procesos de helada suelen originar migraciones de las partículas de agua que, una vez licuadas, saturan o humectan zonas en las que no estaban previamente.

EFECTO DE LA PRESENCIA DE SULFATOS EN LOS SUELOS A TRATAR CON CAL

La existencia de sulfatos en el suelo a tratar con cal es un factor ya citado con una influencia relativamente importante sobre los efectos del tratamiento.

Como se ha descrito, en función de la proporción de sulfatos presentes en el suelo, de la cantidad de cal añadida, del medio en que se desarrolla la reacción y del que afecta a la capa o material en las primeras etapas de su vida, es posible que se presenten importantes efectos no deseados. Incluso algunos de éstos pueden devenir en daños o patología sobre las estructuras construidas.

Si bien la importancia de la presencia de sulfatos en el suelo no es inicialmente mayor que la de cualquier otro de los factores descritos anteriormente, merece la pena dedicar un capítulo aparte a éste. Las razones fundamentales se basan en el desconocimiento de los mecanismos participantes en la reacción por la mayoría de los ingenieros proyectistas, en la necesidad de una caracterización específica de los suelos, más allá de los ensayos convencionales, y en la gravedad de los daños que se han descrito en la bibliografía.

Estos condicionantes hacen preciso sentar las bases de una manera clara, en la medida de lo posible, sobre el fenómeno de la interacción entre la cal y los sulfatos. De no tener en cuenta este riesgo, la probable consecuencia de una eventual proliferación de tratamientos de cal en suelos inadecuados desde este punto de vista sería una sucesión de fracasos que pudieran llevar a proscribir esta técnica por razones de un deficiente diseño.

1.- Antecedentes

El fenómeno de la interacción entre los sulfatos y la cal en los tratamientos de suelos es ciertamente inusual, pero la magnitud de sus consecuencias ha hecho que se trate con una atención singular.

Desde mediada la década de los ochenta surgieron autores en la comunidad internacional que, al describir graves episodios de patología en firmes compuestos por materiales estabilizados con cal, asociaron los daños a las reacciones producidas entre la cal y los sulfatos existentes en el suelo tratado.

Concretamente se han descrito casos especialmente llamativos en:

* Stewart Avenue, Owens Street y un aparcamiento escolar en Las Vegas (Nevada EE.UU..);

* Un aparcamiento en Witchita (Kansas EE.UU.);

* Varios kilómetros de vías, un aparcamiento y una rampa de embarcadero en Loyd Park así como el Cedar Hill State Park en Joe Pool Lake (Texas EE.UU.);

* Unas instalaciones aeroportuarias auxiliares en Spofford (Texas EE.UU.);

* La autopista francesa A28 de Alençon a Tours;

* Un tramo de la autopista M40 entre Banbury y Umberslade en el Reino Unido;

* Otros casos en Australia, Utah (EE.UU.) y Cambridgeshire en Inglaterra.

El hecho de la gran dispersión de ocurrencia de la problemática que aquí se describe

hace más interesante aún su discusión. No obstante, hay que decir que si bien en España no se han documentado casos de patología de suelos tratados con cal asociadas a la presencia de sulfatos en el material base, este hecho puede inicialmente justificarse por la escasa aplicación de esta técnica en las últimas décadas más que por las precauciones adoptadas o por las bajas probabilidades de su aparición.

2.- Descripción de los casos de patología más importante

Por la importancia que el análisis de la experiencia previa tiene así como por la ilustración de los riesgos y la magnitud de las consecuencias que conlleva el fenómeno que se trata, a continuación se describen las principales características de los casos mencionados:

a) Stewart Avenue y Owens Street, en Las Vegas (EE.UU.):

Estos casos han sido abundantemente descritos y citados en la bibliografía técnica, siendo especialmente desarrollados por Mitchell (1.986) y Hunter (1.988).

Se trata de dos actuaciones independientes vinculadas por su cercanía geográfica. La primera de ellas es una actuación de ensanche en una carretera de unos 4,2 kilómetros de longitud. Para ello se construyó un firme compuesto según sigue:

* 10 cm de mezcla bituminosa

* De 13 a 20 cm de base granular

* 30 cm de suelo existente tratado con cal como subbase

El tratamiento en la subbase se proyectó con un contenido de cal de un 4,5 % en peso de cal viva con un período de curado de 16 horas antes de la compactación de la capa.

En el caso de Owens Street la sección del acondicionamiento consistía en una capa de 20 cm de una mezcla de base existente con suelo natural tratado con un 4,5 % de cal sobre la que se extendieron 25 cm de mezcla bituminosa.

Transcurridos seis meses de la construcción de Stewart Avenue empezaron a aparecer daños en la vía, si bien la mayor incidencia de los mismos se produjo a los dos años de vida. Los daños aparecieron como deformaciones por hinchamiento, ondulación y rotura del pavimento. En las zonas de mayor incidencia las deformaciones por hinchamiento, tanto vertical como lateral, se manifestaban en franjas longitudinales de 30 a 60 centímetros de anchura. En la cresta de la onda generada, de hasta 30 centímetros de altura, se abrían grietas de 2 a 15 centímetros de anchura. La patología no se presentaba con igual intensidad en toda la vía, si bien se acusaba una cierta generalización en las zonas de mediana.

El coste total de las reparaciones acometidas ascendió a más de 2,7 millones de dólares. Si se tiene en cuenta que sólo se repararon dos terceras partes de la vía y que el ahorro justificado por la estabilización con cal en la obra fue de tan sólo unos 300.000 dólares, se evidencia la magnitud relativa de la incidencia.

En Owens Street la tipología de los daños detectados fue similar a la de Stewart Avenue, pero con magnitudes inferiores e hinchamiento de 15 a 20 centímetros. En cuanto al reparto de los mismos, se repetía el fenómeno de concentración en las zonas de mediana.

Los terrenos sobre los que se trazan ambas vías son depósitos fluviales constituidos por limos y arcillas arenosas procedentes de rocas originales con altos contenidos de

carbonatos y, en algunas zonas, de yesos. Los dos primeros metros se describían como arcillas limo-arenosas marrones con un 70 a 80 % de finos de baja plasticidad. Mineralógicamente aparecían cuarzo, mica y feldespato junto con arcillas de tipo sepiolita y montmorillonita y con rocas sedimentarias como calizas y yeso. En todo caso, las fracciones arcillosas presentes eran ligera o moderadamente expansivas, pero nunca con capacidad de hinchamiento del orden de las manifestadas, de más del cien por ciento.

De las investigaciones realizadas en el terreno sobre los materiales afectados, se detectó que en las zonas de mayor incidencia de daños la capa de suelo tratado se comportaba como un material blando, frente a las zonas sin daño, en que la rigidez de la capa estabilizada era notable. Incluso el color de los materiales difería desde el grisáceo de la zona dañada al marrón del material más cementado. Además, los espesores de capa en las zonas dañadas se habían incrementado en ocasiones hasta más del doble de la proyectada y ejecutada, manifestando deformaciones no sólo hacia las capas superiores sino incluso hacia el terreno natural, aunque éstas en menor proporción. Las densidades secas de los materiales más afectados no llegaban a 0,9 T/m^3, lo que ratifica y corrobora el grado de hinchamiento producido.

Un aspecto relevante es que en las zonas en peor estado se detectaron fuentes de entrada de agua en el firme, tales como zanjas drenantes cercanas, juntas de construcción o de cambio de sección.

En el análisis mineralógico de los materiales dañados se detectó un contenido de hasta un 20 a 40 % en peso de thaumasita, un compuesto sulfato-carbonatado de calcio y sílice hidratado no presente en el suelo original. También se encontraron otra serie de

compuestos, en menor proporción, fruto de la reacción entre el suelo y la cal. Entre ellos destacaba especialmente la presencia de carbonatos cálcicos y yeso, en proporciones superiores a las existentes inicialmente en el suelo. Las temperaturas detectadas en los suelos analizados se encontraban en torno a los 13ºC en la época de medición, en el mes de Noviembre.

b) El caso de Loyd Park en Joe Pool Lake en Texas (EE.UU.)

Estos casos han sido descritos en detalle por Perrin. Se trata de un conjunto de explanaciones en un parque que comprenden 9 kilómetros de vías, 4 grandes aparcamientos y una rampa de embarcadero.

El proyecto de las vías contemplaba una capa de 15 cm de espesor de suelo estabilizado con un 5 por ciento de cal.

La patología, que apareció a finales del año 1.988, se manifestó inicialmente en las vías, en las que se detectaron hinchamientos en forma de elevaciones longitudinales, transversales o incluso abombamientos que alcanzaban 10 cm de altura. La mayoría de los abombamientos se concentraban en zonas de drenaje deficiente. Además, estas deformaciones provocaban en zonas puntuales la acumulación de agua y encharcamientos que agravaban el problema de hinchamiento. Cuando existían hinchamientos en cordones transversales, la separación entre las franjas contiguas era de 3,7 a 4,6 metros.

El espesor de la capa dañada que se detectó mediante la extracción de testigos había aumentado, de los 15 originales, a unos 18-20 cm.

En algunas zonas en que se actuó mediante recompactación de la capa para la corrección de las deficiencias, éstas volvieron a manifestarse tras las primeras lluvias.

Los materiales que constituían la capa tratada eran en su mayoría arcillas arenosas y arenas arcillosas locales estabilizadas in situ o aportadas de préstamos cercanos. Existía un contenido en finos (< 0,08 mm) de un 40 a un 45 %, si bien menos del 3 % tenía un tamaño inferior a 2 µm. La composición de los suelos consistía predominantemente en sílice, yesos, pequeñas cantidades de caliza y arcillas montmorilloníticas y caoliníticas. No obstante, en los trabajos de reconocimiento previo no se había detectado visualmente la presencia de yesos.

En los estudios realizados a posteriori de los daños se detectó la presencia de niveles suficientes de sulfatos y agua como para provocar la reacción con las arcillas y la cal añadida. De hecho se verificó la existencia de ettringita y thaumasita así como de alguna otra forma intermedia entre ellas.

Los contenidos de sulfatos medidos en las zonas de mayor incidencia de los daños oscilaban entre 0,2 y 0,9 %, mientras que en el suelo primitivo los contenidos no superaban el 0,23 %. Las determinaciones se realizaron con una solución suelo-agua de 1:20.

La reparación, que se basó en reutilizar los materiales, costó cerca de 70.000 dólares.

c) Cellar High State Park en Joe Pool Lake en Texas (EE.UU.)

En este caso, también descrito por Perrin, se estudiaron 18,4 kilómetros de viales y caminos de servicio, construidas con una capa de 15 cm de espesor de suelo

estabilizado con un 6 % de cal y una rodadura de 10 cm de mezcla bituminosa.

En Noviembre de 1.988 se detectó una patología similar al caso anterior, con elevaciones longitudinales, transversales y abombamientos que alcanzaban hasta 30 cm de altura en más de 13 kilómetros de viales. La mayoría de los abombamientos se concentraban en zonas de drenaje deficiente. La distancia entre ondas paralelas transversales de hinchamientos era de 3,1 a 4,6 metros. Eventualmente se detectaron deformaciones con forma errática o no lineal. En las zonas dañadas se midieron espesores de la capa estabilizada de 18 a 23 cm, alcanzando incluso en algunos puntos los 25 cm.

En esta ocasión se realizó un estudio pormenorizado in situ que permitió deducir que las deformaciones por hinchamiento siempre se desarrollaban hacia la parte superior, nunca hacia el terreno subyacente. Sí se detectó en el contacto con el mismo, una pizarra alterada, un importante exceso de humedad e incluso acumulación de agua, indicio posible de ser este contacto una fuente de entrada o circulación de la misma. También se observaba zonas del contacto rellenas o con formaciones de yeso en grano o nódulos.

Los materiales estabilizados eran arcillas con índices de plasticidad en torno a 44. El análisis mineralógico detectó presencia abundante de sílice y caliza, moderada de yeso, illita y montmorillonita.

El análisis tras los daños de los materiales descubría que la plasticidad de los materiales apenas se había reducido por la aplicación de la cal a un índice de 31, frente al 44 inicial. El valor del pH medido in situ había descendido hasta 8,8. Las densidades secas del

material tratado dañado eran bastante inferiores que las originales, en torno a 300 kg/m^3, y los contenidos de humedad superiores en más de un 15 % a los de la capa inferior. Mineralógicamente se detectó la presencia de ettringita y de thaumasita en los suelos tratados.

El contenido de sulfatos del material tratado arrojaba valores en torno al 2,1 % con una solución suelo-agua de 1:10. Se observó que este contenido descendía a 0,5 % con soluciones 1:5.

La reconstrucción total del firme con remoción del existente alcanzó un coste de más de 1,6 millones de dólares.

d) Pistas para el aeródromo de Laughlin AFB en Spofford, Texas (EE.UU.)

Según describe Perrin, en este caso se trata de unas pistas auxiliares para movimiento de aeronaves de unos 2,4 kilómetros, construidos junto con unos viales auxiliares y zonas de aparcamiento. El proyecto contemplaba una subbase de 15 cm de espesor de suelo-cal al 6 %, una base granular y rodadura de mezcla bituminosa en las pistas y de tratamiento superficial en los viales.

A finales de 1.989, apenas dos meses después de la finalización parcial de las obras, empezaron a detectarse patologías tras las primeras lluvias y al inicio de la época de heladas. Afectaban a 600 m de pistas. Los daños aparecieron esporádica y erráticamente a lo largo de toda la superficie. Consistían, de nuevo, en ondulaciones lineales de 5 cm de altura y abombamientos de 0,5 a 4 m^2. Ocasionalmente se observaron superficies de corte y ruptura de la sección.

Los suelos estabilizados eran inicialmente arcillas con límite líquido superior a 50 e índice de plasticidad de más de 30. Tenían un contenido variable en yeso, desde las simples trazas a proporciones de hasta el 30 % a mayor profundidad. Se trataba de materiales expansivos con hinchamiento en edómetro de hasta el 16 %, que podía ser significativamente reducido mediante cal hasta valores inferiores al 0,1 %.

El agua empleada en la compactación, así como el existente en el entorno de la obra tenía un contenido en sulfatos entre 42 y 51 ppm, no especialmente alto.

En los materiales tratados se detectó una presencia importante de yesos, muy superior a la de los no estabilizados. La consistencia de la capa tratada era firme, pero ligeramente frágil.

Al analizar los materiales dañados se detectaron contenidos en sulfatos del 1,4 al 2,1 %, con valores de pH de 10,5 a 11. La plasticidad de los materiales era de 13 a 35, y se midieron humedades del 17 al 32 %. Las densidades secas del material dañado oscilaban entre 1.230 y 1.360 kg/m^3. Los ensayos de resistencia a compresión del material arrojaban valores de 1.000 a 1.400 kPa, inferiores a los exigidos en la obra.

Un hecho relevante en esta obra es que se detectaron valores de pH, contenido en sulfatos, densidad, humedad y resistencia anómalos en múltiples zonas en las que no se habían detectado daños. Ello evidenciaba que la no aparición de patología no aseguraba el buen comportamiento de la estabilización.

En los análisis mineralógicos sobre el material dañado se evidenció la presencia de ettringita.

Los firmes se reconstruyeron reutilizando la base granular una vez eliminada la capa de subbase estabilizada. El coste total de la reparación fue estimado en más de 1,4 millones de dólares.

e) Carretera M40 entre Banbury y la intersección con la M42 en Umberslade:

Este caso ha sido descrito de manera detallada por Snedker (1.996).

Incluye las incidencias en un tramo de carretera de unos 46 km ejecutado en cuatro tramos independientes bajo contratos diferentes. En tres de dichos tramos se planteó el empleo del tratamiento de suelos con cal para los materiales de coronación de explanadas, bajo las capas de subbase proyectadas. Debido al tiempo transcurrido y al cambio de la normativa entre la redacción del proyecto y la adjudicación de la obra, en aquél no se realizó estudio previo alguno de materiales para dicho tratamiento. Sin embargo sí se acometieron estos ensayos, así como las propuestas de métodos de ejecución, por parte de los contratistas adjudicatarios.

Los daños empezaron a detectarse en el tramo norte de la carretera tras el mes de Noviembre de 1.989, período de lluvia y bajas temperaturas. El inicio de los mismos se produjo cuando aún existían partes del material que no habían sido cubiertos por la base granular. En ellos se detectó una ondulación del material y un ablandamiento del mismo. La observación posterior corroboró la extensión de los desperfectos, que motivaron la remoción y sustitución del material tratado que presentó daños. Los daños se concentraron en las zonas en que se emplearon para el tratamiento unos materiales procedentes de depósitos glaciares cercanos.

En el tramo IV, construido por la misma empresa, los daños se manifestaron bastante

más tarde, cuando se había extendido incluso la capa de base de hormigón armado (23 cm) sobre una capa de suelo cemento (15 cm) y otra granular (35 cm) que cubrían el material tratado con cal (25 cm). Si bien se había observado un correcto comportamiento del firme durante el invierno de 1.989, en abril de 1.990 se detectaron deficiencias en algunas secciones transversales, abombamientos longitudinales e incluso algunas fisuras diagonales en la capa base . El estudio de los daños confirmó que se habían producido hinchamientos en tres zonas diferenciadas, alcanzando valores de hasta 150 mm de elevación.

La investigación de las zonas dañadas descubrió que el material tratado con cal había perdido gran parte de su consistencia. Se midieron así valores de CBR del orden del 1% del teóricamente correspondiente al material puesto en obra, así como humedades del orden del 55-60%.

El resto de materiales y capas no arrojaban datos de comportamiento anómalo, mientras que en la capa tratada se habían medido hinchamientos de hasta un 60% sobre su espesor original.

Tras un detallado reconocimiento y análisis de los materiales se observó que el contenido de sulfatos se había incrementado sustancialmente junto con la humedad en todos los materiales, tratados o no con cal. En los suelos tratados este hecho se había traducido en una drástica reducción del CBR y de la densidad seca del material. Asimismo, en las zonas dañadas se detectó la presencia de cristales de ettringita y thaumasita, en proporción acorde con el alcance de los daños. Como nota especial hay que indicar que en los materiales similares a los tratados que se colocaron en obra sin cal se observó la presencia de todos los “ingredientes” precisos para la formación de

la ettringita que, lógicamente, no había llegado a formarse.

En cuanto al contenido de sulfatos, se observó que no eran precisos contenidos excesivos, sino que en algunas de las zonas dañadas el nivel de éstos apenas superaban el 0,37%.

Aunque en el Reino Unido existían precedentes de daños sobre suelos estabilizados con cal, éstos se habían atribuido normalmente a deficiencias en la compactación de las capas. Es el caso de la M25 en Cambridgeshire, en la que se detectaron daños similares a los descritos en 1.983. En los casos de la M40, al haberse llevado a cabo tramos de prueba y aplicado una supervisión de los métodos constructivos, esta causa tuvo que ser desestimada.

También se planteó inicialmente una justificación fundada en que la ejecución bajo condiciones extremadamente secas no había permitido la completa hidratación de la cal viva empleada, que sí se produciría durante las épocas lluviosas. Esta hipótesis fue desechada por ensayos de laboratorio que demostraron que, si bien este proceso puede generar algún hinchamiento, ni su magnitud ni su duración es similar a la medida en la patología detectada.

Finalmente hay que indicar que del análisis de los materiales que se trataron y del agua existente en el entorno, así como de la empleada en la construcción se dedujo la imposibilidad de que el incremento de contenido en sulfatos pudiera provenir de fuentes externas. Tras un minucioso estudio se detectó la presencia de pirita y sulfatos no solubles a los que se imputó la responsabilidad del citado aumento por procesos de oxidación o similares que provocarían su participación en las reacciones producidas. Esta

imputación se deducía del hecho de que en los materiales tratados no se detectaba dicha presencia, que sí se mantenía en los no tratados en proporciones superiores al 7,7%. Se argumentaba entonces que la ejecución de la estabilización pudiera haber permitido la oxidación de los sulfuros, proceso que en los materiales no tratados no se habría llegado a consumar.

Al igual que en otros de los casos descritos, en las zonas dañadas se evidenció la formación de formas secundarias de yeso.

Como conclusión de la descripción del caso hay que mencionar el gran espesor del paquete de firme dimensionado ya descrito, que junto con el pavimento bituminoso estaba compuesto por un paquete multicapa de más de un metro de espesor. Gracias a este generoso dimensionamiento los daños pudieron traducirse en una reducción de la vida útil esperada de la sección sin necesidad de su reconstrucción o eliminación. En cuanto a las deformaciones descritas, su reparación fue acometida mediante sucesivas operaciones de refuerzo y reperfilado que cesaron a los dos años (Abril de 1.992) en que se evidenció el descenso del pH en la capa dañada y la atenuación del proceso de deterioro de la misma.

f) La autopista A28 de Alençon a Tours, en Francia:

El tramo comprendido entre Le Mans y Maresché de la autopista A28 es otro caso de los descritos detalladamente en la bibliografía, en este caso por Baryla y otros (2.000).

En este tramo el firme se construyó con una "capa de forma" de suelo tratado de 35 cm de espesor, sobre la que se dispuso una capa base de 16,5 cm de grava-emulsión y una rodadura de 3 cm de mezcla bituminosa. La escasa sección portante de este

firme se justifica en una estrategia de construcción por fases adaptada al tráfico al tratarse de contratos de construcción y explotación.

En el tramo en cuestión, el material base estaba constituido por unas margas con un 93,7% de finos (que pasan por el tamiz de 80 µm), un índice de plasticidad en torno a 17,4 y humedad natural de un 18,8%. Mineralógicamente presentaban un 10-15% de esmectita en la fracción fina, con algo de esmectita e illita. Una característica de estos suelos era la escasa resistencia a compresión conservada tras la inmersión, que alcanzaba valores del 16 al 27 % de la original. Para solventar este problema se proyectó su estabilización, con lo que se obtenían resistencia conservadas de hasta un 93%.

La "capa de forma" proyectada para este tipo de material consistía en un tratamiento in situ con aplicación de un 1% de cal y un 8% de ligante especial. Tras la ejecución de un tramo de prueba, se decidió su construcción en dos capas (20+15 cm) sucesivas e inmediatas con humedades de compactación en torno a 2 a 4 puntos por encima de la óptima de ensayo próctor modificado y densidades del 92,5% de la máxima de dicho ensayo.

Apenas dos semanas después de la finalización de la capa, en Septiembre de 1.998, después de unas precipitaciones importantes, aparecieron deterioros que afectaban a unos 4 km en ambas calzadas. Se manifestaban principalmente por unas deformaciones anómalas originadas por el paso del tráfico.

La investigación de las causas de los daños se centró en la posibilidad de existencia en las margas de sulfuros que por oxidación pudieran haberse transformado en sulfatos

y reaccionado con los silicatos y alúmina para generar la ettringita o, más concretamente, la thaumasita que fue detectada en las muestras analizadas.

Desechada la participación sustancial en la aportación de sulfatos del agua de compactación y de los propios ligantes aportados, el estudio se centró en los suelos, en los que se detectaron contenidos totales en compuestos de azufre promedio de un 0,8% con valores extremos de más del 2%, muy superiores a los de los suelos sin tratar.

Como conclusión de los análisis y de ensayos específicos de hinchamiento bajo condiciones de curado acelerado, se adoptó el criterio de reconocer como suelos no aptos para el tratamiento a aquéllos que tenían un contenido en compuestos de azufre superior a un 1%.

Para reparar las vías dañadas se procedió a la sustitución completa de las capas tratadas.

3.- Conclusiones de la patología descrita

De la descripción detallada recogida en el apartado anterior sobre las patologías más abundantemente estudiadas, es posible extraer una serie de analogías o puntos comunes interesantes de resaltar:

Con respecto a las características y estado de los **suelos iniciales**, antes de ser tratados con cal:

* En todos los casos los materiales tratados eran suelos arcillosos en los que se detectaba la presencia de montmorillonitas, y, en algunos, caolinitas o illitas.

* El tratamiento de dichos suelos consistía en la aplicación de entre un 4,5 % y un 6 % de cal en peso.

* Los contenidos de sílice, caliza y otros carbonatos en los suelos originales, aún estando presentes, no eran anómalos.

* En todos los suelos iniciales se había detectado la presencia de sulfatos, aunque en proporciones no alarmantes.

* En algunos de ellos se detectó también la presencia de sulfuros.

* Todos los materiales eran moderadamente expansivos.

* Todas las capas afectadas estaban en contacto por su cara inferior con el terreno natural, bien por ser capas de subbase bien por ser capa única de firme.

En relación a los resultados de las **investigaciones una vez producidos los daños**:

* La mayoría de los daños se habían producido una vez que los materiales habían soportado lluvias y, en algunos casos, en épocas de heladas.

* La edad de aparición casi siempre fue superior a los seis meses, sin que se detectara una paralización de los mismos incluso más allá de dos años.

* Las manifestaciones más alarmantes de los daños se traducían en hinchamientos del material tratado de hasta más de un 100 % con respecto al volumen inicial.

* Estos hinchamientos se traducían sintomáticamente en elevaciones de la superficie del pavimento, llegando incluso a su rotura por corte, solape y deslizamiento de los

labios de una misma fractura generada en la capa tratada.

* En ningún caso se habían producido deformaciones significativas hacia la parte inferior o “intrusiones” de la capa tratada en el terreno natural subyacente.

* Las ondulaciones o elevaciones se manifestaban en cordones transversales o longitudinales, incluso en otras direcciones, en función de la geometría superficial del vial o pavimento.

* En los materiales tratados que habían manifestado daño se detectaban las siguientes características:

- Pérdida de resistencia de hasta un 50 %;

- Exceso de humedad en un 15 % sobre la circundante;

- Disminución de la densidad seca a valores inferiores a 1,2 Tm/m^3;

* En la exploración del entorno de las zonas tratadas se evidenciaban deficiencias en el drenaje, incluso con acumulaciones locales de agua en el contacto con el terreno natural. En algunos casos junto a las zonas más afectadas existían claras vías de entrada de agua, tales como drenes, juntas de pavimentos, etc..

* El análisis mineralógico de los materiales alterados mostraba altos contenidos en ettringita o thaumasita, en proporciones de hasta un 20 a 40 % de la masa de suelo analizada. Se trata de compuestos sulfato carbonatados de calcio y sílice hidratados que en ningún caso se hallaban en la formación inicial del suelo antes de su tratamiento.

* De trabajos experimentales, corroborados por la universalidad de los daños en los

casos comentados, se deduce que la formación de ettringita se producía tanto en las caolinitas como en las montmorillonitas, cuando existían ambos tipos de arcilla.

* En zonas que no habían manifestado patología pero en las que se evidenciaba la presencia de ettringita, la consistencia de los materiales era muy superior a la de las zonas dañadas.

* Las temperaturas invernales alcanzadas en la mayoría de los casos eran inferiores a 15 ºC.

* El contenido en sulfatos de los suelos alterados alcanzaba valores altos, en torno más del 2 %, y, en todo caso, muy superiores a los inicialmente detectados en el suelo antes de ser tratado. Incluso se detectó la formación de nódulos y rellenos de yesos en grietas y fisuras del contacto con el terreno natural.

* La reparación mediante simple escarificado y recompactación de los materiales no solucionaba el problema, que volvía a aparecer. Este hecho se ha ratificado en algunas experiencias de laboratorio en los que se comprueba que el hinchamiento de los materiales tratados evoluciona de manera creciente a los largo de varias semanas e incluso meses, mientras que en el suelo natural suele estabilizarse a los pocos días de la inundación de las muestras.

Como resumen de los casos analizados es evidente que el tratamiento de suelos arcillosos con cal había alterado los mismos de manera desfavorable provocándoles un hinchamiento excesivo y en todos los casos muy superior al esperado incluso del propio suelo sin tratar. Las causas parecían deberse a la formación de productos del tipo de la ettringita o thaumasita, derivados de la reacción de la cal con sulfatos en ambientes especialmente

húmedos. La presencia de sulfatos en el material alterado evidenciaba la necesidad de una aportación externa o diferente a la simple disolución de los sulfatos solubles presentes inicialmente, al obtenerse proporciones muy superiores a las iniciales.

Estos hechos, unidos a lo alarmante de los daños y al coste de las reparaciones incitaron a una serie de investigaciones y estudios tendentes a evaluar los riesgos que la aplicación de la cal tenía sobre los suelos arcillosos, en especial ante el riesgo de la presencia de sulfatos solubles.

4.- Mecanismos que intervienen en el proceso

El efecto perjudicial de la posible reacción de los sulfatos con la cal en el tratamiento de suelos es conocido hace tiempo. Así ya en 1.972 un informe de la "California Division of Highways" alertaba sobre el riesgo de hinchamientos de hasta el 4 por ciento e incluso, bajo condiciones de saturación, de la "desintegración" del material tratado.

No obstante, no ha sido hasta la aparición de los principales casos de patología descritos cuando se ha investigado con la suficiente profundidad que permita obtener una explicación detallada y justificada de los procesos que generan este proceso. En los apartados siguientes se resumen las líneas que gobiernan el fenómeno de la interacción entre los sulfatos presentes en el suelo y la cal añadida, expuestas en las diversas referencias de los principales autores.

4.1.- Las reacciones entre la cal y los sulfatos

Aunque el proceso de formación de los compuestos químicos que intervienen en la reacción entre la cal y los sulfatos es complejo, se puede esquematizar con las siguientes series de reacciones, según Hunter (1.988). Las reacciones que se exponen a continuación,

dentro del complicado abanico de posibilidades existentes se han detallado para el caso de la aplicación de cal a arcillas del tipo de las montmorillonitas en que se produce la ettringita. Otras posibilidades y productos derivados se comentarán en los apartados siguientes.

Expuesto por fases, el esquema de reacciones es el que sigue:

a) El primer proceso que se produce en la aplicación de la cal a un suelo arcillosos es la reacción puzolánica ya mencionada en capítulos anteriores mediante la que los componentes básicos que son el óxido de calcio, el agua y la sílice y/o alúmina de la arcilla (remarcados en letra negrita), se combinan para dar lugar a silicatos y aluminatos cálcicos hidratados. En el caso de la montmorillonita estas reacciones se producen según el siguiente esquema:

1) Hidratación de la cal viva aportada en el tratamiento, en caso de que ésta sea la forma de aplicación:

$$\mathbf{CaO} + \mathbf{H_2O} \rightarrow Ca(OH)_2$$

2) Disociación del hidróxido de calcio formado con elevación del pH (~ 12,3):

$$Ca(OH)_2 \rightarrow Ca^{++} + 2\ (OH)^-$$

3) Disolución de la sílice y alúmina presentes en las arcillas del suelo, que es propiciada por los valores de pH altos (> 10,5) generados por la reacción anterior:

$$\mathbf{Al_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot}\ \boldsymbol{n}\ \mathbf{H_2O} + 2\ (OH)^- + 10\ H_2O \rightarrow$$

$$\rightarrow 2\ Al(OH)^-_4 + 4\ H_4SiO_4 + n\ H_2O$$

4) Disociación del ácido silícico generado:

$$2\ H_4SiO_4 \rightarrow 2\ H_3SiO^-_4 + 2\ H^+ \rightarrow 2\ H_2SiO^{=}_4 + 2\ H^+$$

5) Reacción entre los iones silícicos y cálcicos generados para formación de los silicatos y aluminatos cálcicos hidratados, productos cementantes beneficiosos para el tratamiento del suelo con la cal:

$$5\ Ca^{++} + 6\ H_3SiO^-_4 + 4\ OH^- \rightarrow Ca_5(Si_6O_{18}H_2) \cdot 4\ H_2O + 6\ H_2O$$

Este grupo de reacciones correspondería, como se ha dicho, a las que se deberían producir en el proceso normal de la reacción puzolánica.

En realidad existe una gran variedad de formas en los que se pueden manifestar los hidratos obtenidos, dependiendo del tipo y cantidad de cal, características del suelo, tiempo de curado y temperatura.

b) Si en el suelo existen sulfatos solubles es posible su disolución, que se desarrollará en líneas generales según el siguiente esquema:

$$M_xSO_4 \cdot n\ H_2O \rightarrow X\ M^{y+} + SO^{=}_4 + n\ H_2O$$

Los valores de *"x"*, "*n"* e *"y"* dependerán del tipo de sulfato y del catión M que lo compone.

c) La interferencia de los iones sulfato desprendidos con los de calcio y de hidróxidos de aluminio libres se produce cuando existe cantidad suficiente de ellos en el medio. Se produce entonces como consecuencia de ello un sulfato aluminato de calcio hidratado conocido en esta forma como **ettringita** (en letra negrita), según la

siguiente reacción:

$$6\ Ca^{++} + 2\ Al(OH)^{-}_{4} + 4\ OH^{-} + 3\ (SO_4)^{=} + 26\ H_2O \rightarrow$$

$$\rightarrow \mathbf{Ca_6[Al(OH)_6]_2 \cdot (SO_4)_3 \cdot 26\ H_2O}$$

Evidentemente el compuesto conocido como ettringita es el que constituye el producto de la reacción.

Nótese que la reacción anterior necesita para su generación detraer los cationes de calcio que, en caso contrario, darían lugar a la reacción que forma los componentes puzolánicos, incluida en el punto a.5) anterior. Por tanto, con esta reacción se evidencia la interferencia de los sulfatos en el tratamiento del suelo con cal.

Además, para que continúe la producción de esta reacción es preciso que el pH se mantenga por encima del valor de 10,5, dado que en caso contrario no se liberará la alúmina o sílice precisa, según se indicó en la reacción del punto a.3).

Hay que incidir en la complejidad de la molécula de ettringita, que además de ser una forma con alto contenido en sulfato, incluye en su composición nada menos que 26 moléculas de agua.

Llegados a este extremo, una vez agotadas todas las fuentes de reactivos y formada toda la ettringita posible, el proceso se detendría.

Hay que decir que, si bien el proceso se ha ilustrado para describir la formación de ettringita, que es un compuesto de trisulfato, existe otro compuesto cuya generación es posible: El **monosulfoaluminato**. Ambas son las únicas formas de sulfato

aluminato de calcio hidratado que son estables en medio acuoso.

La diferencia entre ambos es que el monosulfoaluminato se genera en medios con un contenido alto en alúmina en relación a la presencia de sulfatos, mientras que la formación de la ettringita se ve favorecida por medios con bajo contenido relativo en alúmina o altos en sulfatos. Debido a ello, en las primeras etapas de la vida de un suelo con cal puede detectarse con más probabilidad la presencia de monosulfoaluminato. Este hecho se justifica en que la reacción anterior es muy rápida, mientras que la disolución o aportación de sulfatos al medio puede ser lenta e incluso llevarse a cabo en varios meses o años. En este caso, en el período inicial es probable que, con pequeñas aportaciones relativas de sulfatos en proporción a la alúmina ya presente en el suelo, se propicie la generación de la forma de "bajo sulfato". Una vez que el nivel relativo de sulfatos se incrementa, bien por efecto de la disolución progresiva bien por la mayor aportación de agua, el compuesto puede evolucionar a la forma de "alto sulfato", o ettringita. La composición final será pues función de la proporción relativa de iones.

Otro factor a considerar para evaluar la forma del producto que se presentará es que, el monosulfoaluminato es estable en condiciones de humedad altas cuya desaparición lo hace inestable. Sin embargo la ettringita no se altera por cambios en la humedad del medio a estados incluso secos.

d) Si la temperatura del medio baja de 15ºC, se produce una transformación del compuesto generado, ettringita, a otra forma conocida como thaumasita. Esta modificación se produce por una serie de cambios factibles a dicha temperatura que provocan la sustitución de silicatos por aluminatos y de sulfatos por carbonatos.

Para ello se deben producir las siguientes reacciones parciales:

1) Formación de ácido carbónico:

$$CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3$$

2) Disolución de la caliza en el ácido carbónico generado:

$$CaCO_3 + H_2CO_3 \rightarrow Ca^{++} + 2\,H^{+} + 2\,CO^{=}_3$$

3) Sustitución estructural de los iones de aluminato y sulfato por silicatos y carbonatos para dar lugar a la thaumasita (en letra negrita):

$$Ca_6[Al(OH)_6]_2 \cdot (SO_4)_3 \cdot 26\,H_2O + 2\,H_2SiO^{=}_4 + 2\,CO^{=}_3 + O_2 \rightarrow$$

$$\rightarrow \mathbf{Ca_6[Si(OH)_6]_2 \cdot (SO_4)_2 \cdot (CO_3)_2 \cdot 24\,H_2O} + 2\,Al(OH)^{-}_4 + SO^{=}_4 +$$

$$4\,OH^{-} + 2\,H_2O$$

4) Finalmente y como reacción derivada de la disolución de la caliza y de la liberación de sulfatos se producen formas secundarias de yeso que son indicadoras de la reacción anterior. El proceso se rige por la reacción siguiente:

$$Ca^{++} + SO^{=}_4 + 2\,H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2\,H_2O$$

5) De igual manera, en caso de que exista un exceso de iones carbonato no consumidos en la formación de thaumasita, se produciría una forma secundaria de caliza según la siguiente reacción:

$$Ca^{++} + CO^{=}_3 \rightarrow CaCO_3$$

Es evidente que para que se produzca el mecanismo de formación de la thaumasita es imprescindible la presencia en el medio de carbonatos solubles, que permitan la sustitución descrita.

De nuevo, al igual que ocurría con la formación de la ettringita, hay que indicar que para que el proceso de formación de thaumasita se produzca o mantenga, el pH debe alcanzar valores superiores a 10,5 que permitan la liberación de los aluminatos que participan en la reacción.

No obstante, la influencia del pH en la formación de la thaumasita es más crítica aún que en la de la ettringita. Esto se debe a que mientras que los valores altos del pH contribuyen a la liberación de la sílice ya descrita, reducen sin embargo la solubilidad de las calizas, que deben liberar los carbonatos para la sustitución. Por tanto, para que se produzca la transformación de la ettringita a thaumasita, es preciso que el medio alcance un compromiso en el valor de su pH que permita el equilibrio adecuado entre las solubilidades de los productos implicados.

Hay que indicar que el fenómeno descrito, según se deduce directamente de las reacciones analizadas, afecta a los suelos tratados con cal en cuanto que interfieren los mecanismos de su modificación a largo plazo. Es decir, las reacciones entre la cal y los sulfatos pueden inhibir los incrementos de resistencia derivados de lo que se ha denominado como reacción puzolánica. Todos los demás efectos inmediatos, como la mejora de trabajabilidad, secado, reducción de plasticidad, etc. no se ven afectados por este fenómeno.

4.2.- Condicionantes para la reacción entre la cal y los sulfatos

Como conclusión de la compleja serie de reacciones expuesta en el apartado anterior,

hay que extraer la idea de que, en medios fundamentalmente básicos (pH > 10,5) la formación de los productos cementantes que provoca la aplicación de la cal a un suelo arcilloso puede verse interferida por la presencia de sulfatos solubles en éste. Esta interferencia se traduce en la aparición de unos productos complejos, sulfato-aluminatos de calcio hidratados, que detraen del medio para su constitución el ion de calcio libre aportado por la cal.

Evidentemente, para que este hecho se produzca deben confluir una serie de circunstancias ineludibles:

a) Parece lógico establecer como primer factor condicionante la **presencia de alúmina en el suelo** que proporcione la materia para la constitución de los sulfato-aluminatos. Sin embargo esta presencia es casi general en los suelos arcillosos susceptibles de ser tratados con cal y, por otra parte, imprescindible si se persigue el efecto de la reacción puzolánica o de mejora a largo plazo. En este sentido, parece demostrado que contenidos en partículas arcillosas inferiores al diez por ciento no propician la generación de los fenómenos descritos. Junto con la tipología de la arcilla también influyen su granulometría y superficie específica como propiedades asociadas en cierto modo.

b) Presencia de **iones de calcio libre** en cantidad suficiente para promover la formación de los productos. Este disponibilidad será función de la cantidad de cal añadida al suelo, siendo más viable en tratamiento “generosos” de los aquí conocidos como estabilización de suelos.

c) Presencia de **sulfatos solubles** en el suelo a tratar, de nuevo en cantidad representativa para producir el fenómeno. Hay que indicar como posible variante a esta

necesidad que los sulfatos pudieran también provenir de una aportación externa, por ejemplo, a través de flujos de agua incontrolados que afecten al material tratado. En principio parece suficiente para iniciar el proceso de formación de ettringita un contenido del orden del 0,3 %. No obstante, la mayoría de los daños se asocian a un aporte permanente y continuado de sulfatos, bien por la disolución lenta del yeso existente en la masa del suelo, bien por aportes mediante percolación de agua, según se verá más adelante.

Como también se ha explicado anteriormente, el factor tiempo en cuanto a la **velocidad de disolución o de aportación** de los sulfatos condiciona la forma del compuesto obtenido, que podrá ser de "bajo sulfato" o monosulfoaluminato, o de "alto sulfato" o ettringita.

Dentro de este factor condicionante hay que mencionar también la influencia del **tipo de sulfatos** presente por cuanto puede condicionar su efecto perjudicial. Así, los sulfatos magnésicos son potencialmente más perjudiciales que los de sodio o calcio.

d) Presencia de un **medio básico**, condición que es algún modo redundante con la existencia de cal libre disponible. Si se recuerda que la aplicación de cal tiene como consecuencia inmediata la elevación del pH, esta limitación deja de ser tal en el tratamiento de suelos que aborda este documento. Además, se ha evidenciado experimentalmente que el descenso del pH provoca un aumento en el tamaño de los cristales de ettringita y una modificación en su forma, haciéndola más acicular y, por tanto, dañina.

e) Presencia de **agua** en cantidad suficiente para permitir:

* De un lado la disolución de los sulfatos de la masa del suelo, o su transporte en la variante de aportación externa mencionada; y

* La formación de la molécula de los sulfato-aluminatos, en cuya constitución intervienen entre 24 y 26 moléculas de agua.

En relación a este último factor, la presencia de agua, hay que indicar que se ha evidenciado en algunos casos como el de Las Vegas, Hunter (1.988), que los iones que han contribuido a la formación de los compuestos nocivos no se encontraban en la masa inicial del suelo. Esto significa que ha sido precisa su aportación desde el exterior, para lo que hay que contar con la **presencia de agua abundante y en circulación** que permita la migración correspondiente.

En paralelo a la presencia de flujo de agua que eventualmente pudiera ser precisa para la aportación de sulfatos desde el exterior habría que mencionar, aunque como factor secundario, la permeabilidad de la masa del suelo, que debe permitir dicho flujo. Inicialmente no merece mayor comentario este factor en lo referente a la masa del suelo, si bien sí en las posibles vías de entrada de agua no controladas (drenes sin revestir, cunetas rotas, juntas constructivas, etc.).

Satisfechos los requisitos anteriores podría en teoría asegurarse la formación de la ettringita cuando en un medio compuesto de un suelo con alto contenido en sulfatos se adiciona cal y se mantiene la humedad suficiente. Esta forma del producto es la más habitual y conocida de los sulfato-aluminatos que pueden generarse en el proceso.

Pero no es la única forma. Existen una serie de compuestos que generan una sucesión continua a partir de ésta básica y que son susceptibles de aparición por sustitución de los

diversos componentes de su molécula en condiciones adecuadas. El paso de este compuesto obtenido a otras formas de sulfato-aluminatos estará regido, no obstante, por otros factores. Entre ellos se pueden citar los siguientes:

f) La transformación de la ettringita en **thaumasita** requiere la **presencia de carbonatos** solubles en el medio.

g) También para ello es preciso el **descenso de la temperatura** por debajo de los 15ºC. A temperaturas superiores a la citada, la ettringita es un compuesto estable.

h) No obstante la necesidad de un medio básico para la formación de la ettringita, para su conversión en thaumasita es preciso **un control del pH** en torno a los valores descritos, sin oscilaciones extremas mayores. Así, reducciones mayores del pH pueden provocar que no se forme la thaumasita o incluso en el caso de la ettringita, que se forme yeso como producto más estable.

i) En cuanto a la posibilidad de formación de otros compuestos, ésta es función de **la tipología de las arcillas** presentes. Así el tratamiento de suelos del tipo de las montmorillonitas, de bajo contenido en alúmina, es más proclive a la formación de ettringita. Pero si el material arcilloso es del tipo de las caolinitas, con mayor cantidad de alúmina, es más probable la formación del **monosulfoaluminato**. En general, cuando la proporción entre alúmina y sulfato es inferior a 1, como es el caso de las montmorillonitas, la ettringita se presenta como una forma estable.

j) Hay que citar también que en condiciones favorables y a medio plazo, los compuestos generados de **monosulfoaluminato pueden trasformarse en la forma de trisulfato** o ettringita. Este paso se ve favorecido, entre otros factores, por

el incremento de la temperatura y por el **aumento sustancial de la presencia de sulfatos** en relación con la alúmina.

k) Finalmente, como sugerencia aportada por algunos autores hay que mencionar la influencia que en la formación y transformación de todos estos productos tiene la **presencia de compuestos de azufre diferentes a los sulfatos solubles** para la aportación de los incrementos sustanciales detectados en los materiales tratados. Así, procesos como la oxidación de los sulfuros pueden originar dichos aumentos, no justificables en diversas ocasiones por la mera aportación externa por percolación o filtración de aguas del entorno.

4.3.- Características de los productos generados

El mecanismo de detracción de la cal que ocasionan los sulfatos no tendría mayor efecto nocivo que la inhibición de la reacción puzolánica si no fuera porque, además, los productos que se generan son altamente expansivos.

Pero el verdadero peligro de la formación de los sulfato-aluminatos de calcio hidratados es su expansividad, que es función de la forma de compuesto que se genere entre las descritas.

Así, aunque el monosulfoaluminato es un compuesto que no manifiesta expansividad cuando se somete a inundación, la ettringita bajo incrementos de humedad sufre procesos de hinchamiento relevantes. De la misma manera la thaumasita también es un producto expansivo. Así, es posible decir que la reacción fundamental que gobierna el proceso:

monosulfoaluminato + sulfatos + agua ➜ ettringita

conlleva unos incrementos de volumen cercanos al 250 %.

Estructuralmente la justificación de esta expansividad se encuentra en la forma y crecimiento de los compuestos que se producen. Los cristales de ettringita se presentan como prismas hexagonales alargados. Presentan formas de aguja y se agrupan en forma de "columna" creciente a lo largo de su eje. Inicialmente la expansividad de este producto es función del tamaño de los cristales formados. También se atribuye la expansividad a la gran capacidad de adsorber agua en su estructura que tiene la ettringita. Además el hecho de su forma acicular contribuye a la desestabilización o rotura de la posible masa homogénea que se pudiera haber generado en el tratamiento de suelos arcillosos con cal.

Sin embargo las formas de estructura de la ettringita estable en una masa de suelo aportan valores de resistencia relativamente altos. Por tanto, el efecto nocivo de la ettringita hay que ubicarlo, más que en sus características intrínsecas, en que su formación y crecimiento suponen la rotura de la estructura del suelo.

Los monosulfoaluminatos, por otra parte, tienen una estructura tipo laminar. Como consecuencia de ello, presentan una baja resistencia a la compresión axial. No obstante su aparente carácter "benigno", hay que recordar que es posible en ciertas condiciones que estas formas evolucionen a las de la ettringita.

Parece una evidente conclusión de lo anterior que la formación de los productos del tipo de la ettringita que pueden alterar la estructura de un suelo tratado sólo producirán un efecto destructor de la estructura si ésta ya se ha formado. Es decir, el efecto de la producción en las primeras fases de la vida del material, cuando aún tiene una consistencia "plástica", incluso antes de la reacción puzolánica si se lleva a cabo, además de no ser perjudicial puede incluso

llevar a una mejora parcial de resistencia. Por poner un ejemplo gráfico, en estructuras de suelo en formación, la ettringita se "acomoda" en el mismo y aumenta incluso su resistencia por los "refuerzos" que introduce. Por el contrario, en estructuras rígidas conformadas para su desarrollo total procede a la rotura de aquella parte de las mismas que interfieren en su crecimiento.

En los casos en los que se ha detectado la aparición de ettringita, casi siempre se comprueba también la existencia de thaumasita. Como se ha detallado en el apartado anterior, el primer producto en aparecer es la ettringita, que lenta y posteriormente puede transformarse en thaumasita en determinadas condiciones. Esta reacción de transformación también conlleva un incremento de volumen sustancial.

En relación a la participación de estos compuestos en los daños detectados, no existe aún certeza de que los mismos sean producidos por la ettringita en la fase inicial de su formación, o por el proceso de transformación y crecimiento posterior de la thaumasita.

4.4.- Efecto sobre las estructuras de firme

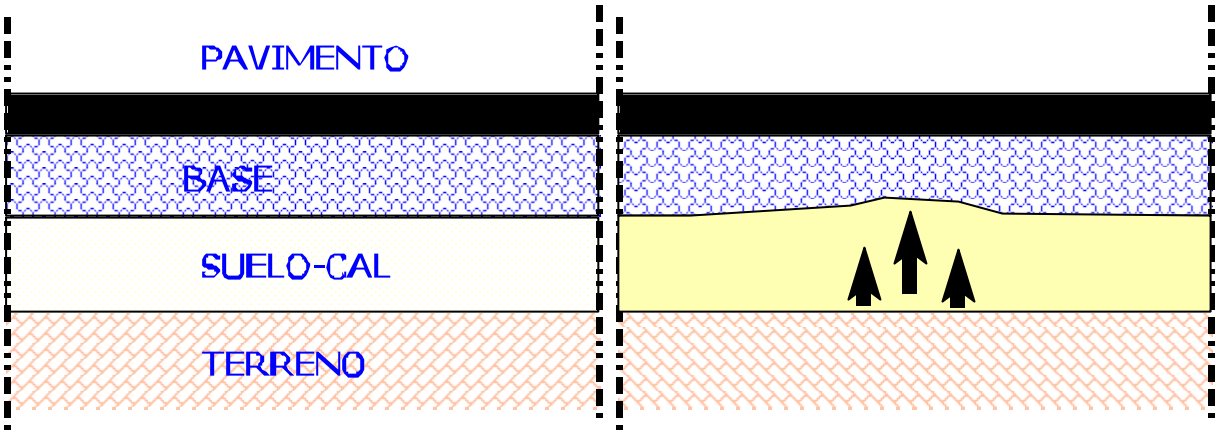
Como consecuencia de la formación de los productos expansivos, se genera en las estructuras de tierra o firme dispuestos una serie de fenómenos que derivan en la patología descrita.

El esquema que rige en líneas generales el colapso de las estructuras multicapa por el hinchamiento desproporcionado de una de ellas se explica en las siguientes figuras.

En la primera de ellas se recoge la estructura inicialmente construida, ilustrada como un conjunto de tres capas sobre un terreno natural. La capa inferior es la que se supone está

ejecutada con un suelo tratado con cal.

En la segunda figura se observa cómo se inicia el hinchamiento en una zona o punto determinado, provocado por las reacciones descritas. El hinchamiento en sus primeras fases tan sólo tiene un efecto local que puede incluso no llegar a manifestarse en superficie.

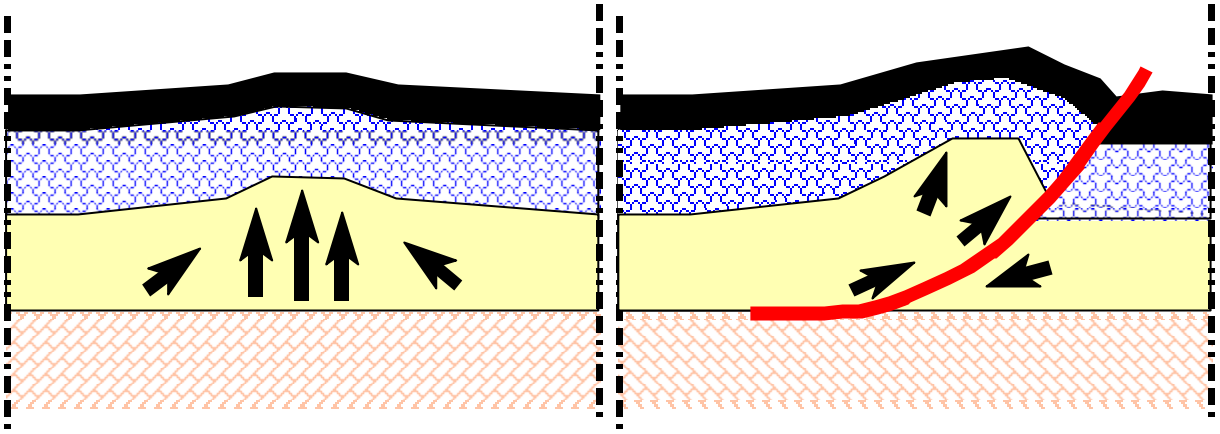


Configuración inicial del firme

Se inician los procesos de hinchamiento

En la tercera figura, una vez el hinchamiento adquiere mayores dimensiones, se ve cómo empieza a reflejarse en la capa de pavimento mediante abombamiento del mismo. Como se ha detectado en los casos reales analizados, lo más frecuente es que la transmisión de los incrementos de volumen se realice siempre hacia la parte superior, donde existe un menor confinamiento de las capas.

Finalmente, si las fuerzas internas generadas por el hinchamiento adquieren un magnitud relevante, con proporciones de incremento de volumen de más del 100 %, se puede llegar al colapso y rotura del firme. Éste se produce al generarse una superficie de deslizamiento que da salida al “nuevo volumen” rompiendo las capas superiores y provocando la aparición de grietas en superficie.



El hinchamiento se manifiesta en superficie Se produce la rotura del firme

El hecho de la presentación de la línea de grieta o de hinchamientos con apariencia transversal o longitudinal estará más ligado a la vía de entrada de agua que origine la patología. Así, en el caso de existir juntas longitudinales o contactos de borde que sean los detonantes del proceso, éste se manifestará mediante ondulaciones con eje longitudinal. En caso de no existir estos elementos y, por ejemplo, tratarse de una humectación e hinchamiento generalizado, la manifestación podría reflejarse más bien como una sucesión de ondas transversales, que dan salida a los tremendos esfuerzos generados en sentido longitudinal.

5.- Recomendaciones constructivas y de diseño

Del análisis de los apartados anteriores se deducen las líneas maestras que gobiernan el proceso de formación de productos nocivos en el tratamiento de suelos arcillosos con contenido en sulfatos mediante la aplicación de cal. Y se establecen las requisitos imprescindibles para ello. Pero no se extraen parámetros indicadores del riesgo de su aparición.

En el estado actual de la técnica parece difícil discretizar el amplio espectro de posibilidades de manera que pueda tratarse cualquier problema genérico mediante protocolos

normalizados o recomendaciones generales. Es claro que las situaciones extremas de ausencia de sulfatos solubles o de altos contenidos (> 1%) marcan también los extremos de probabilidad nula o casi cierta de ocurrencia de los fenómenos. Al menos en ausencia de otras interferencias como pudieran ser aportaciones externas desproporcionadas o presencia de otras formas de compuestos de azufre.

Pero supone un reto abordar el resto de las situaciones intermedias que, al fin y al cabo, son las que usualmente se presentan en la práctica habitual de un constructor o proyectista. Y, tal y como se ha expuesto en la introducción a este documento, es cada vez más necesario resolver estas situaciones y evitar la fácil y conservadora solución de desechar un material para una construcción por el sólo hecho de desconocer el riesgo que se asume en su utilización.

Parece evidente, a la vista de los complejos procesos y agentes descritos, que para abordar la problemática del posible tratamiento mediante cal de un suelo con sulfatos hay que adoptar una serie de precauciones o prever una serie de pasos o medidas que se pueden agrupar en las siguientes etapas o estadios:

a) Estudios previos de caracterización elemental o de los componentes;

b) Estudios específicos de hinchamiento de las mezclas; y

c) Modificación del proceso constructivo.

A continuación se extractan las principales propuestas establecidas por los autores más versados en estos temas, algunas de ellas aún en fase de investigación.

No se recogen en las pautas indicadas a continuación los esquemas o protocolos

habituales de ensayos de materiales (identificación, resistencia, compactación, etc.), por considerar que su descripción es innecesaria y que en todo caso son procesos a abordar de igual manera que si en el suelo no existieran los riesgos que se pretenden conocer o evaluar.

5.1.- Estudios previos de caracterización elemental o de los componentes

Evidentemente, para abordar la posibilidad de presentación de patología en el tratamiento con cal de un suelo arcilloso achacable a la presencia de sulfatos, la primera e ineludible tarea a acometer es la identificación y análisis del suelo o material base a tratar. Posteriormente se deberá proceder al análisis del entorno de la zona en que se ubica el material, al objeto de evaluar su posible influencia en el mismo.

Desde el interés en recoger cuantas aportaciones se han ido enumerando en este capítulo, hay que incidir en la necesidad de considerar una serie de aspectos especiales a tener en cuenta en este reconocimiento, que deberá salirse de la pauta común por cuanto lo es el riesgo a asumir. Así deberán considerarse las siguientes premisas:

a) En primer lugar es preciso **caracterizar mineralógicamente el material arcilloso**, dado que se ha explicado que la mayor o menor presencia de alúmina, influye en la posible generación de los compuestos en sus formas menos nocivas, monosulfoaluminato, o más dañina, como la ettringita.

Esta caracterización se centra fundamentalmente en distinguir la proporción de caolinita o montmorillonita que existe en el material. Deberá abordarse por medios indirectos, como evaluar la plasticidad o granulometría de la fracción fina, o por medios directos a través de estudios mediante microscopio electrónico o difracción de rayos X.

b) El segundo aspecto específico a analizar en estos casos es la **presencia de sulfatos en el suelo**. Como se ha mencionado anteriormente, si bien el reconocimiento del contenido en sulfatos solubles se podría considerar un ensayo habitual, hay que proponer en estas situaciones la realización de reconocimientos especiales, dada la influencia que algunos autores atribuyen en este proceso a la presencia tanto de **sulfatos no solubles** como a la de los **sulfuros y otros compuestos de azufre**. Por ello, deben realizarse procesos analíticos que identifiquen estos compuestos y los comparen con las proporciones obtenidas de sulfatos solubles.

También hay que recordar que es preciso determinar el **tipo de sulfatos** presente por cuanto puede condicionar su efecto perjudicial. Así, los sulfatos magnésicos son potencialmente más perjudiciales que los de sodio o calcio.

De igual manera la tipología de los sulfatos incide en la representatividad de los valores obtenidos en la determinación. Según Little y otros (1.992), cuando los sulfatos son cálcicos la cantidad disuelta en el ensayo es más representativa que, por ejemplo, cuando se trata de compuestos sódicos o potásicos.

c) No obstante los análisis anteriores hay que abordar el tema de la **representatividad de las muestras ensayadas**. Es práctica habitual en las obras de tierras analizar para la identificación muestras de varios gramos que se suponen son representativas de entre 5.000 y 10.000 metros cúbicos del material a colocar en la obra. Dada la característica de los daños previsibles, bastante localizados y a veces discontinuos, y la de los propios sulfatos, que pueden presentarse en nódulos o concentraciones locales, este análisis estadístico deja bastante que desear. Por ello hay que realizar un muestreo más intenso en las zonas con riesgo de manera que pueda

evaluarse la **dispersión de los resultados** de contenidos en sulfatos deducidos de los análisis químicos. Con una serie adecuada de valores es posible evaluar tramos mediante parámetros que arrojen niveles de confianza o intervalos de seguridad en los que la mezcla diseñada se comporte de manera más previsible. La consecuencia lógica de este tratamiento estadístico de los resultados sería la tramificación de la obra, o separación en zonas homogéneas de contenidos en franjas con igual probabilidad de presentación de riesgos.

Hay que indicar que la multiplicación de estos reconocimientos ni encarece ni entorpece el proceso de diseño de las mezclas. Y, sin embargo, de no realizarse la consecuencia más directa sería la necesidad de replantearse el tratamiento en la obra cuando los análisis de producción detecten un contenido muy diferente a los de proyecto. O, en el peor de los casos, la presentación de los daños descritos.

d) Un aspecto especialmente destacado por algunos autores es la necesidad de establecer un criterio fijo en cuanto a la **forma de extraer los sulfatos solubles** mediante su lavado por agua. Se ha evidenciado por diversos autores que el tipo de agua y la proporción aplicada en el ensayo influyen decisivamente en los resultados obtenidos.

En este sentido, en primer lugar en cuanto al tipo de agua, parece que existe un consenso en el **empleo del agua destilada**. Si bien parecería más real ensayar los materiales procediendo a su lavado con agua del entorno, que previsiblemente debería ser la empleada en la compactación de los materiales, esto no supone más que una hipótesis arriesgada. Acertar en fase de proyecto con la fuente aprobada o seleccionada por el constructor para la extracción del agua para la obra es

excesivamente aventurado. Por otra parte, dada la evidencia deducida de algunos casos de la participación en el proceso nocivo de las aguas pluviales o incluso de flujos aportados desde zonas cercanas a la obra, tampoco parece la decisión más certera en su totalidad. Por ello, se propone el empleo de agua destilada, cuya composición en iones es nula y cuyos resultados deberían ser asépticos y reproducibles fácilmente.

En segundo lugar se ha planteado la cuestión de la proporción de agua a aplicar a una muestra dada de suelo para la disolución de los sulfatos. Evidentemente, mientras más agua se emplee en la extracción, mayor contenido es previsible que se deduzca. No obstante, parece claro que el volumen de agua a aplicar debe estar en cierta relación con el que después va a presentarse en la obra. Por ello, y dado que se persigue casi siempre obtener conclusiones y valores de referencia para otros casos, es aconsejable establecer la proporción agua:suelo que debe gobernar el ensayo de extracción de sulfatos. En este sentido, parece demostrado por algunos autores, Little y otros (1.992), que el empleo en los ensayos de determinación de sulfatos solubles de una **proporción de "10-agua : 1-suelo" es suficiente para la detección de niveles indicativos** y para la diferenciación de contenidos sustancialmente diferentes.

Finalmente, cabría definir el **tiempo de extracción** en contacto del agua con el suelo preciso para obtener un valor representativo del contenido en sulfatos. En este sentido, Little y otros (1.992), establecen que un tiempo entre 1/2 y 3/4 de hora es suficiente para ello.

e) Evidentemente, además de analizar los suelos, es necesario analizar la **posibilidad de aportación de los sulfatos por el agua freática** que pudiera afectarle. En esta línea, sería siempre preciso el análisis de la agresividad de la misma enfocada a estos

compuestos, así como, en la medida de lo posible, identificar la fuente de suministro de los compuestos detectados en caso de que esto sea posible.

f) Un grupo de factores adicionales a considerar en el estudio de los materiales es la posible **contribución del entorno** a la patología, que se ha demostrado crucial en los casos analizados. En especial, ante el riesgo de este tipo de procesos sería preciso abordar, en la misma línea y con los mismos criterios anteriores los puntos siguientes:

* Contenidos en sulfatos del entorno

* Posibles flujos de agua desde el exterior

* Contenido de sulfatos en los flujos de agua previsibles

g) Finalmente, como otro de los factores del entorno a considerar es preciso evaluar la posible **influencia de la climatología** en el comportamiento del firme proyectado. Como se ha evidenciado, las aportaciones puntuales de grandes flujos de agua por precipitaciones intensas o los descensos de temperatura pueden incidir en disoluciones de productos como los sulfatos y la alúmina, lavados y oxidaciones de sulfuros, reducciones del pH, etc. que conllevan el riesgo de formación de productos nocivos (ettringita o thaumasita) o transformaciones de otros menos dañinos (monosulfoaluminato) en formas peligrosas. Por ello es necesario evaluar y considerar en el diseño, especialmente, los siguientes aspectos:

* **Precipitación máxima** previsible en períodos cortos (“chaparrones”);

* **Temperaturas mínimas** previsibles, en especial si están por debajo de 15ºC

Hay que indicar que estas circunstancias tendrán especial relevancia si se esperan que puedan producirse en los dos primeros años de vida de la mezcla, como se ha comentado en los apartados anteriores.

5.2.- Estudios específicos de hinchamiento de las mezclas

Una vez detectada y evidenciada la posibilidad de influencia de los sulfatos en el tratamiento de un suelo con cal procede el inicio de los ensayos que permitan evaluar los efectos de estos procesos en la mezcla. Estos ensayos deberán determinar la influencia sustancial o marginal de los efectos en la estructura de tierra a construir o, en caso de ser posible, las prescripciones o recomendaciones constructivas tendentes a minimizar los efectos.

La serie de ensayos que permiten evaluar la influencia de estos procesos se sale de la rutina normal de ensayos mecánicos aplicados a las mezclas de suelo y cal en la actualidad. Y ello se debe a que se trata de procesos con gran duración en el tiempo y en los que influye notablemente las condiciones de curado y las dimensiones de las muestras a analizar.

Del trabajos de los principales autores investigadores del asunto es posible extraer una serie de ideas o conclusiones sobre los ensayos y condiciones a aplicar para evaluar los procesos. Concretamente, a continuación, se incluyen las propuestas de condiciones y metodologías de investigación, algunas de ellas aún en fase experimental o de desarrollo.

a) En primer lugar hay que indicar que la realización de ensayos de reconocimiento de posibles riesgos de hinchamiento en las mezclas de suelo y cal por la acción de sulfatos requieren de la **definición previa de un protocolo de ensayos** a aplicar en los que evaluando diversas condiciones de:

* Contenido de cal

* Aplicación en fases de la cal

* Contenido de agua de compactación

* Curado del material antes de su compactación

* Mantenimiento de las probetas

* Inmersión

se obtenga la evolución o parámetros críticos que más influyen en el proceso. Esto supone, en la mayoría de los casos, la realización de una costosa campaña de ensayos. Pero, en todo caso, el aprovechamiento de los materiales marginales y, en última instancia, el riesgo de presentación de daños con costes de reparación desproporcionados siempre justifican estas "inversiones".

b) En una primera fase de establecimiento de parámetros críticos a la hora de evaluar el riesgo de ataque de sulfatos a la cal hay que indicar que es preciso estudiar los procesos en función del contenido de cal. Como se ha mencionado, la cal es indispensable para ellos, y si no existen iones de calcio disponibles para la reacción no se presentará previsiblemente. En los casos de patología descritos, en la mayoría se trataba de mezclas en los que se habían empleado porcentajes de cal altos (4,5% o superiores), poco habituales en España. Por ello es preciso no adoptar precauciones desproporcionadas en este punto y estudiar con los valores a emplear en la obra de que se trate en cada caso. En este sentido es una propuesta razonable que cuando se analicen las mezclas de suelo con cal se estudie siempre el **efecto de los sulfatos**

sobre muestras con contenido superior al que previsiblemente va a ser adoptado en obra (al menos en un 1% ó 2%) para analizar su sensibilidad.

c) En cuanto a la presencia de agua en el proceso de fabricación de las probetas, adquiere especial relevancia el **contenido de agua de amasado**. Esta importancia viene derivada de que el proceso nocivo se inicia generalmente por la disolución de productos presentes en el suelo. Por tanto, en la medida en que estos productos puedan ser movilizados en las primeras fases de obra se podrá discernir no sólo sobre los riesgos, sino incluso sobre posibles propuestas de recomendaciones constructivas.

En este sentido, se propone el estudio de las mezclas con distintas proporciones de agua de amasado, en especial cuando se evalúen los ensayos de hinchamiento. Es fundamental así ensayar con **proporciones superiores a la óptima del ensayo próctor** modificado en al menos un 2 %.

d) En cuanto al tiempo de reacción o **plazo de curado que se deja a la mezcla antes de su compactación o fabricación de probetas**, también parece lógico establecer unas pautas de ensayo. Esta propuesta se basa en las recomendaciones de algunos autores que proponen no compactar los materiales o incluso remoldearlos transcurridos unos días de su puesta en obra. Por ello, es posible proponer que las muestras se estudien con diversas condiciones de amasado y curado en laboratorio, como podrían ser:

* Elaboración inmediata de las probetas;

* Elaboración de las probetas entre 24 y 48 horas tras el mezclado;

* Elaboración de las probetas transcurridos varios días de la mezcla, por ejemplo una semana, ya que más no parece constructivamente adecuado; y

* Elaboración inmediata de probetas y remoldeo a la semana, reproduciendo un segundo reamasado de la mezcla en obra.

En todo caso, el plazo que la muestra deba permanecer hasta la fabricación de probetas deberá estar protegida pero no aislada, de manera que se reproduzcan en la medida de lo posibles las situaciones previsibles en la obra.

e) La siguiente condición que parece lógico establecer en este proceso es el **tiempo de conservación de las probetas antes de su ensayo**, lo que se podría entender por la "maduración" de las mismas. Dado que en el mecanismo de interferencia sulfatos-cal influye decisivamente el tiempo, parece lógico plantear que el estudio debe servir para comparar la evolución de muestras conservadas durante plazos diferentes, como podrían ser las proporcionadas por:

* Ensayo inmediato de las probetas;

* Ensayo a largo plazo, que podría establecerse en, al menos, seis meses; y

* Ensayo de simulación de curado o curado acelerado, que permitiría evaluar la idoneidad de tratar las muestras en condiciones especiales (a 40ºC, por ejemplo) durante tiempo limitado (48 horas) de manera que se reproduzca el efecto del punto anterior y se reduzcan los plazos de emisión de resultados.

f) A la vez que el tiempo, es evidente que **las condiciones de conservación de las probetas** es un factor decisivo como catalizador de las reacciones químicas a

provocar. En este sentido, es usual proponer que las probetas a ensayar sean mantenidas durante el plazo adoptado en unas condiciones de **temperatura de 20°C y humedad relativa alta**, similares a las de las cámaras habituales existentes en los laboratorios de ensayos (>90%). Una opción al control de la humedad alternativa a la cámara es envolver las probetas o muestras en plásticos que permitan asegurar la conservación de la humedad de fabricación en las mismas y evitar el secado que reduciría la producción de las reacciones a estudiar.

Tan sólo para ensayos o determinaciones puntuales se propone también la inundación de las probetas, casi siempre durante la estricta ejecución del ensayo, o el descenso puntual de la temperatura por debajo de 15ºC.

g) Una vez definidas las condiciones de ensayo, la siguiente propuesta pasa por establecer la tipología de ensayos a aplicar. En este caso, dada la singularidad de los fenómenos a investigar, es preciso proponer una **serie de ensayos especiales** entre los que se destacan por la frecuencia mencionada por los diversos autores los siguientes:

* **Estudio mineralógico y microscópico** de los materiales obtenidos, mediante difracción de rayos X y microscopio electrónico. Persigue el reconocimiento de la formación de compuestos nocivos para la mezcla.

* **Estudio de pH** de las muestras, como indicativo de la presencia de cal libre activa en las mismas.

* Estudio del **contenido de sulfatos** en las muestras, para su comparación con los resultados iniciales y evaluación de la posible producción de las formas

secundarias generadas en los procesos descritos.

* **Estudio de resistencia** de las mezclas, evaluada por medios convencionales como pudiera ser el ensayo de compresión simple uniaxial para determinar la eficacia de la reacción puzolánica esperada y la influencia de las condiciones de conservación y curado en la misma.

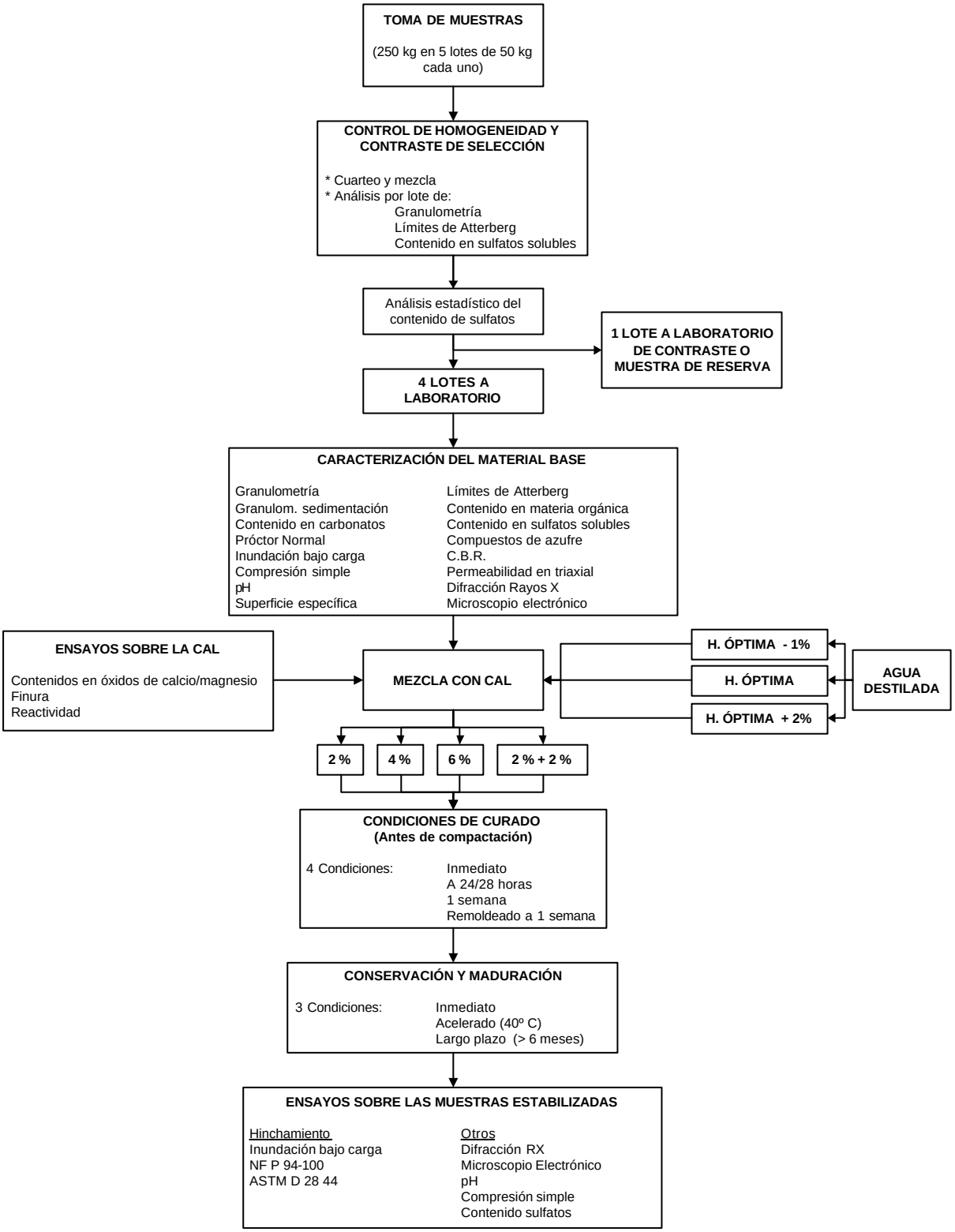
* Estudio de hinchamiento de las muestras por inundación. Entre las diversas posibilidades de análisis de esta circunstancia destacan las de realizar los ensayos de:

- **Inundación bajo carga en edómetro**, que tiene el inconveniente de la escasa dimensión de las probetas analizadas, incluso en el caso de emplear anillos de gran diámetro.

- Hinchamiento de grandes probetas confinadas por materiales flexibles por inundación como el propuesto por la **norma francesa NF P 94-100**. En este ensayos se elaboran probetas de 5 centímetros de altura y diámetro que se someten a inmersión controlando la evolución de sus dimensiones.

En conjunto, y como conclusión de este apartado junto con el anterior, a continuación se expone un protocolo intensivo de ensayos posible para investigación de muestras de suelo con contenido en sulfatos que podría guiar las investigaciones en un caso típico. Evidentemente, no es ni la única propuesta ni la genéricamente adecuada a cualquier tipo de suelos. Pero sirve de guión e ilustración de cómo enfocar y plantear el trabajo de investigación de la mayoría de ellos para el mejor conocimiento de los riesgos adquiridos.

PROTOCOLO DE ENSAYOS PARA EL ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LOS SULFATOS EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON CAL



5.3.- Modificación del proceso constructivo

Finalmente hay que indicar que, en ausencia de recetas magistrales que eviten el problema de la reacción entre los sulfatos y la cal y ante la imposibilidad de la sustitución de los materiales, sólo cabe la propuesta de recomendaciones constructivas que contribuyan a limitar los daños previsibles.

En todo caso, estas recomendaciones, lejos de ser recetas genéricas, deben ser entendidas como la conclusión de las campañas de análisis e investigación del alcance del riesgo abordadas según los epígrafes anteriores.

No obstante, por citar ejemplos de medidas usualmente adoptadas o recurrentes para la aplicación ante esta problemática, es posible citar la siguientes:

a) Dosificación estricta y controlada de la cal para evitar los excesos, bien puntuales bien generalizados, que proporcionen reactivo suficiente para detonar los procesos nocivos.

b) En ocasiones en que el efecto se conoce y es limitado puede ser, sin embargo conveniente la adopción de la medida contraria, es decir la dosificación generosa en cal para movilizar todos los procesos dañinos previstos.

c) Elaboración de las mezclas y compactación con humedades altas, superiores a la óptima del ensayo próctor modificado, para facilitar la disolución de los sulfatos en el memento de su manipulación constructiva.

d) Eventualmente, si las condiciones de la obra lo permite, puede ser recomendable la escarificación y recompactación de las mezclas extendidas transcurridos una semana

de su puesta en obra. Con ello se persigue la rotura de las estructuras previas y permitir que, en caso de producirse algunos de los compuestos nocivos se redistribuya el contenido y se permita su acomodación en la masa del suelo sin alterar la estructura resistente del mismo. Para obtener un mayor efecto de este proceso en dos fases es recomendable "provocar" la aparición de los compuestos nocivos en la primera, por ejemplo, proporcionando excesos de cal y agua que movilicen las reacciones perseguidas.

e) El mantenimiento de las condiciones que podrían llamarse de curado de la mezcla extendida, con aportaciones periódicas de agua, sirve además para generar en las primeras épocas de la obra los posibles procesos previstos.

f) Otra solución planteada por algunos autores, si bien aún en fases muy preliminares, consiste en la aportación de cenizas a la mezcla que reacciones con la cal libre existente y contribuyan a reducir el pH del medio, evitando la producción de las reacciones con los sulfatos.

g) La ejecución de obras complementarias que controlen principalmente el flujo de entrada de agua en las capas compuestas por materiales tratados es otra de las posibilidades frecuentemente citadas. Dentro de este grupo de medidas pueden apuntarse algunas como:

* Impermeabilización de las capas mediante otras superiores más cerradas o incluso mediante la colocación de geotextiles o láminas impermeables sobre o bajo ellas, según el flujo previsto.

* Sellado especial de juntas constructivas de pavimentos y bordes de los

mismos en medianas, bordillos, etc.

* Drenajes de la plataforma que evacuen las aguas pluviales. Estos drenes deben ser especialmente impermeables para evitar que su función sea alterada y se constituyan en una fuente de entrada y circulación de agua en la obra.

En todo caso, las medidas comentadas son optativas, genéricas e incluso en ocasiones contradictorias, por lo que hay que insistir en que se trata tan sólo de propuestas diversas a contemplar en el abanico de soluciones. Siempre, no obstante, deberán estar refrendadas en cuanto a su alcance y a su utilidad por los resultados de la campaña previa de ensayos de investigación.

NORMATIVA QUE REGULA EL TRATAMIENTO DE SUELOS 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 al 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;

b) Las instrucciones de firmes, que especifican el posible uso de este tipo de materiales y sus limitaciones;

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;

d) Las normas que regulan la producción y caracterización del conglomerante, la cal.

A continuación se recoge este repaso por cuanto es ilustrativo de la consideración que al respecto existe en el sector.

1.- Clasificaciones de suelos

Si bien las clasificaciones de suelos para su empleo en terraplenes (suelos seleccionados,

adecuados, tolerables, etc.) deberían en primera instancia para establecer su aptitud para el tratamiento con cal, la realidad es que sólo son de aplicación marginalmente a estos efectos. Ello se debe a que no se usan en este sentido sino tan solo para limitar o recomendar la aplicación del tratamiento en el caso de suelos de baja calidad, en que se propone, por ejemplo, la disposición de capas de separación.

No obstante, a efectos de complementar incluso la información recogida en los apartados siguientes se incluyen las clasificaciones recogidas en los siguientes documentos:

* ***Artículo 330 del Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG-3/75)*** aprobado por Orden Ministerial de 6 de Febrero de 1976 (B.O.E. del 7 de Julio)

* **Orden circular 326/00** de la Dirección General de Carreteras, de febrero de 2.000, **sobre geotecnia vial** en lo referente a materiales para la construcción de explanaciones y drenajes, en cuanto que modifica la clasificación de suelos para terraplenes recogida en el artículo 330 Terraplenes. Fue elevada a rango de Orden Ministerial FOM/1382/2002 el 16 de mayo de 2.002 con su publicación en el B.O.E. el 11 de junio del mismo año.

1.1.- Artículo 330 del PG-3/75

La clasificación de suelos contenida en la versión original del PG-3/75 ha sido la manejada en el sector durante veinticinco años, es sobradamente conocida, y se estructura según la siguientes tabla:

	SUELO TOLERABLE	SUELO ADECUADO	SUELO SELECCIONADO
GRANULOMETRÍA	75 % < 15 cm	No tamaños > 10 cm #0,080 < 35%	No tamaños > 8 cm #0,080 < 25%
LÍMITES DE ATTERBERG	LL < 40 ó LL<65 y IP>(0,6LL-9)	LL < 40	LL < 30 IP < 10
MATERIA ORGÁNICA	< 2%	< 1%	0
DENSIDAD PRÓCTOR	> 1,45 kg/dm^3	> 1,75 kg/dm^3	
HINCHAMIENTO		< 2%	0
C.B.R.	C.B.R. > 3	C.B.R. > 5	C.B.R. > 10

1.2.- O.C. 326/00 sobre geotecnia vial

En el año 2.000 se modificó la clasificación vigente, si bien las consecuencias de la misma tampoco son de directa aplicación a la definición de los tratamientos de suelos con cal. Además, si bien se avanza en la evaluación de propiedades que afectan a los tratamientos, como es el caso de la composición química y el hinchamiento, sus propiedades tampoco cubren todas las prescripciones que se establecen en las últimas normas sobre el material a tratar.

Las nuevas prescripciones son las que se recogen resumidamente en la tabla siguiente:

<table>
<tr><th></th><th>SUELOS MARGINALES</th><th>SUELOS TOLERABLES</th><th>SUELOS ADECUADOS</th><th colspan="2">SUELOS SELECCIONADOS</th></tr>
<tr><td>Contenido en materia orgánica (UNE 103 204)</td><td>< 5 %</td><td>< 2 %</td><td>< 1 %</td><td colspan="2">< 0,2 %</td></tr>
<tr><td>Contenido en sales solubles (NLT 114-115)</td><td></td><td>Yeso < 5 %
Otras sales < 1 %</td><td>< 0,2 %</td><td colspan="2">< 0,2 %</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Granulometría (UNE 103 101)</td><td rowspan="3"></td><td rowspan="3"></td><td>$D_{máx}$ < 100 mm</td><td colspan="2">$D_{máx}$ < 100 mm</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Pasa # 2 < 80 %</td><td rowspan="3">ALTERNATIVAMENTE</td><td>Pasa # 0,40< 15 %</td></tr>
<tr><td>Pasa # 2 < 80 %
Pasa # 0,40 < 75 %
Pasa # 0,08 < 25 %</td></tr>
<tr><td>Pasa # 0,08 < 35 %</td><td></td></tr>
<tr><td>Plasticidad (UNE 103 103 y 103 104)</td><td>Si LL > 90 ?
IP>0,73(LL-20)</td><td>LL < 65
Si LL > 40 ? IP>0,73(LL-20)</td><td>LL < 40
Si LL > 30 ? IP > 4</td><td colspan="2">LL < 30
IP < 10</td></tr>
<tr><td>Ensayo de colapso (NLT 254)</td><td></td><td>Asiento < 1 %</td><td></td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>Hinchamiento (UNE 103 601)</td><td>< 5 %</td><td>< 3 %</td><td></td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

2.- Instrucciones de firmes

En este epígrafe, se incluyen en este documento fundamentalmente comentarios a las siguientes:

* ***Instrucción 6.1.IC 1975 de "Firmes Flexibles"***, así como la ***Instrucción 6.2.IC 1975 de "Firmes Rígidos"*** aprobadas 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).

* ***Orden Circular 10/2002*** de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento, sobre ***Secciones de firme y capas estructurales de firmes***.

Cada una de ellas ha ido derogando secuencialmente a la anterior, no obstante lo cual se extractan las principales características a continuación.

2.1.- Instrucciones 6.1.IC y 6.2.IC - 1975 de firmes flexibles y rígidos

En estos documentos se incluía la posibilidad del empleo de los "suelos estabilizados con cal" para la formación de explanadas, quedando sus prescripciones reguladas por el artículo 510 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes PG-3/75.

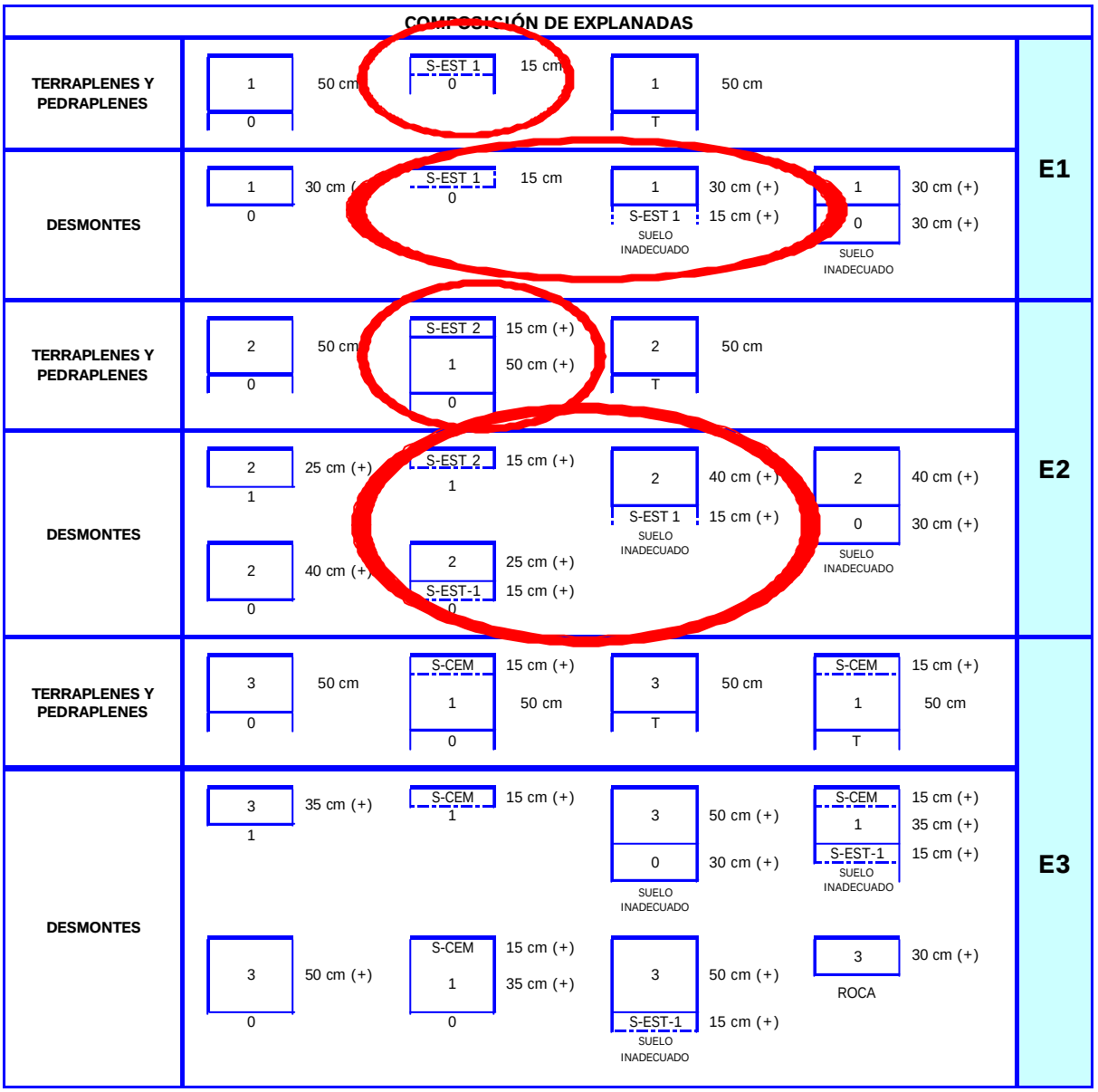
En este sentido, las explanadas se clasificaban en tres categorías, en función de su CBR según la siguiente gradación:

E1: CBR = 5 - 10

E2: CBR = 10 - 20

E3: CBR = 20 +

Para su obtención se proponían las composiciones de materiales a disponer o identificar que se recogen en la tabla siguiente:



En esta tabla se clasificaban los materiales según las definiciones:

Materiales utilizados en las explanadas			
Símbolo	**Definición del material**	**Artículo correspondiente del PPTG**	**Prescripciones complementarias**
0	Suelo tolerable	330 Terraplenes	
1	Suelo adecuado (*)	330 Terraplenes	
2	Suelo seleccionado (**)	330 Terraplenes	
3	Suelo seleccionado	330 Terraplenes	CBR mínimo: 20
T	Material de la zona de transición en pedraplenes	330 Terraplenes	
S-EST 1	Suelo estabilizado in situ con cemento o con cal (***)	512 Suelos estabilizados con cemento 510 Suelos estabilizados con cal	CBR mínimo de la mezcla a los 7 días: 5 Mín. 2% de cemento o cal
S-EST 2	Suelo estabilizado in situ con cemento o con cal	330 Terraplenes 512 Suelos estabilizados con cemento 510 Suelos estabilizados con cal	CBR mínimo de la mezcla a los 7 días: 10 Mín. 3% de cemento o cal
S-CEM	Suelo adecuado estabilizado in situ con cemento	330 Terraplenes 512 Suelos estabilizados con cemento	Resistencia mínima a compresión simple a los 7 días: 15 kp/cm^2

(*) Únicamente a los efectos de clasificación de las explanadas en desmonte de la categoría E1, podrán incluirse también en este grupo los suelos tolerables (PPTG-Art. 330) cuyo CBR sea superior a 5, siempre que no sean de temer contaminaciones en las capas inferiores del firme

(**) Únicamente a los efectos de clasificación de las explanadas, podrán incluirse también en este grupo los suelos adecuados (PPTG-Art. 330) cuyo CBR sea superior a 10

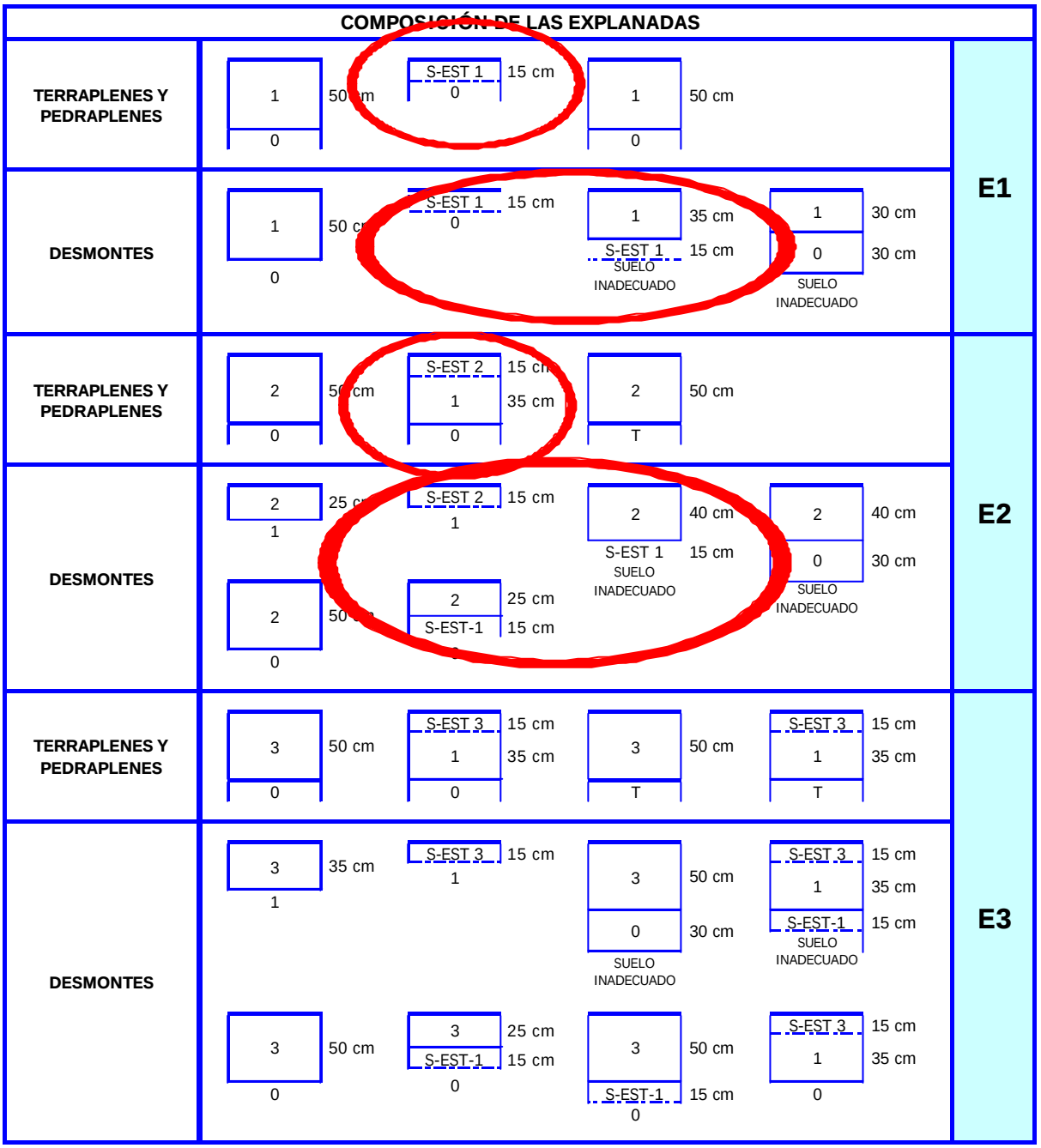
(***) Se recomienda estabilizar con cal los suelos tolerables o inadecuados cohesivos (PPTG-Art. 330)

Tan sólo comentar que se prevé el uso de los tratamientos con cal para coronación de explanadas tipo E1 y E2 o como capa de transición o anticontaminante sobre suelos tolerables o inadecuados.

2.2.- Instrucción 6.1-I.C. y 6.2-I.C. de secciones de firmes (1.989)

El tratamiento que este nuevo texto da a los suelos tratados con cal es muy similar al del texto que deroga, sin que afecte significativamente a las estructuras de explanada en las que participa este material.

En las tablas siguientes se ilustran las posibilidades contempladas en este texto.



Las leyendas y clasificación de explanadas se mantiene igual a la instrucción anterior con la salvedad del cambio de denominación de S-CEM a S-EST 3.

2.3.- O.C. 10/2002 sobre secciones de firmes

En la secuencia de edición de instrucciones para el diseño de firmes de carreteras, la reciente orden circular de septiembre de 2.002 supone un cambio sustancial en la concepción de los distintos factores que condicionan dicho diseño.

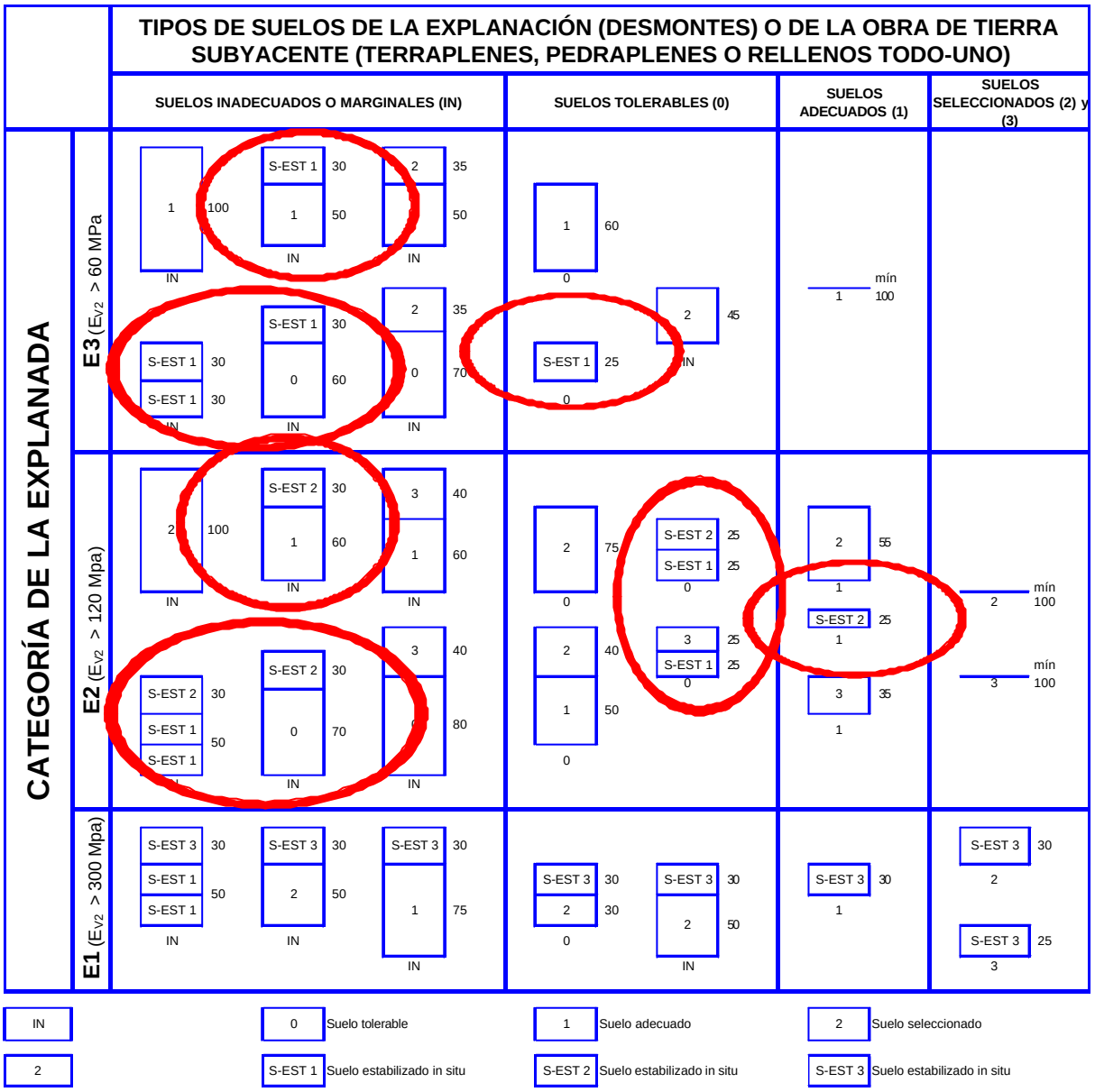
En lo referente a la formación de explanadas, este cambio de tendencia se traduce, fundamentalmente en:

a) El aumento del espesor mínimo de las capas de suelos tratados con cal, que pasa de 15 a 25 centímetros; y

b) En que se configuran estructuras de explanadas no sólo en base a tratamientos de una sola capa sino de varias capas de suelos tratados;

No obstante siguen las limitaciones que establecen que con estos materiales no es posible obtener más de una explanada tipo E2.

La tabla de composición de explanadas recogida en este texto es la que sigue:



En cuanto a la definición de los materiales, se realiza en esta orden a través de la modificación de los artículos correspondientes del PG-3/75, que se comentará más adelante. A modo de comparación, tan sólo indicar que se mantienen los porcentajes de adición representativos de cada tipo de tratamiento (S-EST 1 = 2% y S-EST 2 = 3%) y los CBR a obtener, con un pequeño incremento (6 y 12 respectivamente).

Como novedad también se indica expresamente la posibilidad de emplear el tratamiento con cal en un espesor de 15 cm como capa de separación sobre diversos suelos de baja

calidad relativa.

Asimismo hay que destacar que se propugna el empleo de los tratamientos al establecer que "*para la capa superior utilizada en la formación de las explanadas se recomienda al proyectista la consideración preferente de los suelos estabilizados in situ, con cal o cemento, frente a una eventual aportación de suelos"*.

3.- Especificaciones técnicas de los tratamientos de suelos con cal

Dentro de este epígrafe se incluye evidentemente no sólo el Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes en su versión inicial, el conocido como PG-3/75, sino sus diversas modificaciones y correcciones hasta la fecha.

Las especificaciones recogidas en estos documentos han ido plasmándose en una secuencia de órdenes con derogación de la anterior, que se han referido, en especial a los siguientes artículos:

* ***Artículo 510 Suelos estabilizados in situ con cal del PG-3/75***, 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).

* ***Orden Circular 297/88T sobre estabilización de suelos in situ y tratamientos superficiales con ligantes hidrocarbonados***, de 29 de Marzo de 1988, que revisó dicho artículo 510 Suelos estabilizados in situ con cal.

* ***Orden Circular 10/2002 sobre secciones de firme y capas estructurales de firmes***, de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento, que introduce el nuevo artículo 512 Suelos estabilizados in situ que anula el anterior artículo 510 de la

Orden Circular 297/88.

A continuación se repasan los contenidos y aportaciones secuenciales de cada uno de estos documentos.

3.1.- Artículo 510 Suelos estabilizados in situ con cal del PG-3/75

La primera regulación que se realiza en el ámbito de las carreteras en relación con las normas que definen el empleo de la cal para tratamiento de suelos es la que se recoge en el artículo 510 "Suelos estabilizados in situ con cal" del PG-3/75. En dicho artículo, de entrada, se emplea la denominación de "estabilización" para todos los tipos de tratamiento de suelos.

A modo de extracto, en dicha regulación se establecen las siguientes características y especificaciones al respecto:

a) Tipo de cal: Se empleará cal aérea tipo I, permitiéndose excepcionalmente el empleo de cal tipo II.

b) Composición química: Contenido en óxidos de calcio y magnesio igual o superior al 75 % en peso

c) Finura de molido: Rechazo acumulado máximo al tamizar por vía húmeda sobre la cal ya apagada:

Tamiz 0,80 UNE . . . . . 0 %

Tamiz 0,16 UNE . . . . . 15 %

d) Condiciones al suelo a tratar:

Exentos de materia vegetal y orgánica

Tamaño máximo inferior a 80 mm o a la mitad del espesor de capa

Rechazo del tamiz 0,080 UNE inferior al 85 % en peso

e) Fórmula de trabajo: Se establece en base al CBR preciso a 7 días de edad

f) Tolerancias de dosificación de la cal (en peso):

+/- 0,3% sobre el peso del suelo para dosificaciones mayores al 3 %

+/- 10 % del peso de cal en dosificaciones inferiores

g) Disgregación en el mezclado:

Grumos inferiores a 20 milímetros

En caso contrario, se realizará en dos fases con intervalo de 24 a 48 horas

h) Compactación:

La humedad no diferirá en más de un 2 % de la de la fórmula de trabajo

Se debe conseguir una densidad igual a la máxima del ensayo Próctor Normal

i) Curado: Se mantendrá la mezcla a humedad en torno a la de la fórmula de trabajo durante 5 a 7 días, bien por riego bien mediante sellado de la capa

j) Tramo de prueba: Preceptivo de 15 * 3 metros

k) Tolerancias de nivelación:

Desviación absoluta de cotas inferior a 1/5 del espesor de la capa

Desniveles inferiores a 10 mm con la regla de tres metros

l) Limitaciones a la ejecución:

Temperaturas inferiores a 2º C

Humedad del suelo superior en un 2 % a la de la fórmula de trabajo.

Junto con estas especificaciones se incluyen en el mencionado artículo unas recomendaciones genéricas en cuanto a preparación de la superficie existente, distribución de la cal, mezcla, compactación, acabado y curado.

3.2.- O.C. 297/88T sobre estabilización de suelos in situ y otros

Transcurridos más de veinte años si que se hubiera modificado el articulado vigente sobre los suelos estabilizados con cal, mediante una Orden Circular se procedió a la actualización del mismo.

Las principales novedades o variaciones respecto a lo existente previamente son las siguientes:

a) Tipo de cal: Se impone el uso de la cal apagada

b) Condiciones al suelo:

Granulometría: Cernido por tamiz UNE 0,080 mm inferior al 35% si se

persigue una explanada tipo E2

Plasticidad: Índice de plasticidad mínimo de 12

Índice de plasticidad máximo de 40 para E2

Para suelos con índice de plasticidad superior a 50 se apunta el doble tratamiento por fases

c) Equipos a emplear: Deben permitir la extensión total de la cal en no más de dos pasadas

d) Disgregación del suelo a tratar: No debe tener grumos superiores a 80 mm

e) Aplicación de la cal en lechada: Deberá realizarse en una proporción agua/cal no inferior a tres (3)

f) Disgregación de la mezcla: Se debe satisfacer que:

La totalidad de los grumos sean inferiores a 20 mm

La eficacia de la disgregación referida al tamiz UNE 5 mm no debe ser inferior al 60 % (proporción cernido en obra del material húmedo sobre cernido en seco del material seco)

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 %

g) Juntas: Se prevé que deben ejecutarse en vertical

h) Curado: Se puede prescindir del curado si se compacta la capa con rodillos de más de 25 toneladas de peso

i) Densidad de la capa acabada: Se debe alcanzar el 95 % de la máxima del ensayo Próctor Modificado

j) Tolerancias geométricas: Se limitan a 30 mm, y se establece que los reperfilados se deberán realizar no más tarde de 48 horas y en un espesor igual a la mitad del de la capa

k) Limitaciones de ejecución:

Se limita la extensión en forma de polvo con viento excesivo

Se limita el plazo de mezcla a no más de 8 días desde la extensión de la cal

Se limita la compactación y acabado a no más de 5 días desde la mezcla

l) Criterios de aceptación:

Densidad: Densidad media superior a la exigida (sobre 5 determinaciones)

No más de dos resultados individuales inferiores en un 2%

Espesor: No inferior al teórico en más de 20 mm

Espesor medio no inferior a 10 mm del teórico

CBR: Media superior al 90 % del valor especificado

Ningún valor individual inferior en un 20% al teórico

Como comentario adicional hay que indicar que se desarrollan en especial los apartados correspondientes al tramo de prueba, a las condiciones de seguridad e higiene en la ejecución de la unidad y al control de calidad de materiales y de la unidad terminada.

3.3.- Artículo 512 Suelos estabilizados in situ según la O.C. 10/2002

Con la publicación en septiembre de 2.002 de esta Orden Circular se produce 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 incluirse en un mismo artículo, el 512, derogando por tanto el 510 vigente.

En cuanto a los cambios que dicho texto introduce 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):

S-EST 1: I.P. $\geq$ 12

S-EST 2: 12 $\leq$ 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	≥ 95 (**)	≥ 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 u 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 ºC

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

4.- Normas que regulan las cales para tratamientos de suelos

Dentro del grupo de las normas específicas que regulan las cales en carreteras, para lo que en ellas se cita como estabilizaciones de suelos, cabe destacar las siguientes:

* ***Artículo 200 Cal aérea del PG-3/75***, 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).

* **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).

Las principales especificaciones contempladas en dichas normas se recogen a continuación.

4.1.- Artículo 200 Cal aérea del PG-3/75

Este artículo, bastante estricto en su contenido en la primera versión incluida en el PG-3/75, establecía las siguientes condiciones para las cales a emplear en estabilizaciones de suelos (tipo I según el artículo 510):

a) Composición química:

Contenido en óxidos cálcico y magnésico superior al 90 % sobre material calcinado

Contenido en anhídrido carbónico inferior al 5%

b) Finura de molido: Rechazos máximos acumulados en el tamizado por vía húmeda de la cal apagada:

Tamiz 0,20 UNE 5%

Tamiz 0,080 UNE 10%

4.2.- Artículo 200 Cales para estabilización de suelos (OM 27/12/99)

Incluye las especificaciones siguientes:

a) Composición química: Según la UNE-EN 459-2 deberán cumplir:

Contenido de óxido de magnesio (MgO) deberá ser inferior al 10% en masa

Si el contenido de óxido de magnesio (MgO) es superior al 7%, se determinará la estabilidad de volumen, y el resultado deberá cumplir las condiciones señaladas para calificarlo como «pasa» en la UNE-ENV 459-1

Para cales clase II, el contenido de agua libre deberá ser inferior al dos por ciento (2%) en masa

b) Transporte y almacenamiento:

Transportada en cisternas presurizadas dotadas de medios neumáticos o mecánicos para su vaciado

Los silos de almacenamiento serán estancos y provistos de sistemas de filtros

Excepcionalmente, se podrán emplear en sacos

c) Suministro e identificación:

Según la «Instrucción para la recepción de cales en obras de estabilización de suelos (RCA-92)»

d) Identificación: Cada remesa irá acompañada de:

Albarán con documentación anexa que contendrá explícitamente, al menos, los siguientes datos:

Nombre y dirección del fabricante y de la empresa suministradora

Fecha de fabricación y de suministro

Identificación del vehículo que lo transporta

Cantidad que se suministra

Denominación comercial y clase de cal

Nombre y dirección del comprador y destino

Referencia del pedido

Certificado de especificaciones, marca, sello o distintivo de calidad

Instrucciones de trabajo e información de seguridad si fuera necesaria

Hoja de características con los resultados de los análisis y ensayos correspondientes a la producción a la que pertenezca la remesa suministrada, que contendrá explícitamente, al menos:

Referencia del albarán de la remesa

Denominación comercial y clase de cal

Contenido en óxidos de calcio y magnesio, según la UNE-EN 459-2

Contenido en dióxido de carbono, según la UNE-EN 459-2

Finura, según la UNE-EN 459-2

Reactividad, según la UNE 80 502

También se incluyen en este artículo prescripciones relativas al control de calidad de la cal a emplear en la estabilización de suelos.

5.- 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
	15 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.- 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.

6.1.- 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:

a) Tratamiento de suelos plásticos en los fondos de desmontes y en las capas de asiento de los terraplenes; y

b) 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 ≥ 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 este 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.

6.2.- 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 tráficos 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 explanadas 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

EL DISEÑO DE TRATAMIENTOS DE SUELOS CON CAL

Una vez establecidos los principios, fundamentos y factores que regulan el comportamiento de los tratamientos de suelos con cal, en este apartado se persigue plasmar las pautas que deben marcar la técnica del diseño de dichos tratamientos, sin volver a incidir sobre los mecanismos ya descritos.

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 Laboratorie 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.

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.

Si bien la normativa española sólo contempla directamente los usos concretos de "capa de separación" y de "incremento de CBR", estableciendo los demás (secado, trabajabilidad, hinchamiento, etc.) como condiciones o efectos auxiliares, la realidad de los tratamientos y, cada vez más de sus aplicaciones, hace preciso tenerlos en cuenta como fines propiamente dichos, más que como simples acciones marginales. Desde este punto de vista, la

caracterización de los suelos, los principios de formulación y el control a aplicar al tratamiento deberán ser claramente diferenciados.

2.- Los materiales que intervienen en el tratamiento

2.1.- Identificación de los suelos

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 :

a) Granulometría: Por cuanto el contenido en finos incide en la selección del ligante adecuado y el de gruesos condiciona la maquinaria a emplear;

c) Plasticidad: Como indicador del contenido y tipología de las arcillas presentes y de la posibilidad de emplear tratamientos por fases; y

b) Composición química: Especialmente los contenidos de materia orgánica y sulfatos solubles, por cuanto inciden en las reacciones perseguidas y en los riesgos de hinchamiento, pero también los de fosfatos, nitratos, sulfuros y cloruros.

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 este 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 Laboratorie 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. Por su interés, aparte de la simple referencia, se incluye a continuación un extracto del proceso recogido en dicha norma para el caso de tratamientos con cal.

NORMA NF P 94-100

"Materiales tratados con cal y/o con ligantes hidráulicos"

"Ensayo de evaluación de la aptitud de un suelo al tratamiento"

Objeto: *El ensayo persigue asegurar en un plazo inferior a dos semanas que la mezcla de un material con la cal (y/o otros ligante hidráulico) presenta, tras su compactación, una estabilidad dimensional y un comportamiento mecánico acorde a los previsto para dicho material. Sus resultados permiten evaluar la aptitud de un suelo para el tratamiento pero no proporciona valores indicativos para cálculo o dimensionamiento.*

Principio: *Consiste en acelerar mediante las condiciones de conservación, los mecanismos de reacciones que se producen en una probeta de material tratado y evaluar los*

valores de hinchamiento al cabo de plazos establecidos.

Para ello se evalúa la variación en función del tiempo del volumen aparente de probetas de dimensiones d = h = 5 cm conservadas en un primer momento en atmósfera casi-saturada y, en una segunda fase, sumergidas en agua a 40 º C.

Fabricación: *Eliminada la fracción de suelo de tamaño superior a 5 mm, se fabrica una mezcla homogénea, manual o mecánicamente. Se determina la densidad aparente (d_{PN}) de las probetas obtenidas por compactación de la mezcla a la energía Próctor Normal, con el contenido de agua y dotación de cal seleccionado (pueden emplearse los moldes del ensayo Próctor Normal).*

Se fabrican con ayuda de prensa tres probetas de dimensiones d = h = 5 cm con un contenido de agua igual al de la mezcla y una densidad del 96 % de la del ensayo Próctor Normal. Inmediatamente de su fabricación se procede al desmoldeo.

Conservación: *Se conservarán 3 días ± 4 h a 20 ºC ± 2 ºC y a más del 90 % de humedad relativa para posteriormente sumergirlas 7 días ± 4 h en agua a 40 ºC ± 2 ºC*

Mediciones: *Se realiza el control del volumen inicial (V_0) de cada probeta geométricamente evaluando la altura como semisuma de generatrices ortogonales y el diámetro como la media de diámetros a tres alturas diferentes. Estas medidas se tomarán justo tras la fabricación de las probetas y tras la primera fase de conservación a 20 ºC.*

Tras esta primera etapa se confinan las probetas con una banda textil y se colocan sobre una piedra porosa para sumergirlas en el baño termostático a 40 ºC.

Se realizan pesadas hidrostáticas tras 4 horas, 24 horas y 7 días de inmersión,

descontando el peso de las bandas textiles.

Resultado: *Se obtiene el valor del hinchamiento volumétrico a 7 días y, en su caso, a 4 y 24 horas.*

Interpretación: *Según la siguiente tabla:*

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 a 7 días (%)***
Adecuado	≤ 5
Dudoso	$5 \leq G_v \leq 10$
No apto	≥ 10

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:

$$\text{Índice de consistencia } (I_C) = \frac{w_L - w_{NAT}}{w_L - w_P} = \frac{\text{Límite Líquido - Humedad Natural}}{\text{Límite Líquido - Límite Plástico}}$$

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.

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:

a) El tipo de cal, de entre los establecidos en la normativa, concretamente en el Artículo 200 del PG-3, en el caso español;

b) Su presentación en forma de polvo o lechada, viva o hidratada, según las posibilidades técnicas, volumen de obra y objeto del tratamiento; y

En cuanto a 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, la verificación no

será precisa si se emplea un “producto certificado”.

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.

3.- Metodología de los estudios geotécnicos

Si bien el conocimiento de los factores que influyen en los tratamientos de suelos con cal es cada vez mayor y conocido por los técnicos del sector de la construcción, aún no está implantada totalmente la sistematización que es precisa para el diseño de los mismos.

Cuando se plantea el un estudio para abordar una solución de este tipo, es preciso considerar aspectos como el tamaño de la obra, objetivos perseguidos y complejidad de los suelos a tratar que hace que no cualquier solución valga para cualquier problema y que haya que establecer procesos concretos para casos particulares.

Desde este punto de vista, los estudios geotécnicos previos a realizar para el conocimiento de los suelos se deben desarrollar acordes a su:

a) Objeto, de entre los ya mencionados, que dirija las investigaciones, reconocimientos y ensayos;

b) Alcance de estudio, en función de que se corresponda con un estudio de viabilidad, anteproyecto, proyecto o estudio especial; y

c) Complejidad de las formaciones a estudiar, de manera que las caracterizaciones proporcionadas sean representativas y acordes con el alcance propuesto.

A continuación se desarrollan estos aspectos con indicaciones y recomendaciones para su mejor definición.

3.1.- Objeto del estudio geotécnico

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. Esta parte del estudio se cubre con los reconocimientos y ensayos de identificación de los suelos y materiales atravesados o disponibles.

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.

3.2.- Alcance del estudio geotécnico

A la hora de definir el alcance de un estudio geotécnico, que debe ser proporcionado al del proyecto en el que se integra, es preciso diferenciar una serie de niveles progresivos que representan cada una de las fases de concepción y desarrollo de una obra. En este sentido, es posible definir cuatro grandes niveles representativos del esquema más habitual, que son:

a) Estudio previo o de viabilidad, que se plantea normalmente junto con otras alternativas de tratamiento o materiales, y que persigue juzgar la idoneidad general del mismo.

Como estudio preliminar debe fundamentalmente basarse en el análisis de la información existente (mapas, publicaciones, proyectos cercanos, datos climatológicos, experiencias locales, etc.) que no encarezcan su elaboración ni la del documento del que formarán parte.

b) Estudio para anteproyecto, del que, una vez establecida la viabilidad, se deduzca u predimensionamiento válido para la definición de la obra o tratamiento a este nivel de documento. Dado que usualmente no se aplican a trazados y rasantes definitivos, no es conveniente extremar o particularizar los estudios más allá de la confrontación "in situ" de las hipótesis previstas en el estudio previo anterior.

Como tal debe basarse ya en trabajos de reconocimiento y ensayos, aunque simples, a escala general pero representativa de los materiales implicados. Se emplearán así muestras de calicatas o sondeos, en el caso de grandes desmontes, ubicadas las principales formaciones de las franjas o corredores previstos sobre la cartografía geológica existente. Los estudios de dosificación, en su caso, se realizarán a nivel de

verificación o grandes rangos sobre pocas muestras. Excepcionalmente pudieran acometerse ensayos de aptitud o comportamiento específico cuando se prevea el uso de los tratamientos en grandes volúmenes o capas de especial relevancia.

c) Estudio geotécnico completo para el proyecto constructivo, que persiguen definir completamente las unidades de obra a ejecutar.

En este caso, es preciso identificar y estudiar las aptitud para el tratamiento de cuantas procedencias y posibilidades de empleo sean previstas en las obras, definiendo zonificaciones y tratamientos diferenciados para cada tramo, material y estado implicado. Se incluirán además estudios de dosificación que optimicen las cantidades a emplear, establezcan condiciones de ejecución y sirvan para definir especificaciones y tolerancias.

d) Estudio especial, tendente a la definición o resolución de cualquier incidencia que se pueda producir. Esta incidencia pudiera provenir por el hecho de detectar un factor inusual de relevancia en el diseño (presencia de hielo, aguas agresivas, exceso de sulfatos, condicionantes específicos de ejecución, etc.) o por la propia generación del estudio en una fase anormal (incidencias de obras, sustitución de propuestas inicialmente proyectadas, patologías, etc.). También

Es evidente que la situación ideal de cualquier estudio se rige por la secuencia descrita en los tres primeros niveles de alcance, si bien no es tampoco infrecuente que no se cumpla la progresividad deseada. Es el caso de estudios de incidencias durante las obras, modificaciones coyunturales “de última hora”, cambios en políticas constructivas en proyectos demorados, etc.. En estos casos, es preciso realizar una adaptación de los niveles y cadencias

de investigación para evitar que, por afrontar un estudio geotécnico completo desde el inicio, se obtenga un simple rechazo de la alternativa y, por consiguiente, un despilfarro de los recursos en ella invertidos.

3.3.- 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.

Dado que los protocolos de dosificación requieren múltiples ensayos y análisis con diferentes porcentajes de adición, así como dilatados plazos, parece lógico unificar formaciones o suelos para reducir la magnitud de los estudios a acometer. De igual manera, es interesante reducir las especificaciones de tratamiento en obra a un número mínimo de formas diferenciadas al objeto 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

Una vez realizados los ensayos, dado que es evidente que el nivel de muestreo propuesto se basa en la aplicación de técnicas estadísticas, parece lógico plantearse el tratamiento de los resultados obtenidos. En este sentido, cada formación podrá caracterizarse en cada uno de sus parámetros, más allá que por valores aislados e individuales, por valores medios y coeficientes de variación o dispersión que informen sobre su homogeneidad relativa. Esta homogeneidad informará asimismo de la certeza de la zonificación previa realizada o, en su caso, apuntará a una nueva agrupación en formaciones más acordes con los niveles de dispersión admisibles.

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. En este sentido, establece una tabla para el empleo en las conocidas como "couche de forme", que regula los posibilidades de uso según sigue:

UTILIZACIÓN POSIBLE DE SUELOS TRATADOS EN FUNCIÓN DE SU HOMOGENEIDAD	
Dispersión de la densidad máxima en el ensayo Próctor Normal (*)	**Posible utilización del material tratado**
≤ 4 %	Nivel de homogeneidad excelente pero que no está justificado exigir, salvo excepción, a una "couche de forme"
≤ 6 %	Material homogéneo que puede ser utilizado tras su tratamiento en todos los tipos de "couche de forme", y especialmente en las estructuras diseñadas analíticamente
≤ 8 %	Material medianamente homogéneo que puede ser empleado en la mayoría de las "couche de forme" de suelos tratados, con excepción de los anteriores
≤ 10 %	Material relativamente heterogéneo cuyo uso para "couche de forme" debe limitarse a vías de importancia media y pequeña

(*) La dispersión está expresada como la razón entre el recorrido de los valores aislados, si el número de ellos es igual o inferior a 10 (o al doble de la desviación típica si es mayor de 10) y la media de los valores.

Nota del autor: Si bien es posible trasponer el concepto de "couche de forme" a los firmes españoles y aplicar el mismo a las capas de suelos tratados con cal empleadas en coronaciones y terraplenes, se ha mantenido la denominación, bien conocida en nuestro país.

Parece pues deducirse de esta recomendación que es posible considerar homogéneo un yacimiento, una vez reconocido, si el rango de dispersión de los valores de densidad máxima del ensayo Próctor Normal es inferior al ocho por ciento (8 %), siendo razonable exigir valores entorno al 4 - 6 % de dispersión. **Si un conjunto de muestras de una formación satisface este criterio, se puede considerar que su mezcla puede ser adoptada como una muestra representativa de la misma a efectos del estudio de dosificación**.

Si de la aplicación de los criterios anteriores de muestreo y análisis estadístico se

concluyera 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.

3.4.- El estudio de dosificación de los tratamientos de suelos 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 previstas; y

e) El comportamiento a medio y largo plazo del tratamiento

La dotación o dosificación de cal seleccionada para el tratamiento de un suelo se expresa como la proporción entre el peso de producto de tratamiento aplicado y el peso total del conjunto de productos presentes en la mezcla, ambos entendidos como productos secos. La relación puede escribirse como sigue:

$$d\ \% = \frac{Q}{M_{Ss} + Q + m_{Cg}} * 100$$

en la que:

Q es el peso de producto de tratamiento;

M_{Ss} es el peso de suelo seco; y

m_{Cg} es el peso de las posibles adiciones incorporadas

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

La interpretación o posible aplicación del tratamiento en el caso "dudoso" deberá ser abordada en conjunción con el contexto particular la vía y responsabilidad de la capa en que se pretenda emplear el tratamiento.

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 compacidad 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.

La Guía Técnica del L.C.P.C.-S.E.T.R.A. establece una metodología para la comprobación de las condiciones de ejecución basadas en el siguiente esquema de estudio:

* Se debe partir de los valores de los estudios de compactación de ensayo Próctor del suelo natural así como, en su caso, de los de resistencia del CBR, obtenidos del estudio geotécnico previo.

* Se ha estimado el rango de valores de humedad natural del suelo (w_{NAT}) previsto en obra en el momento de la ejecución, expresados en un valor máximo ($w_{MÁX}$) y otro mínimo ($w_{MÍN}$).

* Elaborar la curva del ensayo Próctor Normal de la mezcla seleccionada para cinco contenidos de humedad diferentes, en cuyo rango debe comprenderse la horquilla de humedades naturales previsibles en el suelo en el momento de la ejecución. Se deben obtener de este estudio los valores de humedad óptima ($w_{ÓPT}$) y densidad máxima de la mezcla ($d_{MÁX}$).

* Obtener la curva del "Índice Portante Inmediato" (IPI), obtenido según se recoge en la norma francesa NF P 94-078, como expresión de la resistencia del suelo en el momento de su puesta en obra;

* Comprobar que para el valor de humedad natural más alto de los previstos ($w_{MÁX}$) el valor del IPI no es inferior a los contenidos en la siguiente tabla de referencia:

ÍNDICE PORTANTE INMEDIATO (IPI) A OBTENER EN LA PUESTA EN OBRA DE LA MEZCLA	
Índice de plasticidad del material base (*)	**IPI mínimo**
> 40	Requiere estudio especial
25 - 40	10
12 - 25	15
< 12	20

(*) Nota del autor: Se han transcrito las clasificaciones de los materiales de la Norma francesa traduciéndolos a los valores equivalentes a las españolas de manera estimativa suficiente para el contenido del texto

* Comprobar que el contenido de agua final de una probeta de suelo tratado fabricado con una humedad de partida equivalente al valor mínimo de la horquilla de humedades naturales previstas ($w_{MÍN}$), es superior o igual al 90 % de la humedad óptima obtenida para la mezcla en el ensayo Próctor Normal (0,9 * $w_{ópt}$).

En caso de que el rango de humedades naturales previstos no satisfaga las condiciones expuestas, será preciso plantear medidas adicionales de secado inicial del suelo (incumplimiento del IPI) o humectación previa (incumplimiento de la segunda condición). Incluso pudiera de esta situación desprenderse la necesidad de abandonar la técnica de tratamiento propuesto por la inviabilidad de su ejecución real.

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 ºC, 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 del 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 trascurrido 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:

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

3.5.- 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 este 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, para 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:

<table>
<tr><th colspan="4">ALCANCE DE LAS DISTINTAS FASES SEGÚN EL NIVEL DE ESTUDIO</th></tr>
<tr><th>FASE</th><th>NIVEL 1</th><th>NIVEL 2</th><th>NIVEL 3</th></tr>
<tr><td>Ensayo de aptitud del suelo</td><td colspan="3">Imprescindible</td></tr>
<tr><td>Dosificación de la cal</td><td>Viene propuesta por experiencias similares</td><td colspan="2">Hay que buscar el valor óptimo</td></tr>
<tr><td>Estudio de la fórmula de trabajo</td><td>Para el porcentaje propuesto</td><td>Al menos para dos-tres porcentajes diferentes en función de la experiencia</td><td>Salvo conocimiento especial es probable que se precise estudiar más de tres porcentajes</td></tr>
<tr><td>Condiciones de compactación</td><td>Comprobación de:
* IPI (**)
* Humedad de ejecución</td><td rowspan="4">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</td><td rowspan="4">Se estudiarán los valores obtenidos para cada porcentaje previsto, analizando los valores obtenidos</td></tr>
<tr><td>Plazos de trabajabilidad</td><td>Hay que estudiarlo o adoptar valores estándar</td></tr>
<tr><td>Comportamiento bajo el paso de tráfico</td><td>Comprobación de los valores de IPI - CBR</td></tr>
<tr><td>Comportamiento bajo hielo (Si existe este riesgo)</td><td>Comprobación de la resistencia a compresión simple</td></tr>
<tr><td>Estudio de sensibilidad ante las variaciones de dosificación</td><td>--</td><td>Realizar para cada parámetro por separado o evaluar unas condiciones críticas extremas</td><td>Realizar para cada una de las condiciones Próctor correspondientes y para cada dosificación seleccionada</td></tr>
</table>

ALCANCE DE LAS DISTINTAS FASES SEGÚN EL NIVEL DE ESTUDIO			
FASE	**NIVEL 1**	**NIVEL 2**	**NIVEL 3**
Dotación seleccionada	La prevista si cumple las comprobaciones realizadas. Si no, se pasa a estudio de nivel 2.	La más baja que permita asegurar las comprobaciones anteriores	Se realizará los cálculos de la dotación 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

3.5.- 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:

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

b) Obras para vías de tráfico reducido, que no van a ser sometidas a solicitaciones 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. Así 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 (*)**	**EFECTO**	**OBSERVACIONES**
Humedad natural	1 % (**)	Reducción del 1 %	
Índice de Plasticidad	2 %	I.P. mezcla < 20	I.P. original < 30
	3 %	I.P. mezcla < 15	I.P. original < 30
Hinchamiento	3 %	Eliminación del riesgo	Salvo compuestos químicos nocivos (SO_3, Cl, etc.)
Densidad máxima ensayo Próctor 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..

MÉTODOS DE EJECUCIÓN

La ejecución de los tratamientos de suelos con cal, al igual que la mayoría de las mezclas que suelen ejecutar en la obra civil, requiere usualmente el empleo de maquinaria muy diversa según el volumen, ubicación, alcance y precisión que se requiera para el tratamiento.

No es lo mismo plantear la mejora de una capa de asiento de una losa de cimentación que la estabilización de la capa de base de una autopista o pista aeronáutica o que mejorar en profundidad un sustrato en el que se apoya una estructura.

1.- Técnicas de ejecución de los tratamientos de suelos con cal

Si bien los requisitos de mezcla y compactación son casi universales, en función del tipo de tratamiento, la realidad es que las posibilidades de amasado en la obra o en central, de humectación y aplicación de la cal por fases o por ejemplo, la necesidad o no de escarificado previo e incluso la forma de presentación de la cal hacen que se multipliquen los posibles esquemas y métodos de ejecución en torno a una serie de variables a combinar.

En principio las técnicas de ejecución de los tratamientos de suelos con cal pueden clasificarse atendiendo a varios criterios según:

a) La **profundidad** a que se aplica el tratamiento:

* Por inyección profunda

* Mediante tratamiento superficial

b) La **presentación de la cal**:

* En polvo, pudiendo ésta a su vez aplicarse:

    * En sacos

    * A granel

* En lechada

c) Por el **tipo de cal** empleada, según sea:

* Cal viva

* Cal apagada

c) El **lugar de la mezcla**, que puede ser:

* En obra

* En central

En este capítulo se repasan las líneas generales de cada una de las técnicas más usuales entre las combinaciones posibles tratadas secuencialmente mediante el análisis de las operaciones aisladas que las constituyen. No obstante, no es objeto de este documento editar un tratado sobre maquinaria, sino más bien apuntar los principales condicionantes, ventajas e inconvenientes de cada sistema, indicando su repercusión en la eficacia del tratamiento.

2.- Fases del proceso constructivo

Salvando las diferencias lógicas que intervienen en cada uno de las técnicas de aplicación

enumeradas en el apartado anterior, el proceso constructivo que supone la aplicación de la cal a un suelo conlleva una serie de operaciones casi generalmente aplicadas a todas ellas. La diferencia en la mecanización, los materiales empleados, el lugar de empleo o los plazos y secuencias de ejecución son las que definen cada una de las técnicas específicas.

La secuencia típica más general de operaciones que compone la ejecución de un tratamiento de suelos con cal comprende así las siguientes:

a) Escarificado del suelo

b) Disgregación

c) Suministro de la cal

c) Aplicación de la cal

d) Humectación

e) Mezclado

f) Nivelación

g) Compactación

h) Curado

A continuación se repasan estas fases con sus características más relevantes y factores condicionantes que influyen en el resultado final del tratamiento.

2.1.- Excavación y escarificado del suelo

La primera operación precisa en el tratamiento de suelos con cal es la remoción de suelo a tratar del fondo de la excavación o del frente de cantera o préstamo.

En principio, la única diferencia que establece las posibilidades de realización de esta operación es si el material va a ser empleado en un lugar diferente o en la misma ubicación en que se extrae.

La primera posibilidad plantea la extracción del suelo a efectos de préstamo, bien para el uso en la propia obra bien en una zona diferente al origen del suelo. Este caso es de aplicación no sólo cuando la remoción se ejecuta desde un préstamo, sino también cuando, por ejemplo, el material una vez extraído de una zona de desmonte de la obra va a ser empleado como núcleo de terraplén en otra zona de la misma. En estos casos, la operación se suele ejecutar mediante maquinaria excavadora convencional, del tipo de palas o retroexcavadoras.

En esta primera opción, el hecho de la manipulación mediante arranque, carga, transporte y vertido del suelo ya hace que el mismo sea aireado y secado en cierta medida, en mayor grado que en la otra posibilidad que se verá a continuación.

El segundo caso supone la extracción del suelo para su empleo en la misma ubicación una vez se haya aplicado el tratamiento. Es en este caso cuando cabe hablar con mayor propiedad del escarificado del suelo, en tanto lo que se persigue es fundamentalmente su manipulación, sin precisar un transporte o movimiento del material.

La extracción o escarificado en estos casos suele ejecutarse con maquinaria de muy

diversa tipología, según el volumen y ubicación de la obra. Lo más usual es el empleo de escarificadores de dientes o “rippers”, acoplados a maquinaria de mayor o menor porte, desde tractores independientes del tipo de los empleados en el sector agrícola a motoniveladoras o incluso bulldozers de mediana potencia, en torno a 200 C.V. También se realiza en ocasiones mediante escarificadores con gradas de rejas o de disco, bien autopropulsados bien arrastrados por tractores.

Como caso especial hay que citar ya desde esta primera fase constructiva la posibilidad de empleo de maquinaria específica, usualmente integradas en equipos compactos o trenes de tratamientos que serán objeto de un apartado diferenciado posterior. En ellos usualmente el material es extraído por rodillos horizontales giratorios dotados de dientes, palas o picas que contribuyen además a la disgregación del suelo que se comentará en el próximo apartado. Otros tipos de equipos realizan la extracción mediante hojas de fondo en mototraíllas, pasando el material a mezcladores intermedios.

En todo caso, la única prescripción o condicionante especial que debe influir en esta operación es la profundidad de la remoción o escarificado. Es evidente que la maquinaria a emplear en cada caso debe ser acorde a la profundidad a tratar en cuanto ésta condiciona la potencia necesaria para el arranque del material. Es usual tratar de profundidades de excavación del orden de 30 a 50 centímetros, a partir de la cual es complejo realizar el escarificado puro y se suele tender al empleo de excavadoras convencionales.

Hay que tener en cuenta que lo más frecuente es que en esta operación se produzca un esponjamiento.

Un caso intermedio entre el de excavación y carga citado en primer lugar y el puro

escarificado es la extracción y acopio intermedio en cordones laterales, empleado cuando el espesor de material a tratar es excesivo para su tratamiento en una sola aplicación y se hacen precisas varias aplicaciones sucesivas. En estos casos lo usual es emplear sistemas mixtos, bien de excavación convencional hacia los bordes, bien de escarificado y extracción.

Si bien es una consideración a extender a todo el tratamiento de los suelos en la propia obra, hay que mencionar que desde el inicio de la extracción o escarificado, las operaciones se encuentran sometidas a las inclemencias meteorológicas, siendo muy susceptibles a las mismas. Es fácil suponer que una vez arrancado el material o en cualquiera de las fases posteriores, una precipitación sobre el mismo puede originar la paralización temporal de las obras e incluso su demora por un importante lapso de tiempo. Todas las operaciones descritas y las que se relacionan a continuación tienen por objeto permitir la entrada de los agentes estabilizantes en la masa del suelo, pero también incorporan el riesgo de la entrada de agua procedente de lluvias. Si este hecho se produce, lo más frecuente es que el suelo alcance un nivel de humedad y de falta de consistencia que haga casi imposible su manipulación. Esta situación se prolongará además no ya mientras duren las precipitaciones, sino incluso hasta que el suelo haya recuperado un nivel adecuado de humedad, lo que requiere un secado natural bastante prolongado.

Por todo ello, es importante tener en cuenta que el tratamiento de suelos, cuando se realizan las operaciones por separado, no debe acometerse si existe un riesgo de precipitación, ya que el no aplazamiento del tajo de obra puede redundar en importantes demoras en la misma. Evidentemente, si el tratamiento se realiza mediante equipos integrados más o menos compactos pero que trabajan en serie el riesgo de interrupción o afección por lluvia en una de las operaciones intermedias se minimiza, cuando no se elimina.

2.2.- Disgregación

Una segunda fase importante conceptualmente aunque en ocasiones se realice de manera conjunta con la excavación o escarificado es la disgregación del material.

El material que ha sido arrancado o removido de su ubicación inicial debe ser triturado o desmenuzado de manera que se posibilite su tratamiento de manera uniforme y homogénea. Además, en la mayoría de las ocasiones, dada la tipología arcillosa de los materiales a tratar, es preciso airear el suelo para permitir su secado o rebaje del nivel de humedad característico por lo que las operaciones de disgregación tienden a generar una mayor superficie de contacto de la masa del suelo con el aire. Estas operaciones aumentan en mayor medida el esponjamiento producido en las primeras fases, al incrementar notablemente el volumen de huecos en la masa del suelo.

Como se ha insistido en la descripción de los efectos del tratamiento de suelos con cal, la disgregación es un factor capital en su eficacia. Es preciso asegurar que el tratamiento llega a toda la masa del suelo de manera homogénea y que las reacciones que deben producirse a nivel de partículas micrométricas son posibles. Para ello deben eliminarse los grumos o agrupaciones de partículas adheridas o mantenidas por la humedad en exceso del suelo. Esto se consigue con la separación física de dichos grupos mediante acciones mecánicas.

La disgregación del suelo se suele realizar mediante maquinaria similar a la empleada en el escarificado, en especial rejas, gradas de disco u hojas de motoniveladora. En el caso de los rodillos de los equipos compactos, la potencia y velocidad de giro de estos rodillos es la que normalmente proporciona la disgregación requerida.

La eficacia y control de esta operación es ya un factor crítico a considerar y controlar.

Esta eficacia, como ya se ha comentado, suele medirse en términos de un tamaño máximo de grumo permitido o a la proporción de disgregación que se obtiene en obra sobre la que es posible obtener en el laboratorio mediante el secado y cernido del material.

2.3.- Suministro de la cal

Si bien no constituye una operación del tratamiento propiamente dicho, existe una serie de condicionantes que hacen que sea interesante plantear la forma en que se suministra y almacena la cal a emplear en una obra.

Como ya se ha citado, la cal puede suministrarse a una obra en forma de polvo seco, ensacado o a granel, y de lechada. La elección entre estas posibilidades suele realizarse basándose en criterios de volumen y costes de transporte usualmente, más que por razones técnicas de eficacia. Así, parece impensable que en obras de gran volumen se emplee la cal en sacos al igual que no parece razonable transportar desde grandes distancias la cal en forma de lechada, pues ello supone el acarreo de agua, con su repercusión en el coste de la materia prima. De la misma manera, no parece razonable disponer silos intermedios de cal en polvo para obras de pequeño volumen ni emplear en obras de este tipo medios especialmente potentes de dosificación de cal con altos rendimientos.

Partiendo de estas premisas, parece lógico, salvo excepciones, que la cal a emplear en una obra llegue a la misma en forma de polvo, bien en sacos bien a granel. En ambos casos se suelen disponer acopios intermedios que permitan el almacenamiento de la cal hasta el momento de su aplicación, ya que no es usual que ésta se produzca de manera directa a la llegada a obra. Incluso aunque así se planease, esta solución de empleo directo no es aconsejable, ya que cualquier retraso en el suministro interferiría en las obras con el riesgo

comentado de paralización por lluvia. De igual manera, si ésta se produce debería existir el acopio para el mantenimiento de la cal hasta su empleo una vez superadas las condiciones adversas.

El hecho de que la cal sea un producto sensible a la humedad ambiental y al dióxido de carbono incluso en su forma de cal apagada hace preciso que los almacenes de conservación en obra deban cumplir unas mínimas condiciones.

Por ello, las instalaciones usuales de acopio intermedio son, en función de la forma de presentación, las siguientes:

a) Cuando se emplea cal en **polvo en sacos** estos suelen venir apilados en palets o grandes sacos. Los sacos convencionales se suelen suministrar en envases de 25 o 50 kilogramos, mientras que los grandes envases o "big-bag" suelen contener hasta 1.000 kilogramos por unidad. En estos casos, el almacenamiento se realiza bajo zonas techadas o bajo toldos que eviten el contacto de la humedad con los envases, y debe procurarse que los envases o sacos vengan envueltos por fundas de plástico impermeables, al menos, en cada palet.

b) Cuando la cal se suministra a la obra en forma de **polvo a granel**, éste suele llegar en camiones cisterna con descarga a presión. Eventualmente se pueden emplear camiones volquetes de caja descubierta, solución ésta de todas formas poco acorde con los principios mencionados hasta ahora. Salvando esta posibilidad, es usual que el suministro de cal a granel requiera la disposición de silos intermedios, bien de tipo vertical, bien del tipo horizontal, similares a los remolques de los camiones de transporte. El paso de las cisternas de transporte a los silos intermedios se suele

realizar a mayor presión que la de descarga y almacén por lo que es importante considerar la diferente densidad del material a efectos del dimensionamiento de las capacidades intermedias precisas.

c) Excepcionalmente se pueden plantear acopios intermedios para la cal en forma de **lechada**, bien porque se suministre así, bien porque ésta se elabore en la obra y se prevea un proceso de fabricación independiente de la aplicación. En este caso normalmente se emplean para los acopios depósitos de líquido similares a las cubas de agua, de los que se extrae la lechada por simple gravedad No obstante, es preciso considerar que el almacenamiento de la cal en forma de lechada requiere disponer en los depósitos de dispositivos mezcladores que eviten la sedimentación o decantación del producto por permanencia excesiva en los acopios.

La capacidad de los silos o acopios intermedios deberá ser proporcional al rendimiento de la obra y dependiente de la distancia y frecuencia de suministro, previendo cualquier incidencia que haga necesaria mayor capacidad de almacén, como por ejemplo, una paralización de obra por avería, lluvia, etc.. Es usual en obras de consumo continuado estable disponer una capacidad de almacenamiento mínima equivalente al consumo de dos jornadas de trabajo.

De todas formas, los suministros de cal a las obras, dadas las características de deterioro del material, suelen estar coordinados y programados de manera conjunta entre el proveedor y el constructor de manera que se eviten pérdidas de material o paralizaciones de equipos por fallos en el aprovisionamiento.

Tan sólo en el caso de obras pequeñas, tajos no críticos o cercanía excepcional al

proveedor se suele trabajar sin acopio intermedio, aplicando la cal a los medios de extensión directamente, bien mediante descarga de sacos en la obra, bien mediante basculado de los camiones, bien mediante traspaso a presión a los equipos estabilizadores compactos.

El almacenamiento en forma de polvo en silos tiene el riesgo ya mencionado del contacto de la cal con el ambiente, lo que puede provocar su reacción de hidratación con la humedad o de carbonatación con el dióxido de carbono. Estas circunstancias, amén de alterar la eficacia del producto, pueden provocar obstrucciones y apelmazamientos en el interior de los silos y conductos susceptibles de derivar en la inutilización de los equipos. Por este motivo no es aconsejable almacenar la cal por un período de tiempo prolongado, limitándose usualmente el máximo plazo a unos quince días de acopio.

Si la cal a emplear se suministra apagada, el riesgo de hidratación y de deterioro de su eficacia durante el almacenamiento disminuye, pudiendo almacenarse por períodos de hasta varios meses, con las propias limitaciones, no obstante, que tiene el acopio de productos pulverulentos en cuanto al apelmazamiento mencionado.

Finalmente, hay que mencionar que la manipulación de la cal para su trasvase de las cisternas de transporte a los silos y de éstos a los equipos de obra suele originar la emisión de polvo al aire con el riesgo inherente no sólo de contaminación sino incluso de peligro para las personas en el caso de que se trate de cal viva, que puede hidratarse en contacto con la humedad de la piel.

2.4.- Aplicación de la cal

Si bien existen operaciones con un insalvable orden de precedencia, hay otras como la aplicación de cal, humectación y compactación, que permiten inicialmente una serie de

combinaciones en función de la tipología del tratamiento diseñado cuya gama completa es difícil enumerar. No obstante, como tales operaciones diferenciadas es posible estudiar sus características y factores condicionantes en la manera en que se describen en este apartado. Por tanto, debe quedar claro que la exposición del mismo no se corresponde con la única posibilidad de aplicación temporal de las operaciones.

El método de aplicación de la cal en las obras depende mucho de la tipología de la misma, su ubicación, las características del suelo a tratar y la dotación de cal diseñada. En principio, la extensión de la cal debe ser realizada por medios tales que se aseguren de manera inequívoca:

a) La cantidad de cal aplicada o dotación media, que suele expresarse en kilogramos de cal por metro cuadrado de superficie tratada; y

b) La uniformidad de la aplicación en la superficie de extensión.

Lo que se ha denominado dotación media es el equivalente de multiplicar la dotación volumétrica teórica proyectada por metro cúbico de suelo por el espesor tratado de manera simultánea. Analíticamente su obtención es sencilla mediante la siguiente expresión:

$$M = P * D * E$$

donde:

M = Dotación media (kg/m^2)

P = Dotación volumétrica teórica (%)

D = Densidad seca in situ del suelo a tratar (kg/m^3)

E = Espesor de la capa a tratar (m)

La extensión de la cal es una operación crítica e importante en el tratamiento. Esta importancia es mayor además cuanto menor es la proporción de cal a aplicar, por cuanto una irregularidad en la distribución puede incluso llegar a dejar zonas del suelo sin tratar por falta de adición. Piénsese que una dotación de un 2 % de cal para una capa de 20 centímetros de suelo equivale a unos 7 u 8 kilogramos de cal por metros cuadrado, cantidad difícil de extender con precisión y regularidad.

En principio el reparto de la cal suele realizarse mediante alguno de los siguientes modos, según la forma o presentación de cal a aplicar:

a) Si se aplica en polvo en pequeñas obras, la distribución suele hacerse en forma manual mediante sacos. Se distribuyen así los sacos en cuadrículas con una superficie de malla equivalente al cociente entre el peso total del saco y la dotación media proyectada. En estos casos, los sacos extendidos se abren o rompen mediante rastrillos o rasquetas por operarios y a continuación se procede a la extensión del polvo, manualmente o mediante motoniveladoras convencionales o tractores con dispositivos distribuidores. Estas operaciones de extendido suelen realizarse en estos casos de manera simultánea a la mezcla que se analizará en el apartado siguiente.

b) Si la cal se aplica en forma de polvo suministrado a granel se suelen emplear extendedoras de diversos tipos más o menos sofisticadas. Estas extendedoras cubren un amplio abanico de equipos con precisiones muy dispares. La mayoría suelen funcionar por dosificación volumétrica, lo que ya introduce una cierta imprecisión en los trabajos. El principio de las extendedoras es el vertido por gravedad del polvo a través

unas trampillas o rejillas tras los dispositivos de control. La principal diferencia entre ellas es el control de la dosificación, según sea:

* Volumétrico e independiente de la velocidad de avance de la extendedora: Es el caso de los volquetes basculantes, autopropulsados o remolcados, en los que el único control es la regulación de la pendiente del volquete y la velocidad de avance de la cabeza tractora. La caída del polvo se produce por gravedad. Es un sistema bastante impreciso y muy dependiente del personal que lo manipula.

* Volumétrico con dosificación servodirigida por la velocidad de avance del motor de la cabeza tractora o extendedora. En este caso la distribución de la cal en polvo se regula mediante un sistema extractor de cinta o de tornillo cuyo movimiento está coordinado con el avance de la extendedora, de manera que se elimina parcialmente la dependencia del operario y de las incertidumbres del avance. Estos equipos suponen una evolución de los anteriores y en ocasiones incluso incorporan tolvas para dosificación que mejoran el reparto. Tanto este sistema como el anterior adolecen sin embargo de los inconvenientes de una dosificación volumétrica, de precisión bastante inferior que la dosificación por peso, en especial en el caso de aplicación de polvo.

* Volumétrico con dosificación servodirigida y con control ponderal. Es una variación del sistema anterior, vaciado por gravedad con sistema distribuidor intermedio accionado por el motor de avance. Se diferencia en la existencia de un cierto control ponderal instalado normalmente en la cuba de almacenamiento del material a verter. Estas balanzas controlan por diferencia el peso de polvo empleado y lo correlacionan con la velocidad de extensión. También es posible

dotar estos equipos con fluidificadores, indicadores de nivel de cal y otros dispositivos que mejoren el control del vertido.

La aplicación de cal en polvo, en especial mediante extendedoras suele originar un problema de emisión de polvo que es preciso considerar en mucha mayor medida que cuando se aplica la cal en forma de lechada o incluso mediante sacos.

c) Si la cal se aplica en forma de lechada la aplicación se suele realizar mediante cubas con dispositivos de riego que, al igual que ocurre en el caso de la extensión en polvo, pueden tener distintos grados de mecanización o control. Los equipos más frecuentes están formados por cubas con barras distribuidoras, por gravedad o a presión, en los que el caudal aportado puede estar o no servodirigido con la velocidad de avance de la cuba. La aplicación mediante lanza manual es un método arcaico y muy poco empleado en este tipo de tratamientos.

La distribución de la cal en forma de lechada tiene no obstante una incertidumbre menor que la realizada en forma de polvo. Esto se debe a que el comportamiento de un fluido es más regular que el de un producto pulverulento y se ve menos afectado por el viento y los agentes exteriores. Además su regulación es más fácil en cuanto a que su conversión a dosificación por peso es más sencilla.

La precisión de las extendedoras descritas suele dejar bastante que desear, salvo en los casos de que los equipos estén dotados de dispositivos de control ponderal regulado por la velocidad de avance. Incluso en estos casos es difícil asegurar la uniformidad del reparto, pudiendo garantizarse para los mejores equipos distribuciones entre un 70 y un 130 % de la dotación media prevista en un 99 % de la superficie tratada. Este aspecto hay que tenerlo en

cuenta a la hora de proyectar las dotaciones teóricas dado que puede redundar en una clara insuficiencia de la cal aplicada en gran parte de la obra si no se considera.

Además, si se tiene en cuenta que los rangos usuales de caudal de aplicación para el tipo de maquinaria descrito suele oscilar entre 5 y 60 kg/m^2 es fácil entender que trabajar en la parte inferior de dichos rangos repercute negativamente en la precisión de la extensión. Por ello, en función de los medios disponibles en obra será conveniente ajustar las dotaciones y espesor del suelo a tratar para evitar una concentración de incertidumbres excesiva en el reparto de la cal.

Otro aspecto a considerar en la aplicación de la cal, en especial cuando ésta se aplica en forma de polvo, es que hay que tener en cuenta que es necesario corregir en cierta manera la dotación de cal proyectada para tener en cuenta las posibles pérdidas derivadas del proceso de aplicación, como arrastres por viento, pérdidas laterales, hidratación durante el vertido, pegado a los neumáticos de los vehículos que la manipulan, etc..

La aplicación de la cal suele hacerse en una anchura que rara vez supera los dos metros y medio, por lo que es usual tener que aplicar varias pasadas en calles paralelas para cubrir la totalidad de la superficie a tratar. En estas pasadas es importante controlar los solapes para evitar nuevas irregularidades en la extensión tanto por exceso de aplicación como por defecto, generando zonas sin cal.

Como se ha comentado anteriormente, en ocasiones la cal se aplica en fases sucesivas, con intercalación de riego, compactación o escarificado eventual según las tipologías del tratamiento proyectado. Este hecho no interfiere ni modifica los sistemas de aplicación mencionados, y tan sólo condiciona en alguna manera la tipología de los equipos a emplear.

Hay que mencionar que en ocasiones es posible realizar la extensión de la cal de manera previa a las operaciones de escarificado y disgregación del suelo relatadas en apartados anteriores. Esta posibilidad de tratamiento es usual cuando la cal se aplica en forma de polvo, ya que se optimizan los procesos constructivos haciendo simultáneas estas operaciones con la de mezclado. Sin embargo, cuando la cal se aplica en forma de lechada, si ésta se hace inicialmente, es posible que se compliquen las operaciones de escarificado y disgregación del suelo por la adición del agua que incorpora la lechada.

El control de la dotación media de cal aplicada es complejo y suele realizarse de manera global dividiendo el peso total de cal empleado en un tramo o jornada por la superficie tratada. Este control tiene la evidente deficiencia de que mide la cal empleada, no la realmente aplicada, con lo que obvía posibles pérdidas por arrastre del viento, adherencias a la maquinaria, etc.. Además no evalúa la homogeneidad de la extensión, lo que supone una limitación importante cuando se emplean métodos sencillos o maquinaria del tipo agrícola. Por otra parte, controles directos del tipo de la medición en recintos predefinidos o planchas están evidentemente sesgados por el conocimiento previo de la zona a controlar.

2.5.- Humectación

La humectación del suelo es una operación que, al igual que ocurre en la extensión convencional de terraplenes, persigue la mejor compactación del mismo. Para ello, basado en los datos procedentes del ensayo de compactación próctor y de la humedad natural in situ del suelo, se obtiene la cantidad de agua a aplicar al mismo.

Conceptualmente la humectación del suelo en los tratamientos con cal tiene tres aspectos importantes a considerar:

a) En primer lugar, hay que tener en cuenta que si se aplica la cal viva ésta requerirá parte de la humedad existente en el suelo para la reacción de hidratación o apagado, por lo que será preciso añadir una cantidad suplementaria a estos efectos.

b) En segundo lugar, el empleo de una cantidad insuficiente de agua puede tener efectos negativos en el tratamiento:

* Por una parte, hace peligrar la distribución de la cal en el suelo cuando ésta se aplica en forma de polvo. La regularización del contenido de cal es más fácil en el medio acuoso que en forma de polvo, que suele presentar grumos o adherirse al suelo sin llegar a penetrar entre sus partículas. Además, en el caso de que se persiga el efecto de la reacción puzolánica en un suelo es evidente que hay que liberar la sílice y alúmina de las partículas arcillosas, lo que es preciso conseguir haciendo llegar a las mismas el medio acuoso básico imprescindible para su disolución.

* Por otra parte, como se ha mencionado en el caso de los suelos con presencia de sulfatos o sales solubles que puedan incidir en el tratamiento, es aconsejable producir esta disolución y provocar la interferencia de los sulfatos lo antes posible en el proceso de estabilización.

c) En último lugar, la aplicación de un exceso de agua en suelos arcillosos, incluso tratados con cal, puede originar un empeoramiento de las condiciones de trabajabilidad de los mismos.

Como contrapartida a estas limitaciones, se ha visto que la aplicación de cal a un suelo aplana su curva característica de compactación, haciendo menos sensible la densidad final

obtenida a la humedad aportada para una misma energía de compactación. Por ello, si bien se ha mencionado como importante el control de la humedad éste lo es más por los motivos indirectos mencionados que por su efecto final en la densidad del suelo tratado.

Es evidente que cuando la cal se aplica en forma de lechada la fracción de agua que se incorpora al suelo en ésta debe ser deducida también de la cantidad total de agua que es preciso aplicar al suelo para su compactación.

Los equipos empleados usualmente para la humectación del suelo son las cubas regadoras convencionales de riego de terraplenes. Estos medios sueles estar poco mecanizados y el control del caudal de agua aplicado suele ser bastante deficiente. Tan sólo en el caso de los equipos compactos de tratamiento de suelos se incorporan sistemas de inyección y control de agua mediante bombas dosificadoras que regulan con una mayor precisión la humedad final aplicada a la mezcla de suelo y cal.

Al igual que se ha mencionado en la aplicación de la cal, el proceso de humectación del suelo puede proyectarse de manera que se realice por fases. Estas fases, que persiguen en general la mayor trabajabilidad y mezclado, se pueden también hacer secuenciales de manera previa o posterior a la aplicación de la cal para optimizar los procesos. En general es frecuente que la humectación inicial del suelo se reduzca o limite a valores mínimos por razones constructivas, mientras que la aportación final de la cantidad restante de agua se realice en el momento de la compactación de la mezcla.

2.6.- Mezclado

Una vez aplicadas al suelo las dotaciones de cal y caudales de agua proyectados previos al mezclado, se hace preciso realizar el amasado de los materiales para conseguir un

producto homogéneo.

Si bien esta es una operación crítica en el tratamiento de los suelos, el empleo de maquinaria no específica o inadecuada para el tipo de suelo o dotación a aplicar hace que en ocasiones no se pueda garantizar la correcta mezcla y, por tanto, la eficacia global del tratamiento.

La maquinaria que se suele emplear en estas operaciones, dependiente de nuevo del tamaño y tipo de obra, suele agruparse en las siguientes categorías o tipologías:

a) Máquinas de tipo agrícola, usualmente remolcadas por tractores de mediana o gran potencia (100 a 300 C.V.), entre las que caben mencionar los siguientes dispositivos:

* Gradas de disco, lastradas o no, que suelen tener diámetros de hasta 1.200 milímetros. Proporcionan un mezclado deficiente y presentan riesgos de atascos en suelos muy plásticos en que el simple efecto de los discos no es suficiente para deshacer bloques que puedan atascar el mecanismo. Requieren normalmente la realización de varias pasadas sobre un mismo material y su profundidad eficaz no va más allá de 20 o 25 centímetros. Se emplean en tratamientos de baja importancia por sus bajos rendimientos y por su deficiente garantía de homogeneidad.

* Rejas o equipos especiales del tipo de los arados agrícolas que con diferentes formas, separaciones y ángulos de ataque, permiten el manejo de diversos tipos de suelos. Tienen rendimientos y posibilidades similares a las gradas de disco y tan sólo se diferencian de ellos en que usualmente están diseñados o adaptados a este tipo de obras.

* Rotobator, o equipos que mediante palas o azadas fijadas sobre un cigüeñal remueven el suelo en el interior de un tambor provocando su disgregación tanto por impacto como por el efecto de cribado producido por barrotes dispuestos en el tambor. Aún siendo elementos del tipo agrícola, suelen tener mayores rendimientos que los anteriores y permiten tratamientos de hasta 35 centímetros de profundidad. La más importante limitación es que se atascan en suelos susceptibles de presentar elementos gruesos de tamaño similar a las rejillas de barrotes, tales como gravas o bolos.

b) Motoniveladoras convencionales de extensión de capas granulares. Mediante el juego de inclinaciones en vertical, horizontal y abatimiento de la hoja o cuchilla de la niveladora es posible mezclar el material. Frente a la clara limitación del excesivo número de pasadas preciso para mezclar el material, aportan la ventaja de su disponibilidad universal en las obras de tierra y de la gran destreza en su dominio que tienen los maquinistas experimentados. La limitación en cuanto a profundidad de tratamiento se establece en el número de pasadas precisas para ello. Por este motivo no suele emplearse este sistema para alcanzar espesores importantes.

c) El tercer gran grupo de mezcladoras lo constituyen los equipos de pulverizadores específicos, o “pulvimezcladores”, asociados con frecuencia a equipos compactos o trenes de estabilización. Funcionan mediante rotores dotados de cuchillas, palas o picas que a gran velocidad consiguen el amasado de los materiales. Estos rodillos se encuentran alojados en tambores cerrados que acentúan el efecto de mezclado por el impacto en la cámara interior. Normalmente el rodillo tiene la doble misión ya descrita de arrancar y disgregar el material en la parte posterior del mismo, y de mezclarlo en

la superior. El diámetro del rodillo o rotor junto con la profundidad de su eje condicionan el espesor máximo de capa a tratar, que llega en ocasiones a los 50 centímetros. Por otra parte la calidad del mezclado se asegura mediante la velocidad de giro del rotor, que a su vez garantiza la mejor disgregación del suelo, y la apertura de la salida del tambor, que condiciona el tiempo de permanencia en la cámara de mezclado. En estos equipos también es usual trabajar con un sentido de rotación inverso al avance de la máquina, lo que aumenta los efectos mencionados. Dada la posibilidad de ajuste de la velocidad y tiempo de mezclado, es usual que estos equipos realicen el tratamiento de un sola o, a lo sumo, dos pasadas. Tan sólo pueden establecerse limitaciones a estos equipos en suelos con presencia importante de gruesos y por el propio desgate de los elementos de arranque, cuyo mantenimiento es preciso asegurar.

La tipología y potencia de la maquinaria empleada en el mezclado es usualmente el factor condicionante del espesor máximo de capa a tratar. Dado que en el ámbito de los suelos la potencia de compactación no suele ser limitante con los medios existentes en las obras, es esta operación la que lo condiciona. Es preciso para asegurar la viabilidad de un espesor de tratamiento que los dispositivos empleados (discos, rejas, dientes, vertederas, etc.) lleguen hasta la parte inferior de la capa, pero que además lo hagan con la potencia y nivel de amasado necesarios y coherentes con los aportados en superficie. Si esta uniformidad no se puede avalar, la mezcla será diferente y graduada en profundidad.

Por otra parte dado que la anchura de tratamiento de los equipos mencionados siempre está limitada a un máximo de unos dos metros y medio, es necesario solapar las pasadas de los equipos de mezclado un mínimo de 20 centímetros entre calles adyacentes.

El control del mezclado y su homogeneidad es una operación compleja y difícil de

realizar. Tan sólo en ocasiones se han propuesto mediciones aisladas de contenido en calcio de los suelos comparados con los previos al tratamiento o de control del pH que no dan más que indicadores cualitativos sin que sea posible concluir con certeza el grado de homogeneidad del material.

2.7.- Nivelación

Una vez realizada la mezcla de suelo y cal, en fases o global, es preciso nivelar la capa tratada para proceder posteriormente a su compactación sobre una superficie regular y que satisfaga los requisitos de tolerancia geométrica establecidos.

Es habitual que esta operación se realice en las obras mediante motoniveladoras convencionales, en especial cuando el tratamiento de mezcla se ha llevado a cabo mediante maquinaria agrícola que dejan un aspecto final muy irregular y esponjado. Excepcionalmente en capas inferiores en que las prescripciones de acabado son más laxas se emplean bulldozers con hoja delantera para la nivelación de las capas.

Tan sólo cuando se emplean equipos con regla de precompactación en salida esta operación de nivelación puede ser evitada. Sin embargo, incluso en el caso de los trenes típicos de estabilización, esta solución es atípica.

Hay que mencionar como caso especial que en ocasiones se plantea la demora de la nivelación de los suelos mezclados en unos días, no más de siete normalmente, para permitir que la cal actúe y reaccione con el mismo y aprovechar en mayor intensidad las ventajas de la mejora en la propia ejecución de la capa de suelo tratado. Esta variación en el proceso tiene, no obstante, importantes limitaciones constructivas por cuanto redunda directamente en el plazo de una obra cuando se trata de una sucesión de capas de material tratado, como es el

de los núcleos de terraplenes. Sin embargo, es viable en los casos de capas de coronación y capas de base de infraestructuras y pistas aeronáuticas.

Un aspecto a considerar cuando se nivela un suelo con cal in situ es que el tratamiento suele llevar asociado un cierto incremento de volumen que modifica la rasante inicial del terreno de partida. Este efecto se debe a la modificación de la textura ya descrita por floculación y aglomeración de partículas que, por ejemplo, también redundaba en una menor densidad máxima de compactación en el ensayo próctor. Evidentemente, el incremento de volumen no tiene nada que ver con posibles hinchamientos o expansividades que, al contrario, se deben reducir o eliminar con el tratamiento. Sin que tenga mayor relevancia que el aspecto geométrico en cuanto a tolerancia de acabado, es una peculiaridad a considerar en las capas tratadas susceptibles de constituir la coronación o tongada superior de una estructura de tierra.

2.8.- Compactación

Una vez mezclados, nivelados y humectados los materiales, se procede a la aplicación de la energía de compactación precisa mediante rodillos de neumáticos, lisos o de pata de cabra.

El empleo de uno u otro tipo de rodillos, así como el uso de vibradores, no dista mucho de las normas convencionales de aplicación a los suelos. En principio es recomendable la realización de unas pasadas previas con rodillo de pata de cabra seguido de rodillos lisos metálicos, ambos con vibración. No obstante, el efecto de la vibración debe ser limitado para evitar que suba el agua de las capas inferiores.

En todo caso, la potencia de los equipos de compactación tiene que ser acorde al espesor y tipología de los suelos tratados, y debe haber sido probada de manera previa en

tramos de prueba. Es preciso asegurar en todo caso que se alcanza el grado de compactación proyectado ya que en función de él se tendrá en el material tratado una mayor o menor capacidad portante.

Como particularidad para la compactación de suelos tratados con cal hay que citar que el proceso debe iniciarse lo antes posible para evitar que la cal permanezca en exceso en contacto con el aire y puedan producirse reacciones de carbonatación que reduzcan su eficacia ante las partículas de arcilla.

También hay que decir que los suelos tratados con cal permiten su recompactación durante los primeros días, a diferencia de los tratados con cemento, ya que los procesos de mejora inmediatos no se alteran por estas acciones de compactación.

Cuando el tratamiento se realiza con cal viva es recomendable dejar unas horas de espera entre las operaciones previas y la compactación para asegurar la hidratación total de la cal antes de su compactación.

Finalmente hay que mencionar que en ocasiones es preciso realizar una segunda nivelación de los suelos tratados una vez finalizada la compactación ya que su nueva textura origina irregularidades que no se eliminan mediante los rodillos, como sí ocurre en los suelos normales. Esta nivelación o refino posterior, al igual que la recompactación, no afecta a los mecanismos iniciados si se realiza en edades tempranas.

2.9.- Curado

Si bien la ejecución de capas tratadas con cal no requiere especiales condiciones de conservación, es lógico que sea recomendable preservarlas de las inclemencias meteorológicas

que pueden afectarle, tales como la insolación, la lluvia y la helada.

La evaporación del agua dosificada convenientemente por causa de la radiación solar o el incremento sustancial de la misma por efectos de precipitaciones pueden alterar el comportamiento de las capas. En todo caso esta alteración debe evitarse y para ello es recomendable realizar operaciones de conservación de la humedad, tipo curado, o preventivas de aislamiento, tipo sellado.

Normalmente se plantea en las obras de tierra el mantenimiento de las capas tratadas mediante riegos periódicos cuando su superficie va a estar expuesta de manera prolongada a la evaporación.

En cuanto al sellado de capas es un tratamiento inusual y reservado a capas de base o subbase en las que en todo caso se pudiera incluso prever la aplicación de este riego como uno de imprimación para la recepción de capas asfálticas superiores.

El caso particular de la protección de las capas contra el riesgo de heladas, que tienen efectos nocivos en edades avanzadas de los tratamientos de estabilización, suele requerir medidas específicas para cada obra. Un ejemplo posible si la capa va a estar sometida a estas inclemencias es proyectar la extensión de una capa superior o un sobredimensionado del espesor de la capa tratada. Este exceso podría ser removido una vez haya pasado el riesgo de helada y recuperada la superficie definitiva, afectada en menor intensidad por el efecto de las mismas.

3.- Secuencias típicas del tratamiento de suelos in situ

Como se ha citado, el conjunto de posibles combinaciones de las operaciones

elementales descritas anteriormente es muy variado en función de las dotaciones a aplicar, tipos de efectos perseguidos, forma de aplicación de la cal, estado natural del suelo, etc..

Existen no obstante una serie de esquemas o secuencias típicas de aplicación que responden a la problemática más frecuente en los suelos. Estos esquemas, en el caso concreto del tratamiento de suelos in situ se enumeran a continuación de manera secuencial:

a) **Aplicación única en forma de polvo**: En estos casos, es usual realizar la extensión de la cal de manera previa y aprovechar las operaciones de escarificado y disgregación del suelo para realizar de manera simultánea el mezclado. El esquema es entonces el que sigue:

Aplicación cal ➜ Escarificado-Disgregación-Mezclado-Humectación previa ➜ ➜ Humectación final ➜ Nivelación ➜ Compactación ➜ Refino

La humectación del suelo inicial persigue una mejor mezcla y efecto de la cal, mientras que la final persigue la adición de fluídos para la compactación de la mezcla.

Tan sólo se plantea como variante en este esquema la posibilidad de dejar curar el material unas horas o incluso días antes de la nivelación y compactación definitiva.

b) **Aplicación única en forma de lechada**: Este proceso requiere la disgregación previa del suelo según el esquema siguiente, con la posibilidad adicional también del curado parcial intermedio:

Escarificado ➜ Disgregación ➜ Aplicación de la cal ➜ Mezclado ➜
➜ Humectación (adicional si procede) ➜ Nivelación ➜ Compactación ➜ Refino

c) **Aplicación de polvo en dos etapas**: Que se diferencia fundamentalmente de la primera posibilidad en la repetición de los pasos intermedios del proceso tras un período

de reacción o curado de la mezcla con una primera aplicación parcial:

1ª fase	Aplicación cal ➜ Escarificado - Disgregación - Mezclado ➜ ➜ Humectación ➜ Nivelación previa
2ª fase	Aplicación cal ➜ Mezclado ➜ Humectación ➜ ➜ Nivelación ➜ Compactación ➜ Refino

Suele aplicarse este proceso especialmente en suelos muy plásticos en que las condiciones de trabajabilidad son malas o en suelos especialmente húmedos que pretenden secarse mediante cal viva. Con la primera aplicación se persigue mejorar estas condiciones y poder completar el tratamiento en circunstancias favorables que aseguren la homogeneidad y alcance del mismo.

En todo caso, la pre-nivelación en la primera fase con una precompactación es aconsejable que sea realizada para dejar el suelo en condiciones relativamente favorables de defensa ante cualquier incidencia climatológica, de tránsito de vehículos, etc. que pudiera plantearse en la obra.

d) **Aplicación de lechada en dos etapas**: Este proceso suele ser preciso cuando se requiere aplicar al suelo un contenido de cal tal que el volumen de lechada a aplicar es excesivo en proporción a la humedad óptima de compactación del suelo. En estas circunstancias, si no es posible derivar el tratamiento hacia la aplicación de cal en polvo, la secuencia podría ser tal y como se indica:

1ª fase	Escarificado ➜ Disgregación ➜ Aplicación de la cal ➜ Mezclado ➜ Nivelación previa
2ª fase	Aplicación cal ➜ Mezclado (Escarificado suave) ➜ ➜ Nivelación ➜ Compactación ➜ Refino

Es evidente que son aún posibles otras combinaciones diferentes a las mencionadas, coherentes con otros medios o situaciones de partida. Sin embargo, tanto la descripción de los procesos realizada como las líneas generales que marcan las secuencias típicas ilustran la metodología práctica de tratamiento que sirve de guión y pauta para el planteamiento de cualquier otra situación específica.

4.- El tratamiento en central

Debido a las claras diferencias en los procesos de mezclado que conlleva el tratamiento de suelos en central, se trata en este apartado específico.

El mezclado de suelos en central se entiende de aplicación fundamentalmente cuando el tratamiento de los suelos se realiza para su aplicación en una ubicación diferente a la de su extracción o fuente original. En estos casos parece justificado introducir en el proceso unas operaciones de carga y transporte que, en las restantes ocasiones, no rentabiliza su sobrecoste.

También puede justificarse en el caso de que se persiga la obtención de un material de especial calidad, del tipo de bases estabilizadas, o se pretenda controlar de una manera muy estricta la cantidad de cal aplicada, fundamentalmente persiguiendo su optimización en grandes volúmenes.

En todo caso, el empleo de centrales para la fabricación de la mezcla parece así provocado más por razones de economía o logística que por razones técnicas o constructivas, sobretodo con la diversidad de maquinaria específica existente, ya descrita.

El esquema clásico de una central de tratamiento incluye una mezcladora trituradora

que disgrega el suelo aportado y lo amasa con la cal, dosificada por peso o volumen según el tipo de instalación. La mezcla suele producirse mediante paletas en ciclos de producción continua o discontinua.

5.- Los trenes de tratamiento o plantas móviles

Un caso especial son las denominadas "plantas móviles". Estas instalaciones se corresponden más con la denominación de "trenes de tratamiento" por cuanto no constituyen una instalación fija independiente como tal. Se trata de equipos pesados que extraen el suelo del terreno y producen su mezcla fuera de la misma, vertiéndolos mediante cinta transportadora en acopios intermedios tras el paso del tren.

Se componen así de los siguientes elementos secuenciales:

a) Un escarificador o excavador del suelo, del tipo de los descritos;

b) Una cinta de transporte del material, o bien un transportador de cangilones;

c) Una criba para los materiales que llegan a la mezcladora;

d) Una mezcladora de paletas;

e) Unos depósitos auxiliares de cal y agua, con sus dosificadores; y

f) Una cinta de salida y vertido del material mezclado.

El material tratado queda así vertido en montones a la salida de la cinta que es preciso extender, nivelar y compactar una vez retirado el tren de mezclado.

6.- Los equipos compactos de estabilización

Finalmente, como equipo más sofisticado y de mayor rendimiento, cabe mencionar de manera especial a los equipos compactos de estabilización, cuyo funcionamiento ha sido apuntado en algunos de los epígrafes anteriores.

Se basa su filosofía en el empleo de maquinaria autopropulsada multifuncional que, debidamente alimentada de manera permanente por depósitos auxiliares de agua y cal, funcionan a velocidad constante en un proceso continuo, dejando a su paso el material tratado.

El esquema de mecanismos más completo que puede componer un sistema compacto de estabilización es el siguiente:

a) Un elemento de transporte, que puede formar parte del propio equipo o exterior, siendo éste remolcado;

b) Un dispositivo de escarificado y mezclado compuesto por un rotor ajustable en altura con picas que, en el interior de un tambor produce el arranque del suelo y su disgregación, a la vez que asegura la mezcla con los materiales aportados desde fuentes externas;

c) Un sistema de control de profundidad, espesores, inclinación transversal del rotor y ajuste de su velocidad, incluso con la de traslación, que asegura las dimensiones de la sección tratada;

d) Un sistema de alimentación y transferencia de fluidos para su dosificación y aplicación del suelo, con los depósitos o cisternas de suministro que circulan en serie al equipo;

e) Un sistema dosificador mediante difusores de aditivos líquidos, agua y lechada de cal, ajustado a la velocidad del vehículo y usualmente con control ponderal y de presión;

f) Una cámara de mezclado con abertura trasera por la que se produce la salida del material tratado y amasado;

Evidentemente es posible configurar equipos que no incluyan todos estos mecanismos pero que puedan integrarse dentro de la categoría de equipos compactos. Así por ejemplo, puede concebirse el tratamiento mediante maquinaria como la descrita habiendo aplicado la cal directamente en polvo de manera previa sobre la superficie del suelo.

Al tratar de estos equipos es usual hablar de estabilización ya que es más frecuente su empleo en capas en las que el efecto perseguido va más allá de la simple mejora. No obstante esta denominación no supone que no puedan emplearse en éstos casos, si bien se debe asegurar un rendimiento suficiente que haga viable económicamente el tratamiento con estos equipos.

Los equipos compactos de estabilización permiten obtener capas tratadas en espesores de hasta 50 centímetros con unas características de homogeneidad muy satisfactorias. Además el control de dosificación de cal y agua, que es posible visualizar mediante los sistemas de control adosados al equipo en ocasiones, permite una mayor fiabilidad en el tratamiento aplicado.

7.- Las inyecciones de cal en profundidad

Por la peculiaridad y especificidad del tratamiento, se aborda en el presente de manera somera la estabilización en profundidad mediante inyección en el terreno, proceso típico de

aplicación para recalce de construcciones o tratamientos en profundidad de problemas geotécnicos muy diferentes al que usualmente se plantea en las estructuras de tierra convencionales, tales como los de hinchamiento o riesgo de lixiviado.

En estos casos el mecanismo operativo se basa en la inyección en taladros hasta profundidades del orden de 3 metros ubicados en una malla de 2 a 3 metros de separación entre taladros.

Los efectos de esta mejora han sido descritos por algunos autores, si bien su empleo específico en obras puntuales no aporta mayor información a los efectos de este documentos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANCADE Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España (2.002): ***"Manual 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 Laboratories 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.

Jímenez, J.A. y De Justo, J.L. (1.975): ***"Geotecnia y cimientos".*** Editorial Rueda, Madrid.

Little, D. N. (1.995): ***"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", Metarie (Louisiana).

Mitchell, J.K. y Dermatas, 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.

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)

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

Orden Circular 10/2002 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

AFNOR (1.997): ***"Norme NF P 94-100. Essai d'evaluation de l'aptitude d'un matériau au traitement à la chaux et aux liants hydrauliques"***. París.

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. Aplication 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.