el suelo estabilizado, material de construcción

la cal, como adición para estabilizar suelos arcillosos

J. NADAL, ingeniero de caminos

812 - 5

1. La cal - Generalidades

1.1. LA CAL VIVA

En el plano teórico se identifica la cal viva con el óxido de calcio (CaO), obtenido, generalmente, por calcinación del carbonato cálcico (CO₃Ca) a temperaturas del orden de los 900° C.

Cuando la materia prima contiene también carbonato magnésico (CO₂Mg), el resultado de la calcinación es una mezcla de óxido cálcico y magnésico (CaO + MgO) que se conoce por cal gris o cal dolomítica.

En los tratados de materiales de construcción, se llama cal viva al producto industrial que se obtiene tratando, a la temperatura indicada, ciertas calizas, que contienen, además de los dos compuestos aludidos, otras impurezas, especialmente óxidos metálicos y sílice. Los residuos del combustible en muchas ocasiones quedan incorporados al conglomerante, con lo que la composición de ésta es muy variable.

A título de ejemplo incluimos a continuación un cuadro aclaratorio, tomado de una publicación americana:

CALES INDUSTRIALES

Cal grasa (%)	Cal dolomítica (%)
92,25 a 98	55.50 a 57,50
0,30 a 2,50	37,60 a 40,80
0,40 a 1,50	0,40 a 1,50
0,20 a 1,50	0,10 a 1,50
0.10 a 0.40	0,05 a 0,40
0.10 a 0.50	0,05 a 0,50
0,10 a 0,90	0,10 a 0,90
	92,25 a 98 0,30 a 2,50 0,40 a 1,50 0,20 a 1,50 0,10 a 0,40 0,10 a 0,50

1.2. LA CAL APAGADA

Puesto en íntimo contacto el óxido cálcico (CaO) con el agua, tiene lugar una reacción química con fuerte desprendimiento de calor, cuyo resultado final es el hidróxido cálcico o cal apagada:

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + 15,3$$
 kcal

La hidratación del óxido magnésico (MgO) es mucho más lenta. Esta diferencia entre la aptitud a la hidratación de ambos compuestos da lugar a distinguir en las mezclas dos estados distintos:

Cales grasas
$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$$
 cal hidratada
$$Cales \ dolomíticas \ \begin{cases} (CaO + MgO) + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + MgO \ cal \ monohidratada. \\ (CaO + MgO) + 2H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + Mg(OH)_2 \ cal \ dihidratada. \end{cases}$$

En la práctica de la construcción, la hidratación de la cal se realiza mediante el llamado «apagado», que—como es sabido—consiste en mezclar el producto anhidro con agua según procedimientos tradicionales admitidos. Del cuidado y precauciones que se tomen en esta operación depende, en gran parte, la composición de las cales apagadas, lo cual, unido a las propias impurezas del conglomerante industrial, es causa de que, con frecuencia, el producto final que se emplea en obra obedezca a composiciones que difieren notablemente de las teóricas hasta ahora expuestas. A título de ejemplo se incluye a continuación la composición calculada resultado del análisis de una cal grasa empleada en Madrid:

COMPOSICION CALCULADA DE UNA CAL APAGADA

Carbonato magnésico (CO ₂ Mg)	1,2 %
Carbonato cálcico (CO ₃ Ca)	13,2
Hidróxido cálcico Ca(OH),	55,0
Pérdida al fuego sobrante (agua)	16,7
Resto	13,9
Total	100

1.3. CARBONATACION

El hidróxido de calcio y el magnésico, puestos en contacto con el CO₂ del aire, se carbonatan dando lugar de nuevo a carbonatos cálcico y magnésico:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CO_3Ca + H_2O$$

Estas reacciones son generalmente muy lentas, especialmente en el caso del hidróxido magnésico, y dependen, de un modo fundamental, de la proporción de anhídrido carbónico del aire por lo que tienen lugar con menos lentitud en ambientes industriales que en zonas rurales.

1.4. CALES HIDRAULICAS

Cuando la materia prima utilizada en la fabricación de la cal es una marga con proporciones apreciables de sílice y alúmina, se obtienen conglomerantes hidráulicos tratando el material a las temperaturas convenientes. Las propiedades hidráulicas de las diversas cales son muy variables y cubren una extensa gama, que va desde una ligera acción que apenas si se tiene en cuenta en los usos normales de este material, a los cementos naturales.

2. La cal en España

La producción de cal en nuestro país es relativamente baja y tiene lugar casi siempre por procedimientos de artesanía, lo que resta interés a este material, cuando menos a los efectos que nos proponemos desarrollar en estas notas, por cuanto la composición y propiedades pueden ser muy variables de unas a otras partidas de diferentes suministradores e, incluso, entre diferentes entregas de un mismo productor.

2.1. NORMAS VIGENTES

Las cales para construcción están reguladas por las siguientes normas:

UNE 41066. Cales para construcción.—Definiciones.

UNE 41067. Cal aérea para construcción.—Clasificación. Características.

UNE 41268. Cal hidráulica para construcción.—Clasificación. Características.

De los cementos naturales se ocupa el Pliego de Condiciones para la Recepción de Conglomerantes Hidráulicos en las obras de carácter oficial (edición de diciembre de 1960), el cual distingue dos variedades: cemento natural rápido y cemento natural lento.

Las limitaciones y tolerancias que se fijan para estos materiales se reducen a la finura de molido, tiempo de fraguado y resistencias, con alguna prescripción relativa a la estabilidad de volumen.

La norma UNE 34004 h. l. define la cal para usos agrícolas, para la que exige un mínimo del 90 % de CaO en la cal viva y un máximo de 4 % de materias arcillosas y silíceas. Esta norma puede resultar particularmente útil en las aplicaciones de estabilización de suelos.

2.2. PRODUCCION

Según nuestros datos la producción anual de cal se eleva a 125.000 t, obtenida en más de 800 caleras repartidas prácticamente por todo el país y de las cuales sólo una rebasa las 20.000 toneladas anuales.

Los combustibles son de lo más variados, pues como tales se emplean desde la leña al carbón de cok, pesado naturalmente, por lignitos y otros carbones de baja calidad.

Respecto del cemento natural, la situación es un poco diferente: La producción rebasa las 700.000 toneladas anuales, y en ciertas regiones, especialmente en Cataluña, dispone el mercado de cantidades muy apreciables. No se diferencia demasiado, sin embargo, de la cal en lo que a número de fábricas se refiere ni a la constancia de composición y características, ya que, según parece, en nuestro país hay más de 230 fábricas, de las cuales algunas trabajan únicamente en ciertas épocas, acompasando su producción a las necesidades del mercado local:

CEMENTO NATURAL

Región	Producción anual aproximada (toncladas)
Aragón	7.000
Cataluña	460.000
Centro	12.000
Levante	34.000
Norte	66.000
Sur	125.000
TOTALES	704.000

3. Acción de la cal como estabilizante

La cal, agregada a ciertos suelos, produce diversos efectos puestos de manifiesto en las aplicaciones prácticas y en los laboratorios. Estos efectos no han encontrado aún clara explicación en todos los casos. En principio, parece demostrado que:

- 1.º La cal hace el suelo arcilloso más friable y le confiere propiedades que, en cierto modo, corresponden a los limos e incluso a suelos granulares.
- 2.º Reduce la plasticidad de los suelos.
- 3.º Favorece el secado de los suelos muy húmedos.
- 4.º Favorece la compactación de los suelos con humedades naturales muy altas.
- 5.º Mejora la estabilidad de los suelos a efectos de las lluvias prolongadas.
- 6.º Incrementa la resistencia del suelo al esfuerzo cortante y a compresión.
- 7.º Reduce la influencia perniciosa de la materia orgánica.

Estas propiedades generales de las mezclas de suelo y cal pueden analizarse considerando que ésta actúa según cuatro procesos:

- a) Cambios iónicos.
- b) Acción aglutinante.
- c) Carbonatación.
- d) Acción cáustica y neutralizante.

3.1. CAMBIOS IONICOS

De este fenómeno ya nos ocupamos en el artículo anterior, cuando nos referíamos al hecho de que los cationes de calcio electropositivos reemplazaban los iones metálicos, especialmente sodio e hidrógeno, en la superficie de las partículas de arcilla o en el interior de las mismas. desequilibrando las cargas eléctricas y provocando una floculación que hacía más friables los suelos y bajaban su plasticidad.

El fenómeno ofrece cierta semejanza con lo que ocurre al disolver jabón en aguas duras, ya que, en este caso, los oleatos de sodio cambian sus iones sodio por los correspondientes al calcio que están menos hidratados y se origina la típica floculación de todos conocida. El paralelismo entre ambos fenómenos es tanto mayor cuanto que es necesaria una cierta dispersión para que tenga lugar, y se producirá tanto más rápida e intensamente cuanto más íntimo sea el contacto y cuanto mayor sea la capacidad de adsorción de cationes, lo cual depende, muy directamente, de la constitución de los núcleos de las micelas de la arcilla.

Generalmente, la capacidad de cambio se expresa en miliequivalentes de cationes por cien gramos de arcilla, siendo mayor cuanto más elevado es el peso atómico dentro del mismo orden de valencia.

Así, por ejemplo, la serie de iones monovalentes ordenados según la capacidad creciente de cambio, sería: Li < Na < K < NH $_4$ < R $_b$ < CS, y la correspondiente a divalentes: Mg < Ca < < Sr < Ba; lo cual quiere decir b que es relativamente fácil desplazar iones, Mg—pongamos por caso—, por iones Ca, y que éstos quedarán más firmemente retenidos en el núcleo que lo estaban los anteriores, como lo estarían aún más los iones Ba, y así sucesivamente. Los cambios iónicos según la escala decreciente no son fáciles, y es de señalar que este cambio que estamos esbozando no es privativo sólo de los iones inorgánicos, y que el contenido de agua de un suelo —es decir, su dispersión—juega un importante papel.

En la práctica de la estabilización de suelos el cambio de bases justifica que en ciertos suelos muy plásticos, incompactables por su gran contenido de humedad, sea la cal el corrector ideal, ya que a las pocas horas de agregada—aun en proporciones relativamente bajas—el suelo se hace más friable, desciende la plasticidad, se seca con rapidez y, por lo tanto, se compactan

[•] Influyen también, y de un modo decisivo, los diámetros de los iones, lo que trae nuevas variables que complican el problema que en orden a las aplicaciones prácticas no tiene otra solución que la confirmación experimental en obra o laboratorio.

bien y son resistentes a nuevas aportaciones de agua, como puede ser, pongamos por caso, las lluvias prolongadas.

En España, y según nuestra información, hay poca experiencia sobre el particular, pero actualmente el Instituto Eduardo Torroja, en colaboración con el de Edafología, estudia estos temas de los que aún no hay suficientes datos; pero, a título de avance, diremos que las investigaciones actuales se centran en suelos con mucha proporción de finos y alta plasticidad. En todos ellos, se confirma un aumento de la humedad óptima del orden del 10 al 15% para proporciones de cal viva del 6%, lo que puede tener importancia en regiones donde haya necesidad de trabajar con suelos cuya humedad natural sea superior al óptimo proctor. En estos casos, podría ser una solución agregar CaO al suelo y compactar después. La compactación debe seguir a la adición de la cal; mas si por cualquier circunstancia ambas operaciones se separasen en el tiempo algunos días, ello no sería inconveniente, e, incluso, parece confirmarse que la humedad óptima aumenta algo con el tiempo, por lo menos dentro de las dos primeras semanas. El empleo de la cal apagada, a los efectos del óptimo de humedad, es más incierto, ya que, si bien en algunos suelos de límites líquido y plástico muy altos resulta a los quince días ser más eficaz a igual proporción que la cal viva, en otros de índices menores parece, por el contrario, no ejercer influencia sensible.

Los ensayos realizados hasta ahora parecen confirmar también que, en efecto, la cal hace más friable algunos suelos y que débiles proporciones de este corrector permiten desmenuzarlo mejor, deshacer los terrones y, en definitiva, preparar el suelo con mucho menos esfuerzo, pero estos resultados carecen de la generalidad que es conveniente para utilizaciones reales en obras y, sobre todo, no se han encontrado aún unas correlaciones de valor práctico entre esta propiedad y las restantes características del suelo que maneja el ingeniero.

Respecto de la resistencia cabrían también nuevos comentarios que omitiremos en favor de la brevedad, pero que esperamos poder tratar con más detalle en otra ocasión.

3.2. ACCION AGLUTINANTE

No todos los fenómenos que tienen lugar en los suelos con adición de cal siguen la línea descrita hasta ahora: en parte porque las cales empleadas tienen, como ya hemos visto, otros compuestos distintos del OCa o del Ca(OH)₂ según se emplee viva o hidratada; en parte también porque los suelos contienen, en muchos casos, elementos que les confieren ligeras propiedades puzolánicas.

Esto hace que los minerales con ciertos contenidos de sílice o de alúmina reaccionen con el conglomerante y formen, como en el caso de los cementos, un gel que favorece la compactación, y una vez que ésta tiene lugar y las partículas entran en íntimo contacto, se deja sentir una acción aglutinante que se pone de manifiesto, entre otras maneras, incrementando la resistencia del suelo tanto a tracción como a cortante y, consecuentemente, también a compresión. Esta acción es siempre más lenta que en el caso de los cementos portland, salvo en el caso de utilizar cales hidráulicas del tipo de los cementos naturales, en cuyo caso pueden ser, incluso, notablemente más rápidas. En líneas generales, podemos establecer, para fijar ideas, que la acción

aglutinante depende de las propiedades puzolánicas del suelo, de la temperatura ambiente y del grado de humedad.

Cuando el poder puzolánico del suelo es pequeño o nulo, puede superarse la dificultad que esto pueda suponer agregándole alguna puzolana natural o artificial, como son las cenizas volantes y de hogar, técnica que merece ser tratada con mayor extensión de lo que sería posible dentro de los estrechos límites de este artículo.

La temperatura ambiente, como ocurre con el cemento, es muy importante, ya que las reacciones tienen lugar con tanta mayor velocidad cuanto más alta sea aquélla, con la diferencia de que, comoquiera que en la cal todos los fenómenos que interesan al constructor se producen con mucha mayor lentitud que en el portland, es necesario y muy conveniente cuidar y aprovechar todo aquello que puede contribuir a acelerarlos.

Finalmente, la humedad ambiente, especialmente en el interior del macizo compactado, debe mantenerse algún tiempo por encima de un cierto nivel, por razones de todos conocidas.

3.3. CARBONATACION

La carbonatación de la cal es la fase en que realmente el conglomerante pasa a constituir un cuerpo duro y resistente, y por lo tanto, desde estos puntos de vista, la más importante en cualquier aplicación. Sin embargo, la carbonatación es lenta, tanto más cuanto que en el interior de un suelo bien compactado la circulación de aire, y por lo tanto del CO₂, es escasa, por lo que en el suelo estabilizado, y especialmente en sus aplicaciones a la carretera, hay que contar con que tendrá lugar, en gran parte, durante el período de servicio de la obra.

Por el contrario, cuando la cal hidratada se almacena en espera de su utilización y cuando ya se ha vertido en el terreno y se mantiene suelta antes de la compactación, la carbonatación es mucho más intensa y resta eficacia a su empleo, si se dejan transcurrir demasiados días.

3.4. ACCION CAUSTICA Y NEUTRALIZANTE

La materia orgánica—como ya ha quedado indicado en los artículos que preceden al presente—es, tal vez, de todos los componentes del suelo, el que más preocupa al ingeniero por su influencia perjudicial en todos los aspectos: geométrico, mecánico y químico. Bien es verdad que en algunos casos y en ciertas fases de transformación, puede contribuir a la estabilización, pero estas circunstancias son relativamente poco frecuentes, y salvo en algunas aplicaciones a edificación, constituyen las excepciones que confirman la regla. Concretamente, en el suelo-cemento, técnica que pretendemos exponer con mayor detalle más adelante, la influencia de la materia orgánica es perjudicial, no sólo desde los puntos de vista ya tratados en otras ocasiones, sino también por cuanto su carácter, muchas veces ácido, inhibe el fraguado del conglomerante.

La cal, sin embargo, es una de las pocas excepciones y, especialmente, la cal viva. No le afectan las actividades bacterianas, que pueden llegar incluso a descomponer ciertos estabilizantes del tipo de las resinas, la celulosa y hemicelulosa; no ejercen sobre ella acciones tan decisivas como, por ejemplo, sobre el cemento, el agua de lluvia o filtraciones que, al pasar a través de la materia orgánica se carga de ácido carbónico; contribuye a la carbonatación de la cal, y, a su vez, la acción cáustica y neutralizante de la cal es tan intensa que, en muchos casos, provoca una rápida descomposición de los complejos orgánicos en otros más simples, de manera que, en algunas ocasiones, puede incluso utilizarse la cal como previo corrector de un suelo que, posteriormente, haya de tratarse con cemento.

No debe, sin embargo, interpretarse cuanto antecede con excesivo optimismo, en la idea de que al suelo-cal no le afecta el contenido de materia orgánica, ni muchos menos que ésta ejerce un efecto beneficioso, sino que debe tomarse en el sentido de que la cal puede servir para paliar algunos de los inconvenientes, dentro de proporciones razonables.

4. Propiedades del suelo-cal

4.1. GRANULOMETRIA

Los suelos con gran proporción de partículas finas, es decir, arcilla, y especialmente si la plasticidad es alta, son más sensibles a la adición de cal que los compuestos, principalmente por arena y limo. Ello se debe a la floculación de las partículas finas y su aglutinación posterior, lo que hace en algunos casos que, pasados unos días de hecha la mezcla, el análisis granulométrico del suelo acuse un notable incremento de arena fina y limo, así como una reducción en tamaños que pasan por el tamiz 200. Las partículas secundarias así formadas no son siempre resistentes al agua, y sumergida la mezcla suelo-cal se produce de nuevo una desintegración y consiguiente tendencia a la granulometría primitiva. La intensidad de floculación, la proporción de aglomerados resistentes al agua y el tamaño de los mismos, depende de la naturaleza del suelo y de la actividad de la cal, siendo mayor, por lo tanto, con cal viva que con hidratada.

También versan sobre este punto las investigaciones que se llevan a cabo en el Instituto Eduardo Torroja, y también aquí los resultados hasta ahora obtenidos precisan de nuevas confirmaciones para poder aventurar reglas de carácter general. Se ha confirmado que, un cambio favorable en la granulometría obtenida por adición de cal, deja de comprobarse en muchos casos al sumergir el suelo en agua y proceder a un nuevo análisis granulométrico por lavado, no obstante lo cual, en algunos casos la reducción de partículas que pasan por el tamiz 200 llega a ser del orden del 20 %, incluso después de haber mantenido empapado el terreno durante algún tiempo y, por supuesto, procediendo también al análisis mecánico por vía húmeda o de lavado.

4.2. PLASTICIDAD

En general, parece comprobado que la adición de cal eleva el límite plástico de los suelos y reduce el límite líquido, si bien esto último tiene lugar, principalmente, en suelos muy plás-

ticos y puede tener el efecto contrario en los de menos plasticidad. El índice de plasticidad se reduce casi siempre, y en tanto mayor grado cuanto más alta es la proporción de cal.

Los fenómenos que dan lugar a estas variaciones en la plasticidad del suelo, tienen lugar en su mayoría durante los primeros días de hecha la mezcla, y aún cabe afirmar que en las primeras horas, siendo más intensos para la cal viva que en el caso de utilizarla hidratada. Es muy posible que continúen a largo plazo, pero ya muy lentamente y sin excesivo valor a los efectos de las aplicaciones a construcción.

4.3. CAMBIOS DE VOLUMEN

La adición de cal reduce los cambios de volumen del suelo, y en algunos casos se comprueba la existencia de un valor óptimo de la proporción cal/suelo a estos efectos.

El tema tiene mucho interés para las aplicaciones de los suelos estabilizados en firmes de carretera, pero hasta la fecha se carece de datos en número suficiente para poder dar reglas de carácter general, especialmente en lo que se refiere a los suelos españoles.

4.4. HUMEDAD OPTIMA, MAXIMO PESO ESPECIFICO Y RESISTENCIA

Un fenómeno difícil de explicar y que produce muchas veces alarma en los ingenieros que trabajan por primera vez con estabilizaciones a base de cal, es que, para una misma energía de compactación, la humedad óptima crece y el peso específico decrece con el contenido de cal.

Hay alguna excepción que confirma la regla, mas estas excepciones no son demasiado frecuentes.

Sin embargo, y afortunadamente, esta disminución en el peso específico no implica una minoración de la resistencia mecánica del suelo tratado respecto del suelo original, sino todo lo contrario, y desde luego, a igualdad de peso específico (lo que implica para el suelo-cal una mayor energía de compactación), la resistencia de la mezcla es notablemente superior a la del suelo sin tratar. Ocurre, no obstante, que es difícil valorar el incremento de resistencia que proporciona la adición de cal, tanto en el caso de una compactación a menos peso específico (igualdad de energía) como en el de igual densidad (mayor energía). La dificultad estriba en que el tanto por ciento de aumento es distinto según el sistema que se siga para determinar las resistencias: CBR, estabilómetro, próctor, triaxil, etc., etc.

Lo que se comprueba al tratar este tema es que la resistencia, siendo función de muchas variables, no puede preverse con suficiente aproximación sin recurrir a pruebas de obra en las que las características del suelo, tipo de la cal, edad, condiciones de curado, compactación, etc.,

tienen importancia extraordinaria y la influencia de cada una en los resultados es decisiva en la mayoría de los casos, sin que quepa hacer un análisis por separado, ya que cada variable está, a su vez, influenciada por las demás. Así, por ejemplo, en ciertos suelos las cales grasas son más adecuadas, y su acción, en forma de cal viva, es más rápida que hidratada. Las cales dolomíticas actúan mejor en monohidrato que en dihidrato, y en suelos muy arcillosos producen a largo plazo resistencias mayores que las cales con bajo contenido de magnesia, pero todo ello se ve muy influenciado por las condiciones de curado, hasta el punto de que, según sea éste, puede aparecer, en la curva proporción de cal-resistencia, un valor óptimo, o puede, por el contrario, crecer constantemente la resistencia con el contenido de aglomerante, al menos dentro de las proporciones en que en la práctica se utiliza la cal.

Evidentemente, un suelo arcilloso con propiedades puzolánicas apreciables resulta más apto para ser tratado con cal que un suelo granular donde este conglomerante no ofrece, generalmente, ninguna ventaja apreciable.

Cuando el aumento de densidad se logra por un mayor esfuerzo de compactación tiene también importancia primordial en la resistencia; pero cuando se incrementa por adición suplementaria de cal, apenas si hace crecer ésta.

El tiempo de curado influye, pero tiene más valor la calidad del curado que su duración, tanto más cuanto que en el suelo-cal la edad no tiene (aunque pueda parecer paradógico) la misma importancia que en una mezcla a base de cemento. Lo que sí tiene una influencia extraordinaria en la resistencia es la temperatura de curado. A temperatura baja el aumento de resistencia es insignificante. A las temperaturas normales (de 20° C aproximadamente) el aumento es más rápido, pero la resistencia que así se obtendría en unos meses puede lograrse en sólo unos días si la temperatura se mantiene por encima de los 60° C.

4.5. DURABILIDAD

Es un hecho que los suelos estabilizados con cal son durables en el sentido de resistentes a los agentes climáticos, pero la dificultad estriba en definir esta durabilidad. Los ensayos de laboratorio hoy por hoy son rudimentarios y poco clara su correlación con la obra. Esto constituye una de las dificultades con que cuenta esta técnica de estabilización y, en general, podremos decir que es común a todas las técnicas análogas. En el caso concreto que nos ocupa, los suelos estabilizados son más durables cuanto más tiempo transcurre entre su ejecución y la actuación sobre ellos de circunstancias climáticas adversas, lo cual no tiene, como pudiera creerse a primera vista, una relación directa con la resistencia mecánica, ya que ésta puede forzarse a alcanzar en pocos días valores muy altos mediante tratamientos especiales—térmicos sobre todo—sin que ello implique paralela evolución de la durabilidad. Sin embargo, a igualdad de otras circunstancias, la durabilidad es creciente con el grado de compactación y, probablemente, en la mayoría de los casos sea mayor si se emplea cal viva (especialmente dolomítica) que si se utiliza la cal apagada.

Dentro de la dificultad de establecer reglas fijas en esta materia que nos ocupa, pueden admitirse las aludidas influencias del tiempo en la durabilidad, así como los efectos beneficiosos de las temperaturas altas.