

# **el suelo estabilizado, material de construcción**

## **los conglomerantes como estabilizantes de suelos**

*J. NADAL, ingeniero de caminos*

812-5

Cuando se añade al suelo un conglomerante—de los tradicionalmente utilizados en construcción—no se pretende exactamente obtener un mortero u hormigón, sino un material que transmita adecuadamente las cargas, que admita ciertas deformaciones sin grave detrimento de su continuidad y que sea estable frente a los agentes atmosféricos, especialmente a los cambios de humedad.

Evidentemente, los hormigones y morteros cumplen estas condiciones, aunque no siempre en el mismo grado que se piden a un suelo estabilizado. Esto justifica que algunos ingenieros aborden las aplicaciones del suelo, especialmente cuando se estabiliza con conglomerantes, desde el mismo ángulo que consideran para los conglomerados típicos de construcción, lo cual no es ni lícito ni conveniente, puesto que si en algunos casos los materiales finales tienen semejanzas que pudieran justificar este común enfoque de problemas, no es menos cierto que difieren muy notablemente en los procesos que tienen lugar durante su formación. Estas diferencias se basan en que, así como en los hormigones los áridos son esencialmente cuerpos inertes, en la técnica de estabilización, el suelo y, concretamente, sus partículas pequeñas, cumplen cometidos mucho más complejos no bien conocidos aún en todos los casos.

El estudio completo de los fenómenos que tienen lugar desde el momento que se empieza a tratar un suelo hasta que ya estabilizado forma parte de una construcción, casa o carretera, no se ha hecho aún por las dificultades que encierra, ni siquiera se han llegado a fijar, con

certeza y generalidad, las características de las transformaciones que más directamente contribuyen a la estabilización, por cuanto son muy contados los casos en que la ciencia, la técnica y las aplicaciones prácticas han encontrado, en sus actuales grados de desarrollo, enlaces tan fuertes como tienen en otros aspectos de la construcción. Todo intento en este sentido resulta, hoy por hoy, demasiado aventurado para que pudiera tener un valor positivo en orden a las aplicaciones; sin embargo, parece también que sin un esquema funcional, aunque incierto e incompleto, no es posible hacer una revisión ordenada de los temas que interesan, lo que puede servir de justificación a nuestra osadía de intentar, en este artículo, una exposición global de los posibles fenómenos que tienen lugar cuando se estabiliza un suelo, que, si bien pueden diferir de la realidad, al menos no está en oposición con los conceptos fundamentales vertidos en los primeros artículos de esta serie y contribuirán a avivar inquietudes en los estudiosos.

## **Partículas gruesas**

Las partículas gruesas de un suelo, ese entramado que le proporciona rozamiento interno, se comportan, una vez estabilizado, poco más o menos a como constituyentes de un hormigón, porque, en general, no son activas, y, aún cuando no fueran intrínsecamente inertes, su escasa superficie específica justifica la escasa intensidad de las reacciones — caso de haberlas — que sólo interesan en algunos casos, muy contados, de combinación con los álcalis del conglomerante, de los que no vamos a ocuparnos por ser tema de excepción que habitualmente se trata fuera de las disciplinas que ahora nos ocupan.

## **Partículas finas**

Son las partículas finas del suelo las que centran nuestra atención, por cuanto, dada su enorme superficie específica, en ellas y en torno a ellas se desarrollan la mayoría de los fenómenos que nos proponemos esbozar.

Hasta hace bien poco, la técnica de estabilización de suelos se había desarrollado de espaldas a las características químicas y mineralógicas de las partículas finas, de las que sólo se consideraba su proporción y algunas de las propiedades que imprimen a los suelos que las contienen. Sin embargo, sólo el conocimiento de sus estructuras y composición puede explicar los diferentes procesos que tienen lugar durante el tratamiento de un suelo y su posterior comportamiento. Las partículas finas a que nos referimos son, además de la materia orgánica, los óxidos metálicos y los compuestos de silicio y aluminio que constituyen la arcilla.

La dificultad mayor estriba en que las estructuras arcillosas son extraordinariamente complejas, difíciles de determinar, especialmente en los suelos reales, donde aparecen mezclas cuyo estudio exige la contribución de especialistas, medios de investigación hasta cierto punto poderosos, y técnicas de trabajo de desarrollo lento que dan resultados de incierta interpretación.

## Silicoaluminatos

Como regla general, podemos aceptar que los minerales de la arcilla están compuestos por iones positivos ( $\text{Si}^{4+}$ ;  $\text{Al}^{3+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ...) y otros que como el  $\text{O}^{2-}$  y  $\text{OH}^{-}$  son negativos.

Podríamos representar su estructura como una serie de tetraedros u octaedros, en el centro de los cuales un ion del primer conjunto agrupa a varios del segundo. Así, pues, los tetraedros  $\text{Si}$  rodeado de 4O se unirían por sus vértices dando lugar a una capa tetraédrica, que se ha representado en la figura 1 por medio de un doble esquema, apareciendo en *a*) en alzado y en *b*) en planta. Del mismo modo, un ion  $\text{Al}^{3+}$ , rodeado de seis (OH), podría formar un octaedro, varios de los cuales unidos por sus aristas darían lugar a una capa octaédrica.

Puede concebirse, en fin, que una capa octaédrica y otra tetraédrica se asocien formando un mineral del grupo 1.1, como, por ejemplo, la caolinita, o que dos capas tetraédricas empaqueten una tercera octaédrica formando un mineral del grupo 2.1, todos los cuales tendrían estructura laminar y serán, normalmente, electronegativos, por cuanto en su superficie y en sus bordes quedarán cargas negativas sin neutralizar de los iones O u OH.

La unión entre estas bicapas o tripacas, que hacen crecer los espesores de las láminas, se logra, según los minerales de que se trate, por muy diversos sistemas. Estos enlaces, que pueden ser de tipo exclusivamente electrostático, como en el caso de la clorita, pueden estar constituidos con cationes generalmente alcalinos o alcalinotérreos.

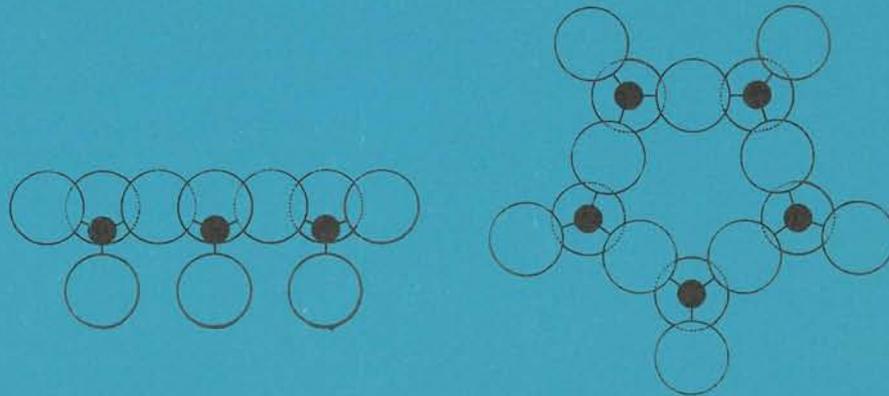


Fig. 1

De este modo hemos llegado a construir la partícula de un mineral de los que constituyen la arcilla. Las propiedades dependerán, tanto del elemento central de los tetraedros y octaedros como de la imbricación de las dos o tres capas tetraédricas y octaédricas, como de los enlaces que retengan unidos estos conjuntos de capas entre sí.

## Sustituciones isomorfas

La primera transformación que cabe imaginar en lo más íntimo de la estructura del mineral, sería la sustitución de los elementos centrales—silicio en los tetraedros o aluminio en los oc-

taedros—por otro átomo. Estas sustituciones se condicionan especialmente por el volumen de los iones, y así, por ejemplo, si el átomo *Si* de un tetraedro se sustituye por *Al*, de mucho mayor tamaño, el mineral resultante tendrá las propiedades que se derivan de una mayor separación de los átomos de oxígeno.

Estas sustituciones, muy corrientes en la naturaleza y que justifican la gran diversidad de minerales con análoga estructura, requieren para llevarse a cabo mucho tiempo y circunstancias muy favorables, hasta el punto que parece poco probable pudieran tener lugar con motivo de los tratamientos de suelos con vistas a su estabilización; no obstante, la creciente resistencia mecánica a largo plazo observada en ciertos suelos estabilizados con conglomerantes podría justificarse por la aparición de nuevos minerales debidos a transformaciones o sustituciones del tipo de las que nos ocupan.

## Cationes de cambio

Los conjuntos bicapas o tricapas, tal como los hemos descrito, pueden resultar eléctricamente neutros, aun cuando normalmente son ligeramente electronegativos, como ya ha quedado dicho, pero la sustitución de un elemento central, pongamos por caso el *Si* en tetraedros, por otro de menos cargas, como sería el caso del *Al*, implica un desequilibrio eléctrico con un exceso de cargas negativas que se compensan con cationes externos, generalmente alcalinos o alcalino térreos, dando lugar, de este modo, a arcillas sódicas o arcillas potásicas, según sean los cationes de sodio o potasio los que neutralicen las cargas. Una arcilla sódica es compacta e impermeable, mientras que la potásica es más suelta y drena mejor. Pues bien, la presencia de determinados cationes del estabilizador o cationes liberados por reacciones provocadas por éste, puede sustituir parte de aquellos cationes de cambio, variando el comportamiento del suelo en aspectos que, como la permeabilidad, la compactibilidad, etc., tienen una importancia decisiva en los procesos de estabilización.

Ciertos suelos muy arcillosos, cuando se mezclan con cal, tienen la particularidad de hacerse friables y adquirir propiedades de limos; esto puede deberse, en parte, a una sustitución de bases en las capas más superficiales, y en parte también, a un cambio de cationes, mediante el cual las cargas negativas de las superficies y bordes se saturan con cationes de calcio, y esta preponderancia de iones divalentes de calcio tiene la particularidad de juntar diversas partículas, es decir, de flocular la arcilla, lo cual hace que el suelo se vuelva más friable y pierda plasticidad.

Según la estructura de los minerales que constituyen la arcilla y el mejor o peor acceso a los cationes *Mg* y *K* empaquetados entre las capas esenciales, la arcilla será más o menos activa, es decir, tantos más cationes podrían cambiarse; y cuantos más cationes estén disponibles para el cambio, tanto más estabilizante se consumirá en la operación y tanto más variarán las condiciones del suelo en favor de una mejor estabilización. Por igual razón, cuanto menos actividad tenga la arcilla, menos proporción de adición estabilizante será necesaria, pero menor será la influencia que sobre ella pueda ejercerse en este sentido. Así, por ejemplo, en una caolinita con espacio interlaminar inaccesible y con escasas cargas negativas por neutralizar, los cationes de cambio serán muy escasos y muy escasa, por lo tanto, la acción que sobre ellos puede ejercer un conglomerante como estabilizador, si se prescinde del efecto de aglutinación del que más tarde nos ocuparemos.

## Estructura de la arcilla

Estos paquetes de capas básicas, unidas, como ya se ha dicho, según mecanismos muy variados, sería lo que se conoce por partículas coloidales, y como tales, dada su gran superficie, o son eléctricamente negativas (raramente positivas) o son neutras por sí mismas o por la acción de los cationes de cambio que saturan dichas cargas, especialmente en los bordes de las laminillas.

Pero estas partículas, así, en ese estado de dispersión coloidal que permite considerarlas por separado, no se encuentran normalmente en el suelo, y si se quieren lograr ha de acudir a sistemas de laboratorio, disoluciones, sustitución de cationes por otros dispersantes (fosfatos, pongamos por caso) u otras técnicas, lo cual no es normal en las obras.

Las partículas tienden a asociarse formando conjuntos, bien por la acción del agua adsorbida entre partículas cuyas tensiones (véase primer artículo de esta serie) pueden ser muy considerables, bien por cationes de cambio que, como los de  $Ca$ , las favorezcan por acciones de tipo electrostático, etc., etc.

Sin entrar en mayores detalles, ya se vislumbra una nueva posibilidad de actuación de los conglomerantes a base de calcio como estabilizantes, y es la que proporciona este catión para reforzar o favorecer la estabilidad de los conjuntos; como ya se comprende también, que la aptitud de un suelo a la estabilización en general y, concretamente, a la estabilización por conglomerantes tradicionales en construcción, no puede ser independiente de la historia edafológica del propio suelo y, concretamente, dependerá en parte de los cultivos que haya tenido en las capas superiores y de los abonos que hayan recibido dichos cultivos, puesto que los abonos son, precisamente, cálcicos, potásicos, fosfatados, amoniacales, etc., muchos de los cuales pueden haber alterado, por cambio de cationes, la constitución primitiva del terreno a estabilizar \*.

## Aglomerados

Conjuntos y partículas se agrupan formando aglomerados de arcilla, en general, de poca estabilidad, muy sujetas a cambios de volumen e, incluso, de forma, por efecto de las variaciones de humedad, climáticas y, en general, ecológicas.

Estos conjuntos o aglomerados de partículas son los que encuentra el ingeniero cuando trata de estabilizar un suelo, conjuntos que están formados por minerales secundarios, en cuyo interior ya han tenido lugar transformaciones a lo largo del tiempo y en función de los procesos de meteorización y del pH de las soluciones del suelo. Los minerales de estos conglomerados no son, en la mayoría de los casos, los silicatos coloidales puros, sino mezcla de ellos, por lo que carece de sentido muchas veces ir a una determinación mineralógica muy exacta para determinar si se trata de materiales caoliníticos, montmorilloníticos o ilíticos, porque, a los efectos que interesa al constructor, puede obtener suficiente información por métodos menos complicados, como, por ejemplo, hallando la relación de sesquióxidos ( $SiO_2/R_2O_3$ ), la cual si es inferior a 1.33 indica la presencia de minerales de tipo caolinítico, si es mayor de 3 delata grupo

\* En trabajos experimentales realizados por el Instituto Eduardo Torroja se ha podido comprobar que, suelos muy compactos y apelmazados, se han hecho friables por la adición de pequeñas cantidades de yeso.

montmorillonita, y en los intermedios están las ilitas, aunque, naturalmente, las mezclas pueden dificultar la interpretación y limitan el valor práctico de estos límites.

Por otra parte, aun cuando desde un punto de vista químico es la actividad de la arcilla la que determina la cantidad y naturaleza del estabilizante, en la práctica ello depende, en mayor grado, de la superficie de estos aglomerados que de la superficie de las partículas coloidales.

Reforzar las uniones interiores de los aglomerados puede ser también misión que cumplan los conglomerantes tipo cal, cemento, etc., pero no puede descartarse tampoco una acción de sellado o taponamiento de accesos al interior del gránulo para limitar la acción de la humedad exterior al mismo. Esta acción es, desde luego, más eficaz cuando se utilizan emulsiones de carácter bituminoso; de donde se puede inferir que, según las características de los gránulos—en definitiva función también de los constituyentes de las arcillas—, puede ser conveniente estabilizar con un producto a base de calcio o puede ser preferible ir a otro tipo de estabilizante, ligante o conglomerante.

Muchos han sido los intentos de clasificar por grupos estas partículas macroscópicas, de acuerdo con sus propiedades o procesos de meteorización que han tenido lugar en su formación. Su aplicación a los problemas de estabilización de suelos son, realmente, muy limitadas, ya que el tamaño y forma de estas partículas depende de un sinnúmero de condiciones, y su comportamiento final constituye toda una compleja casuística de la que resulta muy difícil deducir reglas fijas.

## pH

La intensidad e, incluso, la posibilidad de que se desarrollen determinados fenómenos de carácter físico o químico, depende del pH del medio en que se encuentren. Concretamente, las disoluciones de las mezclas arcillosas son muy sensibles a variaciones en la alcalinidad del medio, siendo frecuente que ciertos compuestos sean solubles en agua con pH comprendido entre estrechos límites y, sin embargo, precipiten cuando se rebasan éstos por defecto o exceso.

Estas cualidades justifican los límites del pH que algunas instrucciones dan para los suelocementos, y ofrecen la posibilidad de actuar sobre las partes finas de los suelos por adición de conglomerantes que eleven la alcalinidad y, con ello, se produzcan precipitaciones o disoluciones que favorezcan la formación de gramerados o refuercen los vínculos entre sus componentes.

La importancia del pH es muy grande en cualquier caso y su influencia preside todos los fenómenos que hemos esbozado. Así, por ejemplo, una arcilla muy activa, digamos para fijar ideas una del grupo montmorillonítico, parece que podría estabilizarse con cierta facilidad, sirviéndonos, precisamente, de su gran capacidad de cambio, la cual puede llegar a ser del orden de 60 a 100 m. c. contra 3 a 15 de los minerales del grupo caolinita y 20 a 40 m. c. de las ilitas. Sin embargo, esto no es cierto muchas veces, debido a que sus partículas están frecuentemente recubiertas de óxido férrico, que tienen ya saturadas, por así decirlo, las cargas que necesitamos, y esta saturación está en forma muy difícil de romper, tanto, que es preciso seleccionar muy bien el estabilizante en función de un determinado pH, y muchas veces añadir un catalizador para asegurar este pH dentro de los límites en que pueden tener lugar las reacciones que nos proponemos producir. Cuando esto se logra, se obtiene, en efecto, por cambio de cationes, aglomerados cuyas superficies pasan de ser absorbentes a ser hidrófugas, si bien la cantidad de neutralizante es, evidentemente, función de la superficie específica del suelo.

## **Conglomerados**

En llegando a este punto, nos encontramos ya con un suelo real, compuesto por gases y un medio acuoso en el que hay granos inertes que constituyen su esqueleto. Entre estos granos de arena, una cierta proporción de limo y aglomerados de arcilla, en cuya constitución puede ejercer una cierta influencia el estabilizador empleado, y tal vez, dentro de todo ello, micelas o partículas en estado coloidal.

La compactación actúa sobre el conjunto y no parece aventurado precisar que en su eficacia influyen también efectos que provienen del mecanismo de hidratación del cemento o la cal empleados como estabilizantes, los cuales, a partir de esta fase, empiezan a desarrollar su acción conglomerante, en el sentido que tiene lugar en un mortero o en un hormigón, o bien influenciados aún por la presencia de ciertos compuestos de la arcilla, que determinan reacciones de carácter puzolánico.

## **Materia orgánica**

Hemos montado nuestro esquema sobre los minerales de la arcilla con alguna referencia, lo menos posible, a los óxidos metálicos, y hemos dejado a un lado la materia orgánica por razón de no complicar nuestra exposición.

La materia orgánica, no obstante, se encuentra presente en las capas superficiales de todos los suelos, y se encuentra también en las porciones de los suelos que se emplean en construcciones, tanto en la construcción de terraplenes y firmes de vías de comunicación como en las que utiliza la edificación en sus elementos resistentes.

Los restos de animales o plantas se destruyen rápidamente por la acción de hongos y bacterias, organismos que precisan para actuar determinadas condiciones ambientales, tanto de humedad como de temperatura, etc., etc. Algunos restos orgánicos, como grasas, resinas, ceras, entre otros, son muy resistentes, mientras que ciertos hidratos de carbono, proteínas, etc., se mineralizan con bastante facilidad si las condiciones son las adecuadas; pero, en general, tanto las materias fácilmente mineralizables como las que no lo son, forman un producto intermedio, que se conoce por humus, el cual es un compuesto de muchos minerales, muy absorbente, difícilmente soluble en agua y bastante resistente a ulteriores transformaciones. El humus, que para el edafólogo y, mejor aún, para el agricultor, es tal vez lo más preciado del suelo, para el ingeniero es su pesadilla.

El humus se forma por la oxidación de la lignina, la fijación de amonio de ciertas sustancias orgánicas, por combinación de complejos coloidales, etc., etc., y, en definitiva, aun cuando potencialmente alto en cuanto a capacidad de cambio y electronegativo como los minerales de la arcilla, es ácido y difícil de neutralizar, si bien algunos de los compuestos que lo integran son estabilizantes y como tal se utilizan y a ellos nos referíamos cuando tratábamos de las aplicaciones a edificación.

Según la composición del humus, éste puede ser más o menos complicado de tratar. Cuando contiene apreciadas proporciones de celulosa y hemicelulosa, perjudica a los estabilizantes, bituminosos, los conglomerantes alcalinos e, incluso, a las resinas por la actividad bacteriana que puede llegar a descomponerlas. Si predomina su acidez puede inhibir el fraguado del cemento o cuando menos perturbarlo desfavorablemente. Por el contrario, ciertos compuestos de

lignina son estabilizantes por sí en determinadas condiciones y la presencia de calcio reemplazable favorece la creación de una estructura granular, elevando el límite líquido y plástico, si bien no afecta apreciablemente al índice de plasticidad.

En la práctica de la estabilización de suelos en vías de comunicación se prescinde de los suelos con elevado contenido de materia orgánica, y ello, indudablemente, está plenamente justificado en la mayoría de los casos. No obstante, esta solución no es posible en zonas de gran riqueza agrícola, cuando se trata de caminos rurales para la extracción de una producción que proviene en gran parte de la abundancia de humus. En tales casos, cuando no es posible prescindir de este suelo, cabe estabilizarlo también, pero requiere un estudio muy completo y una acertada elección del estabilizante y medios de puesta en obra.

## **Elección del estabilizante**

Los fenómenos de la estabilización de suelos no pueden interpretarse aún con criterio matemático. No hay demasiados postulados de general aplicación ni siquiera los límites que vamos esbozando y que aparecen con profusión en manuales, instrucciones y códigos de buena práctica, deben tomarse en un sentido estricto, pues menudean las excepciones y son frecuentes las opiniones encontradas y los resultados en oposición según la región y tipo de suelo considerado. Por otra parte, no puede perderse de vista que lo que pretende el ingeniero al utilizar el suelo natural o mejorado para sus carreteras o el arquitecto al incorporarlo a sus edificaciones, es llegar a unas determinadas condiciones funcionales, por sistemas económicos y, por lo tanto, los precios tienen aquí una importancia fundamentalísima, ya que determinan más que ningún otro factor los campos de aplicación.

En general, todos los conglomerantes tradicionales en construcción, cales y cementos, tienen aptitudes como estabilizantes en la mayoría de los suelos y su acción puede incrementarse con la adición de puzolanas, catalizadores, dispersantes, etc., etc. Evidentemente, el tipo de suelo, el clima de la región y las características de la obra definen el estabilizante más adecuado y descarta otros poco idóneos al caso, pero esta línea de separación no es, en general, muy clara, y más bien constituye una zona dentro de la cual es el precio y los medios disponibles de puesta en obra los que deciden.

Cuando el suelo es granular, sin apenas plasticidad, dentro de los conglomerantes habituales puede resultar el cemento Portland el más adecuado, porque realmente se trata más bien de un hormigón pobre que de un suelo propiamente dicho. Cuando la plasticidad crece, el cemento resulta, en general, como más tarde veremos, especialmente apto para obtener compuestos de resistencia elevada a corto plazo, incluso en condiciones de temperatura y humedad poco favorables. Hay tipos de suelo que requieren un previo tratamiento con cal y otros compuestos de minerales con algunas características puzolánicas, en que la adición de cal y cenizas volantes (material puzolánico) resulta especialmente indicado y de resultados comparables a los del propio cemento, mientras que, finalmente, suelos con contenidos de materia orgánica, u otras características que nos proponemos analizar en próximos artículos, pueden estabilizarse con cal.

Las cenizas volantes y de hogar son, en algunos casos buenos estabilizadores, con sólo agregarles una pequeña proporción de cal o cemento. El yeso puede también servir a los mismos efectos, pero da lugar a reacciones reversibles y, por ello, su estabilidad química está muy ligada a la constancia del clima interno del macizo estabilizado.