

el suelo estabilizado, material de construcción

fundamento de la estabilización de suelos

J. NADAL, ingeniero de caminos

812 - 5

1. Variables que intervienen en el fenómeno

La estabilidad de un determinado suelo depende de las propiedades del sistema en su conjunto, de las propiedades de cada uno de sus componentes y de las variaciones del clima interno.

1.1. Las propiedades del conjunto varían—como es sabido—con el contenido de humedad, con la temperatura interna y con la temperatura exterior, debido a la influencia que ésta tiene en la humedad.

1.2. Las propiedades de cada uno de sus componentes dependen, no sólo de su propia constitución, sino de los movimientos del agua en el interior del macizo y del clima del lugar en que se encuentre la obra. En el caso de carreteras y cimentaciones, depende también de la profundidad de la capa freática.

A este respecto cabe recordar que, en general, de todos los elementos sólidos que constituyen el suelo, las arcillas son las más sensibles a variaciones de tamaño, forma y naturaleza, y esta sensibilidad depende, en buena parte, de su actividad o susceptibilidad para adsorber la humedad y las disoluciones en ellas contenidas. De menor a mayor capacidad de adsorción, las especies mineralógicas de las arcillas se clasifican en: caoliníticas, ílticas y montmorilloníticas. En España, las arcillas más abundantes son las ílticas, y casi las únicas que se encuentran normalmente en los trabajos de construcción.

1.3. Las variaciones del clima interno y, concretamente, de humedad, repercuten de manera extraordinaria en las propiedades de un suelo estabilizado, especialmente si este suelo es cohesivo. Estas variaciones siguen leyes complejas, que dependen del volumen y tamaño de poros, del clima del lugar en que la obra se ubique, del régimen de lluvias y del gradiente de temperatura en el macizo estabilizado, todo lo cual, en el plano teórico, está muy estudiado, así como el efecto que estas variaciones producen en la estabilidad de los componentes según que el ambiente sea ácido o alcalino y según la naturaleza química de los componentes de los finos (arcillas).

Un fenómeno interesante, comprobado en los suelos estabilizados que sirven de base a firmes de carretera, es que en ellos el grado de humedad es muy superior al que correspondería a las condiciones climáticas, incluso en años realmente secos, lo que hizo sospechar que en climas templados, bajo los firmes de carreteras, los suelos mantienen un estado de equilibrio de humedad que puede llegar a las proximidades del límite plástico.

De esto puede deducirse, en orden a las aplicaciones, que si la compactación de un suelo se logra con una humedad muy baja, debe preverse, a efectos resistentes, que esta humedad ha de aumentar hasta que se establezca el equilibrio, aun en el caso en que la unidad estabilizada se encuentre bajo la parte central del firme donde es mayor la protección contra los agentes atmosféricos.

2. Consideraciones relativas a la estabilización de suelos

2.1. En el caso de los suelos granulares, ya se ha indicado que el problema se centra en reducir el volumen de poros y proporcionar el adecuado rozamiento entre granos.

2.2. En los suelos cohesivos, la dificultad estriba en que la resistencia—que proviene de su cohesión—radica precisamente en su afinidad con el agua, motivo por el cual, teóricamente al menos, parece que el sistema más inmediato para dar estabilidad a estos suelos sería el privar las partículas sólidas de su afinidad con el agua, y aglutinarlas para constituir, en definitiva, un suelo granular al que fuese de aplicación lo que se indica en el párrafo anterior. Podría lograrse el resultado apetecido por desecación, sistema que, como es sabido, resulta muy difícil y costoso, tanto más cuanto que debe tenerse muy presente que las arcillas que dan la sensación de pulverulentas y reseca pueden contener, a pesar de todo, del orden del 10 % de agua y que no es raro que el porcentaje de humedad pueda superar el 100 %.

Otra forma sería la de reemplazar los cationes inorgánicos intercambiables con el agua por medio de cationes repelentes del agua y luego conglomerar entre sí, por medio de un ligante orgánico, los constituyentes del suelo, una vez perdida su afinidad con el agua; sistema en que se basa la estabilización con resinas.

El tercer sistema de aplicación en construcción es el de unir entre sí las partículas elementales formando conglomerados resistentes al agua. Esta unión de partículas puede lograrse mediante la adición de conglomerantes inorgánicos, tales como cal, cenizas volantes, yeso, cemento u otros, sin más limitación que la propia estabilidad del conglomerante en relación con las condiciones ecológicas y la economía de empleo.

Vemos, por lo tanto, que, aparte del secado o pseudo-cocido, no hay, esencialmente, más que dos sistemas de estabilizar un suelo: por acción mecánica y por adición de sustancias químicas. Los mejores resultados acostumbran a lograrse por combinación de ambos.

3. Estabilización mecánica

Dentro de las acciones que incluye el presente epígrafe, cabe distinguir dos aspectos bien diferenciados:

- Actuar sobre el material aplicando una energía mecánica que provoque su compactación.
- Actuar sobre otras de sus propiedades, de manera que, además de una densificación, se logre limitar las variaciones de clima interno.

La primera de las modalidades es lo que se llama compactación, y la segunda, estabilización mecánica propiamente dicha.

3.1. COMPACTACION

Existen suelos naturalmente estabilizados por efecto de una compactación lograda a través del tiempo; sin embargo, la estabilización artificial de un suelo, por simple compactación, no es posible más que en los casos en que la granulometría del conjunto y la composición de sus elementos es la adecuada en relación con el clima de la región.

Como principio general cabe establecer que la estabilidad de un suelo crece con la densidad, pero que esta densidad, que en definitiva es disminución de volumen de poros, alcanza, en el caso de las arcillas muy plásticas, un límite relativamente bajo debido a que las partículas de aire ocluido actúan como «neumáticos» y contrarrestan, con su elasticidad, el efecto mecánico de los compactadores. Cuando la arcilla no es muy plástica, un exceso de energía de compactación puede romper los constituyentes secundarios formados por aglutinación de las partículas elementales, y este cambio de estructura puede originar descensos en la capacidad resistente del suelo.

Debe aceptarse, igualmente, como principio aplicable a cualquier estabilización por compactación, que los resultados que no son aceptables en determinado clima pueden, no obstante, ser suficientes si las condiciones ambientales son distintas.

La compactación es hoy operación obligada en la moderna construcción de terraplenes y, por esta causa, se han hecho numerosos intentos de clasificación de los suelos, con objeto de que, una vez encuadrado el suelo que interesa en uno de los grupos, se le pueda atribuir un comportamiento común a todo el conjunto incluido bajo la misma designación. En este sentido, la llamada clasificación P. R. A. * es tal vez la más utilizada por los técnicos y da una buena orientación sobre el sistema de compactación a emplear y el comportamiento que cabe esperar del suelo una vez compactado; pero como quiera que la clasificación se basa fundamentalmente en consideraciones relativas a la proporción en que se encuentran mezcladas las gravas, arenas, limos y arcillas, concediendo muy escaso valor a otros factores, tales como la propia constitución de los componentes, las orientaciones que proporcionan pueden ser erróneas o poco exactas en algunas ocasiones, y, consecuentemente, aconseja que se recurra, en caso de duda, a un laboratorio especializado **.

Refiriéndonos a suelos granulares del tipo A-3 (arenas limpias), una compactación aceptable puede no indicar necesariamente un alto grado de estabilidad, especialmente cuando esté seco o sumergido. En el primer caso, por ser propicio a deslizamiento y muy sensible a la acción de vientos fuertes, y en el segundo, por existir peligro de arrastre o erosión interna.

En general, los suelos más aptos para la compactación son aquellos que tienen una cierta cohesión y no son demasiado plásticos; pero, una vez logrado un cierto grado de densificación, la estabilidad del conjunto depende de la propia estabilidad de los componentes de la arcilla y del equilibrio de humedad en el interior del macizo, ambos muy ligados entre sí y muy ligados también al nivel freático y al régimen de lluvias.

Cada suelo, en un cierto grado de compactación, tiene un límite superior de adsorción de humedad que determina las condiciones energéticas, las cuales dependen, en el caso de un nivel freático alto, de la energía de superficie de las arcillas y de la capilaridad correspondiente a la total saturación. La influencia de la capilaridad es despreciable si el nivel freático es muy bajo.

Cuando la arcilla, que da plasticidad y cohesión al conjunto, corresponde a un tipo cuya energía de superficie sea considerable, la adsorción de agua determina circulaciones que van

* Véase "Toma de datos para la redacción del proyecto y ejecución de las obras" del IETcc.

** En España se ocupan de estos trabajos el Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo del Ministerio de Obras Públicas, y Laboratorio Central de la Dirección General de Aeropuertos (Ministerio del Aire).

debilitando la cohesión entre las partículas de arcilla y los granos de arena, fenómeno que puede acelerar la presencia de carbonatos y, sobre todo, de materia orgánica, provocando un reblandecimiento del conjunto independiente del grado de compactación. De esto se infiere que suelos de este tipo, especialmente en ambientes húmedos, no se estabilizan aun cuando se compacten.

En la construcción de caminos, lo mismo que los terraplenes compactados que se emplean como base de edificaciones, el contenido de humedad depende, en cierto modo, de que el terraplén esté más o menos cargado, ya que la carga contribuye a disminuir la adsorción de humedad y el entumecimiento. Son factores, que también influyen en la estabilidad, la longitud del recorrido que ha de hacer la humedad natural para adentrarse en el macizo y, sobre todo, la disposición y tamaño de los conductos, ya que, según sean éstos, puede favorecerse la transpiración y evaporación, eliminando el agua antes de que alcance peligrosas proporciones.

En el caso de suelos A-6 y A-7 (arcillas plásticas), ambos considerados como buenos en tiempo seco, pueden producirse caídas bruscas de resistencia por un efecto de higroscopicidad si las arcillas contienen sodio reemplazable, ya que, en este caso, la arcilla hinchada colmata los conductos capilares impidiendo la eliminación de humedad.

3.2. ESTABILIZACION MECANICA

En la técnica de carreteras, que es donde hasta el presente se hace un mayor uso de la estabilización de suelos, se tiende, por razones de economía, a estabilizar únicamente las capas superiores de los terraplenes, es decir, las más próximas al firme, y compactar el resto fijando, para las diversas unidades, condiciones que dependen de la idoneidad del material y de la resistencia al esfuerzo cortante que se pretenda obtener.

El método que se sigue para fijar estas condiciones es un tanto empírico, producto de una larga experiencia. Consiste, fundamentalmente, en actuar sobre la granulometría y plasticidad del suelo.

Para la base del firme se acepta, por la mayoría de las Normas extranjeras y, concretamente, por las americanas, que debe controlarse la granulometría, el límite líquido y el índice plástico de la fracción de finos. La razón de esto estriba en que controlando el índice plástico se tiene un control indirecto sobre los máximos cambios de volumen en el conjunto de la unidad estabilizada bajo condiciones de máxima carga, y limitando el límite líquido se limitan, asimismo, las variaciones de volumen con motivo de los cambios de humedad. Mas no debe olvidarse que este sistema de proyectar es aplicable solamente a lo que se refieren los datos estadísticos en que se funda el método; pero que para cualquier otro tipo de suelo es preciso una previa experimentación, tanto más cuanto que aún no se cuenta con una teoría general ni un procedimiento de aplicación que permita limitar la variación global de volumen de una cierta unidad de obra, a valores aceptables.

Por debajo de las bases de los firmes, en lo que se llama subbase, las normas se limitan a estipular que los materiales alcancen una densidad alta al compactarse y que su índice de plasticidad se mantenga por bajo de ciertos límites; en tanto que para las capas más profundas de los terraplenes es práctica usual no controlar más que su compactación relativa siempre que el índice de plasticidad no alcance valores peligrosos.

Se puede influir sobre la plasticidad e índices de retracción y entumecimiento tratando el suelo con elementos naturales de corrección, es decir, agregando arcilla o arena según que el material sea demasiado granular o demasiado plástico. Se actúa normalmente sobre la compac-

tibilidad corrigiendo la humedad natural para dotar al suelo del contenido óptimo, lo cual, en el orden práctico, es relativamente fácil si se trata de humedecerlo, pero bastante difícil cuando el problema es secarlo, especialmente en épocas de lluvias persistentes.

En el orden científico, no se dispone aún de métodos que permitan un control directo y efectivo sobre los cambios de volumen en carga, sin carga y debido a las variaciones de humedad, porque las limitaciones en los indicados índices tienen, como decimos, un fundamento esencial estadístico, pero falta aún encontrar otras condiciones que permitan limitar las máximas deformaciones a valores no perjudiciales.

La realidad es que, hasta ahora, todos los criterios prácticos de dosificación se fundan, esencialmente, en la plasticidad y en la granulometría, con alguna limitación adicional que se aplica, casi exclusivamente, a la materia orgánica, pero no se tiene en cuenta la calidad de la estructura del suelo. Por ello, las tablas y datos que se dan en los tratados técnicos y normas de proyecto no tienen más valor que el de orientar al usuario de este material, ya que la proporción aceptable de finos e, incluso, los propios límites, dependen de la actividad coloidal, lo cual se pone de manifiesto especialmente cuando se estudia el suelo-cemento o cualquier estabilización basada en la utilización de productos químicos.

3.3. ESTABILIZACION QUIMICA

Esbozados, en el primer artículo de esta serie, los principios en que se funda la estabilización de suelos por adición de productos químicos, vamos a pasar una breve revista a los más utilizados, teniendo siempre muy presente que, como quiera que los resultados dependen en gran proporción de las acciones químicas o electroquímicas de las superficies de las partículas finas, cuanto más proporción de arcilla tenga un suelo, mayor será la proporción necesaria de estabilizador.

No tendría justificación económica tratar el suelo por métodos encaminados a separar entre sí las partículas elementales que constituyen las partes finas de un suelo, pues ello, aparte de las dificultades que entraña, multiplicaría la superficie específica y, con ello, las fuerzas superficiales a estabilizar, siendo, por consiguiente, más aconsejable pulverizar los suelos cohesivos sólo en la medida necesaria para obtener conglomerados suficientemente pequeños, cuyo tamaño sea el óptimo compatible con las condiciones mecánicas que deben obtenerse y el coste de la estabilización.

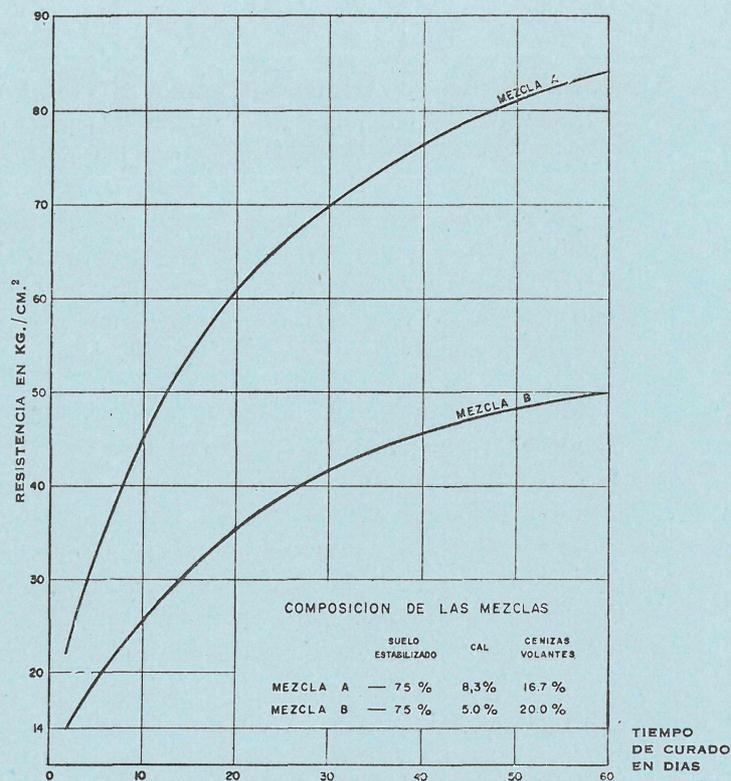
3.3.1. Estabilización con ligantes inorgánicos.

Los ligantes o conglomerantes inorgánicos no proporcionan a los suelos impermeabilidad, y si, bien los materiales tratados con estos productos se comportan mejor que los no tratados ante los cambios de humedad, ello es debido a que se reduce la tendencia al entumecimiento de los componentes arcillosos, es decir, las arcillas encuentran mayor dificultad para expandirse, a lo que contribuye también el entramado semirígido que el conglomerante establece.

Cenizas volantes y de hogar.

Las cenizas son el subproducto de ciertas industrias, especialmente de las centrales térmicas, en las que llega a constituir un verdadero problema su evacuación. Su costo es, por lo tanto, muy bajo; el interés por aprovecharlas de algún modo llega, en ocasiones, a preocupar a las empresas, ya que ven crecer alarmantemente sus escombreras y, como consecuencia, multiplicarse los gastos de su transporte. Por esta razón los estudios sobre aprovechamientos de cenizas son

Variación de las características mecánicas con el tiempo de maduración



abundantes, especialmente los encaminados a su utilización como estabilizante de suelos mezclados con cal o con cemento y, concretamente, a estabilizar suelos arcillosos y limosos, en los que son mayores las dificultades y donde puede estar económicamente justificado el empleo de proporciones fuertes de productos de adición.

El mecanismo por el cual las cenizas actúan, es complejo y su estudio no corresponde a los estrechos límites de estas notas, por lo que nos limitaremos a indicar que, en última instancia, la acción de las cenizas, en lo que a la estabilización de suelos se refiere, es la misma o, al menos, está muy ligada, a su posibilidad de reacción con la cal, posibilidad que depende de la estructura y composición del suelo y de la propia ceniza, al ambiente en que han de desarrollarse las reacciones (temperatura, humedad, etc.), proporciones entre los componentes principales (cal, cenizas y suelo) y, por último, depende también del contacto que tengan entre sí los componentes, es decir, del grado de compactación.

La estabilización de suelos con empleo de cenizas o de mezclas de cenizas y un conglomerante, precisa de un estudio previo de las condiciones de los materiales y de series de ensayos encaminados a determinar las proporciones en que éstos deben mezclarse en función de la granulometría del suelo, grado de humedad, alcalinidad, etc., etc., y, como decíamos, de las propiedades puzolánicas de la propia ceniza.

Una vez hecha la mezcla *, el suelo adquiere mayor facilidad de mezclado (trabajabilidad) y disminuye su plasticidad.

El grado de humedad debe fijarse teniendo en cuenta, no sólo el óptimo para la compactación, sino el mínimo para que tengan lugar los fenómenos de hidratación. La compactación debe ser tal, que asegure un íntimo contacto de las partículas que han de reaccionar, manteniendo, por añadidura, las condiciones necesarias de temperatura y humedad durante el período de fraguado, cuya duración es muy variable de unos suelos a otros, y de unas a otras proporciones de mezcla estabilizadora.

* Las proporciones de ceniza son del orden del 20 % en peso sobre suelo seco.

Cal y yeso.

Pequeñas cantidades de cal hacen al suelo más fácil de trabajar y reduce su plasticidad, pero su valor como estabilizador parece ser muy escaso, cuando no se combina con un material puzolánico del tipo de las cenizas de las que ya nos hemos ocupado.

El yeso es otro conglomerante que podría emplearse como estabilizador en regiones de clima muy seco o para utilización en edificación de viviendas, especialmente con ciertos tipos de suelos muy ricos en sulfatos, pero su comportamiento no ha sido aún estudiado a fondo.

Cemento Portland.

El cemento se utiliza para reducir la afinidad con el agua de las partículas finas, y para conglomerar éstas formando un entramado semirrígido que dé estabilidad al conjunto.

En ciertas arcillas, el cemento actúa como estabilizador según un proceso electroquímico, mediante el cual la proporción de cemento a agregar crece con la actividad de la arcilla. El cemento actúa también en el intercambio de iones que tiene lugar en los complejos coloidales del suelo, pero su actuación no está aún del todo explicada, si bien no hay duda de que es favorable en lo que concierne a disminuir la humedad óptima y, con ello, el límite de retracción.

El empleo del cemento está, sin embargo, estrechamente condicionado al contenido de materia orgánica de los suelos, especialmente si esta materia tiene carácter ácido, por la influencia perniciosa que ejerce sobre el fraguado del conglomerante. También las sales contenidas en el suelo, especialmente los sulfatos, pueden dar lugar a limitaciones importantes por producir, en su reacción con algunos componentes del cemento, compuestos expansivos que pueden desintegrar el macizo que se trata de estabilizar.

La estabilización de suelos a base de cemento es objeto de la preferente atención del Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento, donde se están llevando a cabo estudios muy extensos del tema, los cuales esperamos exponer, con más detalle, en artículos sucesivos.

Electrólitos.

Determinadas sustancias son especialmente aptas para favorecer un intercambio iónico que cambie las condiciones de higroscopicidad en el macizo, disminuya el punto de congelación, favorezca la compactibilidad y, en general, la estabilización del suelo.

Silicatos sódico y aluminico.

Se emplean ambos silicatos, conjunta o independientemente, para endurecer temporalmente terrenos granulares y disminuir la necesidad de entibaciones. También se han inyectado en suelos sin finos, a efectos de consolidar cimentaciones, pero no parece que estos productos tengan gran utilidad como estabilizadores de carácter permanente en construcción. Como quiera que los silicatos, en general, son electronegativos, no dan resultados prácticos para estabilizar arcillas activas.

Otras sustancias.

Aparte de los silicatos de que ya nos hemos ocupado, y de la cal hidratada, el más común de estos electrólitos es el cloruro de calcio, que actuando sobre arcillas sódicas puede reducir su

avidez y retención de humedad, mediante un cambio de arcillas cálcicas, con la consiguiente reducción de índice de plasticidad y variaciones de volumen, habiéndose comprobado que también reduce la tendencia a la expansión. El Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento tiene en estudio este tema.

3.3.2. *Estabilización con productos orgánicos.*

El empleo de productos orgánicos se basa en mantener el suelo en condiciones de humedad constante, igual o inferior a la óptima, evitando que entre agua en el suelo tratado. En general, no tienen poder conglomerante o, al menos, esta propiedad influye relativamente poco en su utilización. Las proporciones en que se emplean las resinas son bajas—del orden del 2 %—, pero no hay todavía demasiada experiencia en lo que a su durabilidad se refiere, se desconoce si pueden dañarse por acción bacteriológica y su precio es todavía alto, por lo que no es de esperar que en un futuro inmediato se extiendan sus aplicaciones a la construcción, especialmente en nuestro país, si no es como producto de adición a los cementos para unir a su acción conglomerante la hidrofugación característica de las resinas.

Se han ensayado estabilizadores de suelo preparados a base de Resina 321, Vinsol y todo un grupo de productos binarios, tales como anilina-furfural; resorcinol-formaldehído; urea-formaldehído; fenol-formaldehído; alcohol furfúrico-ácido sulfúrico. Todos ellos dan buenos resultados, si bien su mecanismo de acción no es aún bien conocido y sus aplicaciones prácticas en la construcción son muy limitadas.

3.3.3. *Estabilización de suelos con productos bituminosos.*

Junto con el cemento, son los productos bituminosos los que se han empleado más profusamente en la estabilización de suelos, bien para dar cohesión a los materiales granulares, bien para agregar impermeabilidad a los suelos estabilizados mecánicamente, o bien para hidrofugar suelos cohesivos.

En los materiales granulares, la proporción de betún debe ser tal que dé cohesión a las partículas sin restarle demasiado rozamiento; esto se logra cuando el espesor de las películas bituminosas se mantiene dentro de ciertos límites.

En los suelos cohesivos, el betún bloquea o tapona los conductos por donde el agua pudiera entrar o salir, manteniendo constante el clima interno; sin embargo, una total impermeabilización no es, ni conveniente ni deseable.

En cuanto a la proporción de betún requerida, depende de su afinidad con el material del suelo; y, como quiera que los betunes actúan como coloides cargados negativamente, su acción estabilizante es más intensa cuando las cargas de la superficie de las partículas son esencialmente positivas, pero, como ocurre con todos los estabilizadores, la proporción de betún debe de ser mayor cuanto más activa sea la arcilla o, en otras palabras, cuanto mayor sea su capacidad de intercambio de bases.

Como la adherencia del betún a los finos es casi siempre mala, éstos tienden a recubrir las partículas bituminosas con una película sólida, lo que debe evitarse mediante el empleo de mordientes o mojantes cuya función es cambiar el signo del campo electrostático de las superficies de las partículas sólidas. Entre los mojantes se incluyen la caliza, el cemento y algunas resinas, y su empleo resulta obligado siempre que el producto bituminoso no contenga proporciones altas de parafina o ciertos aceites que faciliten la adherencia con las partículas sólidas.