el suelo estabilizado, material de construcción

generalidades

J. NADAL, ingeniero de caminos

812 · 5

1. Introducción

Desde el momento en que se comprobó que, mediante determinados tratamientos, era posible mejorar la calidad de un suelo haciéndolo más resistente, más impermeable y más duradero, el suelo pasó a constituir lo que se llama un material de construcción. Los orígenes de este material se pierden en la lejanía del tiempo, habiéndosele dado múltiples usos, algunos de los cuales han evolucionado en tal forma, que hoy resulta ya difícil reconocer en ciertos objetos su antecesor—suelo estabilizado—e, incluso, escapan del grupo de lo que, actualmente, cabe considerar bajo la denominación genérica que encabeza estas líneas.

Otras aplicaciones, por el contrario, han evolucionado muy poco con el paso de los siglos y sus expresiones actuales apenas si se diferencian de las de otros tiempos, habiendo quedado relegadas a un plano secundario, al margen de la moderna técnica, sin que haya recaído sobre ellas la atención asidua de los investigadores. Nos referimos a los tapiales y adobes, de uso muy extendido en nuestro país hasta hace tan sólo unos años.

No obstante, sobre una de las aplicaciones más primitivas, cual es la de servir de pavimento a vías de comunicación, se ha centrado la atención de los constructores y son numerosos los intentos de mejora por parte de los técnicos, quienes, a pesar de las dificultades que entraña la empresa, han ido deduciendo correlaciones entre la propia composición del suelo, las condiciones climáticas de la región, el contenido de humedad y otros parámetros que les permite influir eficazmente sobre las características de este material, aminorando las desfavorables e incrementando las beneficiosas.

No todas las interdependencias observadas han plasmado aún en leyes generales, pues la Ciencia del Suelo es muy moderna y se fundamenta en principios básicos de la Naturaleza no bien conocidos en todos los casos; pero como quiera que en la actualidad es del máximo interés la cuestión, y se ocupan de ella eminentes y numerosos investigadores repartidos por todo el mundo, cabe esperar que los progresos sean tales que permitan disponer, en un futuro inmediato, de nuevas teorías y posibilidades que favorezcan la construcción de vías de comunicación mejores y más económicas.

La evolución de los conocimientos que de un determinado material se tienen, favorece el progreso de toda una serie de elementos constructivos y de toda una técnica de aplicación, por lo cual es muy posible que el presente avance de los suelos estabilizados repercuta, decisivamente, en esos materiales de uso estancado, a que se hizo referencia, impulsándolos a salir del estado en que se encuentran, por lo que no resulta totalmente aventurado predecir para el suelo estabilizado aplicaciones en edificación que podrán ser de interés en determinadas zonas rurales y regiones industrialmente poco desarrolladas.

2. Compactación, consolidación y estabilización

A lo largo de cuanto sigue, se empleará el vocablo compactación refiriéndose a la acción de densificar un suelo, reduciendo su volumen de poros.

Se entenderá por consolidar a la acción de aproximar, entre sí, y fijar, mediante el empleo de energía mecánica, los elementos sólidos constituyentes del suelo para que éste adquiera firmeza.

Finalmente, se dirá que un suelo está estabilizado cuando se le considere con resistencia suficiente para recibir y transmitir adecuadamente las cargas a que deba estar sometido, y permanezca sin alteración importante durante todo el período de servicio de la obra.

3. El suelo

Cuando decimos suelo, nos referimos a la capa más superficial de corteza terrestre constantemente en evolución, afectada directamente por los agentes atmosféricos y orgánicos, formado por rocas desintegradas y descompuestas, en la cual tienen lugar los fenómenos biológicos.

Hasta hace bien poco, para el constructor, y más concretamente para el constructor de vías de comunicación, el suelo era un conjunto de rocas descompuestas y materia orgánica, que se encuentran en la superficie terrestre constituida por elementos que, según su tamaño, clasifica en gravas, arenas, limos y arcillas. Actualmente, cuando cobra mayor interés el problema de la estabilización de suelos, no se puede desconocer el concepto que de este elemento tiene el geólogo ni el edafólogo; de aquél, porque basándose en los antecedentes más lejanos define especies constituyentes y prevé las direcciones de la evolución probable, y de éste, porque trata el suelo en su estado actual, como sistema dinámico sujeto a la influencia de la temperatura, de la humedad y de los ciclos biológicos.

3.1. COMPOSICION DEL SUELO

El suelo no es una mezcla desordenada de diversos elementos, sino un sistema ordenado, compuesto de partículas sólidas, elementos líquidos y gases.

El sistema suelo está constantemente en evolución; a través de él se verifican cambios de estado, circulan gases y líquidos, hay actividad biológica y pueden presentarse reordenaciones de sus componentes, todo lo cual lo hace, en cierto modo, comparable con un ser vivo.

3.1.1. Partículas sólidas *.

Las partículas sólidas del suelo, orgánicas o inorgánicas, se clasifican, según su tamaño. El M. I. T. ha establecido la gradación que figura en la tabla núm. 1.

T A B L A 1

Clasificación M. I. T. de suelos en fracciones granulométricas

Piedras	Mayores de 60 mm.		
Grava gruesa	60	a 20	mm.
media	20	a 6	"
fina	6	a 2	"
Arena gruesa	2	a 0,6	"
media	0,6	a 0,2	"
fina	0,2	a 0,06	"
Limo grueso	0,06	a 0,02	"
medio	0,02	a 0,006	"
fino	0,006	a 0,002	"
Arcilla gruesa	0,002	a 0,0006	"
media	0,0006	a 0,0002	"
fina	0,0002	a 0,00006	"
Coloides	Menos de 0,00006 "		

3.1.2. Suelo granular.

Cuando la proporción de gruesos (gravas y arenas) rebasa el 65 %, se dice que el suelo es de composición granular, o simplemente granular, y se caracteriza, entonces, por contener un verdadero esqueleto de partículas grandes, en contacto entre sí, que le proporcionan estabilidad de volumen y rozamiento interno.

3.1.3. Suelo cohesivo.

Los suelos en que la proporción de limos y arcillas supera en su conjunto el 35 % son, geométrica y mecánicamente, muy sensibles a los cambios de humedad, por carecer de entramado granular, lo que, a su vez, les priva de rozamiento interno. Estos suelos, sin embargo, tienen gran cohesión.

Según la proporción, composición y forma de las partículas, especialmente las finas, los suelos naturales se aproximan más o menos a estos dos tipos extremos, compartiendo las propiedades de ambos.

3.1.4. El agua.

El suelo contiene agua alojada en los poros e interpuesta entre las partículas elementales, y a ella debe en buena proporción sus propiedades mecánicas, como se verá más adelante.

Como es sabido, el agua puede encontrarse en estado gaseoso, líquido o sólido, según la presión y temperatura a que esté sometida. El diagrama de presiones-temperaturas que definen el estado sólido del agua, pone de manifiesto que este estado puede existir a temperaturas tan

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

elevadas como son los 45° C si la presión alcanza valores del orden de los 12.000 kg/cm² e, incluso, elevando la presión es posible retener el agua sólida a temperaturas aún mayores. Limitándonos a las presiones y temperaturas que se registran en los suelos, cabe afirmar que, debido a las fuerzas de adsorción y a la presión interna de las disoluciones, es posible la existencia de agua sólida en los suelos limo-arcillosos, agua que cambia de estado con las variaciones de humedad, ya que estas variaciones afectan al espesor de las porciones de agua adheridas a las superficies sólidas.

Estos fenómenos se presentan en los suelos con fuerte contenido de partículas pequeñas, porque para que puedan desarrollarse las presiones necesarias es preciso que el espesor de las porciones de agua sea muy reducido, circunstancia que sólo puede darse en los suelos cohesivos, los cuales son, por lo tanto, muy sensibles al contenido de humedad, y sus propiedades físicas están muy íntimamente ligadas con el comportamiento del agua a alta presión, así como por la influencia de los campos eléctricos y magnéticos de las partículas sólidas.

Cuando un suelo no granular se humedece, es decir, cuando actúa la humedad higroscópica, estas fuerzas de adsorción que—como se ha indicado—pueden ser del orden de los 12.000 kilogramos/centímetro cuadrado, disminuyen allí donde se incrementa el espesor del agua contenida, y esta disminución es rapidísima (según una ley exponencial) hasta descender a valores del orden de los 50 kg/cm², a partir de los cuales el fenómeno es más lento, y llega a anularse cuando el contenido de humedad alcanza el valor conocido por *límite líquido*.

La higroscopicidad de un terreno depende, entre otros factores, de la cantidad de arcilla y de la composición química de ésta, especialmente de la relación SiO₂ : R₂O₃ *. En la interfase se desarrolla un considerable potencial eléctrico que origina fenómenos electrocinéticos y depende de la composición de las partículas y de los iones de las disoluciones contenidas en el agua y, en definitiva, de la afinidad con el agua.

De cuanto se ha expuesto, se infiere que las propiedades resistentes del suelo, así como otras muchas propiedades físicas, crecen al disminuir el contenido del agua y, naturalmente, al densificarlo, o sea, al disminuir su porosidad. También se deduce del comportamiento del agua en suelos de elevada proporción de finos (arcillas), que la estabilidad de volumen está íntimamente ligada con las variaciones de humedad, por lo que se llega a la conclusión de que, en definitiva, se conseguirá la estabilización de un suelo coherente cuando sea posible reducir convenientemente el volumen de huecos, disminuir el contenido de agua y evitar variaciones de humedad.

3.2. COMPORTAMIENTO RESISTENTE DEL SUELO

Lo que se entiende por resistencia de un suelo es, fundamentalmente, resistencia al esfuerzo cortante, hasta el punto que muchos autores definen el suelo estabilizado como el estado en que un suelo alcanza y mantiene la necesaria resistencia a dicha sollicitación.

La resistencia, T, cortante es función de la cohesión, C, del ángulo de rozamiento interno, φ , y de la tensión normal, σ . La ecuación de Coulomb liga estas magnitudes:

$$T = \sigma \operatorname{tg} \varphi + C$$

* Por R₂O₃ se entiende conjunto de óxidos.

SUELO A - Tierra arenosa

ARENA _____ 60 %
LIMO _____ 25 %
ARCILLA _____ 15 %

FASES EN EQUILIBRIO	TEMPERATURA °C	PRESION (Kg/cm ²)
AGUA - HIELO I - HIELO III	- 22	2,050
HIELO II - HIELO I - HIELO III	- 34.7	2,170
AGUA - HIELO V - HIELO III	- 17.0	3,530
AGUA - HIELO V - HIELO VI	- 0.16	6,380

DIAGRAMA DE FASES DEL SISTEMA H₂O
(Segun Tammann y Bridgman)

3.2.1. Suelos granulares.

En estos suelos los granos en contacto le proporcionan un cierto entramado mantenido por el rozamiento de los elementos entre sí. Su resistencia al cortante no depende más que de este rozamiento y carece totalmente de cohesión o es tan pequeña que no se considera.

El coeficiente de rozamiento identificado con $\operatorname{tg} \varphi$, no es constante, pues depende, a su vez, de la propia tensión normal σ , y de la proporción de huecos, de tal suerte que crece al decrecer ésta según la expresión de la siguiente forma:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{K}{V - V_s}$$

donde: K es una constante; V , el volumen del conjunto, y V_s , el volumen de las partículas sólidas. Cuando los materiales de que se dispone ofrecen diferentes tamaños de granos, se pueden mezclar para ir rellenando con los más finos los huecos que dejan entre sí los mayores, de tal suerte que se llegue a obtener un mínimo de espacios vacíos, técnica ésta muy bien conocida y estudiada por cuantos se dedican a la confección de hormigones.

3.2.2. Suelos cohesivos.

Un suelo compuesto esencialmente por limos y arcillas y, sobre todo, si la proporción de estas últimas es alta, no tiene apenas rozamiento por carecer de entramado granular, ya que las partículas de arena, caso de existir, se encuentran embebidas en la masa sin superficies de contacto entre ellas. La total carencia de rozamiento no se da, normalmente, en los suelos que trata el constructor, porque tampoco en estos suelos naturales se encuentran las partículas elementales de limo o arcilla, totalmente diferenciadas, sino que, por el contrario, se presentan formando conglomerados de muy diversas y complicadas formas, que, estando en contacto entre sí, ofrecen fuerte ángulo de rozamiento, y en su conjunto transmiten esta propiedad al suelo. Mediante un amasado enérgico pueden romperse algunos de estos conglomerados o partículas secundarias, y con ello anularse el rozamiento interno, o disminuir considerablemente, cosa que también se logra mediante tratamientos especiales, previos a ciertas utilidades, como es el caso de las balsas de preparación de arcillas para cerámica, donde el suelo se somete a la acción del tiempo, el agua y agentes biológicos. La existencia de estos conglomerados de partículas elementales da mayor porosidad al suelo que si las partículas estuvieran separadas y, sobre todo, incrementan el tamaño de estos poros y con él la permeabilidad.

En los suelos con gran porción de partículas pequeñas (arcillas) no pueden considerarse los posibles efectos beneficiosos que se desprenderían de su siempre escaso rozamiento interno, y se acepta, en la práctica, que en ellos la resistencia depende exclusivamente de la cohesión C , la cual, a su vez, en cierto modo, es, como el rozamiento, función del grado de compactación, del contenido de humedad y de la forma en que están dispuestas las películas (1) de esta humedad. Hasta qué punto la cohesión puede interpretarse como el resultado de fuerzas de atracción que desde la superficie de las partículas actúa a través de las películas líquidas que las envuelven, es cuestión que, de momento, no parece totalmente resuelta, pero que permite dar una interpretación del fenómeno. De cualquier forma, estos suelos pasan fácilmente del estado

(1) Las películas, en general, no son continuas.

sólido al plástico y al líquido como consecuencia de su contenido de humedad, y los límites que separan estos estados son, en última instancia, fronteras que el ingeniero debe conocer y que dependen del tipo de arcilla y de su actividad superficial, del contenido de coloides y de la granulometría del suelo en todas sus fracciones. Cuando las películas de agua son discontinuas y de muy pequeño espesor, el suelo puede considerarse y se comporta como un sólido; cuando la humedad crece y las partículas de agua recubren por completo la superficie de los componentes mineralógicos, con un espesor tal que actúa de lubricante, pasa al estado plástico; y cuando esta película líquida aumenta el espesor, las partículas sólidas pueden girar libremente en ella, y el suelo entra en estado líquido.

La manera de actuar sobre estos límites puede encauzarse por diversos caminos: conglomerar más partículas elementales, formando sólidos mayores que no puedan rotar libremente por efecto de su propio tamaño y condiciones de superficie, o bien agregando elementos que, como el limo o arena fina, obstaculicen—digámoslo así—el libre movimiento de rotación. En la industria del cemento, donde es frecuente tener que granular crudos o fluidificar pastas, interesa proceder teniendo en cuenta que baja el límite líquido de una arcilla si disminuye la dispersión, aunque ello implique un aumento en el límite plástico. La presencia de granos de arena y el limo, pueden modificar el fenómeno.

4. Estabilización

4.1. ESTABILIZACION DE SUELOS COHESIVOS

En las aplicaciones a la construcción interesa, principalmente, el estado sólido de estos suelos, y refiriéndonos a este estado cabría deducir, de cuanto llevamos expuesto hasta aquí, que estabilizar y secar son sinónimos.

En efecto, el procedimiento es aceptable, como lo demuestran las edificaciones de tierra sin cocer que aún se conservan en algunas regiones de nuestro país, pero es necesario que la desecación se lleve a un extremo tal que el agua no pueda volver a penetrar en la masa durante el período de servicio de la obra, y que la textura sea la adecuada para que pueda evacuar prontamente la humedad que, circunstancialmente, adquiriese.

En las técnicas propias del ingeniero, y más concretamente en pavimentos de aeropuertos o caminos, no parece sea económicamente posible el secado, porque llevado al punto que sería preciso resulta antieconómico y, por ello, no se ha desarrollado la técnica de aplicación correspondiente. Tal vez se pueda disponer algún día de calorías a precio suficientemente bajo para que este sistema admita una aplicación generalizada. En esta línea se considera, también, la electroósmosis como un posible sistema de estabilización.

Otro sistema de estabilizar sería, en ciertos suelos de este tipo, influir sobre la afinidad del agua con los componentes de las superficies sólidas, lo que puede lograrse en algunos casos incorporando resinas u otros componentes orgánicos de compleja constitución.

Puede aún lograrse la estabilización por el método de fijar en ellos la humedad mediante compuestos asfálticos u otros que impidan nueva incorporación o evacuación de agua, sistema

aceptable desde el punto de vista teórico y cuyas realizaciones, si bien no exentas de dificultades, se han llevado a la práctica en algunas ocasiones, y al parecer con éxito.

En estos suelos es posible constituir, mediante la adición de conglomerantes, conjuntos que proporcionen a la masa un mayor ángulo de rozamiento interno, método que ha alcanzado enorme desarrollo, dando lugar al suelo-cemento y otros materiales análogos de los cuales hemos de ocuparnos con más detalle.

Si con un suelo de este tipo se siguiesen las directrices que presiden la ejecución del buen tapial, esto es, compactar y crear una red fibrosa interior, se lograría también una estabilización cuya aplicación dependería de la inalterabilidad de los filamentos, de la afinidad que con ellos tuviese la arcilla y otros factores.

A base de polimerización a baja temperatura, puede crearse en el suelo una verdadera retícula fibrosa, una especie de fieltro que fija las partículas, da resistencia al corte e impide las variaciones de volumen, pero hasta el presente no se tiene noticia de aplicaciones a la construcción de este sistema.

4.2. ESTABILIZACION DE SUELOS GRANULARES

La estabilización de estos suelos es, en general, más simple que en el caso anterior. No cabe, desde luego, la posibilidad por desecación, pero sí cabe, en determinados casos, y bajo ciertas condiciones climáticas, estabilizar mediante una compactación conveniente, en especial si ésta se lleva a efecto con el grado de humedad preciso y se evitan posteriormente sus variaciones, todo lo cual se logra mediante la adecuada granulometría, y con el auxilio de revestimientos o por adición de productos químicos.

Sin embargo, la forma más eficaz y generalizada de estabilizar estos suelos, es agregando conglomerantes que unan entre sí los granos, formando conjuntos mayores, con el consiguiente aumento del rozamiento que éstos proporcionan cuando están en contacto. La unión de estos conjuntos entre sí, de modo que constituyan un verdadero entramado general dentro de la masa estabilizada, y que es la técnica que se pretende seguir en la ejecución de los hormigones, no es siempre posible en los suelos y ni siquiera conveniente para muchas aplicaciones, por dar lugar a un material cuya excesiva rigidez puede no estar en consonancia con su limitada resistencia.

5. La ciencia del suelo

La estabilización de suelos no constituye todavía una ciencia con sus leyes fijas y sus principios inmutables en los que poder basar conclusiones generales que permitan prever el comportamiento de un suelo, a partir de los datos elementales que se derivan del conocimiento de sus componentes. No cabe negar, sin embargo, que la estabilización cuenta ya con bases científicas y que existe el anhelo de ir más adelante. Hay fundados motivos para suponer que no ha de transcurrir mucho tiempo sin que se logre crear verdaderos cuerpos de doctrina que

permitan alinear las estructuras de suelo estabilizado junto con las de otros materiales de construcción, como el acero o el hormigón armado, mejor conocidos en su formación y comportamiento.

Actualmente, los especialistas en la materia han logrado explicar muchos fenómenos y sistematizarlos, partiendo de los verdaderos orígenes del problema, es decir, estudiando los componentes del suelo desde sus más diversos puntos de vista y, especialmente, el mineralógico y químico. La formación del suelo, es decir, su historia, influye en el comportamiento posterior, razón por la cual se están analizando, con el mayor detalle, los procesos de formación sistematizándolos y siguiéndolos en su evolución, sin olvidar las condiciones climáticas en que se desarrollan. Ello ha hecho posible varias clasificaciones de suelos, según su origen, según su composición y según su edad, y ha hecho, también, que el técnico de hoy haya tenido que incorporar a su léxico palabras que hasta hace bien poco eran privativas del edafólogo o del biólogo, porque responden ya a conceptos que cada día se adentran más en la práctica de las construcciones y, más concretamente, de las construcciones de caminos.

Por último, la idea que hoy se tiene de la estabilización de suelos, en general, y en particular, de la estabilización por compactación o la estabilización por agentes químicos, se basa en consideraciones de equilibrios de fases y de cargas eléctricas que permiten, al menos en el aspecto teórico, prever efectos, fijar resistencias, evitar alteraciones o limitar los consumos de adiciones y energía, con la misma certeza y grado de confianza con que puede hacerse en otros aspectos de las ciencias propias del ingeniero.

6. La técnica del suelo

La ciencia del suelo no está todavía en condiciones de acudir siempre en apoyo de las realizaciones prácticas, pero, por el contrario, existe toda una técnica de aplicación que permite proyectar y construir con razonable grado de seguridad.

Los datos en que esta técnica se basa son, fundamentalmente, los ensayos de laboratorio y las pruebas de campo, sistematizados unos y otros para que su ejecución sea fácil, su reproducibilidad aceptable, y sencilla la interpretación de sus resultados.

Con auxilio de esta experimentación, con la ayuda que proporciona siempre el estudio de los casos que precedieron a la obra que se estudia y siguiendo normas generales, producto de la experiencia y del tiempo, se puede en la actualidad fijar proporciones, determinar procesos constructivos, condicionar calidades, controlar resultados y prever coeficientes de seguridad, con análogo grado de aproximación con que se trabaja en otras actividades de la construcción.

**En el próximo número se publicará la segunda parte
de este artículo, titulado
"fundamento de la estabilización de suelos"**