

Innovaciones recientes en el campo de la mejora y refuerzo del terreno*

Recent innovation in ground improvement and reinforcement*

Carlos Oteo Mazo. Prof. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Catedrático de ingeniería del terreno. Madrid (España). carlosoteo@telefonica.net
Javier Oteo Escobar. Ingeniero Geólogo
E.I.S., S.A. Madrid (España). eclipse_curro@hotmail.com

Resumen: Los procedimientos de mejora y refuerzo de terreno para resolver problemas de cimentaciones y apoyo de estructuras térreas varias tienen un origen muy antiguo, ya que en Asia, mucho antes de Jesucristo, se utilizaban troncos de madera para "armar" el terreno en el trasdós de muros y para mejorar superficialmente el terreno bajo las calzadas. Pero las técnicas han ido evolucionando, por lo que hoy se dispone de un panorama muy extenso de tecnologías diferentes para resolver estos problemas. En la comunicación se presentan diversas técnicas que se han venido utilizando y desarrollando en los últimos diez años en España y algunas que tienen un futuro esperanzador. Se describen tanto las técnicas estáticas clásicas (precarga), como las vibratorias (superficiales y profundas), así como las inclusiones en el terreno (desde las clásicas columnas de grava hasta las inyecciones puntuales y masivas, pasando por las modernas de mezcla de lechada con el terreno, a alta y baja presión).

Palabras Clave: Geotecnia Vial; Tratamientos del terreno; cimentaciones especiales

Abstract: Ground improvement and soil reinforcement procedures to overcome foundation problems and support road structures date back to ancient times. The origins being found long ago in Asia where tree trunks were used to "reinforce" the ground at the back of walls and to improve the surface of the ground under roadways. These techniques has since developed and there is now a vast range of different techniques to resolve these problems. This article presents the different techniques that have been employed and developed over the last ten years in Spain together with others that are seen to have a promising future. A description is given of both classic static techniques (preload) and compaction techniques (surface and in-depth), as well as the soil additions employed (ranging from the traditional columns of gravel to individual and massive grouting, right up to the modern combinations of soil and slurry at high and low pressure).

Keywords: Soil mechanics for roads; Soil treatment; Special foundations

1. Introducción

La resolución de problemas geotécnicos suele referirse a alguno de estos casos:

- Cimentaciones de estructuras (puentes, edificios, naves industriales, etc.).
- Excavaciones a cielo abierto (estructuras de contención, taludes de tierra y roca, afección a instalaciones próximas, posibles flujos de agua y/o terreno, etc.).
- Excavaciones a cielo abierto (en suelo y roca, teniendo en cuenta la estabilidad de la excavación, su afección a instalaciones próximas, etc.).
- Perennidad de obras (estudiando la alterabilidad del medio y de las estructuras, etc.).
- Problemas de contaminación de suelos (fugas en gasolineras, aeropuertos, etc.).
- Construcción de estructuras de tierra (presas, terraplenes, pedraplenes, etc.)...

Estos problemas han de resolverse tanto en "tierra firme" como en el mar, en obras costeras, puertos, obras exteriores, etc.

Llevan implícitos la definición de afecciones, coeficientes de seguridad (clásicos y aleatorios), límites de movimientos, etc. Pero, en todos ellos, el terreno (suelo o roca) es, desde nuestro punto de vista, el prota-

*Este artículo fue presentado, como Comunicación, en el VI Congreso de la Ingeniería Civil (Valencia, febrero de 2012).

*This article was presented as a paper in the VI Civil Engineering Conference (Valenci, February 2012).

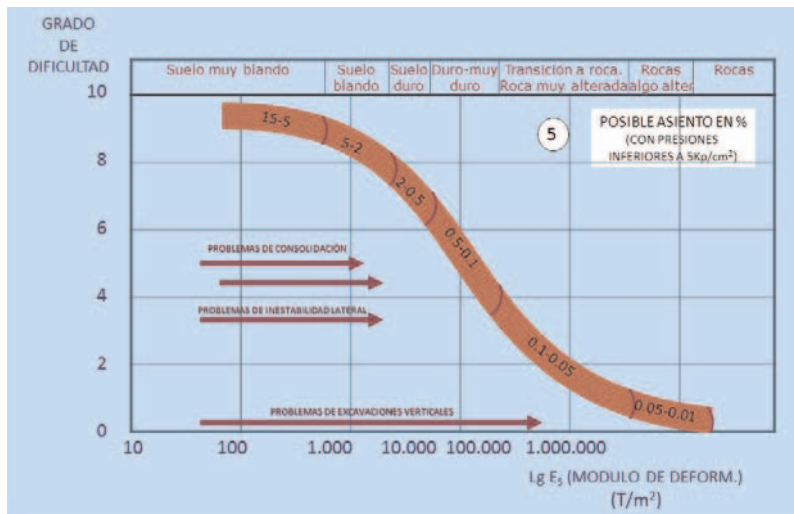


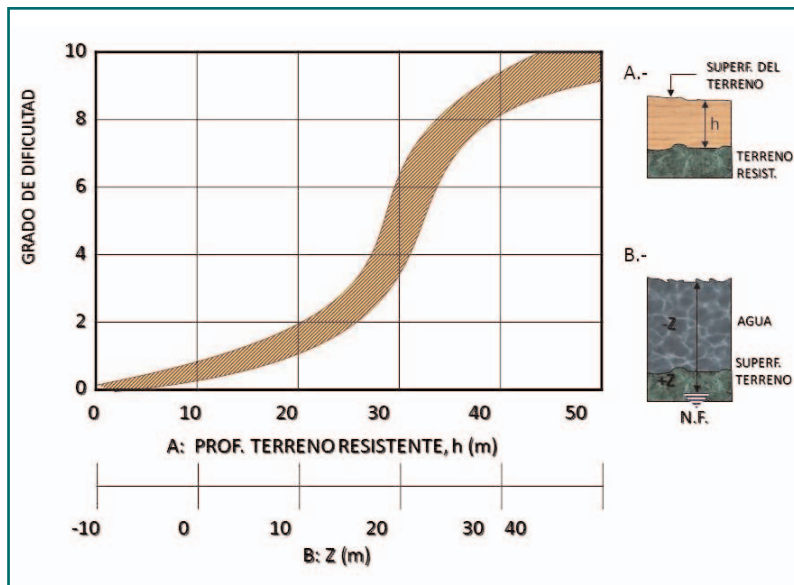
Fig. 1. Dificultad en la resolución de problemas geotécnicos en función de la deformabilidad del terreno.

gonista. En él, resumiendo extraordinariamente cuentan:

- Las propiedades deformacionales.
- Las propiedades resistentes (aunque, de cierta forma están ligadas a las anteriores).
- La permeabilidad.
- La posibilidad de alteración física o química (y, a veces, biológica).

Puede calificarse la gravedad del problema (o grado de dificultad en la resolución del problema que se trate) bien –por ejemplo– por la deformabilidad del terreno (Fig. 1), bien por la profundidad a que se presentan las capas resistentes o “duras” (Fig. 2).

Fig. 2. Dificultad en la resolución de problemas geotécnicos según la profundidad del estrato resistente.



Cuando el conjunto de propiedades hace que calificamos el terreno más superficial como “blando”, “deformable”, “alterado”, etc., el camino clásico es trasladar el problema a mayor profundidad, mediante soluciones como las de pilotes, pantallas, etc.

Hoy día la idea ha ido cambiando. Se pueden emplear técnicas muy diversas que permiten cambiar las propiedades de terreno – en sentido favorable a nuestro problema – a fin de transformarlo en otro que no necesite la solución profunda. Esta última suele ser más rígida y más conservadora pero, en muchas ocasiones, el coste es claramente superior, por lo que disponer de soluciones más flexibles (y algo más deformables) y más cerca de los límites admisibles puede ser muy adecuado y más económico, en función del problema a resolver, su funcionalidad, su “visibilidad”, etc.

Con esta intención nacieron las técnicas de mejora y refuerzo del terreno. Esta frase incluye la descripción de un amplio panorama de intervenciones ingenieriles que supone el ejercer una cierta acción sobre el terreno para acabar modificando sus propiedades y su respuesta frente acciones exteriores e interiores al propio terreno. En este sentido cabe considerar como “tratamientos de mejora y refuerzo” las actividades que:

- Incrementan la cohesión aparente de conjunto del terreno, generalmente por adicionarle o mezclarle con aditivos, bien removiendo el terreno junto con el aditivo y un elemento que facilite su mezcla e, incluso, cierta actividad puzolánica (que puede ser agua), como el caso de columnas de suelo-cal y suelo-cemento, las inyecciones con manguitos, etc.
- Aumentan la resistencia al corte de conjunto del terreno (a veces afectan ligeramente la cohesión y, sin embargo, ejercen una influencia mayor sobre el rozamiento de conjunto). Esto suele hacerse con inclusiones no cementantes como las columnas de grava (drenando el conjunto y elevando las tensiones efectivas e incluyendo grava gruesa con más rozamiento que el del terreno natural) o las columnas de mortero (que consiguen un refuerzo de conjunto y sin mezclar el mortero con el terreno).
- Elevan la resistencia al corte de conjunto por comprimir con fuerzas interiores-exteriores la zona en peligro de rotura (aumentando su tensión efecti-

va), como se hace por ejemplo con anclajes (actuaciones puntales) o por aumentar la presión efectiva con la precarga (actuación más extendida y permanente).

- Movilizan la resistencia efectiva, gracias a drenar una zona o conseguir un menor tiempo y menor camino de drenaje, con lo que la disipación de presiones intersticiales es más rápida y se permite el disponer de esa resistencia efectiva en un plazo más corto. (p.e. drenes de plástico y columnas de grava).
- Aumentan la resistencia al corte -sobre todo rozamiento- por aumento de la densidad aparente del terreno, lo que se suele conseguir con impulsos dinámicos en materiales poco o nada cohesivos (compactación dinámica, vibroflotación, explosivos, etc.)
- Actúan en el interior del terreno, formando barreras activas o pasivas, con inclusiones de mayor o menor rigidez, de forma que los movimientos de la estructura que interesa se reduzcan, respecto a los que se producían sin tratamiento, debidos a una fuente externa a la estructura, tal como una excavación a cielo abierto o subterránea. También pueden evitar el paso de agua, el arrastre de terreno, etc. (p.e. los tratamientos con barreras de jet-grouting o de micropilotes que se usan entre túneles urbanos y edificios).
- Modifican, de forma activa, el comportamiento deformacional del terreno, al actuar sobre él a través de inclusiones a las que se hace aumentar de volumen y producir movimientos contrarios a los que produce una excavación (inyecciones de compensación, de compactación, etc.).

A manera de ejemplo, puede decirse que en la Guía de Cimentaciones en Obras de Carretera del Ministerio de Fomento (1) se consideran técnicas de mejora y refuerzo del terreno los siguientes métodos (como indica SAGASETA (2)):

- Sustitución.
- Compactación con rodillo.
- Precarga.
- Mechas drenantes (o drenes de plástico).
- Vibración profunda (o vibroflotación, sin aportación de material).
- Compactación dinámica (apisonado intensivo o dinámico, tipo Menard).

- Inyecciones.
- Jet-grouting (o inyección por tobera, que es un tipo más de inyecciones).
- Columnas de grava (que es una vibración profunda con torpedos de vibroflotación, pero con sustitución del terreno por grava compactada).
- Columnas de suelo-cemento.
- Bulones (claveteado).
- Geosintéticos (geotextiles, geomallas, etc.).
- Otros: Explosivos, tratamientos térmicos (calentamiento, congelación, electrólisis).

A esta relación cabe añadir:

- Las columnas de suelo-cal (variante de las de suelo-cemento)
- Las columnas de suelo cemento tipo "springsoil" con mezcla de terreno más allá del diámetro nominal de perforación.
- Electro-osmosis para consolidación.
- Los micropilotes que pueden utilizarse como mejora resistente del terreno cerca de un túnel (prebóveda, p.e.), como barreras pasivas entre túneles y edificios.
- Inyecciones armadas con tubo metálico (o de P.V.C., en algunos casos) con finalidades similares a las indicadas para los micropilotes.
- Las columnas de mortero con desplazamiento (o de módulo controlado), etc.
- La mezcla directa de suelo (generalmente, arcilloso) con cal u otro aglomerante similar, para formar núcleos de terraplenes.
- El suelo reforzado con neumáticos.

En la Fig. 3 (3) se puede ver la posibilidad que tienen diversos tratamientos de tener éxito en función de la granulometría del terreno, aunque esto es algo con bastantes posibilidades de discusión. Las columnas de suelo-cemento o suelo-cal o suelo-cal-cemento (desarrolladas en Japón y Suecia hace unos cuarenta años) se utilizan para "reforzar" terrenos arcillosos blandos y fangos, principalmente, y suelos con alto contenido en materia orgánica, sulfatos o sal, con aportaciones de cal o cal-cemento de 70-110 Kg/m³ (duplicándose esta aportación en fangos y turbas). En el caso de columnas de mortero con desplazamientos el campo de aplicación puede ser diverso: Rellenos antrópicos sin excesivos gruesos, arenas flojas, arcillas de consistencia no excesivamente blanda.

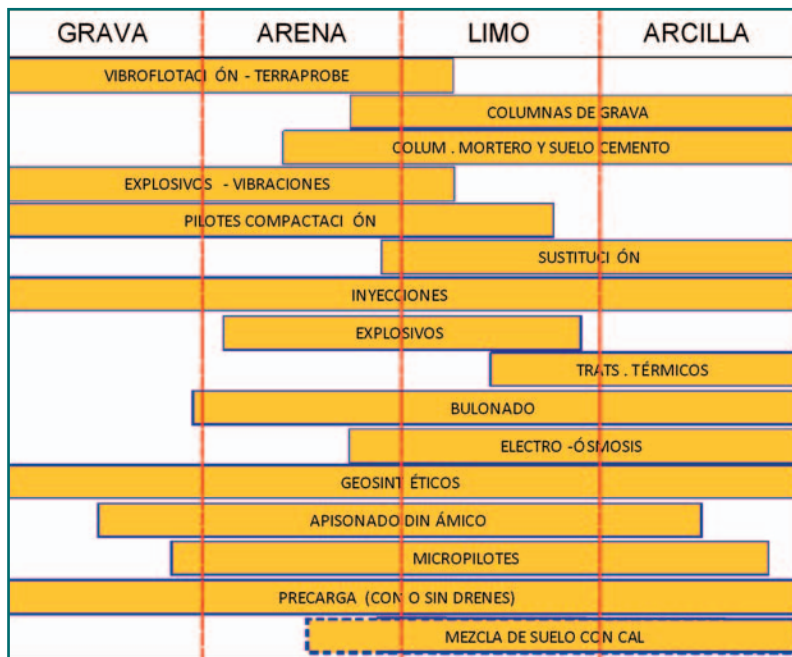


Fig. 3. Tratamientos posibles en función de la granulometría del terreno.

Todos estos sistemas podrían clasificarse, por el principio de actuación, en los siguientes grupos:

- Técnicas de sustitución: Remoción del material original y su sustitución por otro mejor (mayor cohesión) o más grueso (compactado) o por el mismo mejor compactado. Suele realizarse en los primeros metros del terreno, por encima del nivel freático.
- Técnicas de desplazamiento y sustitución: a) Columnas de grava. b) Columnas de mortero. c) Columnas de suelo-cemento o suelo-cal.
- Técnicas estáticas: Precarga (con o sin drenes de plástico, con columnas de grava, con columnas de suelo-cal, etc.), a fin de aumentar la resistencia del terreno y (en ocasiones) el recubrimiento sobre la bóveda de un túnel.
- Técnicas de inclusiones resistentes: a) Inyecciones armadas (manguitos y tubo metálico). b) Jet-grouting. c) Columnas de mortero. d) Columnas de cal. e) Micropilotes. f) Pilotes de hormigón armado. g) Pilotes de mortero, no armados. h) Geotextiles, etc.
- Técnicas dinámicas: a) Compactación con rodillo. b) Vibroflotación. c) Terraprobe. d) Compactación dinámica. e) Explosivos.
- Técnicas de mezclado con aditivos fraguantes en plan masivo: a) Terraplenes de arcilla con cal. b) "Sandwichs" terreno natural-terreno con aditivo.

A continuación pasaremos revista general a una serie de técnicas de mejora y refuerzo para dar una visión general del alcance de su utilización, características, criterios de selección.

2. Tratamiento de materiales por sustitución

En el caso de la construcción de terraplenes se presenta, cada día más a menudo, el caso en que la materia prima disponible está constituida por suelos marginales (introducidos en el PG-3 del Ministerio de Fomento al iniciarse el siglo XXI), que pueden ser expansivos, colapsables, contener excesivo yeso, etc.

Trabajando del lado húmedo esta materia prima (caso arcilla-expansiva), esto es, con humedades superiores a la óptima del ensayo Proctor, y con estructura dispersa en la matriz arcillosa, pueden conseguirse masas estables con elevados contenidos de humedad y densidades correspondientes más bajas que la óptima (téngase en cuenta que la densidad máxima disminuye de forma notable cuando aumenta la humedad de colocación). Pero puede mezclarse este material arcilloso con cal para disminuir su expansividad y aumentar la rigidez del conjunto. Inicialmente y antes del proceso del curado de la mezcla con cal, la competencia del suelo tratado será reducida, pero por efecto del propio aglomerante, ésta irá aumentando, primeramente en un período de 24 horas en lo que se denomina "endurecimiento primario", y que es de naturaleza cristalina, y finalmente mediante el endurecimiento secundario, debido a la hidratación de coloides, período que viene a comenzar desde las 24 horas y puede finalizar pasado un año (la mitad de la resistencia final se alcanza en el plazo de 1 mes).

La mezcla y trituración del material se puede realizar mediante el empleo de grada de rejas o arado o rotabator y compactar con rodillo de "pata de cabra" de unas 30 Tm (Fig. 4). Se ha comprobado que el efecto de la "pata de cabra" no solo es válido para la trituración del material, sino también para su mezclado con la cal, con espesores de tongada del orden de 25-30 cm (4). Para controlar el producto acabado conviene utilizar ensayos de placa de carga y el ensayo suizo de "huella". En todas las obras en que hemos hecho estos ensayos se han obtenido, a las 24 horas, valores inferiores a 5 mm. Los ensayos de placa de carga pueden dar unos valores altos del módulo de deformación del segundo ciclo (EV₂), superior a



Fig. 4. Tratamiento de una arcilla expansiva con cal para formar el núcleo del terraplén de una Autovía.

100 MPa en el núcleo del terraplén (llegando a valores de 200 y 300 Mpa), lo que resulta prácticamente imposible de conseguir en terraplenes sin tratamiento. Personalmente, preferimos el uso del rodillo "pata de cabra", aunque pueden obtenerse buenos resultados con el rotabator.

En otros casos, con análoga filosofía de refuerzo, hemos utilizado rellenos de arcilla con cal, sustituyendo parte del terreno superficial y añadiendo terraplén, a fin de conseguir una capa dura en túneles con poco recubrimiento (Fig. 5, Aeropuerto de Málaga (3)). También hemos utilizado suelo-cemento (en la misma obra citada) e incluso hormigón pobre o mortero rico. Esta última solución se ha usado en el caso de recubrimiento mínimo, como en el Túnel ferroviario que une las Estaciones de Atocha y Chamartín de Madrid para la L.A.V., a veces ayudada por pilotes de mortero que constreñían lateralmente la zona a excavar (Fig. 6). En este caso el material resistente conviene que tenga una resistencia característica a compresión del orden de 9-10 MPa, a fin de que pueda cortarse bien (sin fragmentar y destrozarse el relleno), y que no desgaste excesivamente las picas y cortadores de la tuneladora (3).

Este sistema de sustitución es también aplicado en obras marítimas bajo diques verticales, eliminando el terreno blando y sustituyéndolo por escollera. Hay que diseñar bien el espesor y anchura de la zona sustituida, ya que podría producirse – si ese espesor es escaso – una rotura por inestabilidad lateral o por hundimiento (Fig. 7). Se han producido roturas de este último tipo, como en el Puerto de Barcelona y por deslizamiento (Fig. 8) en el Puerto de Málaga.

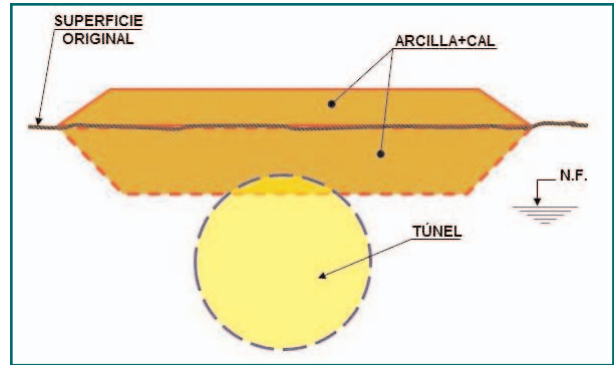


Fig. 5. Sustitución de la parte superficial del terreno por arcilla reforzada con cal.

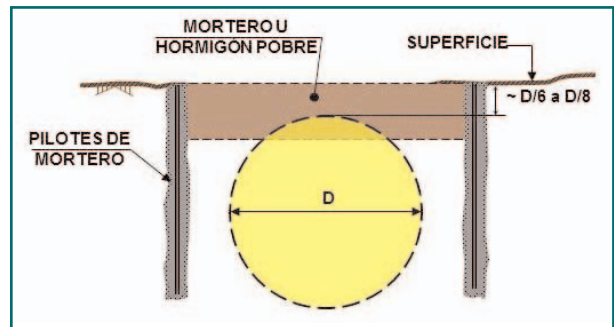


Fig. 6. Sustitución de terreno superficial por material resistente (Recubrimiento muy escaso).

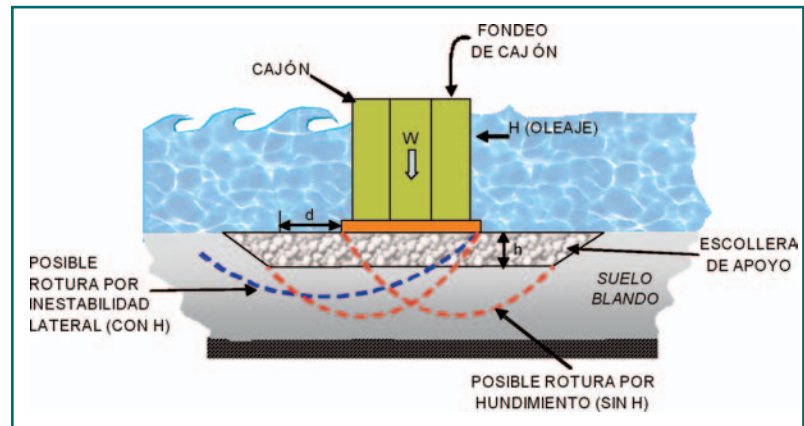


Fig. 7. Diques verticales sobre suelos blandos. Sustitución en el apoyo.

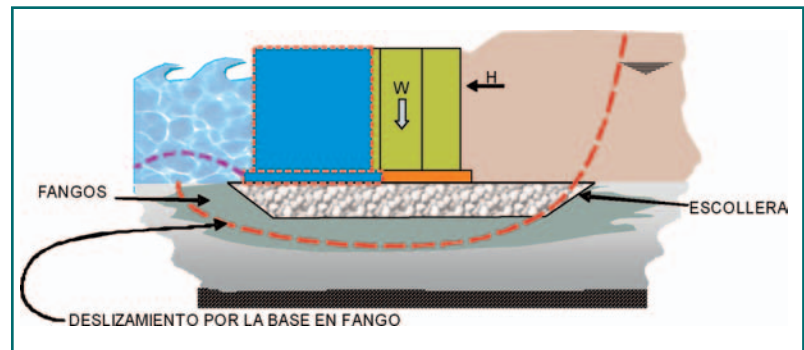
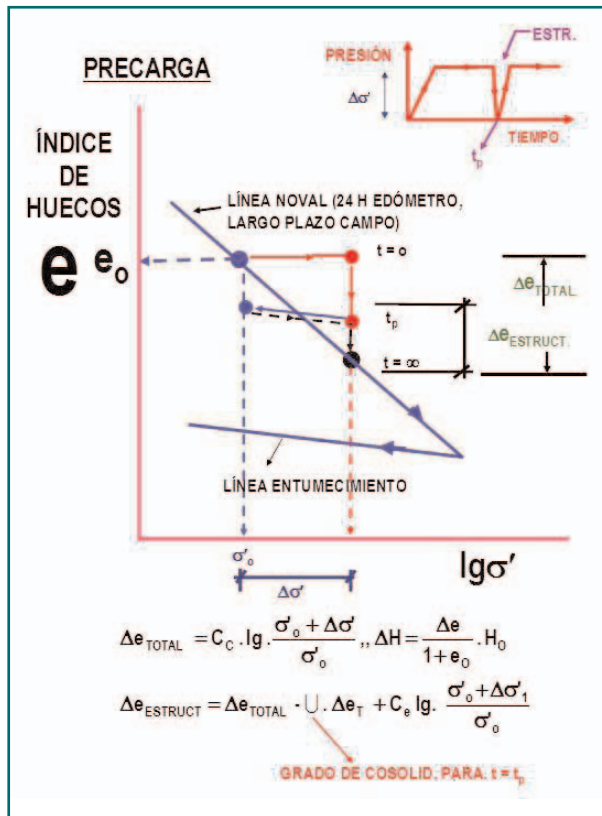


Fig. 8. Esquema de una rotura por deslizamiento por la base del fango. (Puerto de Málaga).

Fig. 9. Precarga estudiada con el método edométrico.



3. Tratamientos de acción estática

Con esta idea se pretende aplicar una carga estática o quasi-estática sobre un terreno, más o menos blando, a fin de producir asientos a lo largo de un periodo en que no está constituida la estructura definitiva, para que ésta no “sufra” dichos movimientos. Mediante una “precarga” con terraplén u otro sistema de aplicación de carga estática (p.e.,

con bloques de hormigón, chapas metálicas etc.), se pretende:

- Elevar la calidad geotécnica del terreno a corto y largo plazo.
- Que la estructura definitiva (el firme de una carretera, un depósito de combustible, las zapatas de una nave industrial, etc.) no experimente más que una parte de los movimientos totales (admisibles para ella), en tiempo razonable (Fig. 9).

Esta precarga es muy típica en estas estructuras que acabamos de indicar y puede, incluso, sobrepasar la carga máxima prevista (sobrecarga), siempre que la capacidad portante del terreno lo permita. Pero no sólo es adecuada una precarga en esa situación. También puede utilizarse en el caso de túneles excavados en suelos blandos, como en el de la Fig. 10 (ejemplo de una zona en la variante del Aeropuerto de Málaga del Ferrocarril Málaga-Fuengirola (3)). En estos casos el controlar movimientos verticales máximos de la precarga y los horizontales en su pie (Fig. 11) es muy importante ya que la relación entre estos dos movimientos máximos da idea de la seguridad de la propia precarga.

El aumento de la calidad geotécnica del terreno puede acelerarse con drenes banda (o drenes mecha o drenes de plástico). Si se colocan estos drenes (Fig. 12), debe instalarse uno cada 1,5-2,5 m², en disposición triangular. Entre los drenes y la precarga hay que instalar una capa de arena o un geotextil para que los drenes estén en contacto con la atmósfera, a presión “cero” en su parte superior (3). Se trata de disipar las presiones intersticiales con rapi-

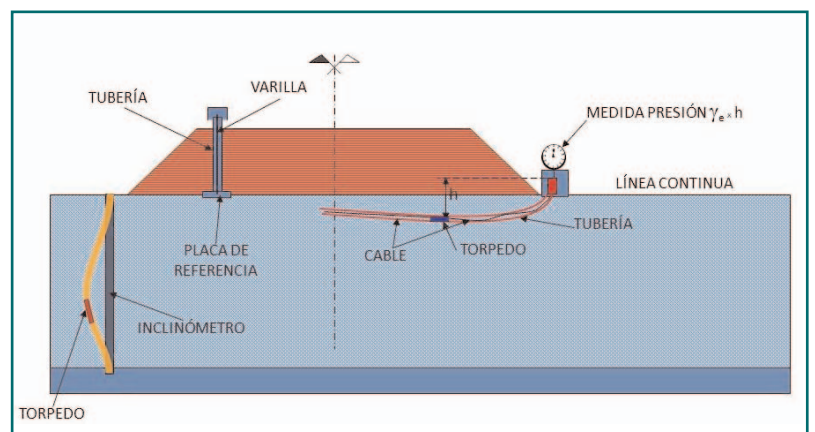
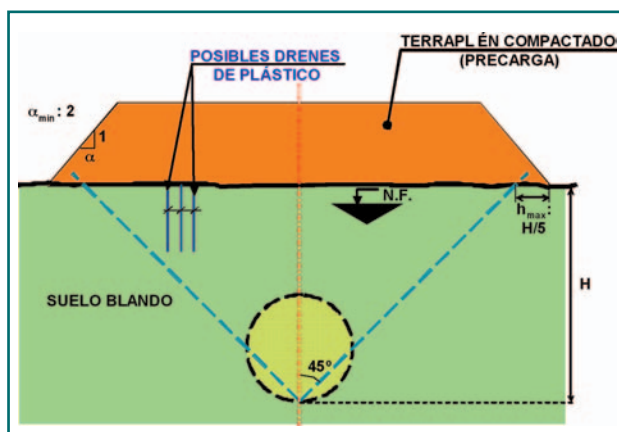
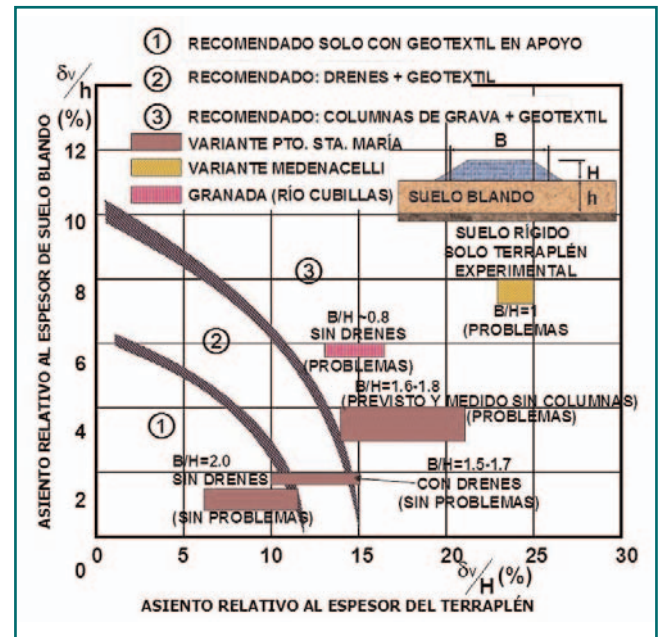
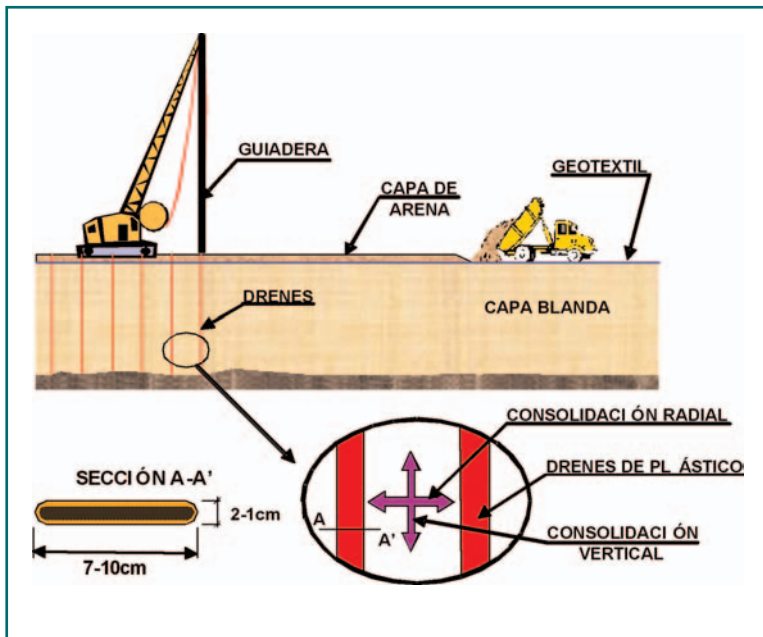


Fig. 10. Precarga para mejorar un terreno natural blando por encima de la clave del túnel. A la derecha, Fig. 11. Control de movimientos en una precarga.



dez, haciendo que el drenaje sea horizontal y de corto recorrido y no de "bombear" agua. Aunque el cálculo de la consolidación debería hacerse teniendo en cuenta la consolidación radial y la vertical, esta última puede despreciarse, a efectos prácticos.

También puede pensar en armar el terreno bajo la precarga con columnas de grava, pero ello es, económicamente, más costoso que en el caso de los drenes, por lo que no es siempre aconsejable. En la Fig. 13 se presenta un criterio para la selección cuando deben usarse drenes, columnas de grava o nada. Evidentemente cada tipo de actuación tiene una efectividad diferente, en movimientos y en velocidad de consolidación.

4. Sistemas de reducción de densidad aparente.

Estos sistemas pretenden reducir el volumen ocupado por un terreno flojo, bien en un espesor superficial de algunos metros, bien en vertical y profundidad.

Entre los primeros está el sistema de compactación dinámica clásico, ya usado antes de la II Guerra Mundial e impulsado por MENARD, de forma teórica y práctica. Consiste en dejar caer una maza, de peso W desde una altura H (Fig. 14, (3)) para que, golpeando la superficie del terreno, reducir el volumen ocupado por el terreno (o sea, aumentar su densidad y, por lo tanto, mejorar su resistencia al es-

fuerzo cortante y su deformabilidad). Se van formando cráteres (como los de la Fig. 15) que luego hay que rellenar con un material mejor, consiguiendo así un espesor de terreno mejorado, h , que es función de W y H .



Fig. 12. Instalación de drenes-banda. A la derecha, fig. 13. Criterio para seleccionar el uso de drenes y columnas de grava bajo terraplenes.

Fig. 14. Compactación dinámica realizada en la R3 de Madrid.

Fig. 15. Cráteres conseguidos en el caso de la Fig. 14.



Otros sistemas pueden ser vibratorios, a aplicar cuando el material sea granular: a) Compactación con supercompactadores y con bandejas vibrantes. b) Compactación profunda con el clásico sistema de vibroflotación, en que un vibrador se introduce en el terreno con lanza de agua o de aire y transmite una vibración al medio granular, para compactar la zona que se desee. c) Compactación con tubería metálica de gran diámetro con vibrador en cabeza (terreaprobe). Este sistema tiene menor capacidad de densificación que la vibroflotación.

También cabe incluir aquí el sistema de mejora de un terreno blando por medio de voladuras controladas en el interior de sondeos que, bien densifican un terreno granular, bien lo desplazan (fango). Esta técnica – muy poco usada en España, como en un caso del Puerto de Valencia – tiene muchas dificultades de uso, derivadas de la dificultad administrativa de conseguir GOMA-2 o un explosivo similar, almacenamiento y manejo del mismo, etc.

5. Inclusiones rígidas

Pueden incluirse en este apartado:

- Las columnas de mortero.
- Las columnas de mortero con desplazamiento (de módulo controlado).
- Bulones autoperforantes.
- Inyecciones de compactación.
- Columnas de jet-grouting.
- Los pilotes de gran diámetro, armados.

El primer sistema pretende “armar” un terreno blando o flojo para conseguir una “estabilidad de conjunto”, con una cierta elevación de resistencia al

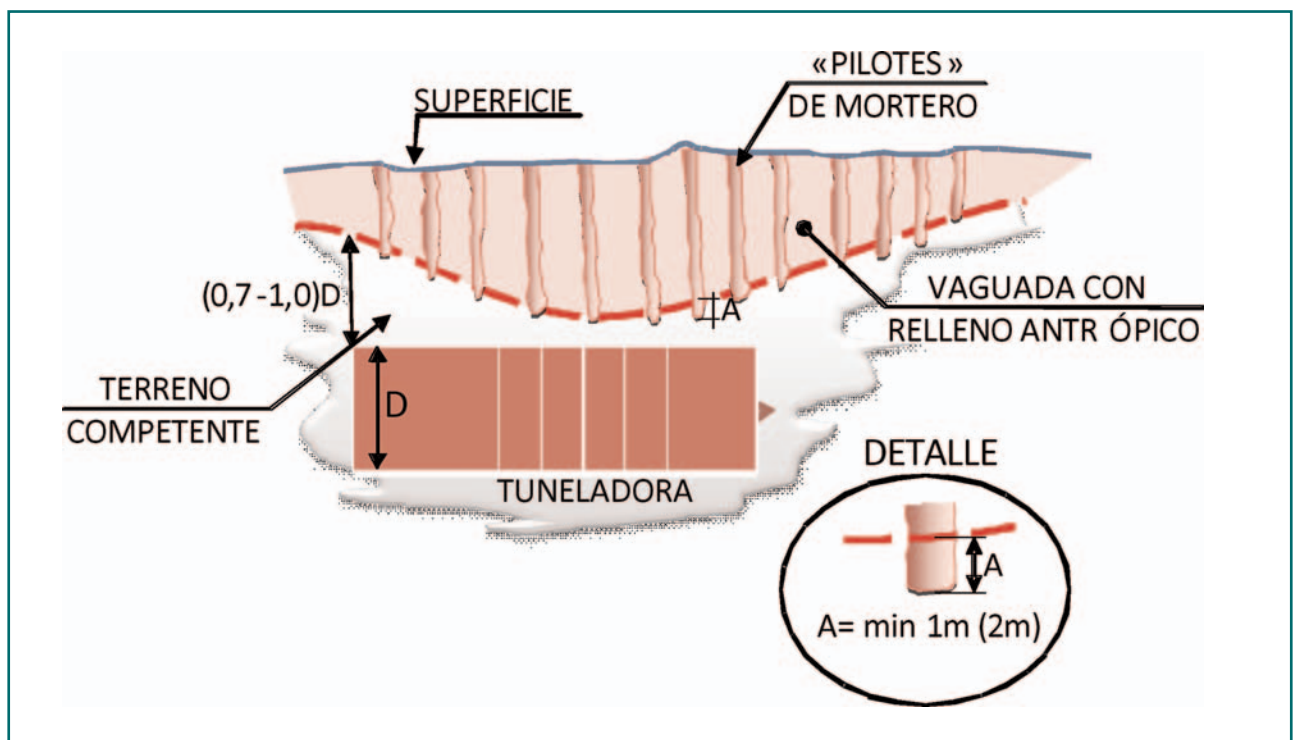


Fig. 16. Refuerzo de rellenos con columnas de mortero.

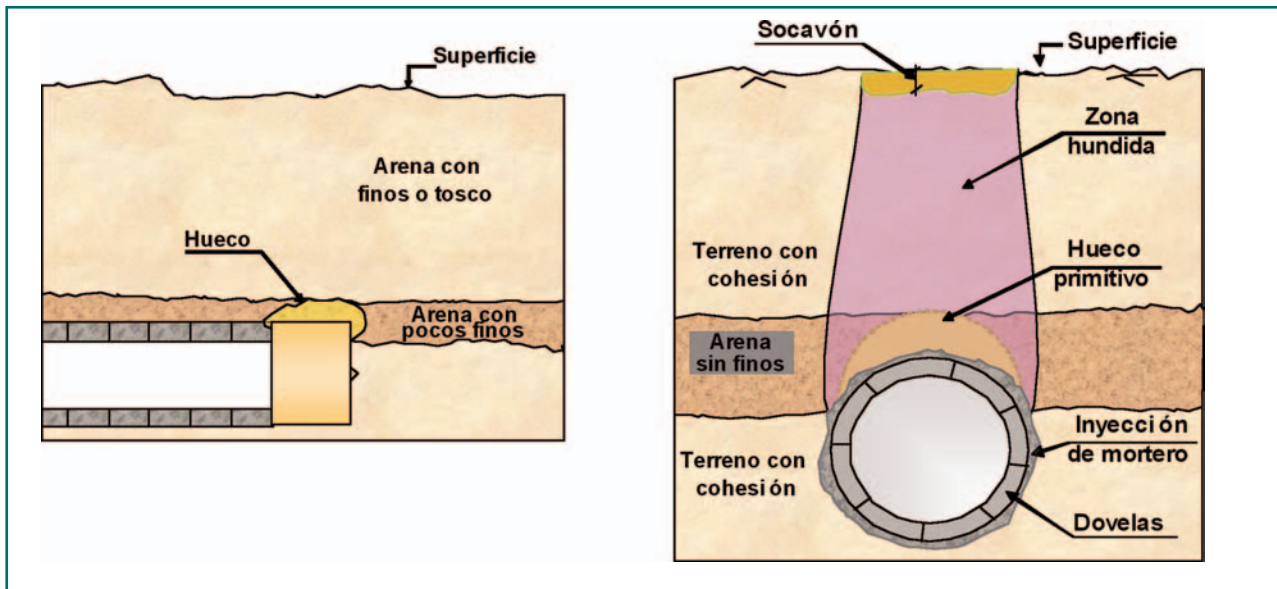


Fig. 17. Inestabilidad dorsal.

corte y una disminución global de la deformabilidad (5). También pretende, a veces, el cambiar un sistema de riesgo general (socavón, hundimiento), por otro de riesgo localizado (terreno entre columnas).

En la Fig. 16 (3) puede verse, por ejemplo, un tratamiento con columnas de mortero, realizadas por pilotes de barrera helicoidal continua, en que el mortero se inyecta por el hueco central de la barrera. Se trata de "armar" un relleno antrópico (heterogéneo, deformable y colapsable) sobre la traza de una tuneladora, a fin de evitar la inestabilidad de ese terreno y evitar un gran socavón (Línea 8 del Metro y By-Pass Sur de Madrid, por ejemplo).

Otras veces se trata de rellenar huecos con mortero, a través de perforaciones de unos 200-225 mm, como cuando se producen inestabilidades dorsales (por sobreexcavación en arenas con menos del 15% de finos y, por lo tanto, con poca cohesión). Estos huecos pueden formarse en arenas pliocenas entre dos capas de arcilla rígida o arenas densas algo cementadas con más finos (Fig. 17). El relleno continuo de ese hueco que se va formando (Fig. 18) puede impedir la formación de grandes socavones.

Pero, además, pueden hacerse columnas de mortero con desplazamiento en terrenos arcillo-limosos blandos, vertederos, etc., con la denominada técnica de "columnas de módulo controlado". En ellas la sección media equivalente de la columna finalizada es del orden de 1,8-2,0 la sección teórica del útil de perforación, lo que supone un desplazamiento y una "compresión" del terreno a "armar", cosa que no se

consigue con igual intensidad con las columnas de mortero realizadas con barrera continua (incremento de sección del 10-20%, generalmente). En la Fig. 19 puede verse un aspecto del extremo del útil de perforación (3).

Los bulones metálicos autoperforantes se han empezado a utilizar hace pocos años y están evolucionando rápidamente. Se trata de un bulón metálico hueco con útil de perforación unido al propio bulón y que queda perdido en la operación de instalación. Es el propio bulón el que realiza la perforación que, al acabar, queda inyectada a través del hueco que tiene el bulón. La lechada de agua y cemento sale por el extremo del útil de perforación y vuelve por el hueco entre el terreno y el bulón, para rellenarlo y que el bulón quede adherido al terreno (Fig. 20). Estos ele-

Fig. 18. Relleno de inestabilidad dorsal.

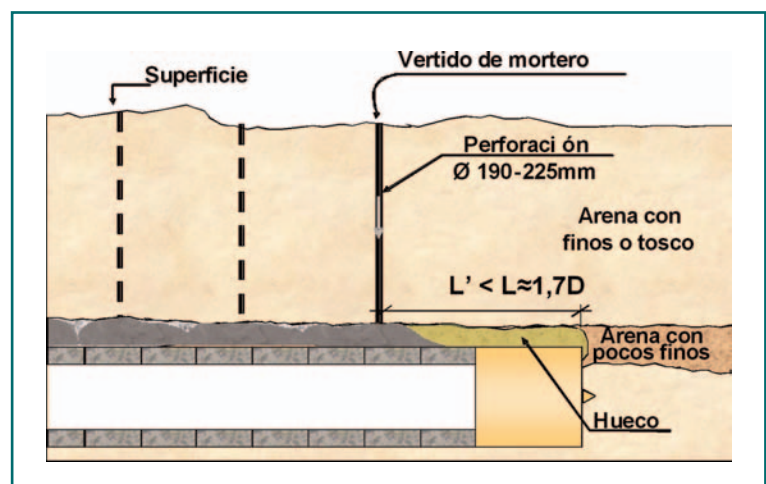


Fig. 19. Detalle del extremo del útil de perforación para columnas de mortero con desplazamiento (Gentileza de MENARD).



Fig. 20. Perforación y colocación del bulón autopercutor e. (Gentileza de ISCHEBECK TITAN).

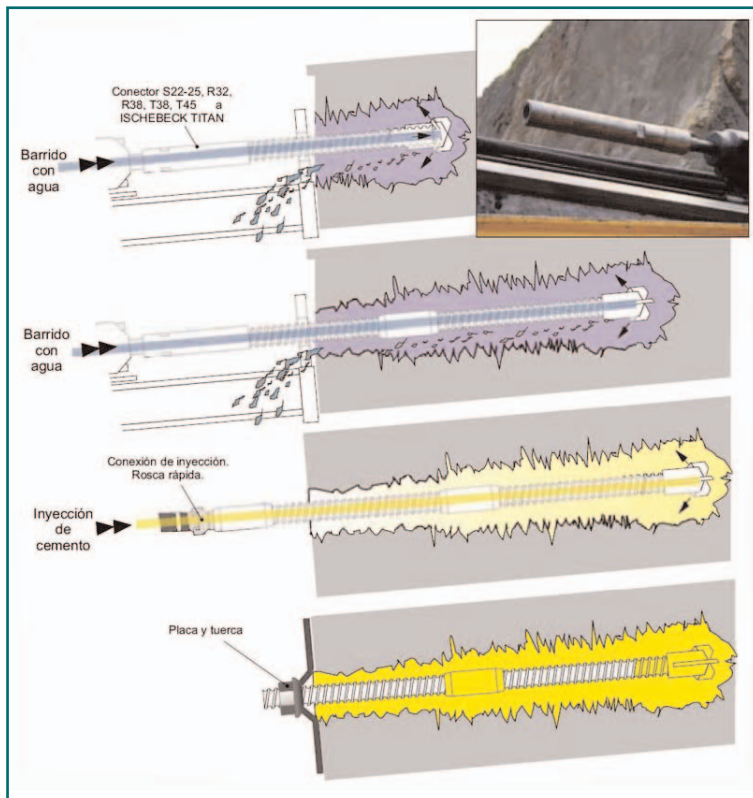


Fig. 21. Control de asiento en Cono de Abrams del mortero a utilizar en inyecciones de compactación (Henríquez y otros, 2009).



Fig. 22. Equipo utilizado para la perforación e inyección de mortero. (Gentileza de GEOCISA).

mentos son muy útiles en terrenos en que las paredes son irregulares y más rápidos de instalación y se usan en paraguas de túneles, anclaje de elementos de contención de tierras, etc. Existe la posibilidad de instalarles varias válvulas e inyectar no sólo por la boca del útil de perforación sino, en retirada, por dichas válvulas para que la adherencia quede más asegurada. Así lo hemos hecho en algunos túneles en formaciones heterogéneas canarias.

Las inyecciones de compactación, utilizadas en los años 80 para compensar asentamientos sobre túneles (Metro de Baltimore (6) y Metro de Caracas, en el que intervinimos personalmente), inyectan "bolas" de mortero seco (cono de Abrams del orden de 5 cm, Fig. 21) de forma más o menos continua, para desplazar el terreno y compactarlo (7). En la Fig. 22 puede verse el equipo de perforación e inyección. Este procedimiento puede permitir reducir el riesgo de licuefacción en depósitos naturales arenosos flojos y saturados (o rellenos hidráulicos), como se ve en el caso real de la Fig. 23 (tratamiento realizado por una empresa española en Méjico).

En cuanto a las columnas de jet-grouting (Fig. 24) pueden considerarse como inclusiones rígidas en el caso de formar columnas continuas y de diámetro constante. El material resultante es una mezcla de suelo-lechada de cemento que puede tener una resistencia de 40-50 MPa en suelos arcillosos y de 8-10 MPa en suelos granulares, en función de las condiciones de ejecución (tipo de jet, tiempo de inyección, contenido de fi-

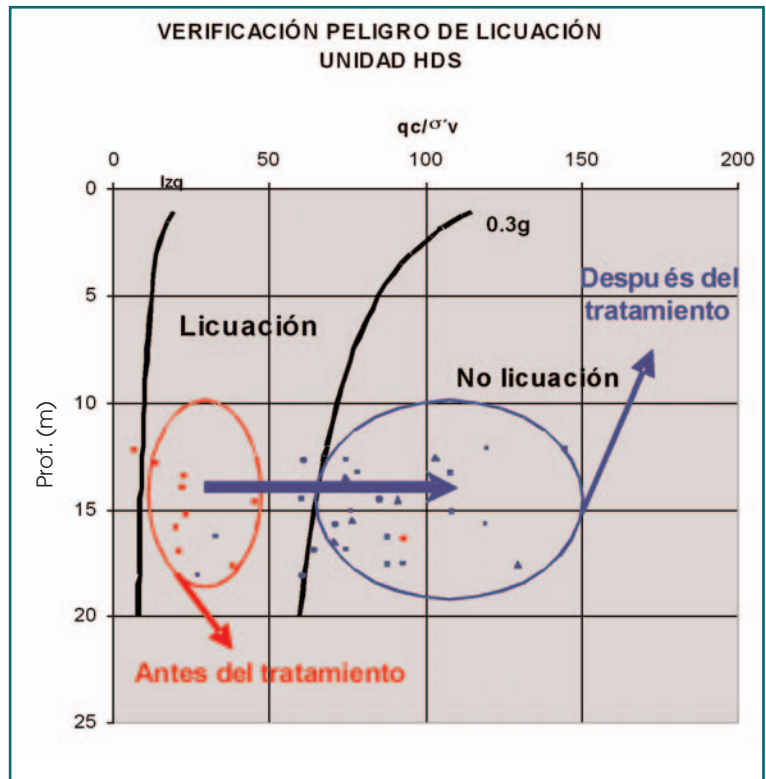


Fig. 23. Análisis de licuación antes y después de ejecutado el tratamiento con inyecciones de compactación. (HENRIQUEZ y otros, 2009).

nos, velocidad de acceso, presiones de corte e inyección, etc.). A veces se emplean jets (o toberas) diferentes, para cortar con agua a alta presión e inyectar - con otra tobera - la lechada de cemento (tipo 2). Hemos utilizado columnas de jet-3 (y de superjet) en el re-

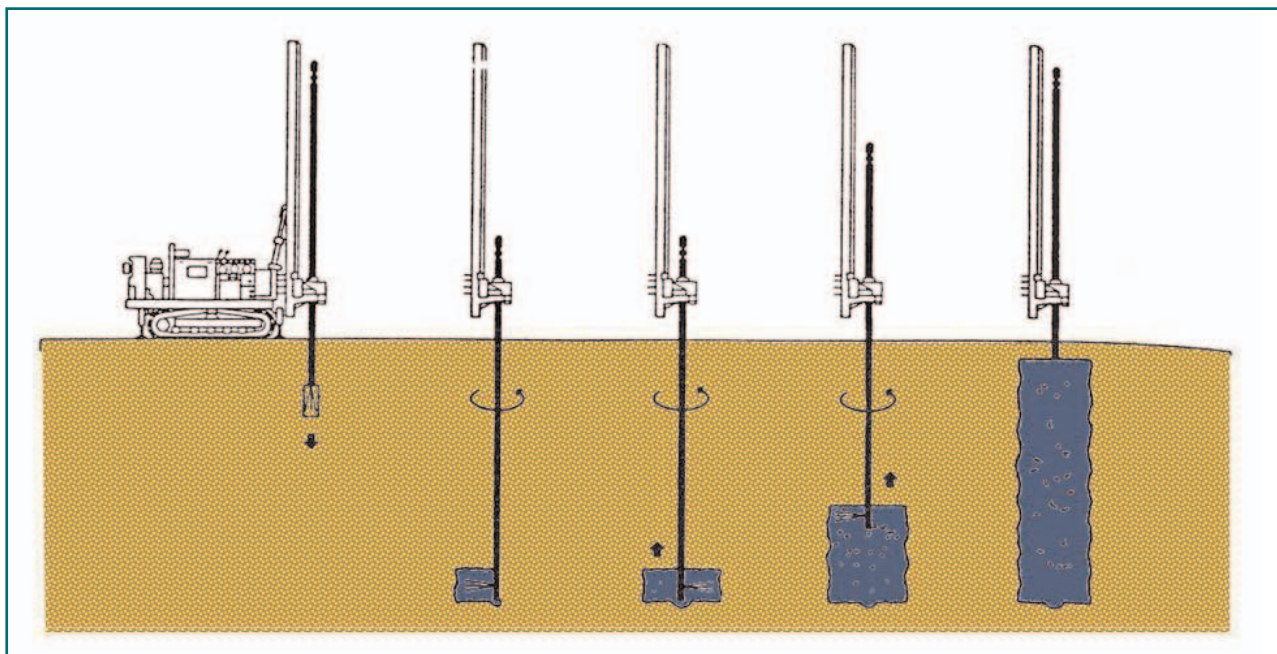


Fig. 24. Esquema de la realización de columnas de jet-grouting.

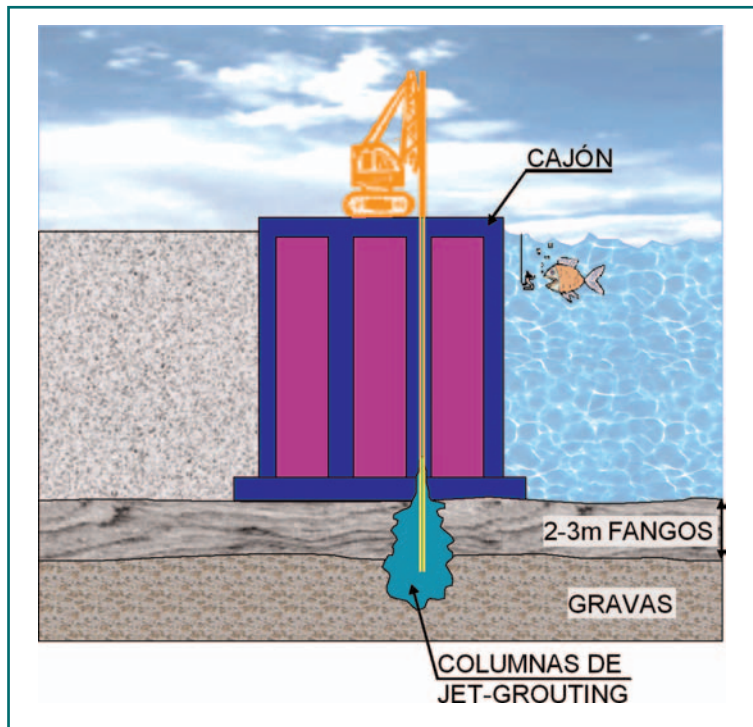


Fig. 25. Recalce de cajones en el Puerto de Málaga con jet-3 para reforzar los fangos existentes.

calce de unos cajones en el Puerto de Málaga, bajo cuya escollera de rasante quedaban fangos (Fig. 25).

Por último, cabe citar el empleo de pilotes de gran diámetro, debidamente armados, como barreras de contención y refuerzo, por ejemplo, de taludes inestables. En las Figs. 26 y 27 se indican los procedimientos de refuerzo de taludes más adecuados, tanto en desmontes como en terraplenes (8).

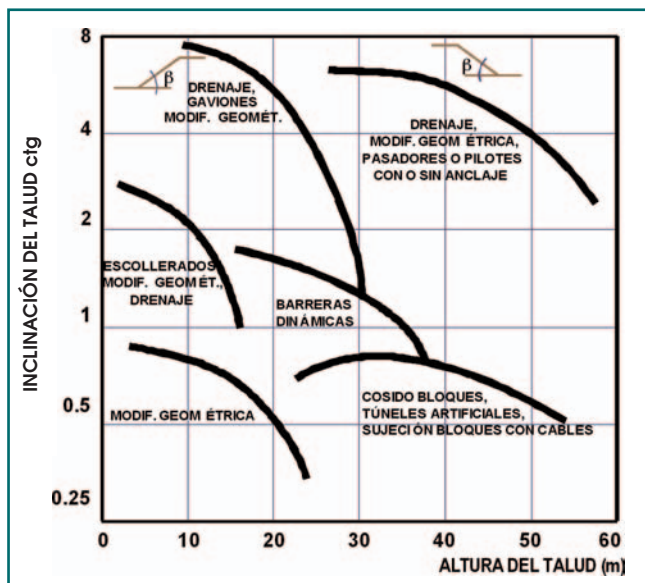


Fig. 26. Refuerzos en desmontes (OTEO, 2001).

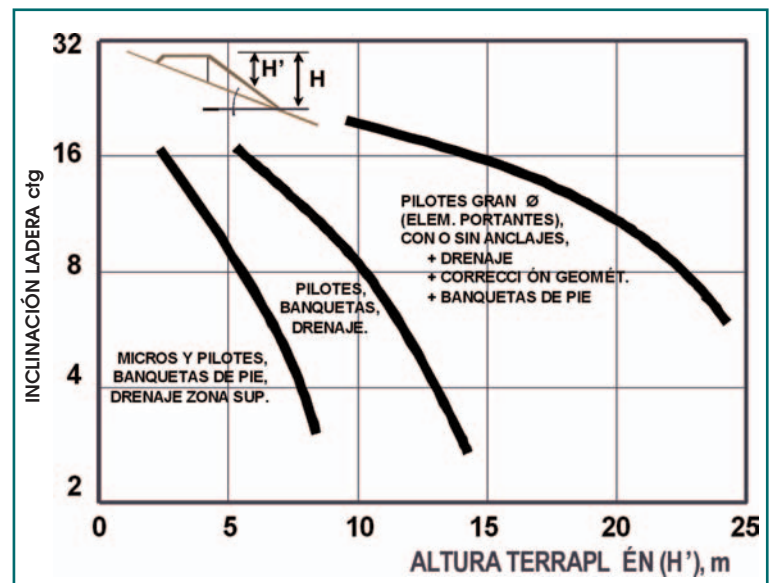


Fig. 27. Refuerzo en terraplenes (OTEO, 2001).

6. Inclusiones semirígidas y flexibles.

En este grupo pueden incluirse:

- Las columnas de grava, con aportación de grava en boca de perforación o en profundidad por tubo (Fig. 28). En el caso de obras marítimas puede usarse el sistema de acumular una "manta" de grava en el fondo marino y luego, arrastrarla con el vibrador. Así se ha hecho en el Puerto de Algeciras (Fig. 29). Hoy día es posible conseguir un buen control durante la realización de las columnas (Fig. 30). Estas columnas no sólo refuerzan globalmente el terreno sino que aceleran su drenaje.
- Las columnas de suelo-cemento tipo Springsol®. La perforación se hace, inicialmente, con un diámetro de unos 170 mm, por lo que puede hacerse cerca de vías férreas, para atravesar losas y recalzarlas, etc. Una vez dentro del terreno, el útil que lleva la perforadora se abre y se llega a un diámetro de 400-700 mm, removiendo el terreno dicho útil (gracias a sus aletas, Fig. 31). Como se aporta una lechada a baja presión por el eje de la herramienta se mezcla con el terreno removido y puede obtenerse una columna semi-rígida que puede resistir, a 28 días, entre 2,0 y 4,0 MPa.
- Las columnas de jet-grouting ejecutadas en suelos heterogéneos y fisurados en que la columna suele ser pequeña, pero en la que forman capas

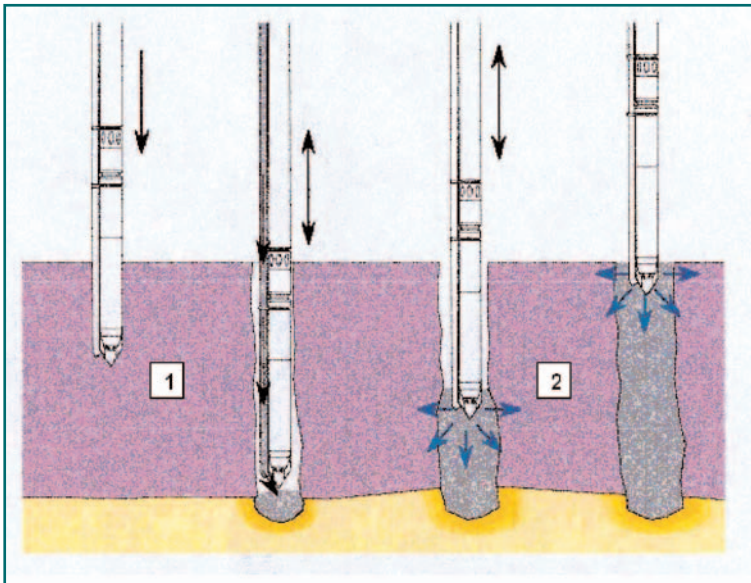


Fig. 28. Realización de columnas de grava con aportación profunda por tubo.

(de 2-3 cm de espesor) que se introducen en el terreno o fisuras, formando "pseudópodos" que arman el terreno, etc.

- Los micropilotes, generalmente como barreras para "reforzar" taludes de desmonte y terraplén (Fig. 26 y 27), "armado" general.
- Las inyecciones de lechada, vía manguitos, que permiten seleccionar la aplicación del refuerzo e impermeabilización, incluyendo las de compensación (evolución natural de las de compactación) para "compensar asentamientos producidos, por ejemplo, por la excavación de túneles. Esta y otras técnicas se han desarrollado, precisamente, para proteger edificios cerca de obras subterráneas (Fig. 32) (3). Hoy día, la aplicación del microcemento está empezando, sobre todo para impermeabilizar, tal como se está empezando a hacer en los túneles de Pajares. Pero hay un amplio panorama de productos a inyectar desde silicatos aqua-reactivos hasta los productos fenólicos, más difíciles de manejar. En este sentido, el futuro todavía no está escrito para las inyecciones.

7. Conclusiones

- El panorama de técnicas de mejora del terreno es muy variado. Aquí no se han descrito más que las más utilizadas en España. Algunas de estas técnicas

INSTALACIÓN COLUMNAS

• BANQUETA

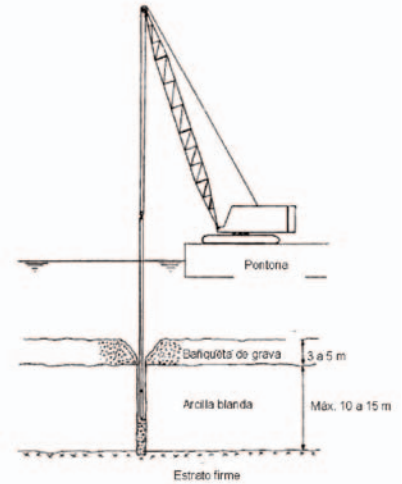
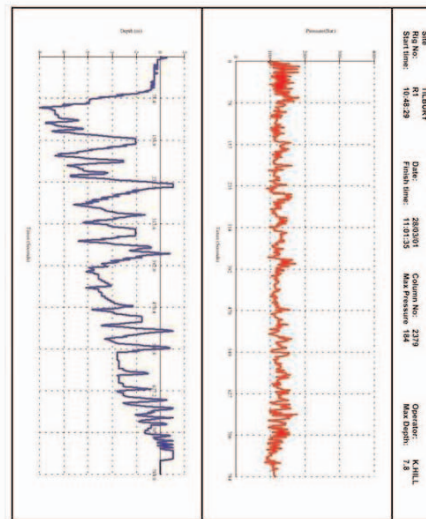


Fig. 29. Realización de columnas de grava en medio marino.



Ejemplo de las salidas del registrador de parámetros (Profundidad - tiempo a la izquierda y presión - tiempo a la derecha)

Fig. 30. Control de la realización de columnas de grava. Gentileza de Terratest.

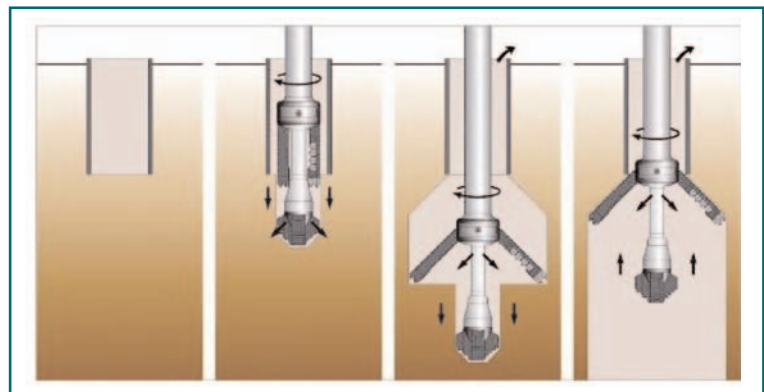


Fig. 31. Proceso de ejecución de Springsol® (Gentileza de RODIO-KRONSA).

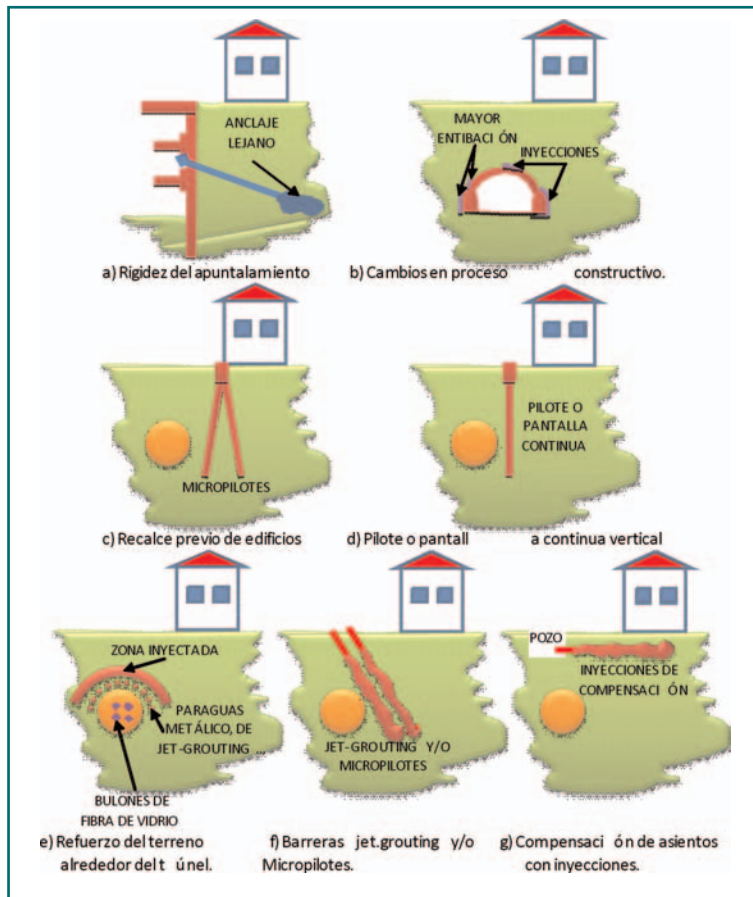


Fig. 32. Tratamientos en medio urbano para proteger edificios de excavaciones de túneles (Oteo, 2011).

cas pueden verse con más detalle en la referencia (9).

- Si bien la variedad es grande no todos los sistemas son adecuados para cualquier problema. La caracterización geotécnica del mismo, los plazos, costes, etc., deben determinar su adecuación.
- Existen métodos basados en la aplicación de calor al terreno (refuerzo por "cocción" o en la electroósmosis (para la consolidación) que apenas se ha utilizado en España, pero que no hay que olvidar para el futuro.
- El campo de inyecciones y mezclas suelo-aglomerante todavía puede desarrollarse extraordinariamente.
- Lo que es muy importante es que todos estos métodos (aunque pueden diseñarse con algunas bases teóricas) tiene una gran componente práctica, por lo que suele ser conveniente el llevar a cabo pruebas de campo, al iniciar algunos de estos tratamientos.
- Además debe de llevarse a cabo un control de los mismos, no sólo instrumentando la maquinaria (ejemplo de la Fig. 31), sino siguiendo los resultados de las obras (admisiones de lechada, de grava, etc.), con planos en que se dibujen los parámetros a controlar, las fechas de ejecución, los movimientos que pueden originar... ♦

Referencias:

- (1) MINISTERIO DE FOMENTO (2002) "Guía de Cementaciones" Dir. Gen. Carreteras.
- (2) SAGASETA, C. (2006) "Avances en el diseño de las técnicas de mejora del terreno". 6ª Jornadas Técnicas SEMSIG-AETESS. Técnicas de mejora del terreno. Madrid, pp. 13-26.
- (3) OTEO, C. (2011) "Tratamientos de mejora del terreno" Capítulo del Manual de Túneles, dirigido por C. López Jimeno. Ed. Entorno Gráfico. Madrid.
- (4) DOMINGO, J. A.; OLIAS, I.; TORROJA, J.; CASTANEDO, J. y OTEO, C. (2000) "Metodología

- y estudio de la reutilización, con tratamiento de col. de materiales arcillosos clasificables como marginales o inadecuados en la M-45 de Madrid". Simposio sobre Geotecnia de las Infraestructuras del Transporte. SEMS. Barcelona, pp. 483-96.
- (5) ROSAS, J. I. (2006) "Columnas de mortero con desplazamiento" 6ª Jornada SEMSIG-AETESS "Técnicas de mejora del terreno". Madrid, pp. 111-121.
- (6) ZEIGLER, E. J. y WIRTH, J. L. (1982) "Soil stabilization by grouting on Baltimore Subway". Proc. of the Conference on grouting in Geotech. Eng. New Orleans, Louisiana, Feb.

- (7) HENRÍQUEZ, C. I.; OTEO, C. y ARMIJO, G. (2009) "Aplicación y verificación del método modificado de expansión de cavidades (MMEC) en el diseño de las inyecciones de compactación para la mitigación del potencial de licuación". Revista de Obras Públicas.
- (8) OTEO, C. (2001) "Reflexiones de un "arreglador" de taludes andaluces". V Simposio Nacional sobre taludes y laderas inestables. CEDEX - U.P.M. - U.P.C. Madrid, Vol. II, pp. 783-94.
- (9) BIELSA, A. (1999) "Manual de Técnicas de Mejora del Terreno". Ed. C. López Jimeno. Madrid.