

MODIFICACION DE SUELOS

ROBERTO MALDONADO G. Ingeniero Civil M.S.
Director Técnico MALDONADO INGENIERIA S.A., Santafé de Bogotá, Colombia

1. INTRODUCCION

Una modificación de suelos, vista desde el punto de vista geotécnico, consiste en cambiar las propiedades del mismo para hacer que la construcción de la cimentación de una estructura relacionada con estos suelos sea técnicamente factible y resulte económicamente ventajosa.

2. PRECARGA EN ARCILLAS COMPRESIBLES, UN SISTEMA USADO PARA MODIFICAR SUELOS

Este es uno de los sistemas más antiguos y conocidos. Tiene reglas establecidas como la de usar precargas que excedan en 30% la carga futura para que los asentamientos que se sucedan con la fatiga de cimentación sean admisibles.

Para que efectivamente se produzca una consolidación, se requiere que haya una pérdida del agua intersticial, lo mismo que una pérdida de volumen. Por esta razón hay ne-

cesidad de suministrar sistemas de drenaje que permitan la salida del agua y el acercamiento entre las partículas que conforman la arcilla.

La separación entre los drenes que se proyecten debe ser tal que la consolidación se produzca en el tiempo disponible y con la intensidad necesaria para alcanzar los objetivos de la precarga, los cuales se podrían resumir para la mayoría de los casos en aumentar la cohesión y disminuir la compresibilidad.

En nuestro medio estos métodos son lentos y requieren una inversión considerable representada en las herramientas para la construcción de drenes, el valor de transportar, colocar y luego remover los suelos de sobrecarga, el monitoreo e instrumentación necesarios para colocar la sobrecarga lo más eficientemente posible y finalmente el tiempo de precarga, que puede ser bastante largo cuando la arcilla tiene espesores considerables y cohesiones bajas.

3. METODOS ALTERNATIVOS DE MEJORAMIENTO DEL SUELO

Como alternativa a la precarga han surgido métodos que pueden lograr efectos similares en cuanto al aumento de cohesión y a reducciones proporcionalmente mayores de la compresibilidad en tiempos cortos. Algunos de estos métodos se describen a continuación.

3.1.1 COMPENSACION DE EFECTOS CAUSADOS POR LA DEPRESION DEL NIVEL FREATICO

La construcción de un edificio con varios sótanos deprimió el nivel freático bajo las edificaciones vecinas.

En esta zona aparece un perfil estratigráfico compuesto superficialmente por arcillas, seguidas de arcillas limosas con lentes de turba, un estrato de arena de densidad media, unas arcillas limosas con lentes de turba y finalmente la formación Bogotá de arcillas preconsolidadas.

El nivel freático original se encontraba a profundidades del orden de 3.0 m y al construir los sótanos vecinos se deprimió a 11.0 m de profundidad. La parábola de depresión correspondiente se extendió a un radio del orden de 100 m y produjo asentamientos proporcionales a la depresión neta en cada sitio. Por esta razón los edificios vecinos se asentaron y se inclinaron hacia la excavación.

Para contrarrestar principalmente los efectos de inclinación, se programaron inyecciones de mortero duro debajo de las losas de cimentación de dos de los edificios cercanos, tal como se muestra en la figura No.1.

Con estas inyecciones se lograron las siguientes modificaciones de los suelos del perfil:

- Aumento de la resistencia inconfiada de un 100 %, hasta profundidades de 26 metros

3.1 INYECCIONES DE MORTERO DURO

Este sistema consiste en bajar una tubería de revestimiento de 2" de diámetro hasta la profundidad deseada y bombear luego mortero de bajo "slump", al mismo tiempo que se va extrayendo la tubería de revestimiento por medio de gatos.

En el caso de suelos granulares de baja densidad o cohesivos blandos, el módulo de deformación y la rigidez de un mortero de 1.5 pulgadas de slump es mucho mayor que el módulo y rigidez del suelo circundante. Consecuentemente, a medida que se extrae el revestimiento, el mortero no penetra, como en el caso de inyección de lechada, sino que aparta el suelo blando formando una columna de mortero duro.

El suelo que rodea la columna formada por el mortero duro sufre inicialmente precarga lateral por el desplazamiento causado, y luego consolidación, siempre y cuando haya posibilidad de drenaje. Para garantizar dicho drenaje hay que construir drenes que disipen la presión de poros en los casos de baja permeabilidad.

Las inyecciones de mortero duro permiten utilizar diámetros variables de columnas de inyección con profundidad, de acuerdo con las características de cada uno de los estratos a modificar. De esta manera se pueden lograr las resistencias y compresibilidades que se deseen, dentro de los rangos en que los suelos son modificables.

A continuación se presentan dos casos de utilización de inyecciones de mortero duro.

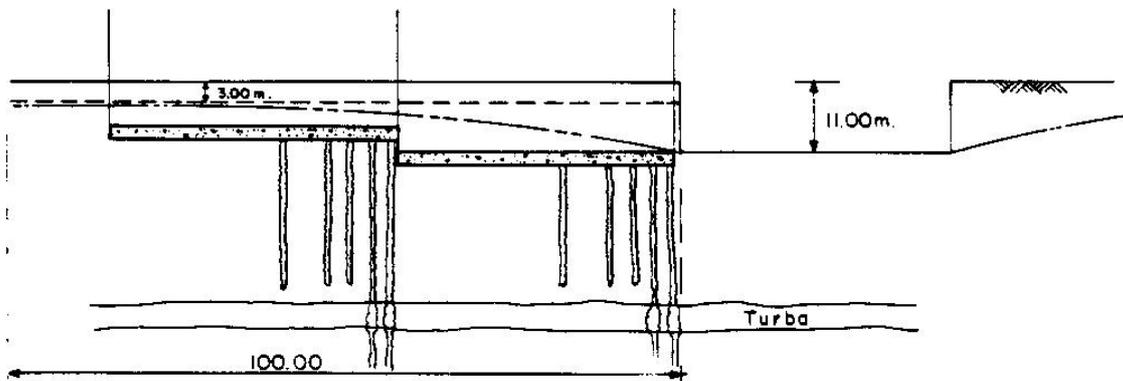
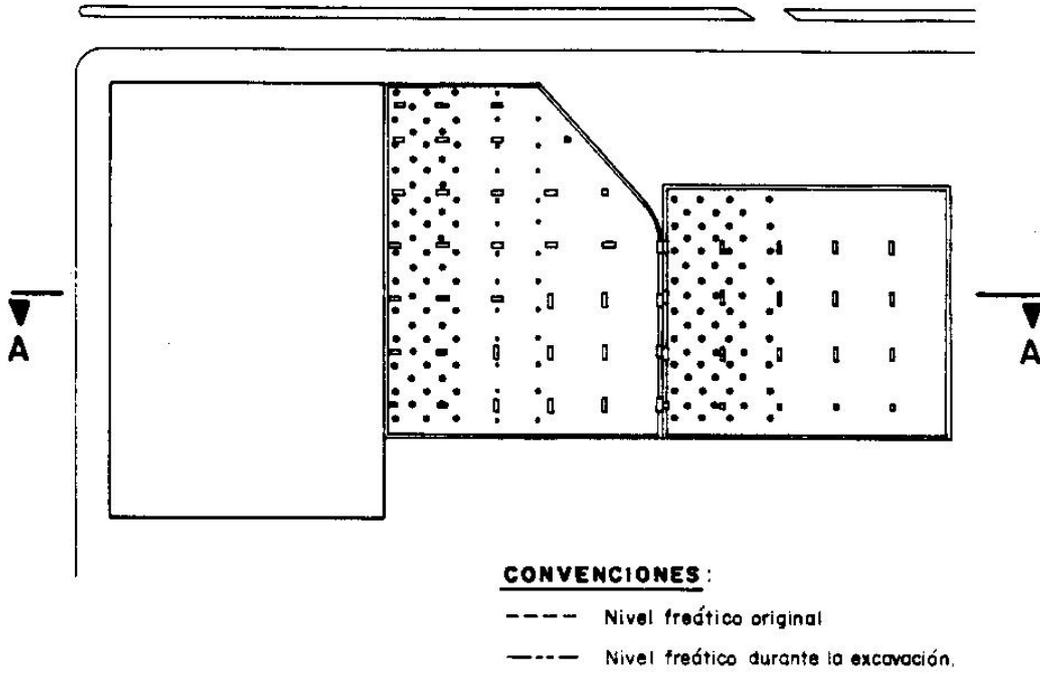


Fig. 1 COMPARACION DE EFECTOS CAUSADOS POR LA DEPRESION DEL NIVEL FREATICO

- Disminución del índice de recompresión en valores del orden de 150%.
- Transmisión de los esfuerzos de contacto de las losas de cimentación a profundidades mayores, a fin de producir asentamientos menores contra el edificio vecino, compensando así los efectos de la depresión del nivel freático.
- Introducción de un momento en la cimentación que compesara los efectos de la depresión del nivel freático, lo cual se consiguió con inyecciones de intensidad variable en el costado de los edificios contiguo a la excavación en cuestión, y de intensidad nula en el costado opuesto.

En la figura No.1 se observa que solo unas pocas inyecciones se llevaron hasta profundidades donde hay estratos muy competentes, ésto con el fin de obtener control inmediato de nivelación. Esto se debió a que la subsidencia de la Sabana de Bogotá continuará causando asentamientos generales en la zona y dado que las inyecciones también actúan como pilotes sobre los estratos de gran capacidad del perfil, se consideró necesario evitar que los edificios bajo los cuales se modificó el suelo sufrieran asentamientos mucho menores que los ocurridos por subsidencia, lo cual generaría desnivelaciones perimetrales no previstas en el diseño arquitectónico.

Después de varios años los asentamientos diferenciales causados por la depresión del nivel freático no han aumentado y en algunos casos han disminuído. Sinembargo, los asentamientos totales sí han aumentado debido a factores externos, tales como la subsidencia de la Sabana de Bogotá antes mencionada.

3.1.2 MEJORAMIENTO DE SUELOS GRANULARES Y GRANULARES COHESIVOS

En este caso se trataba de cimentar un edificio de 11 pisos en un perfil de suelos que consta de arenas limosas de densidad baja a media hasta profundidades del orden de 20.0 m y arcillas arenosas medias que descienden hasta un estrato de arcilla dura a una profundidad del orden de 30.0 m.

La solución inicial planteaba la utilización de pilotes a profundidades del orden de 35 m. No se consideraba factible una cimentación superficial, debido a la existencia de niveles freáticos elevados y a la baja densidad de algunas de las arenas que aparecen por debajo del mismo.

Resultaba muy conveniente aumentar la densidad de las arenas superficiales para que fuera factible una cimentación por medio de zapatas, siempre que el tiempo y los costos de hacer esta densificación fueran menores que los de una solución convencional de pilotes con puntas a 35 m.

Después de un análisis de las posibilidades se optó por hacer inyecciones de mortero duro con diámetros de 0.60 m y a profundidades de 12.0 m. En la figura No.2 se aprecia un corte con las diferencias entre las dos alternativas.

Los valores de penetración estándar tomados como criterio para evaluar el mejoramiento, aumentaron de 7 golpes por pie a 25 y más golpes por pie. Adicionalmente se han registrado asentamientos totales máximos del orden de 3.0 cm y asentamientos

3. Soportan parte de la carga durante sismo.
4. Permiten el escape del agua que produciría licuefacción.

A continuación se presentan dos situaciones en las cuales se ha utilizado este tipo de mejoramiento del suelo.

3.2.1 CONSTRUCCION DE TANQUES METALICOS SOBRE SUELOS SUSCEPTIBLES DE LICUEFACCION

Se planeaba construir dos tanques metálicos grandes para el almacenamiento de combustibles dentro de un complejo petrolero ya construido.

Los suelos encontrados eran susceptibles a licuefacción hasta profundidades de 10 m y en su mayoría estaban por debajo del nivel freático.

En este caso se construyeron columnas de piedra usando como elementos un tubo metálico, un tapón de concreto que se quedaba en el fondo, un martillo Delmag 12 y geotextil para establecer un sistema de libre acceso del agua a la columna, tal como se aprecia en la figura No.3.

diferenciales admisibles.

En esta oportunidad el costo del sistema construido fue del orden de 50% del costo de la alternativa de pilotes.

3.2 DENSIFICACION DE SUELOS POR MEDIO DE COLUMNAS DE PIEDRA

Ultimamente se ha despertado la conciencia sobre la licuefacción de suelos y sus consecuencias sobre obras civiles. Se ha observado lo que sucedió en Niagata, y lo que ha sucedido recientemente en Arauca y en el Chocó durante y después de los respectivos sismos.

Una de las posibilidades de disminuir las deformaciones y los daños sobre obras civiles construidas en suelos susceptibles a licuefacción es la construcción de columnas de piedra.

Estas columnas de piedra tienen los siguientes efectos sobre suelos de comportamiento granular y granular - cohesivo:

1. Densifican el suelo por el volumen de piedras que se introduce dentro de la masa original.
2. Densifican por vibración.

Durante el sismo se observó la salida de agua por la base del relleno de los tanques, la cual corrió a un sistema de drenaje construido previamente para el efecto. Una nivelación de los tanques después del sismo mostró que sucedieron asentamientos de varios centímetros sin que se excedieran los diferenciales permisibles.

3.2.2 CIMENTACION DE UNA PLANTA SOBRE RELLENOS EFECTUADOS POR MEDIO DE DRAGADOS

Para formar áreas útiles se había hecho un relleno de arena por medio de dragado y, como es de esperarse, la densidad resultante fue baja y la granulometría uniforme.

Tomando en cuenta ésto, se diseñó la cimentación de la planta utilizando pilotes con puntas sobre arena densa en algunos casos y pilotes flotantes dentro de una arcilla blanda en otros.

Estos pilotes densificaron en cierta medida el relleno. Sin embargo en los perímetros de los grupos de pilotes quedaron zonas que requerían densificación para garantizar la estabilidad del conjunto, pues los efectos de licuefacción producen movimientos laterales y verticales que pueden hacer fallar una cimentación sobre pilotes. En la figura No.4 se muestran los pilotes estructurales y las columnas de grava que se emplearon para hacer una masa estable dentro de las dimensiones del conjunto.

Al caer una pesa produce una densificación inmediata reduciendo en algo la humedad natural, pero principalmente comprimiendo la parte gaseosa del suelo. Al hacer migrar el agua se produce presión de poros que en el caso de suelos granulares se disipa rápidamente y en el de suelos arcillosos toma un tiempo mayor.

En el caso de suelos arcillosos, si la energía es suficiente, se producen salidas instantáneas de agua y aire por microfisuras, causando un grado de consolidación permanente e instantáneo.

En estas condiciones se pueden densificar o consolidar suelos de cualquier composición granulométrica. Lo importante es determinar si tal consolidación modifica los suelos en un grado suficiente para los fines propuestos y si esa modificación tiene un costo adecuado frente a otras alternativas.

Enseguida se presentan dos casos de consolidación y densificación por medio de "tamping".

3.3.1 RELLENO PARA MUELLES Y BODEGAS EN UN AREA DENTRO DEL MAR

La alternativa para construir muelles y bodegas que podría ser más económica en este proyecto implicaba recuperar una zona al mar, rellenando una bahía existente y utilizando para ésto lodolita, el único material existente en la zona. Ver figura No.5.

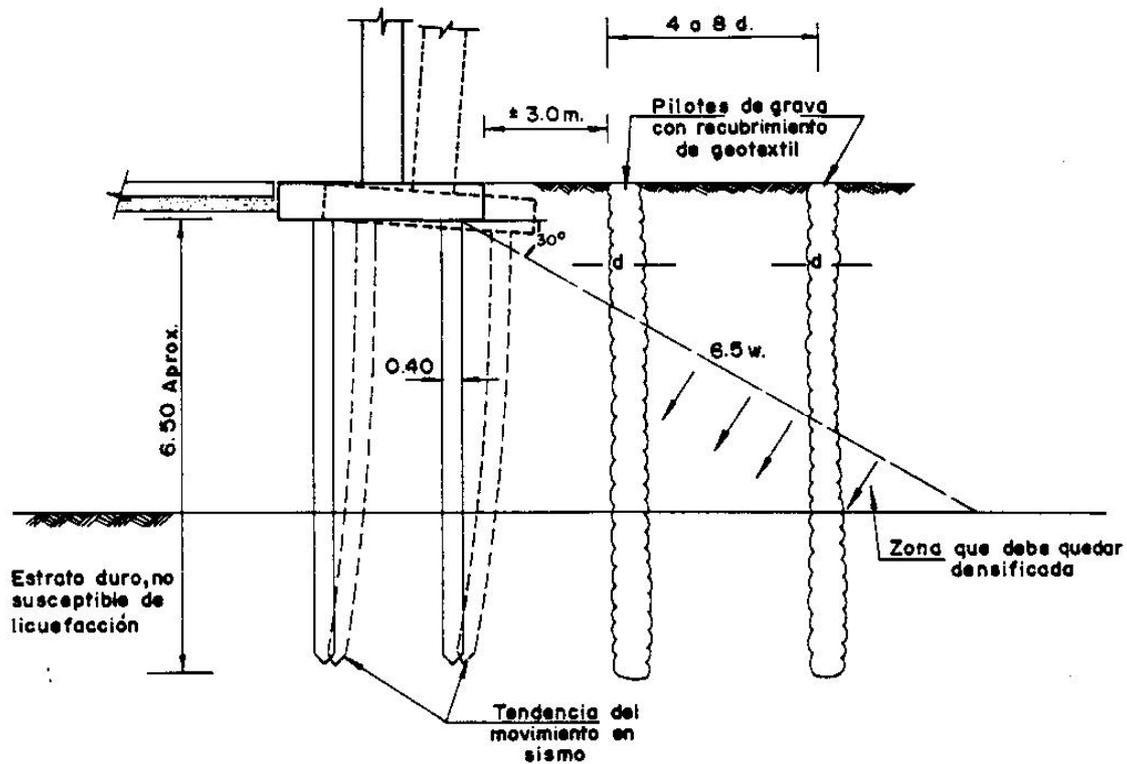


Fig. 4 ESQUEMA DE COLUMNAS DE PIEDRA

3.3 DENSIFICACION DE SUELOS POR COMPACTACION DINAMICA UTILIZANDO CAIDA DE GRANDES PESOS.

Cuando las dimensiones de las áreas que requieren densificación o consolidación son considerables, una de las alternativas que pudiera ser más económica en nuestro medio es dejar caer pesos de alturas que permitan las grúas disponibles.

Aunque parezca imposible, la densificación puede hacerse en todo tipo de suelos incluyendo arcillas de alta plasticidad. La eficiencia naturalmente varía según las profundidades de densificación, los suelos existentes y la energía disponible.

El control de la compactación se efectuó por medio de un presiómetro que se correlacionó posteriormente con la velocidad de ondas Raleigh. Luego de la compactación se obtuvieron Módulos de Presiómetro (Ep) superiores a 10 MPa, Presiones Límites (P1) de 1.0 MPa y más, y velocidades de ondas Rayleigh de mínimo 300 m/s.

Usando estos procedimientos se hicieron rellenos sin tablestacados, dejando taludes estables que fueron protegidos luego por medio de geotextiles, todo esto a unos costos mucho menores a los de los puertos convencionales.

3.3.2 CIMENTACION DE UNA PLANTA INDUSTRIAL

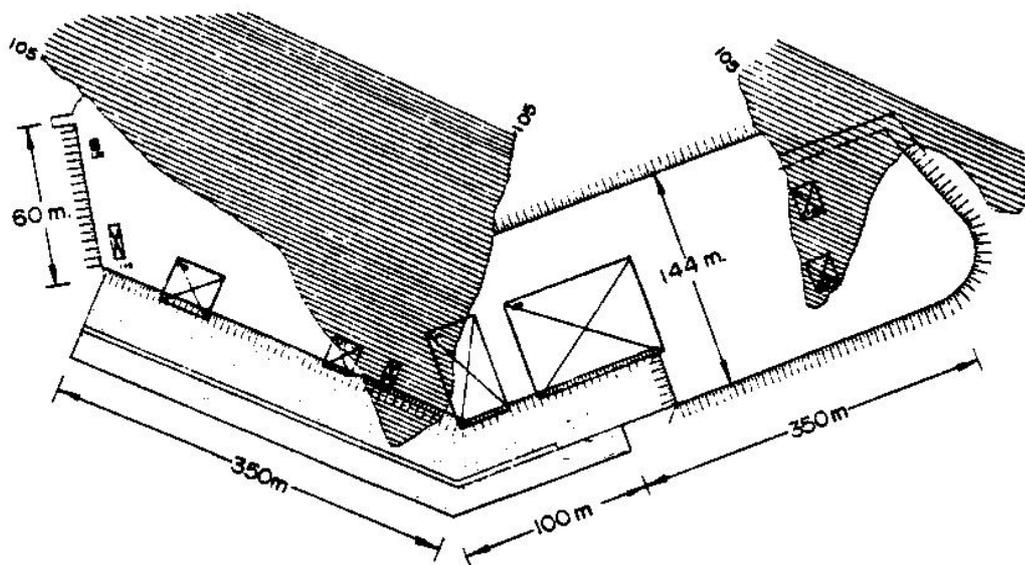
En una planta que cubre una extensión considerable hay zonas de suelos saturados blandos y sujetos a licuefacción. Las alternativas de soluciones de cimentación consistían en excavar los suelos blandos, en muchos casos bajo el nivel freático, y reemplazarlos por rellenos granulares compactados. También se proponía densificar y compactar los suelos existentes para que se llegara a las capacidades portantes y esfuerzos cortantes necesarios para cumplir con todos los requerimientos de cimentación estáticos y dinámicos del proyecto.

Se optó por la densificación usando caída de pesas, o "tamping", como se denomina esta modalidad de densificación dinámica en la literatura técnica.

Los resultados de dos ciclos de densificación se pueden resumir así:

Al comparar varios sistemas se optó por hacer los rellenos de arcilla compactando por medio de caída de pesas dentro y fuera del agua. El proyecto incluyó rellenos con espesores entre 7.0 y 13.0 m. dentro de un área del orden de 30.000 m².

La forma de la pesa y su peso fueron calculados para penetrar eficientemente dentro del agua, con suficiente energía remanente para producir los efectos deseados.



CONVENCIONES

-  ZONA DE CORTE
-  RELLENO CON GRAVA TRANSPORTADA, 70 Km por mar y 25 Km por tierra.
-  ZONA DE COMPACTACION DINAMICA
-  MUELLE
-  EDIFICIOS

Fig. 5 LOCALIZACION GENERAL DE LA ZONA DE COMPACTACION DINAMICA

PARAMETROS DEL SUELO	CONDICION		
	ORIGINAL	1° CICLO	2° CICLO
Resistencia a la penetración estándar (golpes/pie)	2-4	4-10	***
Resistencia a la compresión inconfiada (kg/cm ²)	0.17-0.70	1.0-1.50	2 su = 3.4
Vel. de ondas Raleigh (m/s)	158-231	228-274	317

En algunos casos dentro de este proyecto se construirán columnas de piedra adicionales a la compactación por "tamping", con el objeto de mejorar la densidad, proveer drenaje y usar la capacidad estructural de las mismas durante sismo. Estas columnas también permitirán el drenaje de las aguas que se producirían durante sismo en los estratos que no hayan llegado a las densidades necesarias para que no se produzca la licuefacción. De esta manera las posibilidades de daño por licuefacción durante sismo se reducen efectivamente combinando los dos sistemas de modificación del suelo.

4. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

En otros países se están usando sistemas de vibroflotación, electro-ósmosis, precargas con "mechas" colocadas con maquinas especiales, aceites sulfonados, maquinas con pesas de 120 toneladas y caídas de 30 m, etc. para realizar mejoramientos de suelos. En

Colombia no sucede así; pues los bienes de capital tienen un costo elevado que hace que en muchos casos no resulten rentables las maquinarias de última tecnología.

De ahí el interés de los casos mencionados, pues en la mayoría de ellos se usaran palas y piloteadoras existentes en el país, junto con elementos construibles localmente.

El uso de dos sistemas de modificación de suelos en el mismo sitio hace posible obtener parámetros modificados en mayor proporción, que si se usa uno solo.