1ª JORNADA SOBRE INGENIERÍA DEL TERRENO

PROBLEMAS GEOTÉCNICOS EN SUELOS METAESTABLES

JAÉN, MARZO 2010

OBRAS REALES Y RECALCES EN ARCILLAS EXPANSIVAS Y SUELOS COLAPSABLES

José Santos Sánchez
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

OBRAS REALES Y RECALCES EN ARCILLAS EXPANSIVAS Y SUELOS COLAPSABLES

El título de la charla es "Obras reales y recalces en arcillas expansivas y suelos colapsables", no obstante el recalce de obras de fábrica se diferencia poco según el tipo de terreno que se encuentre bajo la cimentación.

Como sabemos, las arcillas expansivas son aquellas que presentan cambios de volumen asociados con los cambios de humedad. Cuando la arcilla se humedece sufre una fuerte expansión que produce daños considerables en estructuras, sobre todo en climas de intermitentes periodos de humedad.

Las cimentaciones que soportan cargas livianas y las vigas de cimentación suelen ser las más afectadas por estos movimientos, mientras que para grandes cargas prácticamente los efectos de la expansividad quedan anulados.

Cuando la arcilla se encuentra a cierta distancia bajo la superficie no se expande y contrae tanto debido a la carga que soporta por el propio peso del terreno sobre la capa expansiva, no originando daños por levantamiento o asiento en la estructura.

Salvo algunas pequeñas diferencias, vamos a tratar recalces con carácter general.

Igualmente, vamos a distinguir dos tipos de estabilización:

-ESTABILIZACIÓN DE OBRAS DE FÁBRICA

-ESTABILIZACIÓN DE OBRAS DE TIERRA

1. ESTABILIZACIÓN DE CIMENTACIONES DE OBRAS DE FÁBRICA

La existencia de patologías en una obra de fábrica puede obedecer tanto a causas estructurales como a fallos de cimentación de la misma.

Nos ocuparemos exclusivamente de las debidas a la cimentación dado que las causas estructurales no forman parte de la ingeniería del terreno.

El fallo de la cimentación de una obra de fábrica puede obedecer a distintas causas:

- Tipo de cimentación inadecuado
- Cambios de humedad bajo la cimentación
- Variación de las cargas a lo largo de la vida de la obra
- Intervenciones en su proximidad que alteren el estado tensional del suelo (principalmente excavaciones)
- Deslizamientos de ladera
- Inundaciones y socavaciones

Fisuras típicas de daños en viviendas

Socavación

Estas causas pueden originar distintos tipos de daños sobre las obras de fábricas, que van desde la aparición de pequeñas fisuras que con el tiempo se estabilicen o bien puedan seguir progresando hasta llegar a provocar la ruina total de la estructura.

Para estabilizar una cimentación cuando ha sufrido una patología es necesario proceder al recalce de la misma. Para ello es necesaria la redacción de un proyecto de reparación y recalce que permita que la obra vuelva a cumplir con coeficiente de seguridad el fin para el que fue diseñada.

Previamente a la redacción de un proyecto de recalce se requiere una serie de conocimientos

- Conocimiento de la estructura aérea y cargas que transmite a la cimentación
- Conocimiento de la cimentación de la obra

- Estratigrafía del terreno, parámetros geotécnicos del mismo, variaciones del nivel freático y humedad a lo largo del tiempo, etc

El conocimiento de la estructura y de la cimentación de la obra de fábrica nos permitirá poder interpretar las causas por las cuales se produce el fallo de la misma. Es conveniente realizar un estudio de grietas y movimientos para poder determinar dichas causas, y si es posible instrumentar la obra (colocación de testigos, seguimiento topográfico, extensómetros, etc) para observar la evolución de la misma.

Respecto a la cimentación, independientemente de que puedan existir planos de construcción, conviene la realización de catas en el terreno para confirmar la misma y observar el estado en que se encuentra, así como el terreno sobre el que se apoya. La realización de catas es imprescindible sobre todo en obras histórica, donde no existen datos de la cimentación.

Para el conocimiento del terreno, será necesaria la realización de estudios geotécnicos, normalmente mediante la ejecución de sondeos y ensayos del terreno en laboratorio, así como la instrumentación de dichos sondeos con piezómetros, inclinómetros, etc, que nos permitan conocer tanto el perfil estratigráfico del terreno, sus parámetros geotécnicos, la existencia de movimientos, y los cambios en el nivel freático.

Una vez obtenidos todos los datos, hay que decidir la necesidad o no de proceder al recalce de la cimentación y en caso afirmativo, elegir en cada caso la solución más adecuada para cada obra.

2. ACTUACIONES EN LA CIMENTACIÓN

Las soluciones para el recalce de la cimentación y que ésta vuelva a cumplir la función para la que fue construida, se basan en dos tipologías básicamente:

- Actuaciones directas sobre la cimentación de la obra
- Actuaciones de mejora del terreno sobre el cual se apoya la cimentación, o actuaciones en el entorno de la obra que eviten el cambio de las condiciones de humedad del terreno, o modifiquen la forma de trabajar de la cimentación.

2.1. ACTUACIONES DIRECTAS SOBRE LA CIMENTACIÓN DE LA OBRA

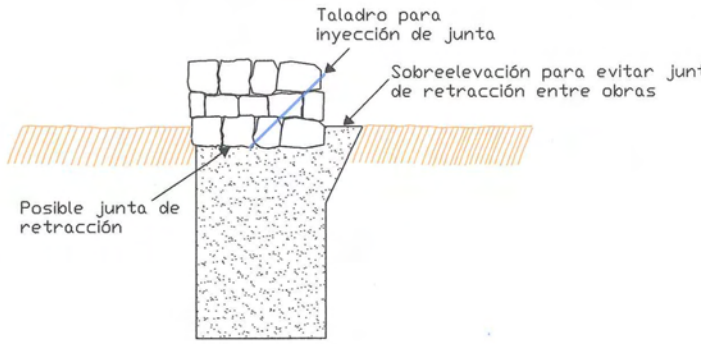
Aunque las técnicas pueden ser variadas, básicamente se reducen a:

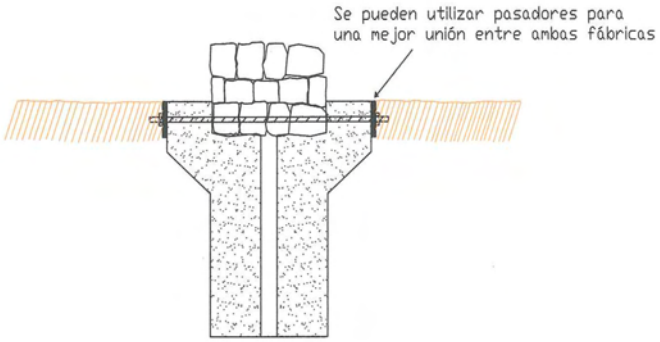
- Recalces por métodos tradicionales (vigas corridas, pozo bajo cimientos, etc)
- Recalce con micropilotes.
- Jet grouting

2.1.1 Recalces por métodos tradicionales

Es una técnica que básicamente consiste en ampliar la superficie de la cimentación, y transmitir dichas cargas a algo más de profundidad (logrando disminuir las cargas unitarias transmitidas al terreno) a un terreno más competente.

Se realiza mediante la ejecución de bataches bajo la cimentación existente y el posterior hormigonado de los mismos procurando que el hormigón quede por encima de la unión entre la fábrica a recalzar y la nueva al objeto de evitar que se produzcan entre ambas juntas de retracción





Ejecución por bataches

Este método puede presentar problemas de seguridad para el personal y para la obra a recalzar por hundimientos del terreno o de la fábrica antigua, y pueden ser muy difíciles de realizar en presencia de nivel freático.

Este método no es adecuado para terrenos expansivos dado que con él se alcanzan profundidades pequeñas y no se supera la capa activa expansiva con lo cual el recalce no es efectivo.

2.1.2 MICROPILOTES

Un micropilote es un elemento resistente de cimentación profunda de diámetro inferior a 300 mm, perforados en el terreno y armados con tubería de acero inyectado con lechada o mortero de cemento en una o varias fases.

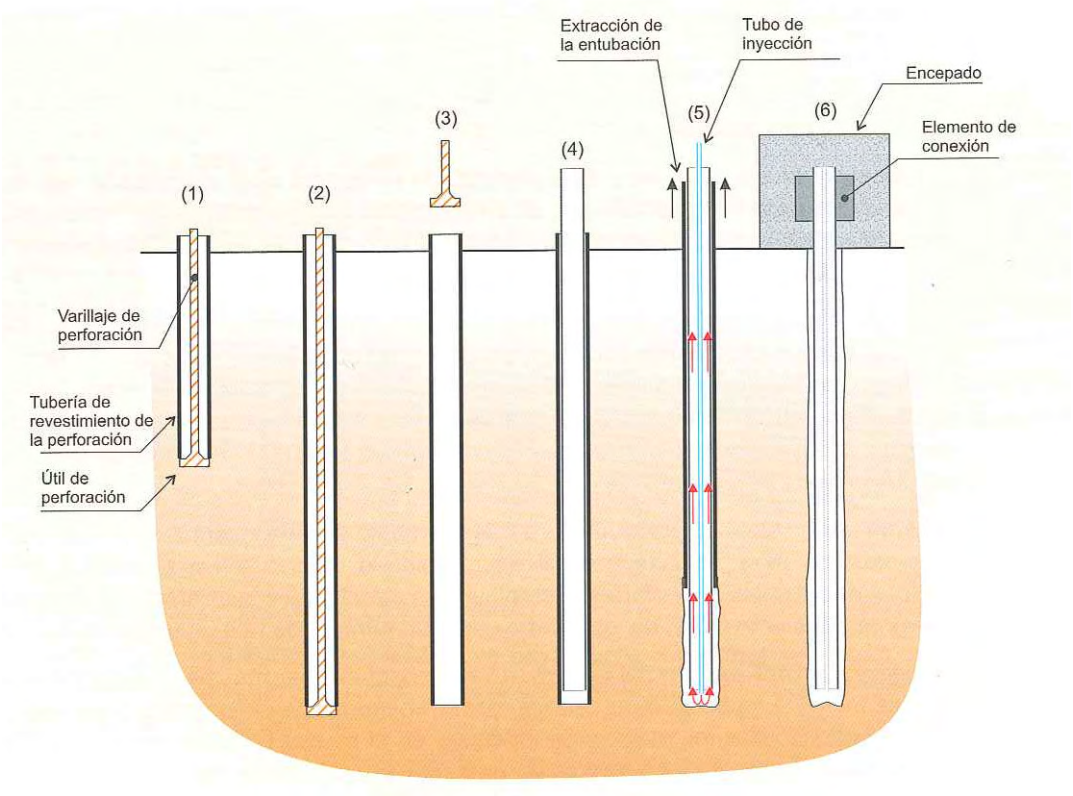
Existe una Guía editada por el Ministerio de Fomento, "Guía para el proyecto y ejecución de micropilotes en obras de carretera", que recoge todos los aspectos de los mismos.

No obstante, haremos sucintamente un breve recorrido sobre ejecución y cálculo

EJECUCIÓN DE LOS MICROPILOTES:

La ejecución de un micropilote comprende normalmente las siguientes operaciones:

- Perforación del taladro
- Colocación de la armadura
- Inyección del micropilote
- Conexión con la estructura



- **Perforación**

-A rotación:

Consiste en provocar la rotura del terreno por la fricción generada en la rotación del útil de perforación.

Se utiliza en terrenos blandos, mediante el uso de barrenas helicoidales, trialetas o triconos

-A rotopercusión

Consiste en la trituración de los materiales por fricción y percusión conjunta.

Se pueden utilizar martillo en cabeza (el golpe se realiza desde el exterior mediante martillos percutores) o martillo de fondo (el golpe lo realiza el martillo puesto en la punta del varillaje de perforación accionado por aire comprimido).

Se utiliza para terrenos de consistencia media y dura.

Boca de perforación

Martillo de fondo y tallantes

-Sistemas autoperforantes

Existe otro método de perforación que es utilizar la propia armadura del micropilote como varillaje de perforación, e inyectando posteriormente a través de los agujeros de barrido.

Este método no es muy recomendable puesto que no garantiza el recubrimiento de la armadura

- **Introducción de la armadura:**

  Materiales

- Armadura de acero tubular: Consiste en un tubo de acero cuyo límite elástico oscila entre 235 Mpa y 550 Mpa, y las medidas más usuales son las indicadas en la siguiente tabla

Diámetro mm	Espesor mm	Seccción mm2
60,30	3,50	624,00
73,00	5,50	1160,00
88,90	6,30	1630,00
88,90	7,00	1800,00
88,90	9,00	2250,00
101,60	9,00	2610,00
114,30	7,00	2350,00
114,30	9,00	2970,00
127,00	9,00	3330,00
127,00	13,50	4810,00
139,70	9,50	3880,00
139,70	12,50	4990,00
177,80	10,00	5270,00

Es muy importante cuidar la conexión entre armaduras dado que existen uniones que no garantizan la transmisión d ela carga (unión macho-hembra), siendo la más recomendable la unión macho-macho con manguito exterior.

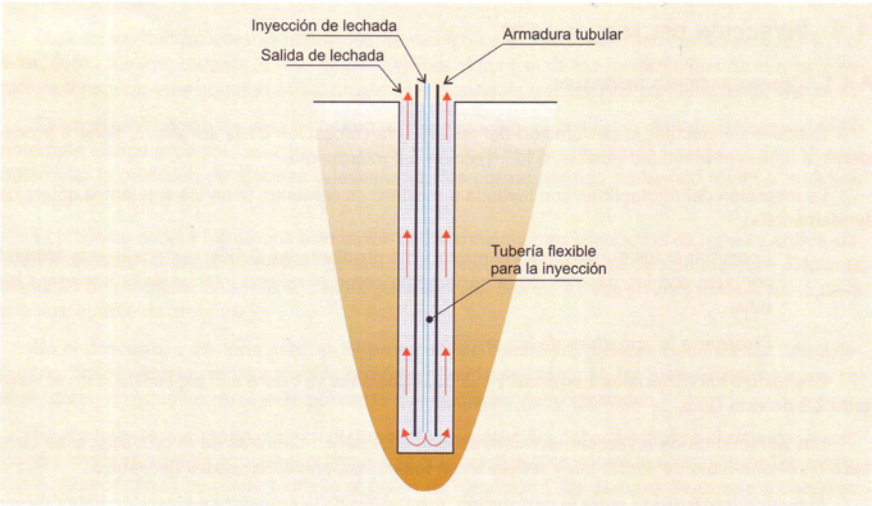
Unión macho –hembra
(reducción 50% tope estructural)

Unión macho -macho
(no hay reducción del tope estructural)

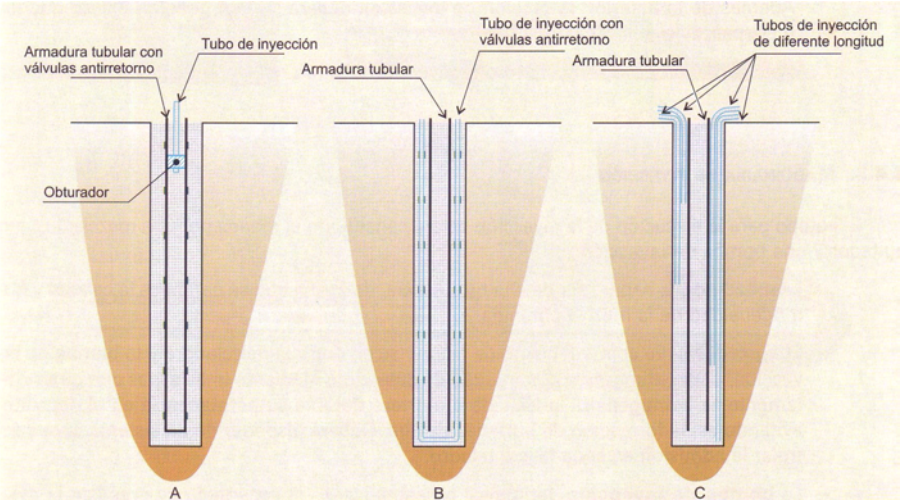
- **Inyección del micropilote**

Existen distintos tipos de inyección:

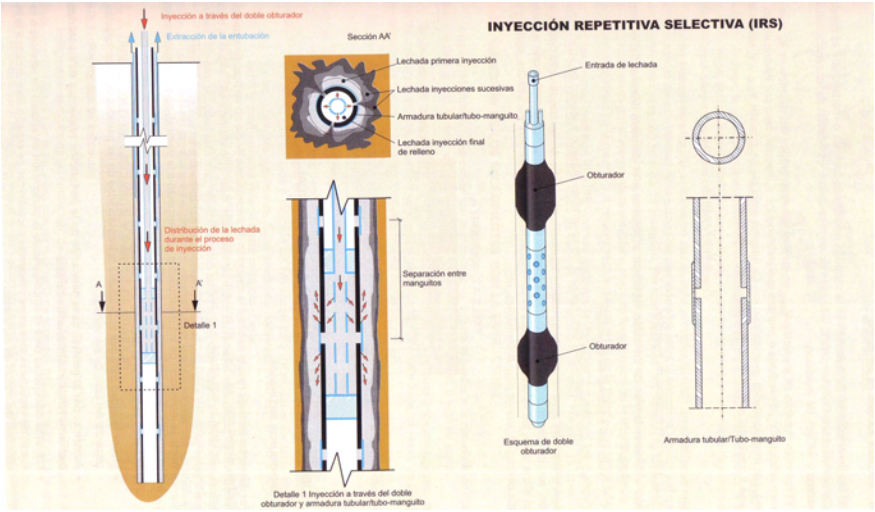
- IU: Son los ejecutados mediante una Inyección Global Unificada del taladro de la perforación, de una lechada o un mortero de cemento.

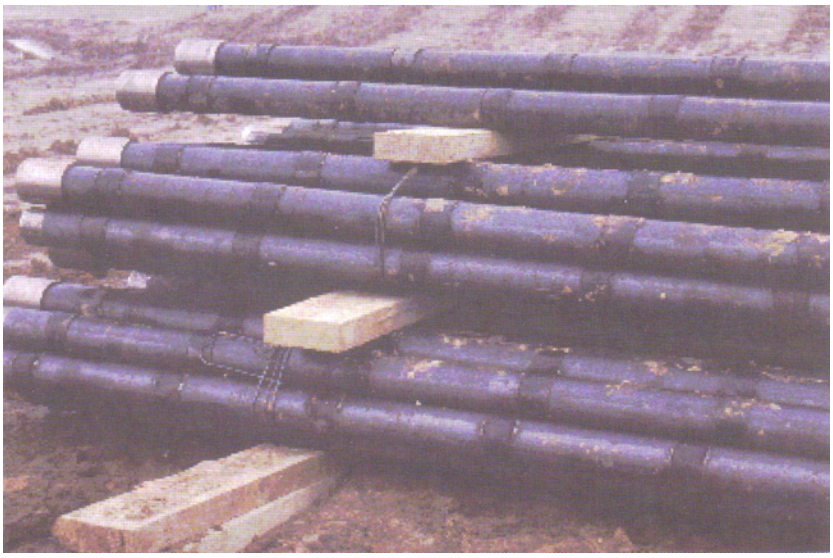


- IR: Son los ejecutados mediante una Inyección Repetitiva de las válvulas antirretorno existentes en la armadura, inyectadas de forma global mediante obturador en boca.



- IRS: Son los realizados mediante una Inyección Repetitiva y Selectiva (IRS), del taladro de la perforación





Armaduras de micropilote con manguitos para inyección por fases

CÁLCULO DE LOS MICROPILOTES

Un micropilote hay que calcularlo tanto des el punto de vista estructural como desde el punto de vista geotécnico

- Cálculo de la resistencia estructural del micropilote

Para un correcto diseño desde el punto de vista estructural del micropilote, se debe comprobar que:

$$N_{C,Rd} \geq N_{C,Ed}$$

Con:

$$N_{C,Rd} = (0{,}85 \cdot A_c \cdot f_{cd} + A_S \cdot f_{sd} + A_a \cdot f_{yd}) \cdot \frac{R}{1{,}20 \cdot F_e}$$

Donde la sección reducida del micropilote es:

$$A_a = \frac{\pi}{4} \cdot \left[(d_e - 2 \cdot r_e)^2 - d_i^2 \right] \cdot F_{u,c}$$

R Factor empírico de pandeo

$$R = 1{,}07 - 0{,}027 \cdot C_R \leq 1$$

- Cálculo geotécnico del micropilote

Para asegurar la correcta transmisión de las cargas del micropilote al terreno, se emplea la conocida fórmula del método de Bustamente

$$T_L = Af \cdot q_S = \pi \cdot D \cdot L \cdot q_S$$

Donde q_S representa la adherencia unitaria del fuste (normalmente se desprecia la punta)

Este dato q_S se toma normalmente de tablas empíricas para distintos tipos de terreno.

CONEXIÓN DEL MICROPILOTE A UNA CIMENTACIÓN PREEXISTENTE

La unión entre el micropilote y la cimentación que se quiere recalzar se puede básicamente realizar mediante dos sistemas

- Conexión directa a la cimentación preexistente
- Conexión a un nuevo encepado que se conecta a su vez a la cimentación preexistente

Conexión directa

Este caso se refiere cuando la cimentación existente es atravesada por una perforación que es prolongación del micropilote, con lo cual la propia cimentación existente hace las veces de encepado. Conviene observar las siguientes fases:

-Ejecutar un taladro pasante en le cimiento
-Ejecutar el micropilote
-Eliminar la lechada en la zona del cimiento y rellenar el espacio entre las dos superficies para garantizar el contacto.

Habrá que garantizar la transmisión de cargas entre las siguientes superficies

-Contacto entre mortero y cimiento preexistente
-Contacto entre armadura del micropilote y posibles conectores dispuestos y mortero que las rodea.

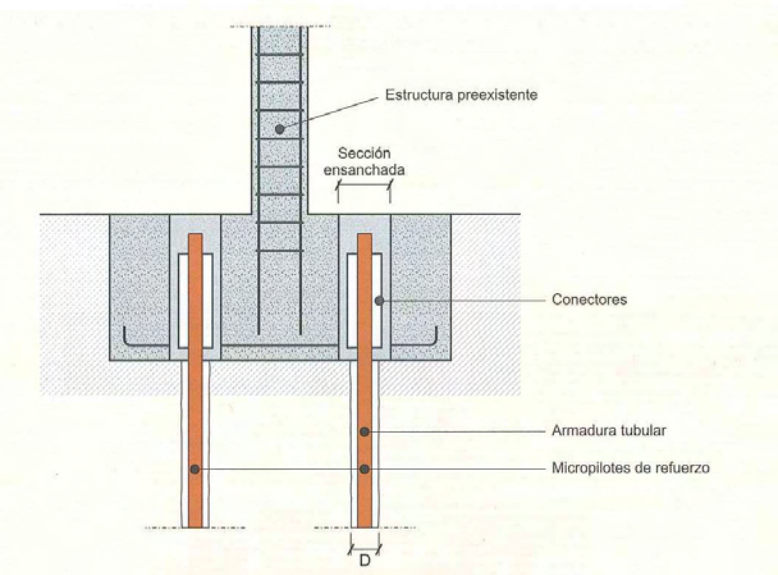
La unión entre la lechada o mortero que rodea al micropilote y la cimentación preexistente, debe garantizar la transmisión de los esfuerzos de dicha cimentación al micropilote, para ello dependiendo del tipo de material que constituye la cimentación, se pueden adoptar los siguientes valores para la tensión rasante última de cálculo:

TABLA A-5 2. **TENSIÓN RASANTE ÚLTIMA DE CÁLCULO ENTRE LECHADA O MORTERO DEL MICROPILOTE Y CIMIENTO PREEXISTENTE, $\tau_{Rc,d}$**

TIPO DE CIMIENTO	$\tau_{Rc,d}$ (MPa)
Mampostería de piedra de resistencia media a baja ($q_u \leq 50$ MPa) con mortero pobre	0,01-0,20
Mampostería de piedra de alta resistencia ($q_u \geq 50$ MPa) con mortero de buena calidad	0,20-0,30
Fábrica de ladrillo de baja calidad, con mortero pobre	0,02-0,25
Fábrica de ladrillo de alta calidad, con mortero de buena calidad	0,25-0,40
Hormigón	$0{,}6\sqrt{f_{cd}} \longrightarrow Para - HA25 \longrightarrow 7{,}7 kg/m^2$

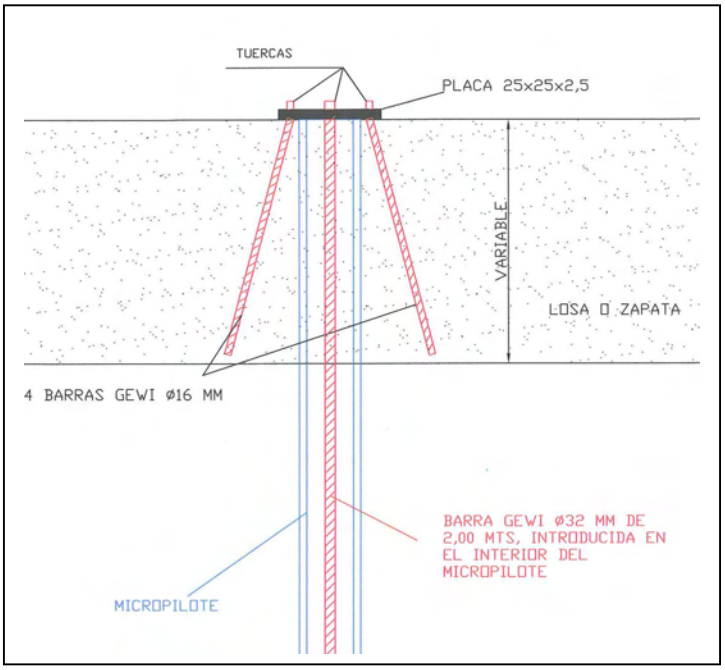
En el contacto entre armadura del micropilote y el mortero que las rodea, se puede adoptar un valor para la tensión rasante de cálculo de 0,3 Mpa para armadura lisa, y como este valor es muy bajo, se suele dotar a la armadura del micropilote de conectores (pletinas o barras corrugadas soldadas) al objeto de aumentar dicha adherencia.

No obstante se pueden considerar valores superiores cuando se utilicen morteros especiales (normalmente se utiliza mortero sin retracción de alta resistencia).



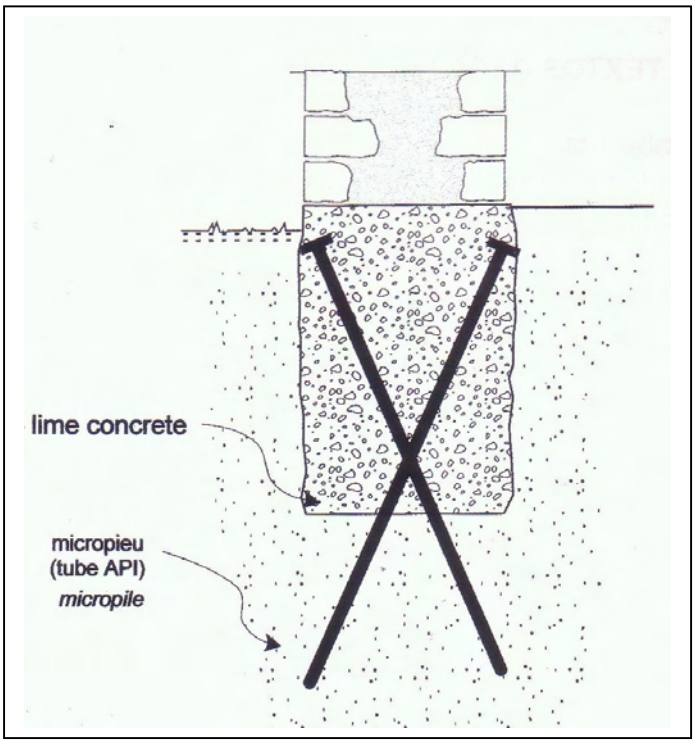
Conexión directa a cimentación preexistente de hormigón

Si el canto de la zapata es pequeño y no se puede lograr la transmisión de esfuerzos, se puede acompañar la unión de actuaciones complementarias (placas de conexión atadas a la zapata con pernos inyectados con resina), o cualquier otro tipo de conexión.



Conexión con pernos a la zapata

Utilización de plaza metálica para unión entre micropilote, zapata y pilar

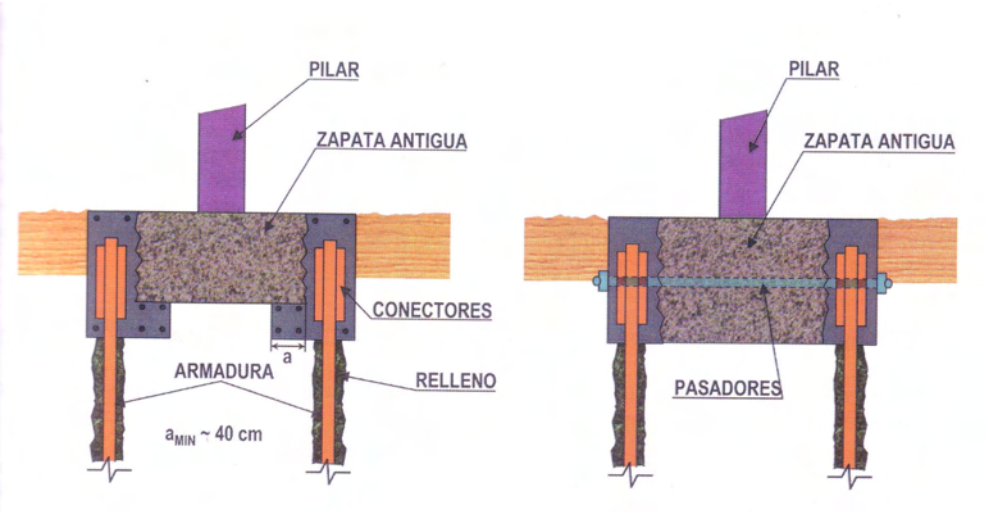


Conexión directa a cimentación de hormigón en masa o mampostería

Conexión a un nuevo encepado

Esta conexión se produce cuando los micropilotes se conectan a un nuevo encepado de hormigón armado y éste se conecta a la cimentación existente, normalmente porque no es posible la transmisión de la carga directamente a la cimentación primitiva.

La conexión se efectúa mediante el tratamiento de la superficie del encepado existente para que resulte un contacto rugoso y además ambos cimientos deberán conectarse con conectores o pasadores metálicos.



Micropilotes para recalce mediante encepado a la cimentación preexistente.

A veces los micropilotes se utilizan a la par para recalzar fachadas o edificios y para la ejecución de sótanos.

Micropilotes utilizados para recalce de fachada y excavación de sótanos

Micropilotes utilizados en recalce de muro mediante encepado conectado a cimentación preexistente y para ejecutar sótanos bajo dicho muro

VENTAJAS DE LA EJECUCIÓN DE RECALCES CON MICROPILOTES

- Maquinaria pequeña

La ejecución de micropilotes puede realizarse con maquinaria de diverso tamaño y prestaciones, en función del espacio disponible para su realización. Así, mientras que la ejecución de micropilotes en campo abierto se puede realizar con la maquinaria habitual, es posible el empleo de maquinaria de dimensiones más reducidas, que se pueden introducir prácticamente en cualquier lugar.

- Atraviesan cualquier tipo de fábrica

Utilizando el procedimiento de perforación adecuado, es posible perforar cualquier tipo de fábrica, teniendo en cuenta que posteriormente será necesaria la correcta conexión del micropilote con la zapata, siendo habitual el uso de morteros sin retracción o resinas.

- Pueden inclinarse:

En estos, casos, se tendrán que tener en cuenta las direcciones de os esfuerzos para no crear flexiones inadmisibles en los micropilotes

- Gran capacidad portante.
  No es necesaria la ejecución de perforaciones de gran diámetro para obtener una capacidad portante elevada

- Gran versatilidad. Permite la ejecución de obras de carácter singular

Recalce de muros sin posibilidad de acceso a la parte de la zapata

Recalce de zapatas con micropilotes, pantalla de contención y corte de la zapata de hormigón por invasión de solar colindante

INCONVENIENTES DE LA UTILIZACIÓN DE MICROPILOTES EN RECALCES

Si bien el uso de micropilotes es el más extendido en la ejecución de recalces, su empleo conlleva una serie de inconvenientes que son los que se incluyen a continuación.

La utilización de agua durante la perforación, puede provocar el colapso de terrenos flojos o rellenos, que por otra parte, es lo que puede haber dado lugar a las necesidades de la ejecución de dicho recalce.
Puede emplearse aire en lugar de agua, pero conlleva una pérdida de eficacia en la perforación, que suele llevar finalmente, al empleo de una perforación combinada de agua y aire.

También puede producirse el colapso simplemente por el relleno de la perforación con lechada de cemento, por lo que en ocasiones se recurre al uso de micropilotes autoperforantes.

2.1.3 JET-GROUTING

El jet-grouting es un proceso que consiste en la desagregación del suelo (o roca poco compacta), mezclándolo, y parcialmente sustituyéndolo, por un agente cementante (normalmente cemento).

Conforma unas columnas pseudo-cilíndricas de suelo-cemento de diámetro entre 0,5 y 3 m con aditivos capaces de soportar tensiones de rotura de hasta 200 kg/cm2,

Se consigue la consolidación del terreno mediante inyección de lechada a alta presión (hasta 500 bares)

La desagregación se consigue mediante un fluido con alta energía, que puede incluir el propio agente cementante

EJECUCIÓN DEL JET-GROUTING

Consta de dos únicas fases:

- Perforación hasta la cota final a la que se va realizar el jet-grouting
  Se realiza con métodos convencionales (rotación o rotopercusión en función del tipo de terreno). El diámetro de la perforación es variable en función de la solución a realizar.

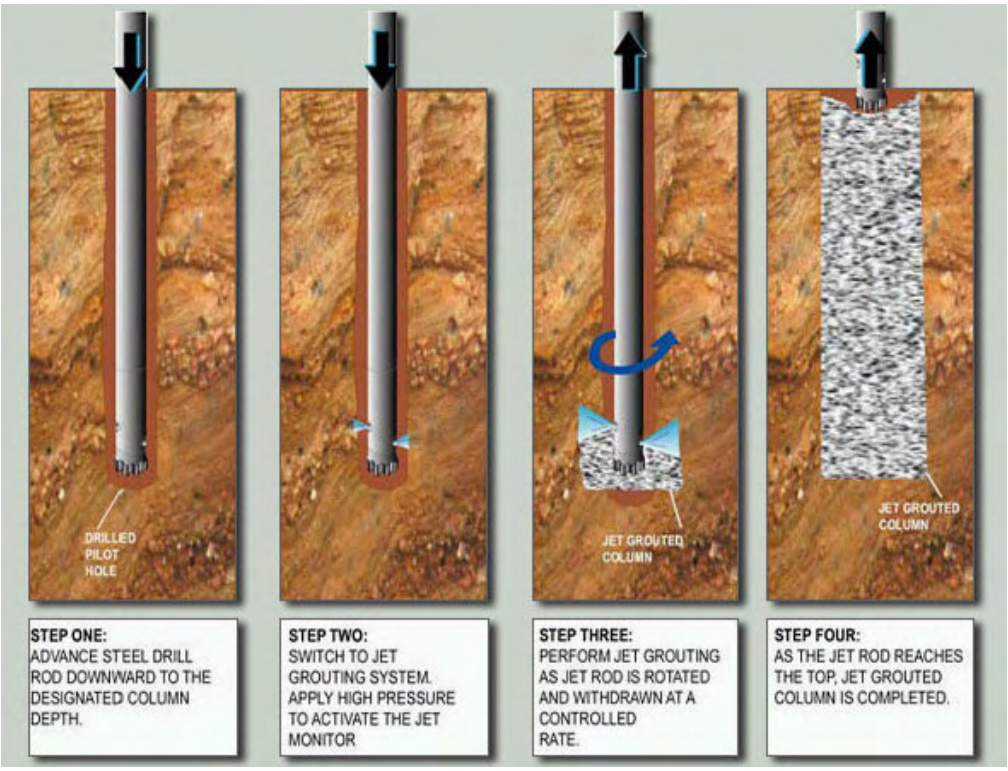
- Inyección del fluido y recuperación de la tubería simultáneamente.

  En esta fase, se destruye la estructura y compacidad del suelo mediante un chorro de alta energía (fluido) que facilita la mezcla del mismo con una lechada de cemento, y que emerge por una tobera de diámetro pequeño, pero a gran velocidad. Las presiones son elevadas, entre 350 y 500 bar.

  Para que el método funcione es necesaria la entubación de toda la perforación hasta la zona de tratamiento, para poder evacuar parte del material removido y parte de los fluidos de inyección y excavación.

  Para el tratamiento se emplea un castillete capaz de desplazarse verticalmente y de hacer rotar a gran velocidad un monitor cilíndrico por cuyo interior transcurren los conductos que comunican con las toberas y por los que se hacen fluir los fluidos empleados.

  El radio final de la columna de jet-grouting resultante, dependerá, no sólo de las variables de ejecución, sino, además, de las características geotécnicas del terreno.



Procedimiento de ejecución de Jet-Grouting

JET-GROUTING EN LA EJECUCIÓN DE RECALCES

El uso de jet-grouting no ha tenido la repercusión en obras de recalce que ha tenido en otras áreas, ya que en prácticamente la única utilización del jet-grouting como elemento de recalce es la ejecución de columnas atravesando la propia obra de fábrica.

A eso se añaden otras desventajas determinantes que se explican a continuación

- La conexión se logra introduciendo barras o tubos por las columnas, pero en la mayoría de las ocasiones resulta más compleja, menos eficiente y menos versátil que en la utilización de micropilotes

- La maquinaria utilizada es de gran envergadura (máquina., silos bombas de inyección, paneles de control), lo cual no permite en la mayoría de los casos su utilización. Además es necesario que los elementos a recalzar sean suficientemente rígidos para resistir las zonas debilitadas por la ejecución de las columnas

- Por otro lado, se pueden producir sobrepresiones de gran intensidad en el terreno como consecuencia del bloqueo de la salida del rechazo, entrando en presión una gran masa de inyección

2.2. ACTUACIONES MEJORA DEL TERRENO O EN EL ENTORNO DE LA OBRA

Otra técnica de recalce es mejorar el terreno sobre el que se apoya la cimentación, consistente en realizar inyecciones en el terreno.

Dichas inyecciones pueden ser de:
-Lechada de cemento
-Mortero de cemento
-Otros productos químicos

Las inyecciones con lechada de cemento, suelen realizarse mediante el "método de inyecciones armadas", consistente en la ejecución de un taladro, dotarlo de un tubo metálico de poco diámetro y espesor, dotado de válvulas de inyección antiretorno (I.R.S) e inyectar el terreno a través de los manguitos.

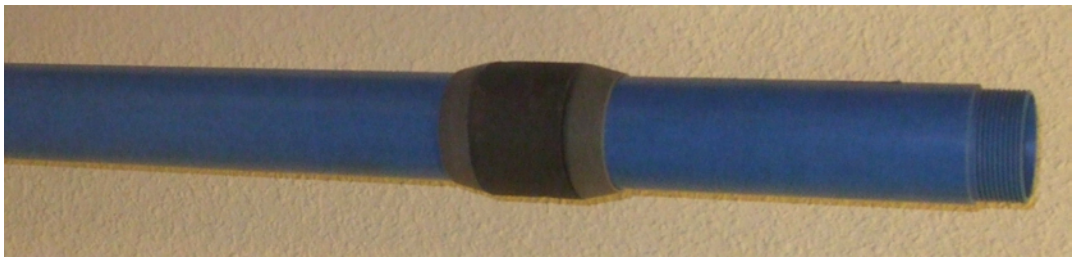
Tubo metálico con manguito para inyecciones armadas

De esta manera con la inyección bajo la cimentación, se logra mejorar el terreno por compactación por presión a la par que se arma el terreno con el tubo metálico y con las vetas de cemento.

En un primer momento se produce una reducción de volumen para pasar después a una consolidación del terreno que puede utilizarse para levantar las cimentaciones. Un método de aplicación de esta técnica son las "inyecciones de compensación" que consiste en la ejecución de taladros bajo una estructura y provocar en ella levantamientos controlados.

Las inyecciones de mortero se utilizan para el relleno de oquedades y para la compactación del terreno, son inyecciones con morteros densos y a grandes presiones.

Por último, las inyecciones químicas de geles de sílice y otros productos se realizan con la técnica del tubo manguito de forma similar a las "inyecciones armadas" pero usando normalmente tubos de PVC.



Tubo de PVC con manguito para inyecciones químicas

Planta para inyecciones de consolidación

Otros trabajos que dan buen resultado en presencia de terrenos expansivos es evitar los cambios de humedad, por eso resulta muy conveniente la impermeabilización de las zonas adyacentes a las viviendas, y la ejecución de franjas drenantes alrededor de las mismas.

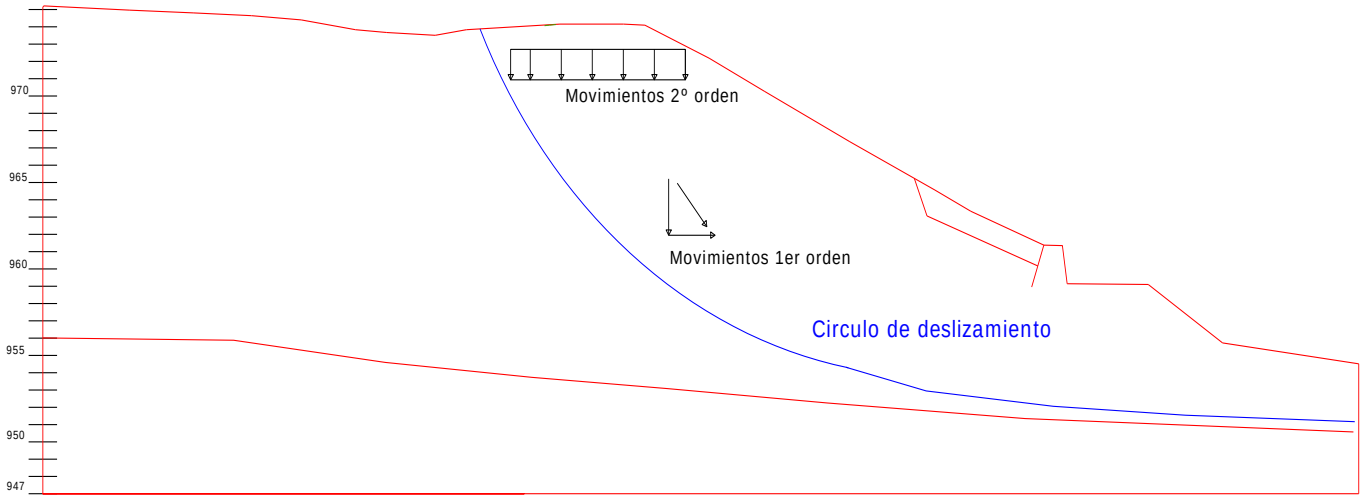
2. ESTABILIZACIÓN DE OBRAS DE TIERRA (TERRAPLÉN).

En este invierno lluvioso en el que se han producido numerosos fenómenos de inestabilidad en obras lineales, principalmente en terraplenes, queremos hacer mención a los distintos métodos de consolidación de los mismos.

Igualmente se ha producido, en muchos terraplenes, un asiento no admisible para el uso de la infraestructura que genera trabajos de consolidación de los mismos.

Es notorio que un deslizamiento de ladera origina un movimiento en el terreno movilizado de distinta índole:

- Movimientos horizontales, debidos al desplazamiento del terreno en sentido del deslizamiento.
- Movimientos verticales (asientos), debidos al propio movimiento (primer orden) y a un asiento de segundo orden debido a la descompresión fruto del agrietamiento del mismo, que se prolongará en el tiempo a pesar de que el deslizamiento se encuentre estabilizado.



Deslizamiento de ladera. Cuando aún no se ha producido la ruina total del terraplén.

La corrección de estos deslizamientos se basa en establecer sistemas de contención bien al pié del terraplén, bien en la parte superior de la calzada tales como:

- Muros de escollera, gaviones, espaldones de terreno al pie de terraplén.

- Pantallas discontinuas de pilotes pudiendo completarse con contrafuertes o pantallas continuas de hormigón armado etc…

- Pantallas discontinuas de micropilotes

Estas pantallas pueden necesitar refuerzos mediante anclajes de barra o cable en función de los esfuerzos a absorber.

En aquellos deslizamientos en los que no se ha producido su ruina total (deslizado el material) y se hayan contenido, es necesario además corregir el asiento. Para ello es necesario un largo periodo de tiempo para que el terreno deje de asentar para que la plataforma sea plenamente operativa.

Este asiento depende fundamentalmente de:

- El grado de descompresión sufrida por el terreno.

- El espesor del mismo

- El tipo de material del núcleo de terraplén .

- El terreno sobre el que se apoya.

- La carga a la que esté sometido el terreno.

Así mismo, estos asientos se ven muy influenciados por la presencia de agua que acelera el proceso de consolidación y puede causar además el arrastre de finos con la consiguiente pérdida de material del terraplén y el incremento de los asientos.

Dado que este movimiento de segundo orden seguirá evolucionando hasta que la consolidación llegue a su fin, periodo que puede durar años, debemos actuar sobre dicho terraplén al objeto de evitar o, al menos, disminuir considerablemente, el asiento y el tiempo de consolidación y sustitución por un material debidamente compactado.

Habitualmente las actuaciones tendentes a lograr estos objetivos consisten en:

1. Excavación del terraplén o zona de terreno descomprimida, actuación que puede ser inviable porque la excavación del material descomprimido puede poner en riesgo la estabilidaa de la calzada no afectada por el deslizamiento provocando el corte total de la vía.

2. Ejecución de inyecciones de pequeño diámetro mediante:

    a. Inyecciones de lechada o mortero.

    b. Inyecciones con mortero de baja movilidad.

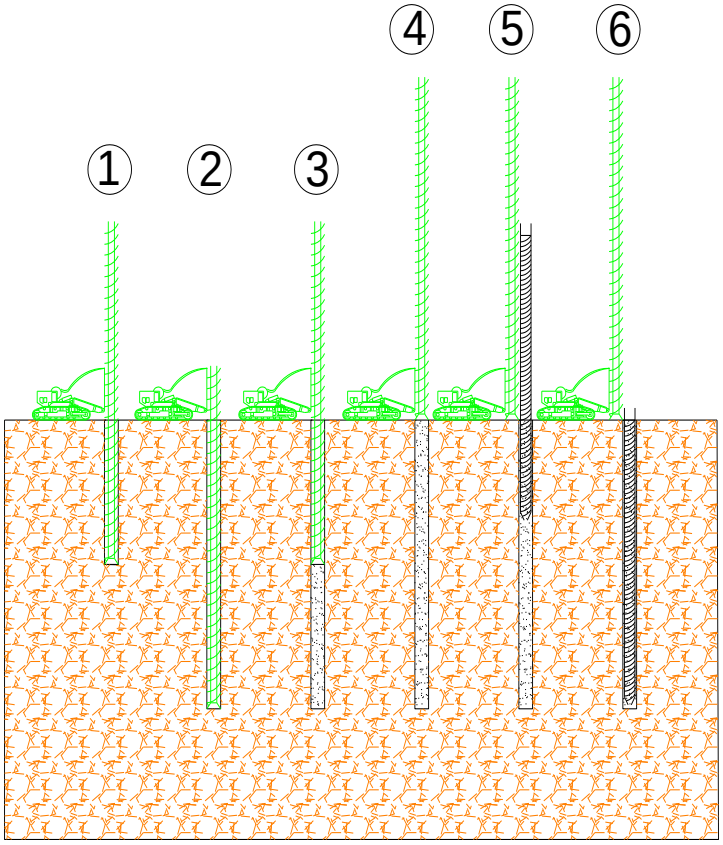
    c. Inyecciones armadas con tubos manguito. Técnica IRS.

    d. Jet Grouting.

Todas estas actuaciones son suficientemente conocidas y utilizadas.

Además de estas técnicas, hoy les propongo un nuevo método para corregir dichos asientos. Este método está basado en el aprovechamiento de los avances en la maquinaria de perforación de pilotes y en la gran calidad de los hormigones.

Básicamente se trata de “inyectar” el terraplén con hormigón, para ello se procede a perforar mediante pilotera de hélice continua (pilote CPI-8) una cuadrícula de pilotes (aproximadamente de 2x2 a 3x3) en diámetro F550, F650, F850, dependiendo del terreno y de longitud suficiente para atravesar la zona descomprimida y penetrar en el terreno competente la longitud necesaria para asegurar un buen funcionamiento, 4 a 8 diámetros, (las piloteras modernas de hélice continua pueden alcanzar profundidades de 25 a 28 metros o bien hasta que la pilotera dé rechazo) y proceder a hormigonar dichos taladro con hormigón fluido o líquido procurando darle una presión en la bomba de, al menos, 3-5 kg/cm^2



1.- PERFORACIÓN MEDIANTE BARRENA CONTINUA
2.- PERFORACIÓN FINALIZADA
3.- HORMIGONADO DE PILOTE POR EJE DE BARRENA EN SU RETIRADA
4.- HORMIGONADO FINALIZADO
5.- INTRODUCCIÓN DE ARMADURA
6.- PILOTE TERMINADO

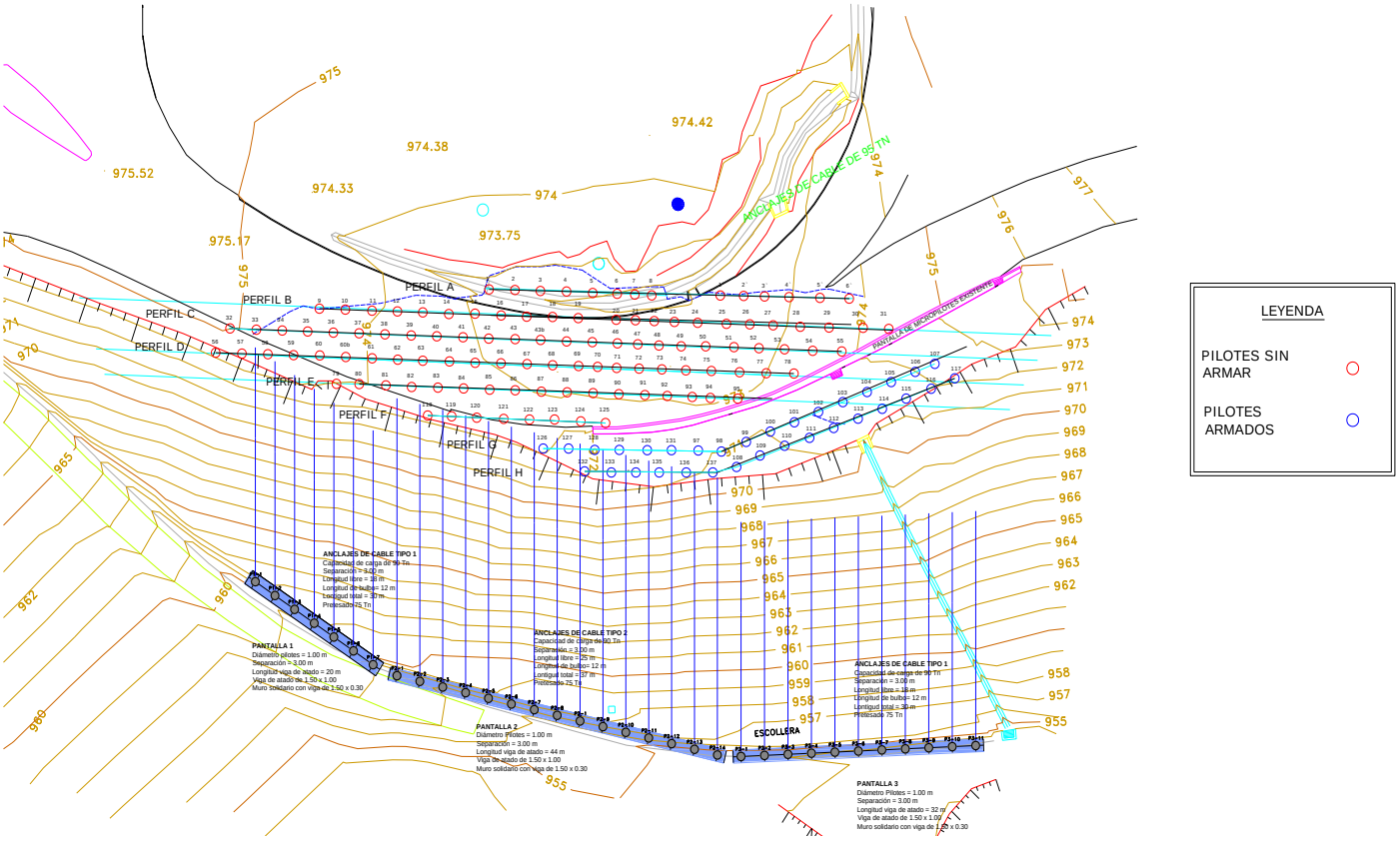
Esquema de perforación

Este procedimiento de ejecución de pilotes CPI-8 consiste en la perforación mediante barrena continua del taladro, el hormigonado a través del eje central de la barrena a la vez que se va retirando la misma, extrayendo el material y la posterior colocación de la armadura del pilote.

Posteriormente a la ejecución de la cuadrícula de pilotes conviene extender y compactar una capa de zahorra artificial de, al menos, 60 cms de espesor, separada de la coronación del núcleo de terraplén por un geotextil, que actuará como losa de reparto de cargas, para posteriormente extender la MBC correspondiente.

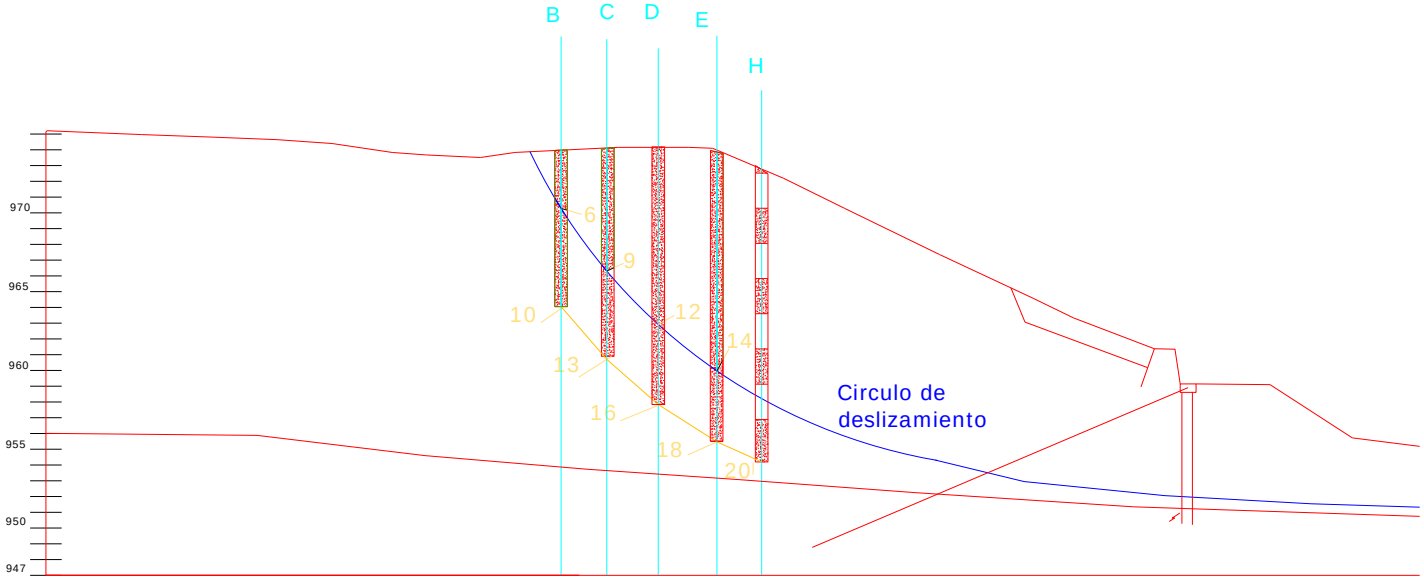
La ejecución de estos pilotes comporta, evidentemente, una mejora del terreno descomprimido, por la compactación del mismo debido a la presión dada al bombeo del hormigón.

Además la ejecución de un pilotaje atravesando una capa de terreno que está sometida a un proceso de consolidación (asentamiento), tiene su consecuencia en que, dado que estos pilotes asentarán menos que el suelo circundante, éste se colgará del fuste del pilote generando un rozamiento de signo contrario al resistente (rozamiento negativo).



Planta consolidación

PERFIL 1



Consolidación mediante pilotes CPI-8

Este rozamiento negativo inducido supone que el pilote se ve sometido a unas cargas transmitidas al terreno competente donde se empotra el pilote y dicha capa no actuará sobre las capas inferiores descomprimidas, ni sobre la parte superior del terreno sobre el que se apoya el terraplén.

La carga generada sobre el pilote debido al rozamiento negativo se puede evaluar mediante la expresión:

$R_n = 0{,}25 \times p \times D \times L \times (p_o + \sum(L_i \times g_i)/2) \times b$

Donde:

P = rozamiento negativo

D = diámetro del pilote

L = Longitud del pilote

p_o = sobrecarga

L_i = espesor de las distintas capas de terreno

g_i = densidad de las distintas capas de terreno

b = coeficiente que marca la parte del peso de la columna del terreno que rodea al pilote que se transmite al mismo, obtenido de la tabla 3.5.3 (pg 451) del mencionado libro. Dependiendo de la esbeltez del pilote y de la separación.

Esbeltez L/d					
s/d	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**
2,5	0,614	0,443	0,347	0,285	0,241
3	0,696	0,534	0,433	0,364	0,314
3,5	0,803	0,671	0,576	0,504	0,449
4	0,864	0,761	0,680	0,614	0,560
5	0,926	0,862	0,806	0,757	0,714
7	0,962	0,927	0,895	0,864	0,836

Tabla 3.5.3. pg 451 Geotecnia y Cimientos III (Jiménez Salas)

Evidentemente el resto de la carga es la que se transmite a través del propio terreno. Lógicamente a una menor carga le corresponde un menor asiento.

Además la inclusión de estos pilotes (pasadores) en la zona movilizada genera, debido al esfuerzo cortante que son capaces de soportar, una mejora del coeficiente de seguridad frente al deslizamiento, lo cuál nos permitirá reducir la contención necesaria para estabilizar el deslizamiento o llegar incluso a suprimirla y que los pasadores sean, a la vez, elementos que corrijan tanto los asientos (desplazamientos verticales) como los desplazamientos horizontales que se generan en los deslizamientos.

Los pilotes de barrena continua permiten además el armado de los mismos, con armaduras que alcanzan fácilmente los 24 metros de profundidad, con lo cual es esfuerzo cortante resistido por el pilote se puede ver incrementado considerablemente.

Por último podemos comentar que lo más ventajoso frente a otras técnicas es la rapidez de ejecución y su economía.

En pilotes de barrena continua en terrenos blandos y medios se obtienen rendimientos medios de 200-300 ml/día y, por tanto, es un pilote muy económico de ejecutar.

EJEMPLO.

Calzada de autovía afectada 10 metros de ancho y 80 metros de largo con altura de terraplén media de 10 metros.

SOLUCIÓN MEDIANTE PILOTES CPI-8

Cuadrícula de 2,0x2,5 metros

Longitud pilote de 15 metros de pilote de diámetro 650 mm.

32 unidades de 5 filas de 15 metros = 2.400 metros

Rendimiento medio 250 ml/día

Tiempo de ejecución 12 días

Precio aproximado

PA Montaje y transporte equipo_____6.000,00 € (duración 2 días)

Ml Pilote CPI-8 (sin armar)_____2.400 ml x 50 € = 120.000,00 €

126.000,00 €

Si el pilote fuera armado con 8 barras de F20

PA Montaje y transporte equipo_____6.000,00 €

Ml Pilote CPI-8 (armado)_____2.400 ml x 70 € = 168.000,00 €

176.000,00 €

JET GROUTING

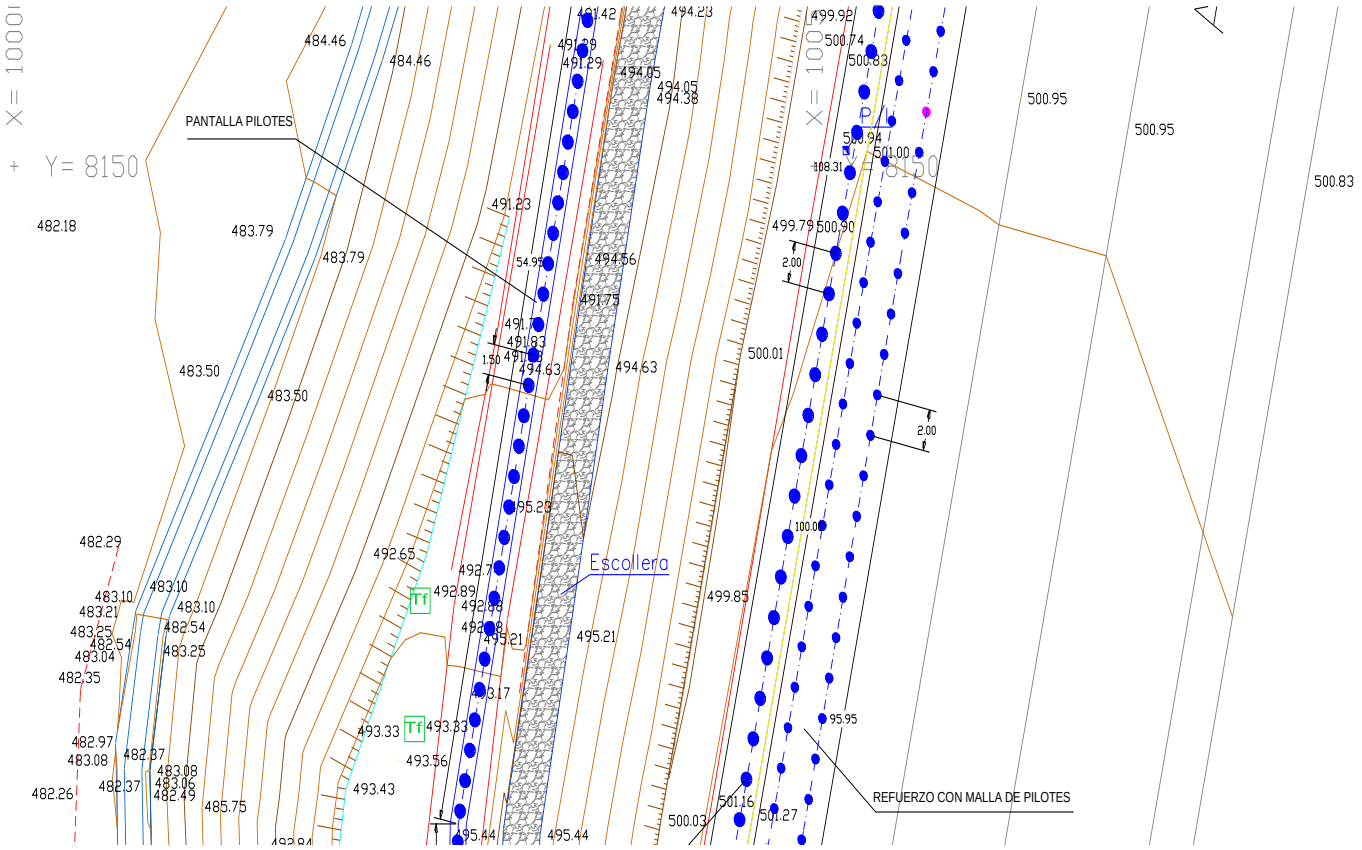
Con la misma medición que pilotes CPI-8

PA Montaje y transporte equipo_____20.000,00 € (duración 5 días)

Ml JET GROUTING_____2.400 ml x 120 € = 288.000,00 €

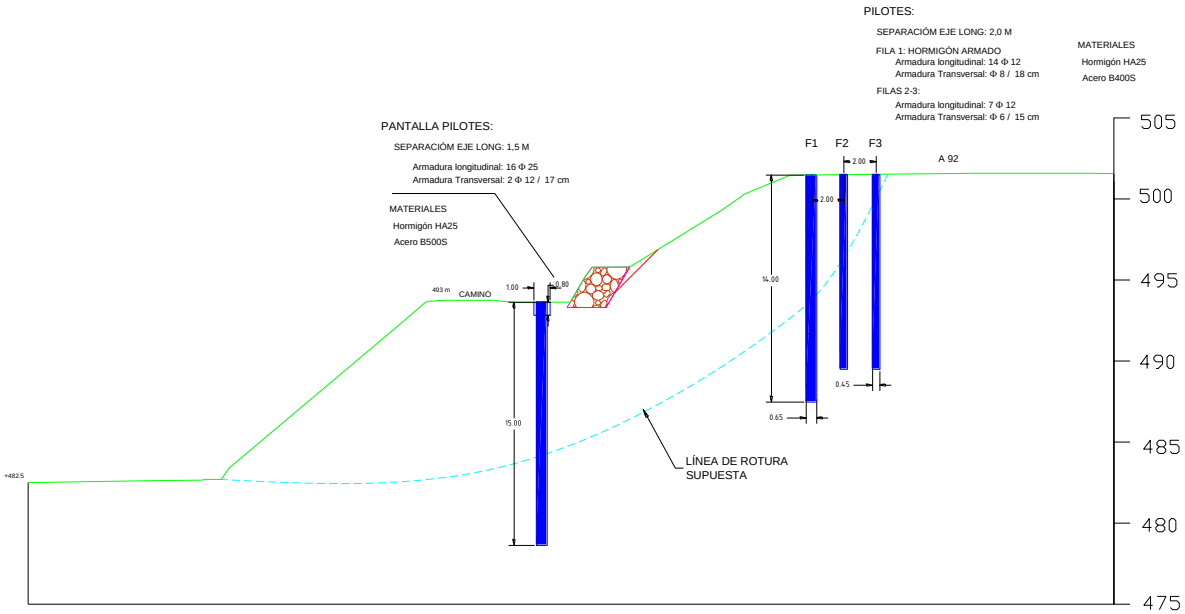
308.000,00 €

Tiempo previsto ejecución 35 días laborables.



Zona Grietas

Planta consolidación.

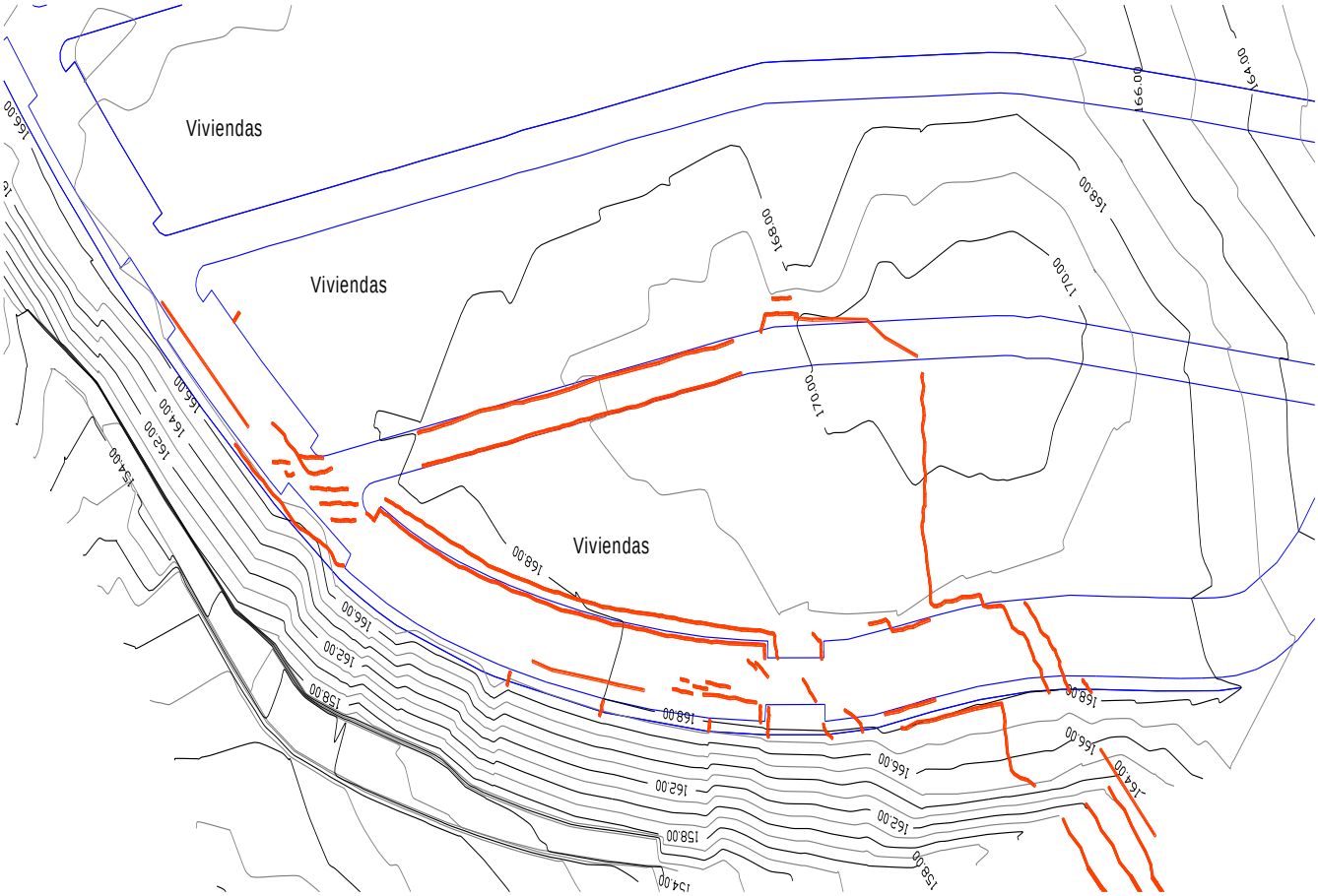


0+150

Sección tipo consolidación

CASO PRÁCTICO REAL

Tratamos de varios viales de una urbanización en Arcos de la Frontera (Cádiz) con varios edificios de viviendas afectados por fenómenos de asiento-desplazamientos muy importantes en los dos últimos años. Terraplenes de altura superior a 20 metros constituidos por arcillas margosas sobre un terreno de margas arcillosas.



Planta viales afectados

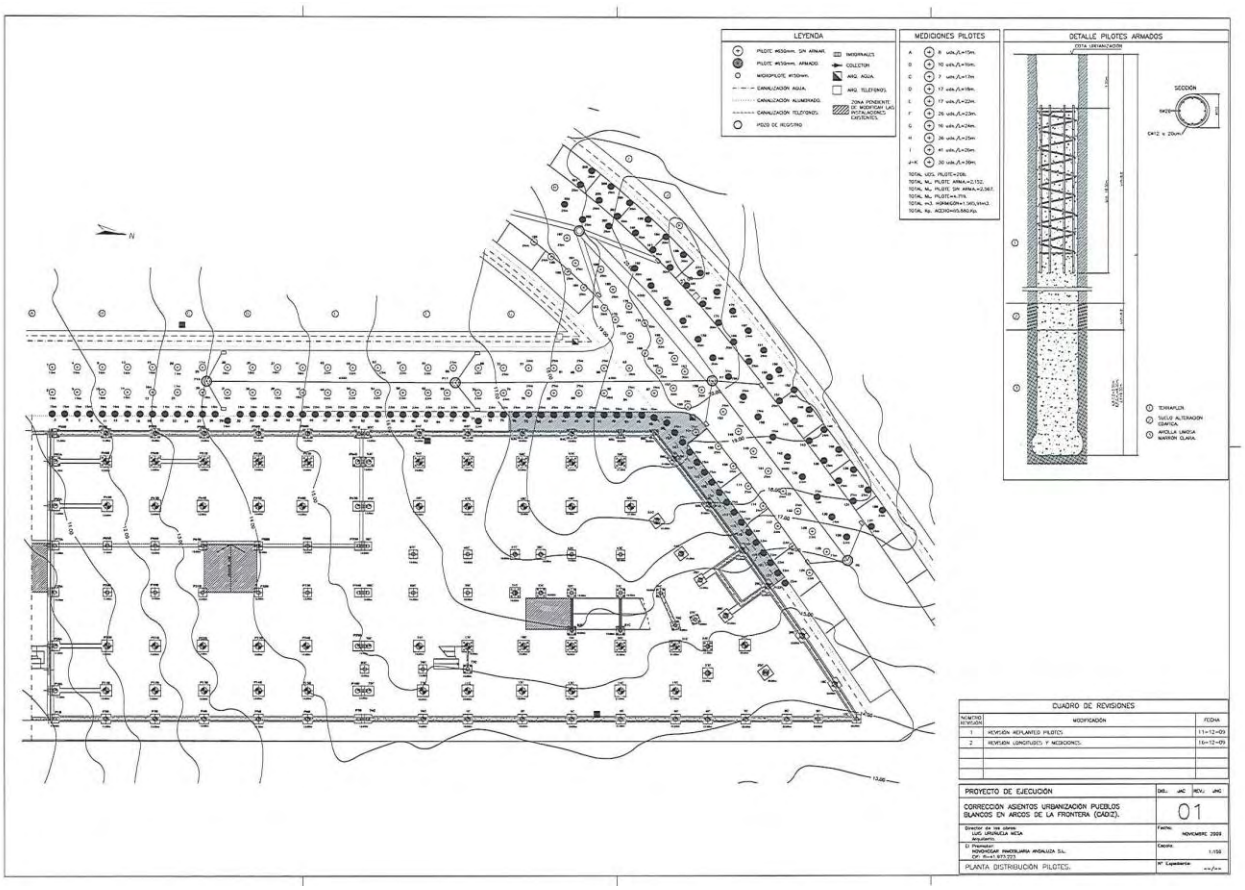
Para la consolidación del terraplén afectado se diseña:

- Cuadrícula de pilotes de 650 mm de diámetro de longitudes variables entre 14 y 30 metros con una cuadrícula aproximada de 4D x 4D

- Adicionalmente se ejecutarán unos pilotes armados constituyendo una pantalla, las cuales se dotarán de armadura formada por 8 redondos del 20 para absorber esfuerzos de cortante a los pilotes que van junto al bloque y en la zona del vial central de mayor altura de terraplén conformando tres filas de pilotes armados. De este modo se defiende el bloque frente a movimientos asociados a los comentados anteriormente.

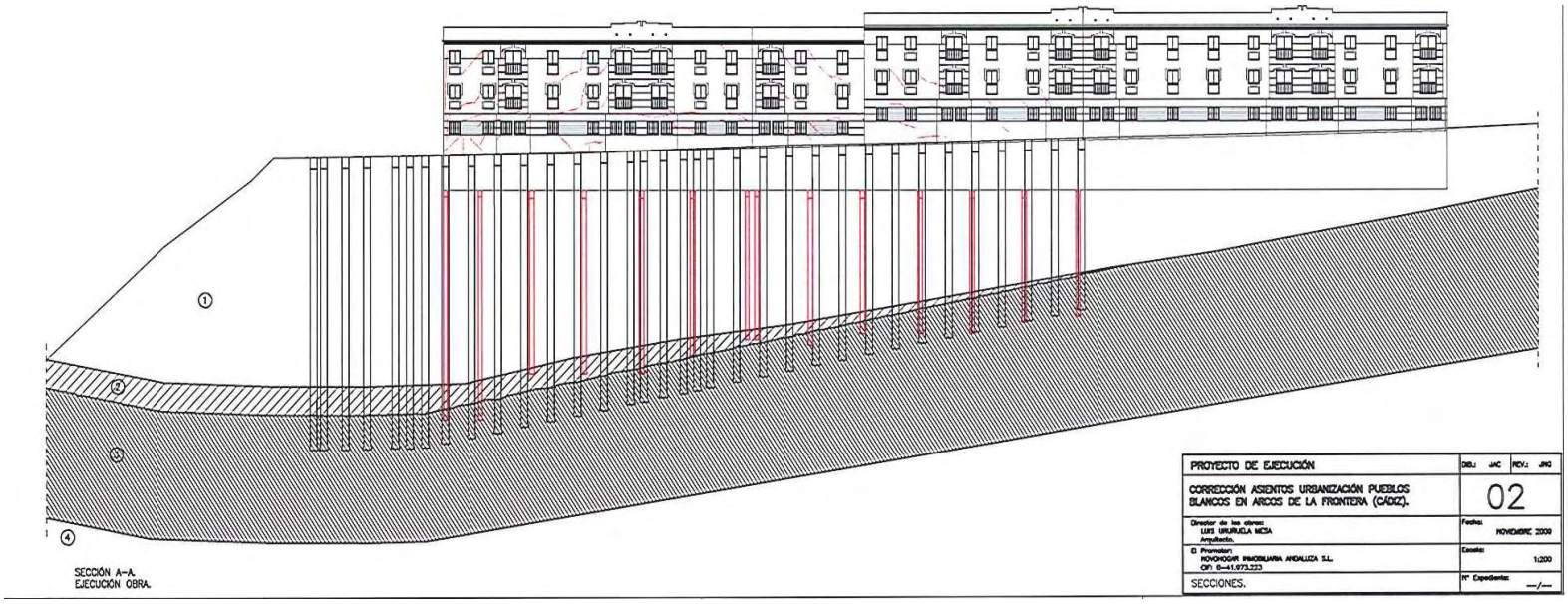
El diámetro de las perforaciones será de 650 mm siguiendo una cuadrícula de 2,50 m x 2,50 m.(4D) No obstante debido a la existencia y proximidad de los servicios de la urbanización (telecomunicaciones, saneamiento, pluviales…) estas distancias pueden ser objeto de modificación en obra.

Las longitudes de los pilotes varían entre los 14 metros (zona extrema afectada por los socavones) y los 30 metros (zona central).



Planta Consolidación

Lo primero que se ha de tener en cuenta para la modelización del problema es la caracterización geotécnica y la asignación de valores para los distintos parámetros de los materiales que constituyen el modelo. Para ello se debe diferenciar los niveles en los rellenos de terraplén, atendiendo al grado de alteración y a las características litológicas y resistentes de éste.



Sección tipo.

Todos los cálculos se han realizado mediante la herramienta de elementos finitos PLAXIS en su versión 8.6.

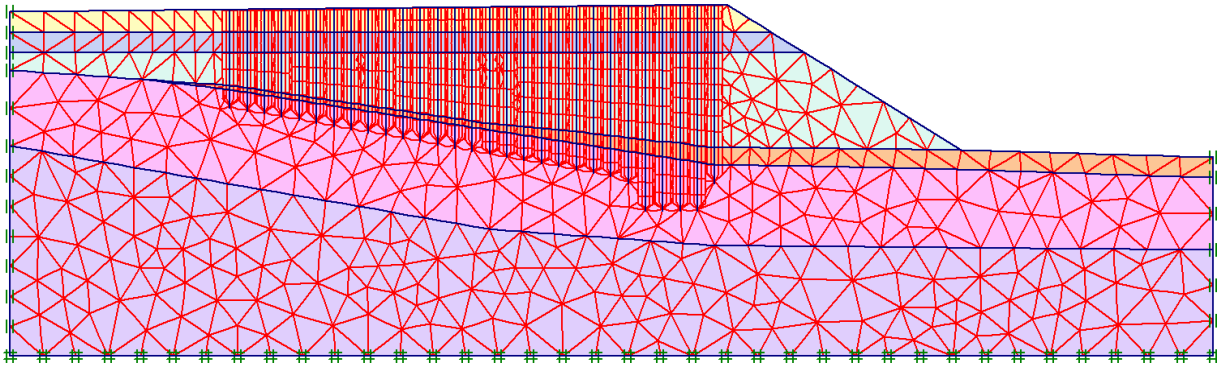
Las distintas fases de cálculo realizadas han sido:

- Análisis previo para calibración del modelo con la obtención de los asientos similares a los reales mediante análisis por consolidación.

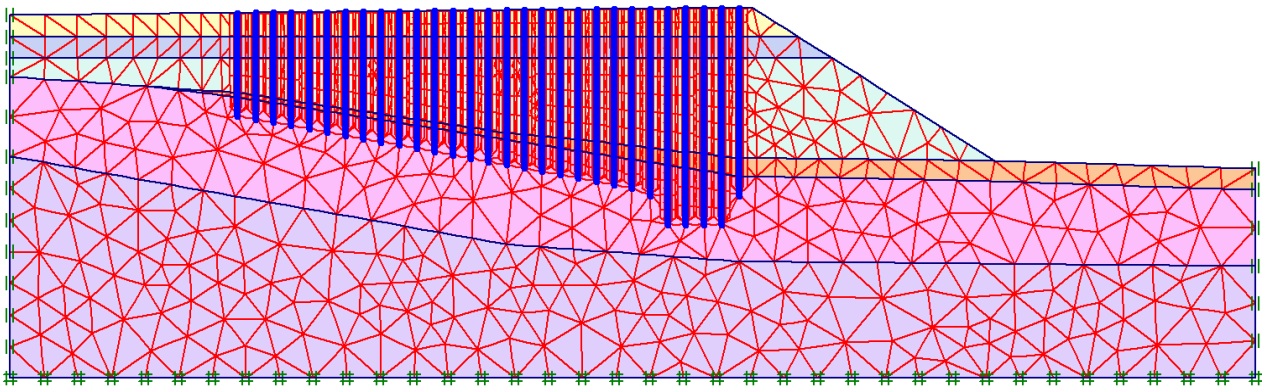
- Análisis de los asientos remanentes en el caso de no existir tratamiento alguno.

- Análisis de los asientos producidos durante la etapa de construcción de los elementos de refuerzo (inyecciones de gran diámetro) estimadas. Análisis de asientos remanentes tras el refuerzo.

Se incluye a continuación la malla de elementos finitos usada en los cálculos:



Malla de elementos finitos sin tratamiento

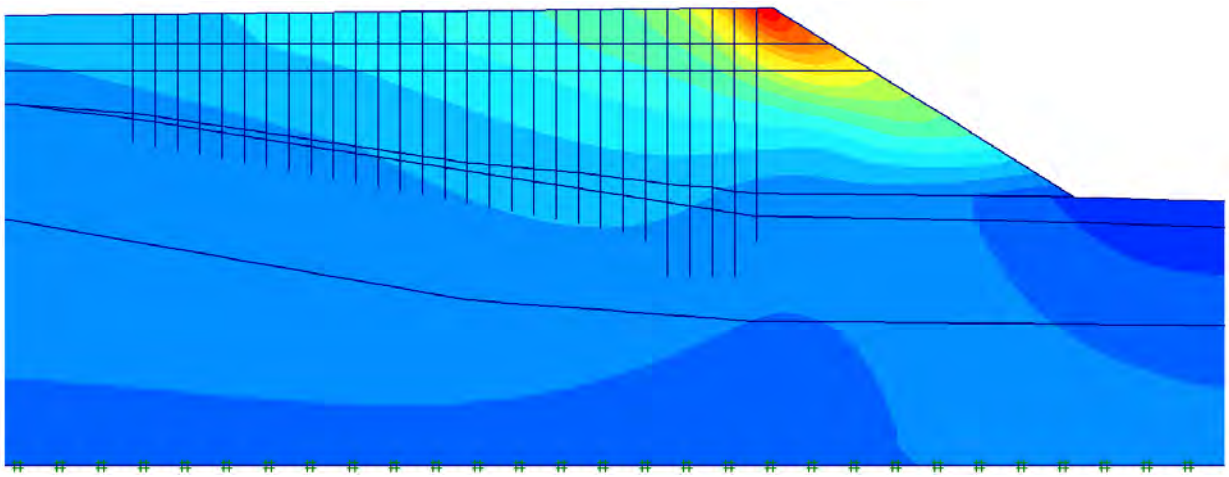


Malla de elementos finitos con el tratamiento propuesto.

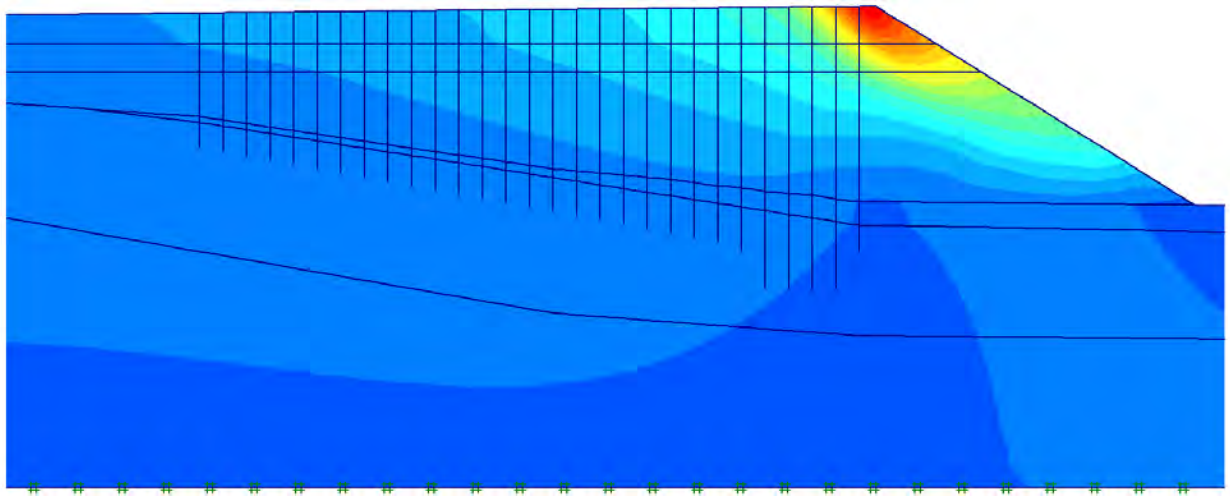
SALIDA DE RESULTADOS

En el modelo calibrado, tomado como eje base para la realización del resto de los cálculos, se ha obtenido un asiento máximo de 18 cm, producido durante el último año y medio.

Se incluye a continuación la distribución de asientos:



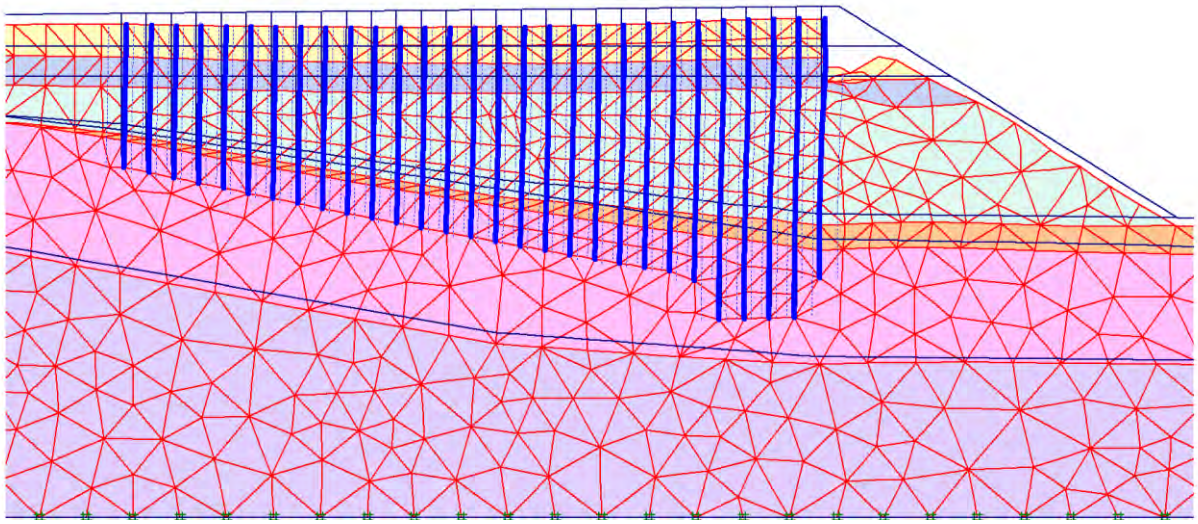
Los asientos obtenidos para una consolidación total son de 47 cm, quiere decir esto, que aún quedan 29 cm de asientos por producirse. En siguiente figura se refleja la distribución de desplazamientos verticales tras una consolidación total y la malla deformada:



Los cálculos realizados para el tratamiento propuesto arrojan los siguientes resultados:

Se obtienen asientos remanentes de 3.6 cm.

En la figura adjunta se reflejan los asientos remanentes que se producirán tras la ejecución del tratamiento propuesto.



Los valores absolutos obtenidos para los asientos son aproximados, no siendo representativos, pudiendo variar dependiendo de las características locales del subsuelo y del empotramiento de las inyecciones, así como de la rugosidad del hormigón.

En cualquier caso, la relación de asientos que se producen en el terreno sin tratar y el tratado si que será un valor representativo y a tener en cuenta, en nuestro caso el factor de mejora con el tratamiento es de un 750% para los asientos remanentes.

Con lo cual cabe concluir que la corrección de asientos y desplazamientos horizontales en inestabilidades de terraplenes, mediante la ejecución de cuadrículas de pilotes de barrena continua armados o sin armar presenta las siguientes ventajas:

- Compactación por presión del terreno descomprimido.

- Descarga del terreno por transferencia de carga a pilotes.

- Mejora de la estabilidad del terraplén por el esfuerzo cortante que aportan los pasadores.

- Rapidez de ejecución.

- Economía

Entre los inconvenientes cabe mencionar:

- No se pueden atravesar terraplenes con presencia de bolos.

- No se pueden ejecutar en terraplenes que se apoyen en terreno rocoso.