

FUNDACIONES SUPERFICIALES CON COLUMNAS DE GRAVA

Fernández Vincent, Juan Manuel
Ingeniero Civil

Universidad de Buenos Aires, Universidad Católica Argentina, Geotecnika SRL.
jvincent@fi.uba.ar

RESUMEN

Las columnas de grava, también conocidas como vibrosustitución, son una técnica de mejora de suelos mediante vibración profunda y aporte de gravas al terreno, formando columnas de grava compactada que incrementan la capacidad portante global, reducen los asentamientos y eliminan o reducen significativamente el potencial de licuación sísmica. La mejora del terreno mediante vibrosustitución, mejora las propiedades geotécnicas del terreno existente de forma de lograr que el suelo tratado sea apto para fundar las cargas de la estructura mediante una cimentación superficial. El refuerzo mediante la presencia de la columna de grava crea un material compuesto de menor compresibilidad media y de mayor resistencia al corte media que la presente en el suelo natural con el objetivo de verificar las condiciones de resistencia y deformación de diseño. En función del valor de las cargas de la estructura y el perfil geotécnico del terreno, este tipo de solución posee su campo práctico de aplicación en la edificación como alternativa a las fundaciones profundas. Se presentan los lineamientos para su diseño y casos de aplicación.

ABSTRACT

The stone columns, also known as vibrosustitution, is a technique to improve soils by deep vibration and the adding of gravel to the soil, forming columns of compacted gravel that increase the overall bearing capacity, reduce settlement and eliminate or significantly reduce the seismic liquefaction potential. The soil improvement through vibrosustitution modifies the geotechnical properties of the existing land to ensure that the treated soil is suitable to bear the loads of the structure by a shallow foundation. The reinforcement by the presence of gravel column creates a composite material with lower average compressibility and greater average shear strength than the natural soil in order to verify the conditions of design of deformation and resistance. Depending on the value of the loads of the structure and geotechnical profile, this type of solution has its practical field application in buildings as an alternative to deep foundations. We present guidelines for its design and applications.

INTRODUCCION

Las columnas de grava como sistema de mejora de suelos son una técnica utilizada desde los años 30 en que se inventara el primer vibrador. Se basan en la utilización de la vibración profunda en suelos predominantemente cohesivos y que se emplea tanto en obras civiles como en edificación.

El tratamiento de mejora y refuerzo del terreno mediante columnas de grava constituye una alternativa a otras soluciones geotécnicas más tradicionales. Cuando deseamos apoyar una estructura en un terreno cuyas características geomecánicas son insuficientes, debemos en una primera fase identificar qué tipo de deformación es el que no hace admisible una cimentación directa, es decir, sin ningún tipo de tratamiento o cimentación especial. Las deformaciones no admisibles pueden ser asentamientos absolutos, asentamientos diferenciales, deslizamiento, licuefacción en zonas sísmicas u otros. En función del tipo de deformación que queramos subsanar, podremos identificar cuál o cuáles de las características del terreno deberíamos mejorar.



Figura 1. Sección transversal esquemática de una estructura con fundaciones con tratamiento de columnas de grava.

Frente a la posibilidad de transmitir las tensiones hasta un estrato competente mediante una cimentación profunda, o la opción de extraer un cierto espesor de terreno no apto y sustituirlo por otro mejor compactado, existe la alternativa de incrementar las características del terreno hasta obtener valores suficientes para apoyar mediante una cimentación directa.

El tratamiento de mejora y refuerzo del terreno mediante columnas de grava persigue mejorar el conjunto de parámetros intrínsecos del terreno (ángulo de

rozamiento, modulo de deformación, densidad) para obtener un suelo equivalente mejorado apto para una cimentación directa.

El concepto del tratamiento se basa en tomar el terreno original y sus características fundamentales (es decir, su ángulo de rozamiento, su cohesión y su módulo de deformación) e incorporarle las columnas de grava (de características conocidas y controladas), de manera que se obtenga un suelo mejorado con sus propias características equivalentes. A partir de estas características equivalentes del terreno mejorado se procede por cualquier método convencional al cálculo de asientos para una cimentación directa o superficial.

Es fundamental tener en cuenta que, siempre que la densidad de las columnas de grava sea inferior o igual a una columna cada 10 m², se puede considerar que el conjunto suelo-columna presenta las características equivalentes; pero en ningún caso se entiende que cada punto del suelo mejorado tenga esas características. El terreno que circunda a las columnas de grava tiene prácticamente las mismas características que el terreno original (pudieran ser algo mejores en función del método de ejecución, compactación lateral) y la mejora reside en hacer trabajar de forma conjunta y homogénea a los dos suelos presentes (terreno original y columna de grava) distribuyendo la carga uniformemente repartida en superficie.

Este método se utiliza cuando el contenido de finos en el suelo es mayor al 10-15%; cuando el contenido es menor el método empleado es la vibrocompactación.

De amplia utilización en países como Francia, Alemania y España, la vibrosustitución se emplea desde hace más de 10 años. En la actualidad son cada vez más vigentes debido a su versatilidad y facilidad de ejecución.

A diferencia de las cimentaciones profundas que atraviesan las capas de suelos blandos hasta alcanzar un estrato competente al que transmitir las cargas, las técnicas de mejora de suelos se basan en mejorar una cierta profundidad de este sustrato blando de tal forma que una vez actuado sobre el pueda resistir las cargas transmitidas.

AMBITO DE APLICACIÓN Y OBJETIVOS

En principio, las columnas de grava se utilizan bajo terraplenes y cargas extensas, aunque también se usan como cimentación de estructuras. Los diámetros típicos son de 0,60 a 1,00 m, decreciendo en general con la resistencia del terreno original, aunque con una fuerte influencia del método constructivo.

Los espaciamientos se suelen definir mediante la razón de sustitución (cociente entre el área de cada columna y su área tributaria). Son usuales razones de sustitución del 5 al 30 %.

Este medio de mejora de suelos blandos se realiza mediante la inclusión de material granular (sin cohesión) en el terreno en una perforación previamente realizada por un vibrador, en la que no existe extracción del terreno, sino que las gravas que se introducen en la perforación por pasadas sucesivas, se compactan movilizándose el empuje lateral del terreno.

Este tratamiento permite alcanzar en mayor o menor medida los siguientes objetivos:

- Mejora de la capacidad portante del terreno
- Reducción de asentos.
- Homogeneización de las características geotécnicas.
- Aceleración del proceso de consolidación, constituyéndose como elementos drenantes (suelos cohesivos saturados).
- Aumento de la estabilidad frente al deslizamiento (caso de terraplenes).
- Disminución del riesgo de licuación (arenas flojas), en zonas sísmicas.

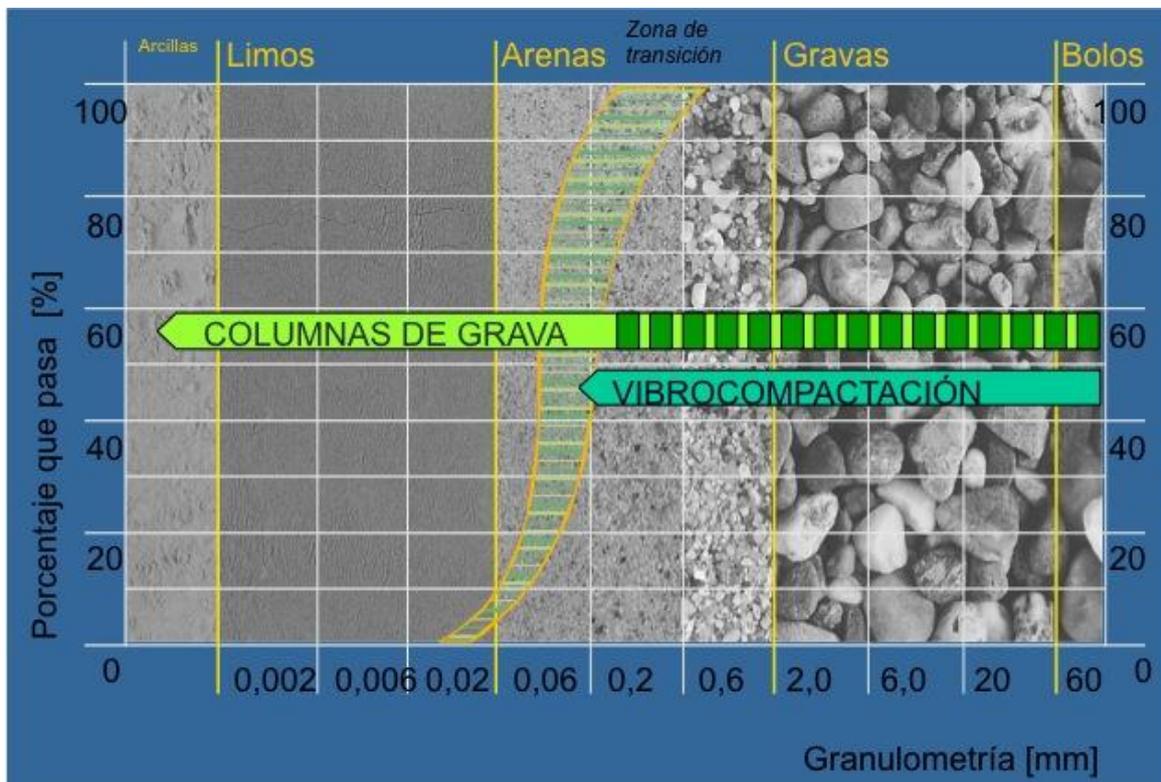


Figura 2. Técnica de mejora del terreno según granulometría del terreno

PROCEDIMIENTO DE EJECUCION

Las columnas de grava se clasifican en función de los siguientes aspectos:

- I. Sistema de perforación:
 - a) Vía seca (empleo de aire comprimido)
 - b) Vía húmeda (empleo de agua, con cierta extracción del terreno disuelto)

- II. Sistema de alimentación:
 - a) Descarga inferior e interior de gravas (bottom-feed)
 - b) En cabeza por vertido superior

Vía húmeda

El procedimiento de ejecución de columnas de grava mediante la vía seca no se diferencia en mucho de la vía húmeda salvo que no es necesaria la utilización de agua durante la perforación.

Esto implica un ahorro tanto en el coste propio del agua empleada y de su traída, como en un laborioso sistema para su gestión una vez utilizada, sistema que necesita la construcción y utilización de balsas de decantación antes de su vertido, el tratamiento de los lodos decantados y la restitución de toda la zona de decantación una vez terminados los trabajos.

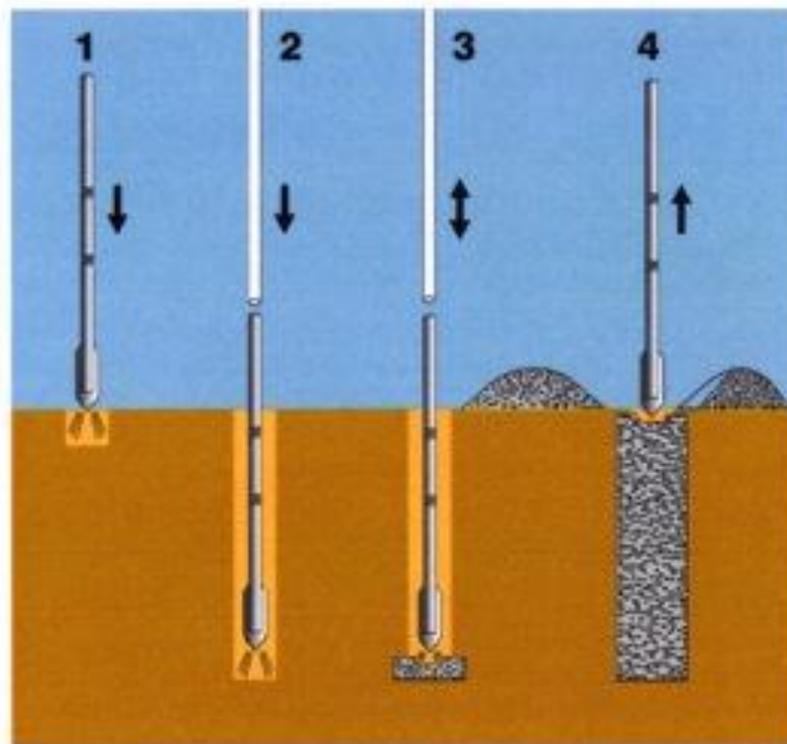


Figura 3. Procedimiento de ejecución vía húmeda

El caudal de agua empleada y su gestión una vez utilizada, deben preverse mediante un sistema de canales con utilización de balsas de decantación, recirculación de agua y, antes de su vertido, el tratamiento de los lodos decantados y la restitución de toda la zona de decantación una vez terminados los trabajos.

Vía seca

El procedimiento de ejecución de columnas de grava mediante la vía seca se diferencia de la vía húmeda en que no es necesaria la utilización de agua durante la perforación, ya que se trabaja con hincas estáticas por el equipo (200kN), y el empleo de aire comprimido para asegurar el correcto vertido por el interior del tubo de descarga de la grava hasta la su extremo inferior.

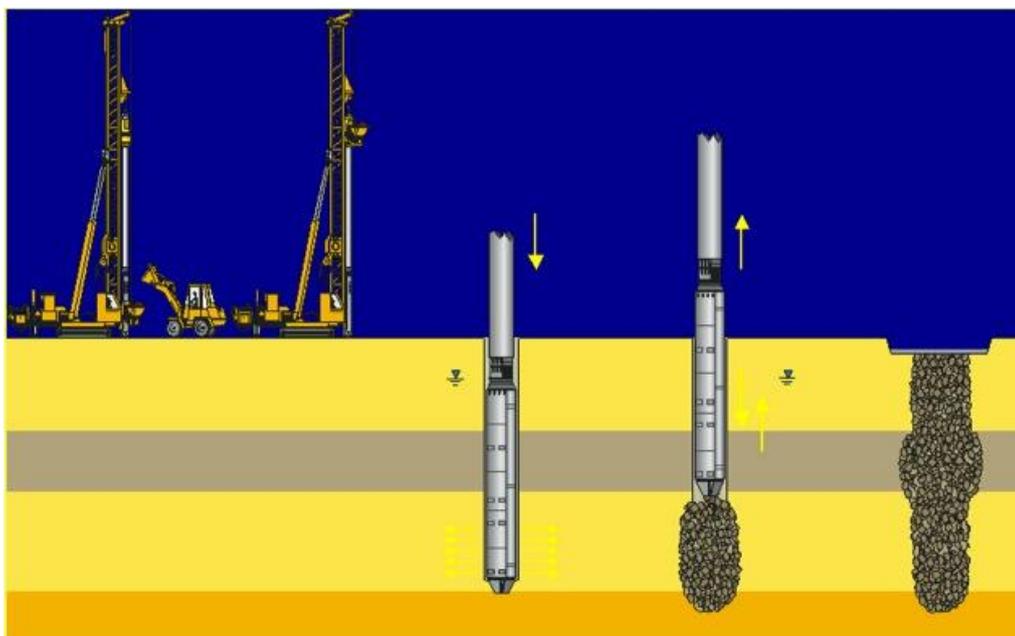


Figura 4. Procedimiento de ejecución vía seca con hinca estática.

Fases de ejecución

La ejecución de las columnas de grava tiene las siguientes fases, independientemente del sistema empleado:

i. Preparación del terreno: Los equipos de columnas de grava necesitan una plataforma con suficiente capacidad portante, horizontal, lisa y drenante, de tal forma que la maquinaria pueda moverse por la plataforma sin riesgo de vuelco o accidente, y que pueda trabajar incluso durante periodos de lluvia. Asimismo todos los accesos a la obra deben permitir el paso de camiones y de maquinaria sin dificultad, teniendo en cuenta que estos equipos son transportados por góndolas y camiones de grandes dimensiones, y que la grava se aporta de forma continua durante toda la duración de la obra.

ii. Levantamiento de los puntos de hinca: Una vez aceptada la plataforma de trabajo, se marcan sobre ella los puntos de hinca de acuerdo con el plano. El marcado se hace mediante pintura de colores vivos y estacas de madera o metálicas. Generalmente estos puntos se distribuyen en redes regulares triangulares o cuadradas, que no tienen por que se de lado constante a lo largo y ancho de la obra, pues este puede variar en función de las características del terreno o de las cargas a las que va a estar sometido en cada punto. Los puntos singulares como las zapatas o esquinas, pueden ser tratadas de modo diferenciado al resto de la superficie.

iii. Hinca del vibrador: El vibrador se sujeta mediante un grúa o una máquina sobre orugas dotada con un mástil, también denominada vibrocat. En el primer caso, el vibrador se posiciona sobre el punto de hinca y se introduce en el terreno gracias al peso propio del vibrador, a las vibraciones, y al aire comprimido que es el fluido empleado. En el caso de utilizar un vibrocat con mástil, se dispone de un empuje adicional proporcionado por el peso de la máquina y transmitido a la punta mediante

cables con poleas. La hincas se lleva hasta la profundidad de diseño o hasta rechazo si este se produce antes.

iv. Relleno de la perforación mediante grava: Por medio de una tolva que se carga a nivel del suelo con una sencilla pala cargadora, que se eleva por el mástil hasta alcanzar una trampilla superior del vibrador por el que se descarga la grava y a través del tubo alimentador interior llega hasta la punta inferior del vibrador donde se encuentra el orificio de salida. Alcanzada la profundidad de hincas, el vibrador se eleva ligeramente a la vez que la grava aportada a través del orificio de salida inferior ocupa el espacio que queda libre. El vibrador vuelve a bajar sobre el material aportado que es compactado por medio de la presión ejercida por el equipo como por la vibración que este transmite. Mediante pasadas sucesivas de poca amplitud (generalmente 50 cm) se consigue rellenar toda la perforación hasta alcanzar la superficie.

v. Acabado: Una vez ejecutadas las columnas se regulariza la base de apoyo mediante la aportación de grava o tierras compactadas que permitan la ejecución de la cimentación superficial.

Una vez ejecutadas las columnas, habrá de procederse a descabezarlas, como mínimo 0.50 m y hasta 1.00 m desde la superficie (en función del tipo de terreno existente), debido al cono de hundimiento generado. Sobre la columna, una vez descabezada, siempre es conveniente una compactación secundaria. Si sobre las columnas se va a realizar un colchón de material granular (base de regularización), se comprobará que el espesor sea de al menos 0.60 m.

Vibrador

El vibrador en sus alternativas eléctrico o hidráulico, por medio de la rotación de una masa excéntrica con una frecuencia de 30 a 60 Hz, genera una fuerza centrífuga de 100 a 350 kN, con amplitudes de movimiento de 5 a 30 mm.

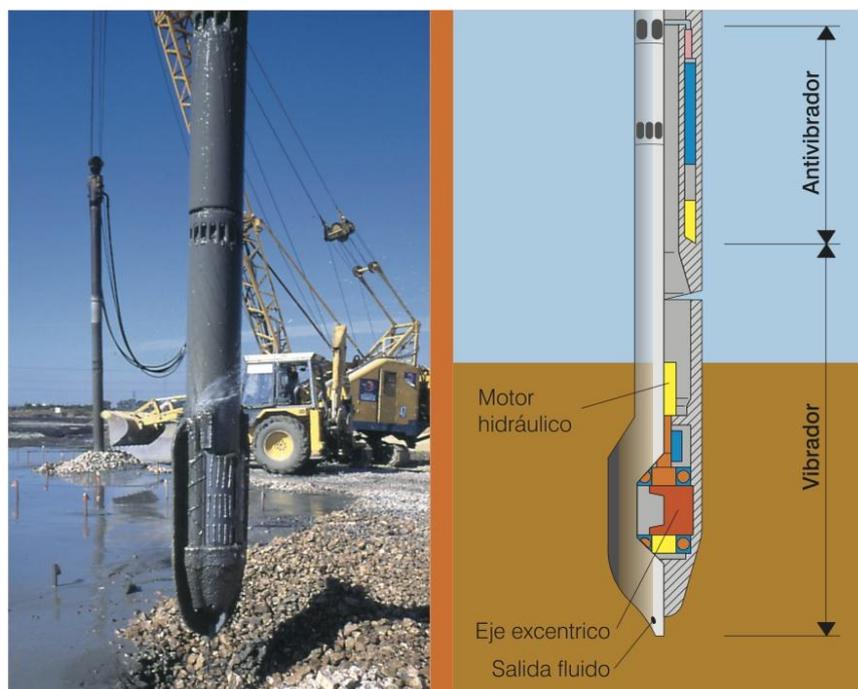


Figura 5. Vibrador para método vía húmeda.

En la variante vía húmeda, hace falta que el equipo con las tuberías tengan peso, que gracias a la ayuda de un importante caudal de agua, genera una lanza de inyección que ayuda a la penetración del vibrador en el terreno.

En el caso de la vía seca, generalmente se basa en la hincada estática del vibro con fuerzas de hasta 200kN por lo que se puede ver un poco más limitado los suelos y/o profundidades tratables, sobre en temas de licuación.

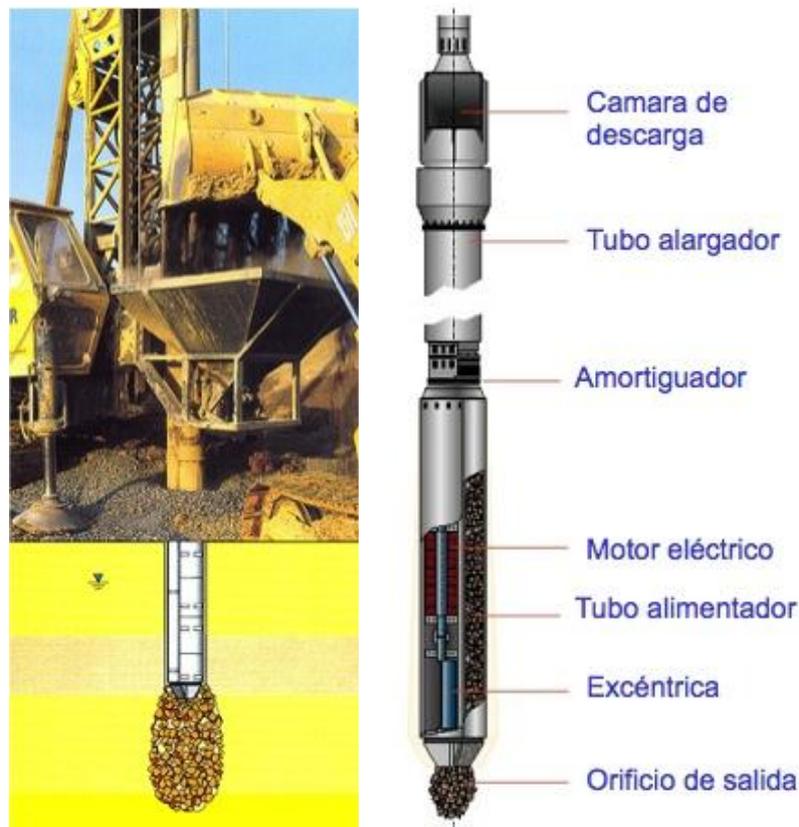


Figura 6. Vibrador para método vía seca con alimentación interna.

MATERIALES (GRAVA)

Para la comprobación del material, se requerirán los siguientes datos:

- Características mecánicas del material.
 - Curva granulométrica (el contenido en finos será menor al 2%).
 - Composición: partículas limpias (machaqueo, aluvial o reciclado)
- a) Vía seca: 10 a 50 mm para áridos rodados (10 a 40 mm para piedra partida)
- b) Vía húmeda: 10 a 80 mm (coincide con la aportación exterior)

También es susceptible de comprobación la tolva de alimentación de la grava, ya que suele disponer de un tamiz en la parte superior para evitar el paso gravas de dimensiones elevadas.

- Dureza del material ($LA < 35$).
- Opcionalmente se medirá el Micro-Deval ($MDE < 30$)

MÉTODOS DE CALCULO

Método de Priebe (1976/1995)

De los diversos métodos de dimensionamiento, el más comúnmente aceptado es el Método de Priebe (1995). Este método persigue obtener los parámetros del suelo equivalente mejorado partiendo de las características del terreno original deducidas del informe geotécnico y las de las propias columnas de grava. Como herramientas para ese fin emplea distintos factores de mejora (n), de reparto (m) y de profundidad (f_d), afectados cada uno del subíndice 0 (básico), subíndice 1 (que tiene en cuenta la diferencia de módulos de deformación entre el suelo y la columna de grava) y subíndice 2 (que tiene en cuenta la influencia de las capas suprayacentes a la capa estudiada). A partir de fundamentalmente el ángulo de rozamiento, la cohesión y el módulo de deformación, el método de Priebe procede a un estudio clásico de asientos de la fundación (zapata y platea).

Se estudian uno por uno todos los elementos de apoyo de la estructura (zapatas, platea, terraplén...), las tensiones recibidas y el terreno afectado, para obtener la combinación de profundidad y separación de las columnas de grava que ofrezcan eficacia técnica (fundamentalmente capacidad portante, seguridad a la rotura y control de asientos).

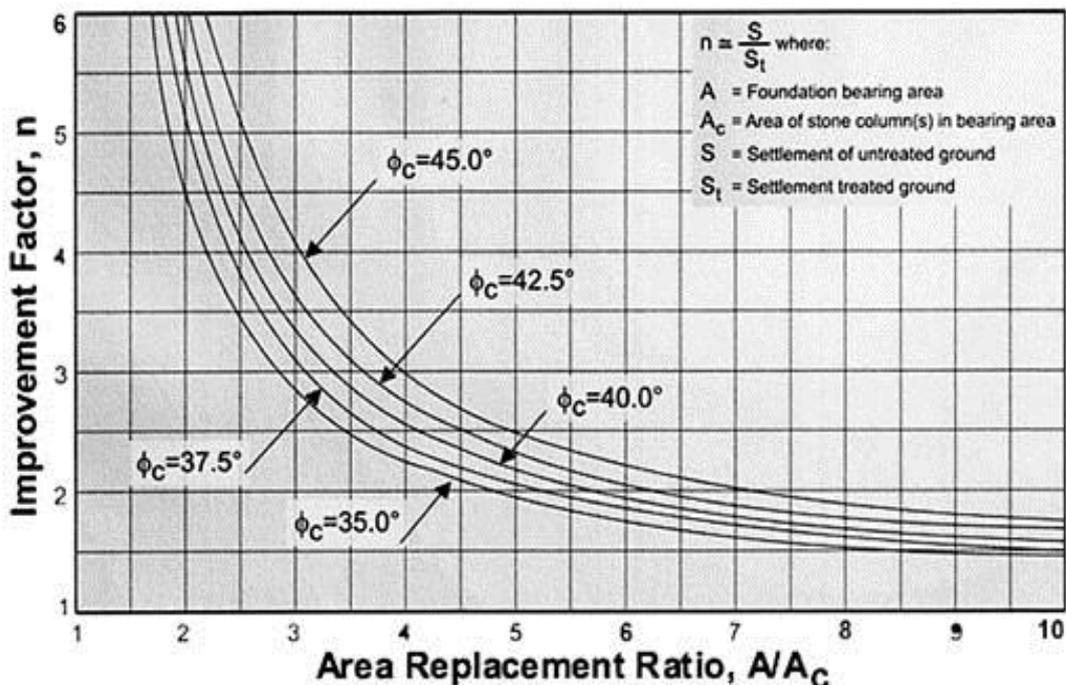


Figura 7. Factor de mejora básico (n_0) (Priebe, 1995).

Es el más antiguo, y probablemente el más utilizado. Con el tiempo ha ido experimentando modificaciones y mejoras diversas hasta la más reciente versión (Priebe, 1995). Contiene varias hipótesis simplificadoras:

1. La deformación vertical del suelo es la correspondiente a condiciones edométrías, es decir con confinamiento lateral.
2. La columna es rígido-plástica, es decir, sólo se deforma si la tensión horizontal, radial, en su pared es inferior al empuje activo correspondiente a la carga

vertical a que está sometida.

3. Alcanzado este estado límite, la columna se deforma sin cambiar de volumen.
4. El coeficiente de empuje en reposo del suelo vale la unidad.
5. Si la presión radial actuante en la pared suelo-columna difiere de este valor, el suelo se deforma elásticamente.

Algunas de las hipótesis anteriores son cuestionables, aunque finalmente el método proporciona unos resultados razonablemente próximos a la realidad, haciendo intervenir los parámetros más significativos del problema: módulos edométricos de suelo y columna, razón de sustitución, y ángulo de rozamiento de la grava (a través del coeficiente de empuje).

Método de Ballam y Brooker (1981)

Es similar al anterior en el planteamiento general, pero mejora alguna de sus hipótesis cuestionables. Así, se realiza un análisis elástico riguroso del sistema: la columna, como un cilindro en condiciones triaxiales sometido a una tensión vertical y otra radial; el terreno circundante, como material elástico sometido a expansión de una cavidad cilíndrica por presión radial en su pared y, simultáneamente, a una cierta presión vertical en su superficie.

Estableciendo la igualdad de asentos de columna y terreno, y compatibilidad y equilibrio en la pared vertical de la interfaz columna-terreno, se dispone de las ecuaciones necesarias para resolver rigurosamente el problema, determinando sus incógnitas simultáneamente (tensiones verticales en columna y terreno, presión radial en la pared y desplazamientos verticales y horizontales).

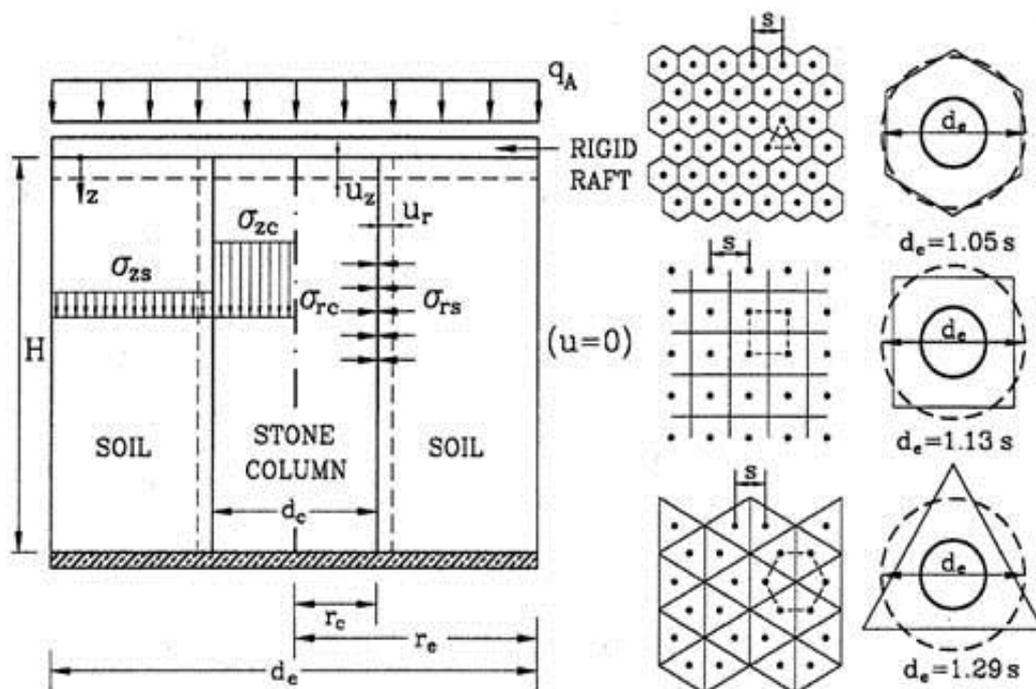


Figura 8. Celda unitaria equivalente (Balaam y Booker, 1981).

En la Figura 9 se presenta la solución y el resultado en términos del factor de reducción de asentos, en función de la relación de diámetros de columna y celda

tributaria ($a/b = \rho^{1/2}$) y la relación de módulos de columna (1) y suelo (2). Se incluye la corrección de una errata de la formulación, indicada por los autores en un artículo posterior (Balaam y Booker, 1985).

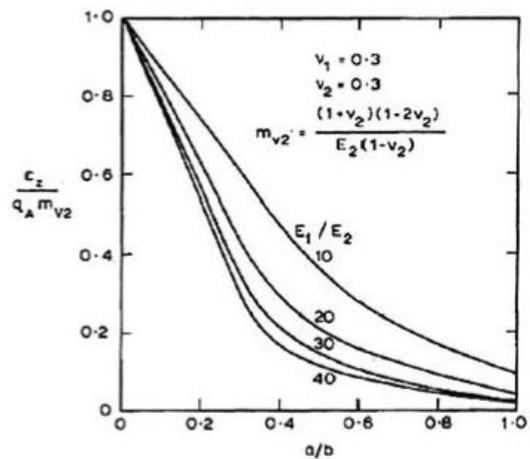
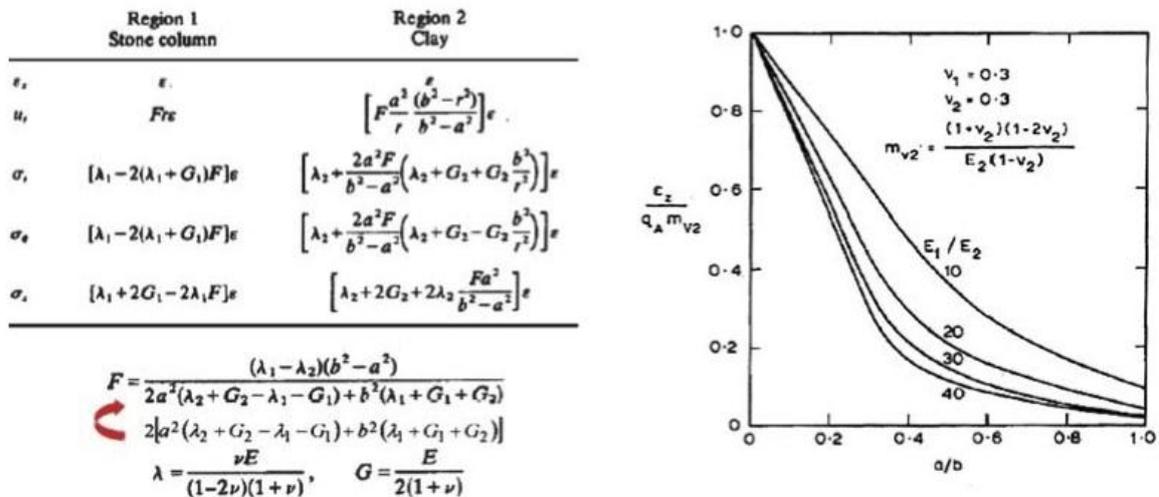


Figura 9. Factor reductor de asentos. Solución de Balaam y Booker (1981).

Una aportación interesante del método es que distingue entre las dos situaciones de corto plazo (carga sin drenaje) y largo plazo, al final de la consolidación. Para ello, repite el análisis utilizando para el terreno los parámetros no drenados o drenados, respectivamente. El resultado indica que el reparto de tensiones entre columna y terreno no es constante, sino que varía con el tiempo entre los dos instantes considerados. Por otra parte, se pone de manifiesto la existencia de un asiento instantáneo, en contra de lo que resulta de la hipótesis de compresión confinada.

Método de Van Impe-De Beer (1983)

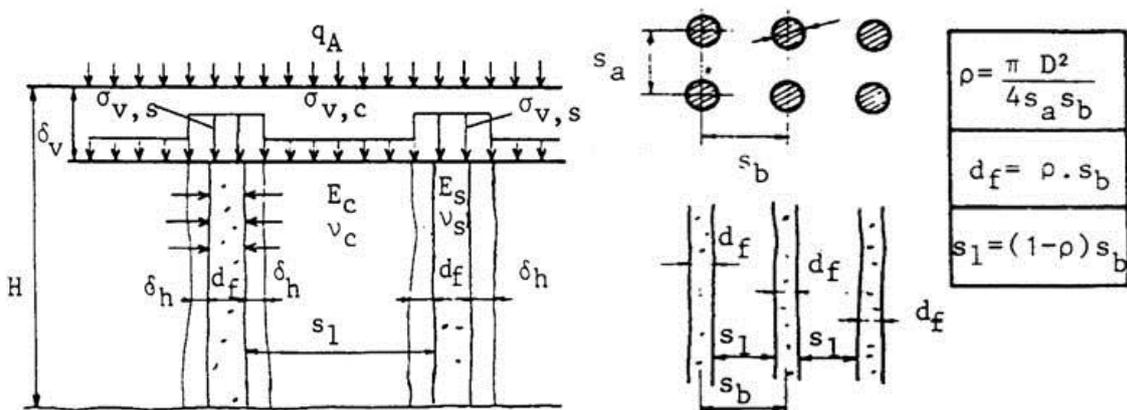


Figura 10. Pantalla infinita equivalente. Van Impe De Beer (1983).

Presenta la peculiaridad de trabajar en dos dimensiones. En lugar de la celda unitaria cilíndrica, toma una pantalla indefinida equivalente en deformación plana, con un espaciado relativo (separación/ancho) igual a la razón de sustitución de la malla. En consecuencia, los factores de mejora difieren bastante de los de los

métodos anteriores. Para la columna, considera estado de tensiones activo, como en el método de Priebe.

Este método incluye como aspecto singular un análisis de la estabilidad de las columnas frente al estado límite último de la rotura del suelo circundante.

Capacidad de carga

Para la evaluación de la mejora de la resistencia al corte proporcionada por las columnas, los métodos de cálculo existentes proponen considerar el sistema terreno-columnas como un único material, con unos parámetros (peso específico, cohesión y tangente del ángulo de rozamiento) definidos por ponderación entre los de ambos elementos. En principio, los coeficientes de ponderación deben ser diferentes para cada parámetro:

- Los pesos específicos, y las cohesiones, se deben ponderar con arreglo a las áreas de cada elemento.
- En cambio, la tangente del ángulo de rozamiento interno se debe ponderar teniendo en cuenta el producto del área y la tensión normal actuante, es decir, la carga normal total sobre cada elemento. Para roturas predominantemente horizontales, como en terraplenes, puede utilizarse a este fin la tensión vertical.

El método de Priebe también propone esta ponderación, pero para la cohesión y el rozamiento recomienda reducir los valores de los coeficientes, mediante leyes empíricas.

Falla local de las columnas

Otro aspecto importante del análisis, sujeto a alguna controversia, es la estabilidad de las columnas, es decir, su capacidad de mantenerse bajo la carga vertical que actúa sobre ellas.

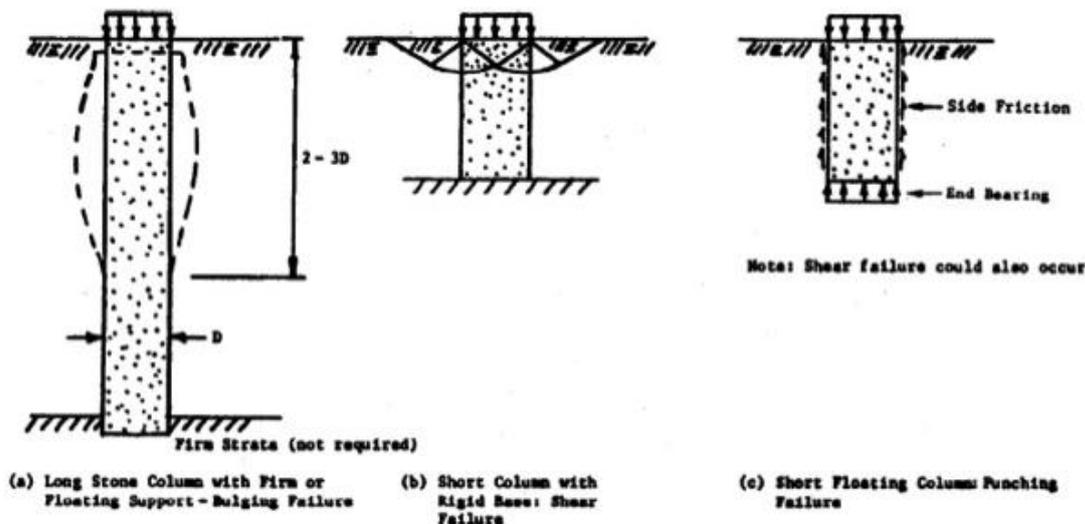


Figura 11. Mecanismos de falla de una columna en un suelo blando homogéneo.

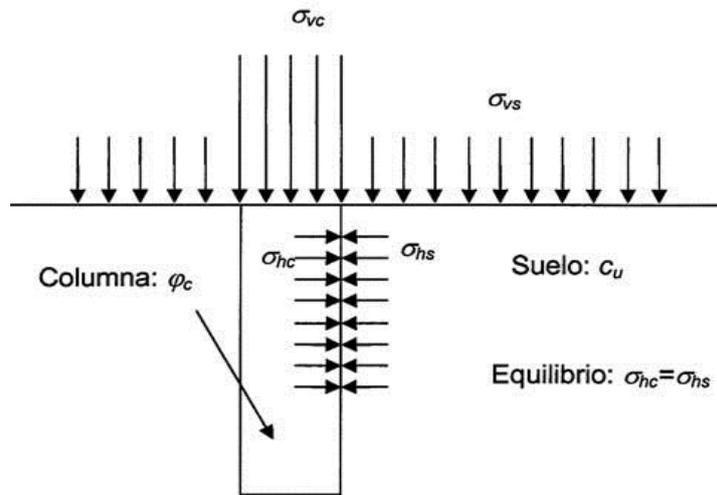


Figura 12. Esquema de estabilidad de una columna.

En la Figura 12 presenta el esquema de estabilidad. El equilibrio límite exige:

$$\sigma_{vc} = \sigma_{hc}/k_{ac} = N C_u + q \quad (1)$$

El factor N y la presión q dependen del método de análisis. Si se considera la geometría real, cilíndrica, de la columna, N es el factor Nk_u , que es del orden de 6 a 8, y el término q es la tensión horizontal total, σ_{hs0} en el límite de la celda unitaria entonces:

$$\sigma_{vc} = (Nk C_u + \sigma_{hs0}) \approx 20 C_u + 3 k_{0s} \sigma_{vs} \quad (2)$$

CONTROL DE EJECUCION

Tal y como se ha explicado, la base de la mejora y el refuerzo reside en las propias columnas de grava y no en la posible mejora que se produzca en el terreno circundante, por lo que los controles y ensayos deben orientarse sólo a las columnas de grava. Los ensayos o controles en el terreno entre columnas no tienen ningún valor como comprobación de la eficacia.

Con esa premisa, el control más fiable y eficaz es el que proporciona el registro de control automático de la máquina de columnas de grava. Este permite que el maquinista vea en tiempo real por el monitor los parámetros de ejecución (número identificativo de la columna, tiempo y velocidad de ejecución, profundidad, intensidad del motor, empuje del vibrador, admisión de grava) de la columna de grava.

Preliminares

- Idoneidad de la plataforma de trabajo
- Levantamiento de los puntos de hinca de acuerdo con el plano
- Energía de hinca y punto de rechazo

- Amplitud de las pasadas en el relleno de la columna y energía de compactación

Durante la ejecución de los trabajos

- Energía aplicada a la hinca
- Amplitud de las pasadas y energía de compactación utilizada en el relleno de la columna
- Longitud de las columnas
- Diámetro de las columnas
- Granulometría de la grava empleada
- Duración

Algunos equipos van dotados con medios informáticos que permiten la medición de algunos de los parámetros reflejados.

Se debe poder desprender de los reportes de ejecución los parámetros medidos durante la ejecución de una columna de grava, en particular: profundidad de la columna en metros; avance en m/min; empuje en bar e intensidad del vibrador en amperios.

Puede obtenerse también otros datos de cada columna ejecutada como:

- la secuencia de relleno y vibrado al introducir la grava en la columna, lo que permite evaluar si el relleno de la perforación se ha ejecutado correctamente, es decir, con la cantidad de grava adecuada y con la energía de compactación necesaria
- duración de la ejecución

Posteriores

Los controles posteriores están orientados a comprobar la compacidad, continuidad y profundidad de las columnas. Los ensayos de penetración estática continua, CPT (Norma UNE 103804:1993 IN), y los ensayos de penetración dinámica continua, y DPH (Norma UNE 103801:1994), DPH (Norma UNE 103802:1998).

Las pruebas de carga y los ensayos de placa de carga son bastante habituales en verificaciones de cimentaciones, si bien los últimos para los tratamientos con columnas de grava deben tomarse con cautela y elaborar un análisis en lo que se refiere a las correlaciones y resultados esperables. Como las tensiones que, bajo la forma de un bulbo, se transmiten al conjunto, son disipadas lateralmente movilizándolo el empuje pasivo del terreno, las dimensiones de la placa deben ajustarse a las dimensiones de la zapata modelada para no generar un bulbo distinto al real.

TIPOLOGIA DE APLICACIONES

Se presentan varios casos de obra resueltos con fundaciones superficiales apoyadas sobre un suelo mejorado con columnas de grava.

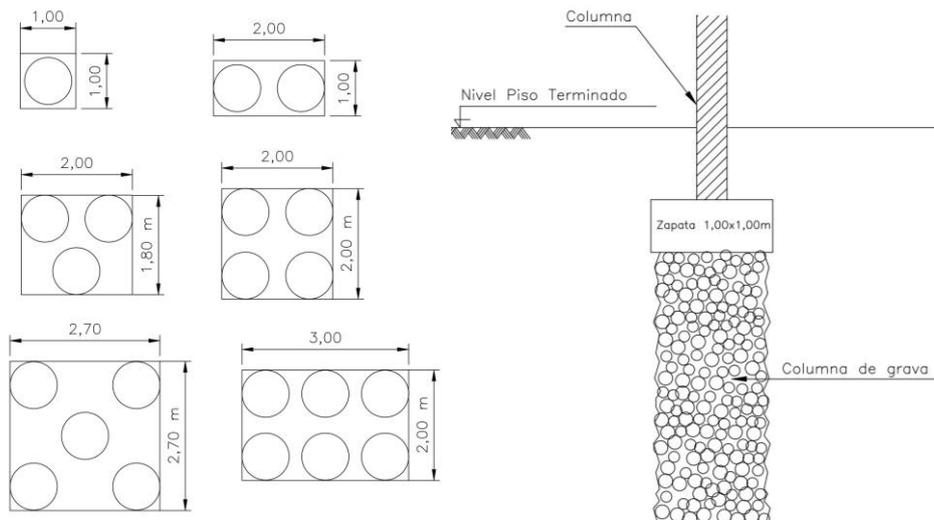


Figura 13. Plantas y sección tipo de zapatas sobre columnas de grava.

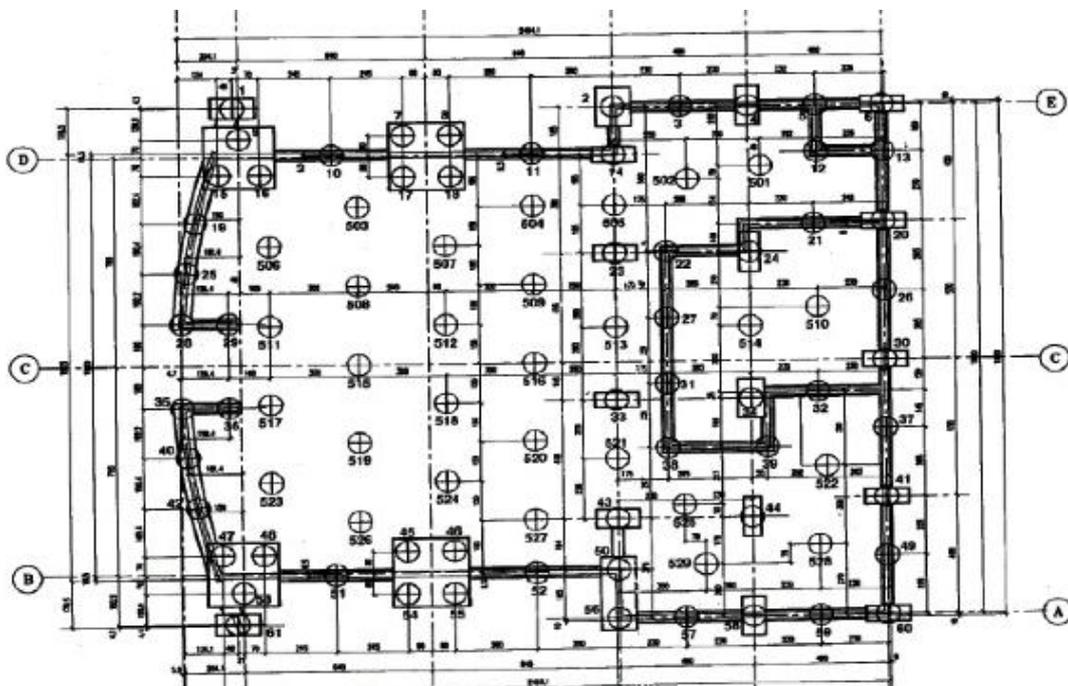


Figura 14. Tipología de solución con tratamiento bajo contrapiso y bajo bases.

Nave Industrial Loeches (Madrid)

La caracterización del terreno presente materiales arcillosos limosos con golpes son inferiores a 10, hasta alcanzar el rechazo, asociable a niveles detríticos y sustrato resistente. El nivel freático se detectó a una profundidad aproximada de 5,00 m.

Tensión admisible de aprox. 0,20 MPa, para un asiento admisible de 2 cm, con columnas de 0,85m de diámetro y longitud estimada de 7 metros.

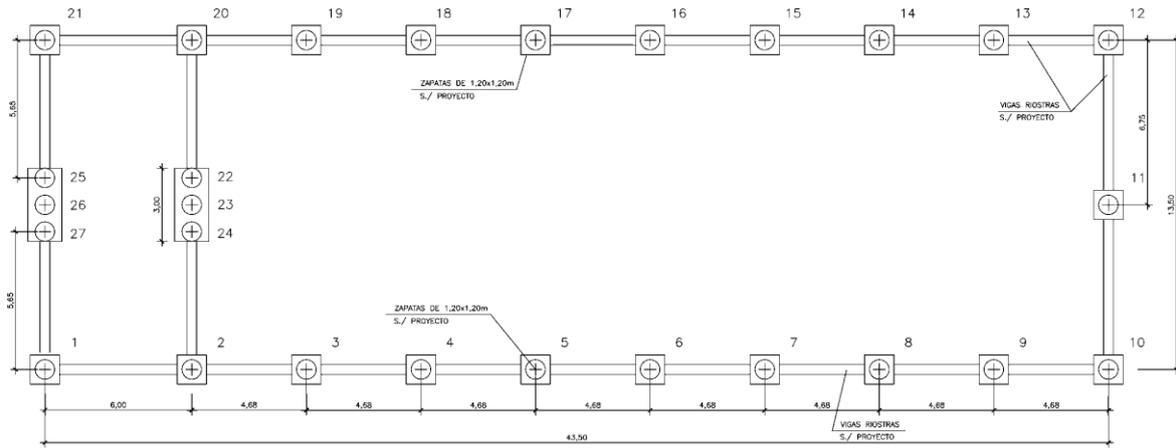


Figura 15. Planta fundaciones nave industrial en Loeches (Madrid)



Figura 16. Equipos vibrocat vía seca con descarga interior, en obra.

87 Viviendas en los Altos de Estepona (Málaga)

La caracterización del terreno presente es la siguiente:

Nivel I : (0,00 a 9,00_m) Relleno/terreno removilizado. Consiste principalmente en arenas arcillosas vertidas sobre la topografía original.

Nivel II : (9 a 12,00 m) Arenas arcillosas rojizas. Arenas y gravas en matriz limo-arcillosa con valores penetrométricos comprendidos entre 20 y 40.

Nivel III : (>12,00 m) Sustrato rocoso. Esquistos y filitas muy fracturadas con

grado de meteorización medio de III y un RQD inferior al 10%.

Tensión admisible de aprox. 0,22 MPa, para un asiento admisible de 2,5 cm, con columnas de hasta 0,85m de diámetro y longitud estimada de 6 metros.

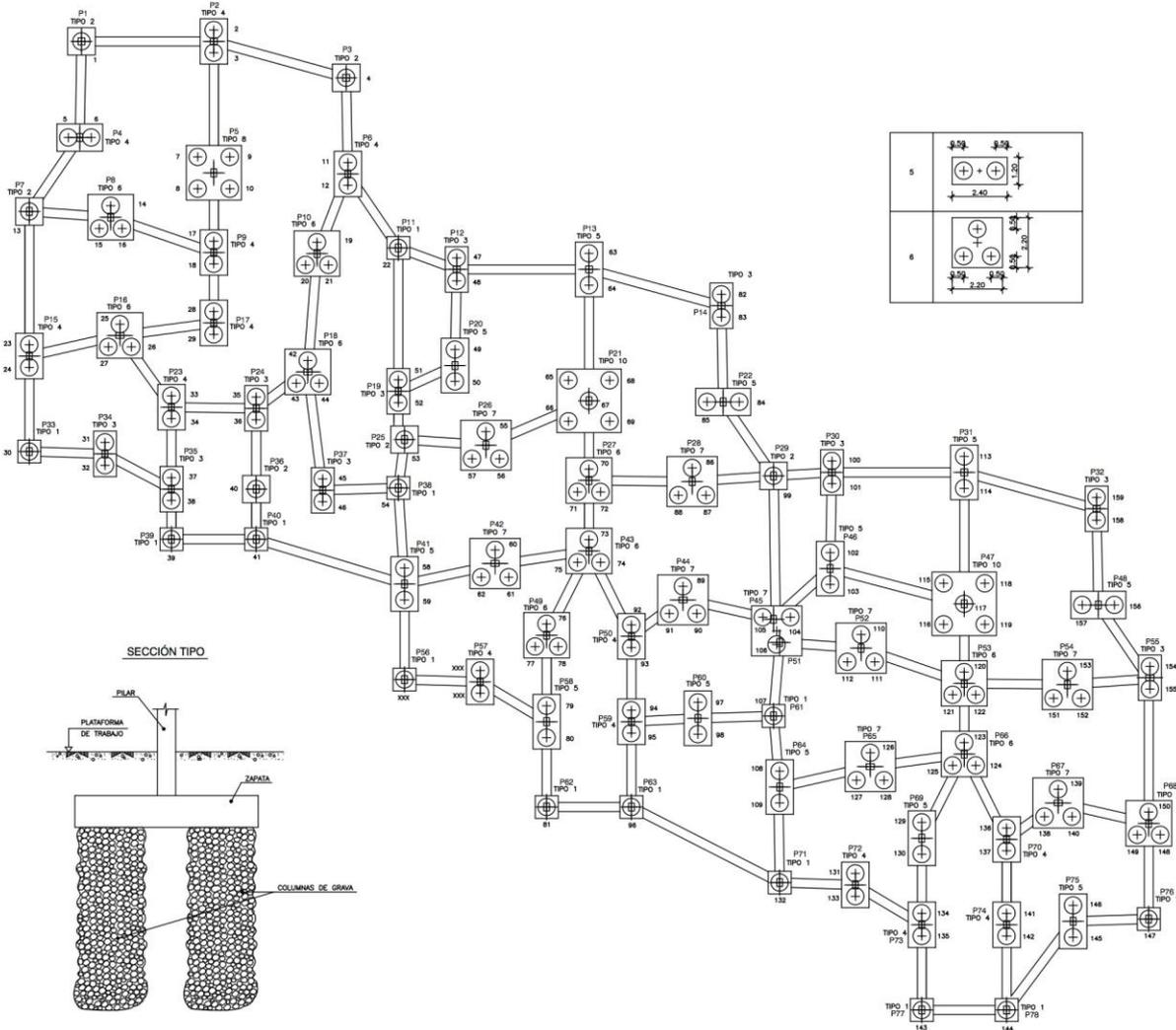


Figura 17. Planta fundaciones viviendas en Altos de Estepona (Malaga)

CONCLUSIONES

Las columnas de grava se han empleado en forma satisfactoria para apoyar las fundaciones superficiales de estructuras sobre el suelo mejorado por las mismas, ya sea para plateas o zapatas.

El control de asientos admisibles generalmente controla el diseño de este tipo fundaciones.

Su campo de aplicación técnico-económico esta situado como una alternativa a las fundaciones profundas, en función de la configuración y cargas de la estructura, y el perfil geotécnico del terreno del emplazamiento de la obra.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a Kellerterra S.L. por el uso de la información presentada.

BIBLIOGRAFIA

Balaam, N.P. y Booker, J.R. 1981. Analysis of rigid rafts supported by granular piles. Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech. 5,379-403

Dossier Columnas de Grava y procedimientos. KELLER TERRA.

M.P. Moseley and H.J. Priebe, "Ground Improvement" (p 1-39). Vibro techniques.

Priebe, H.J. 1995. Design of vibro replacement. Ground Engineering. 28:10,31-37.

Priebe, Heinz-J. (1990): The prevention of liquefaction by vibroreplacement.

Recomendaciones para el diseño, el cálculo, la ejecución y el control de las columnas de grava bajo edificios y estructuras sensibles a los asentos. Version 15/10/04 . Reemplaza a la Norma NFP 11-212 (referencia DTU 13.2 Travaux de bâtiment – Travaux de fondations profondes pour le bâtiment).

Sagaseta Millán, César . Avances en el diseño de las técnicas de mejora del terreno. Jornadas Técnicas SEMSIG-AETESS. 6ª Sesión: Técnicas de Mejora del Terreno. Madrid 2006

Van Impe, W. y De Beer, E. 1983. Improvement of settlement behaviour of soft layers by means of stone columns. Proc. 8th Eur. Conf. Soil Mech. Found. Eng. Helsinki. 1,309-312.

Vibroflotación y Columnas de Grava. Curso sobre Mejora y Refuerzo del Terreno. CEDEX, Madrid, 1998.