

PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS

TÉCNICAS DE CIMENTACIÓN ESPECIAL

MEJORA DEL TERRENO CON COLUMNAS DE GRAVA POR VÍA SECA

Noviembre 2017

ÍNDICE

1.	Descripción.....	1
2.	Rango de aplicación.....	2
3.	Estudio geotécnico.....	2
4.	Diseño y cálculo.....	3
4.1	Diseño	3
4.2	Cálculo	4
5.	Ejecución y aspectos a tener en cuenta durante la misma.....	5
5.1	Descripción de la ejecución.....	5
5.2	Grava a utilizar.	6
5.3	Medios e instalaciones auxiliares requeridos.	7
5.4	Preparación del terreno.....	7
5.5	Rendimientos de ejecución	10
5.6	Diámetro real de ejecución de la columna.....	10
5.7	Otros aspectos a considerar.....	11
6.	Aseguramiento de la calidad	11
6.1	Control de ejecución.....	11
6.2	Control de la grava.	16
7.	Proveedores	17
8.	Coste	17
9.	Grado de satisfacción y resultado final.....	18

1. Descripción.

Las columnas de grava son una técnica de mejora del suelo consistente en la introducción de grava en el terreno mediante vibración. Con esta mejora se consigue una mayor compacidad del terreno de cimentación, lo que se traduce fundamentalmente en una reducción de los asentos ante las acciones transmitidas por la cimentación y una mejora de las características resistentes del suelo.



Figura 1. Máquina de columnas de grava preparada para comenzar la perforación

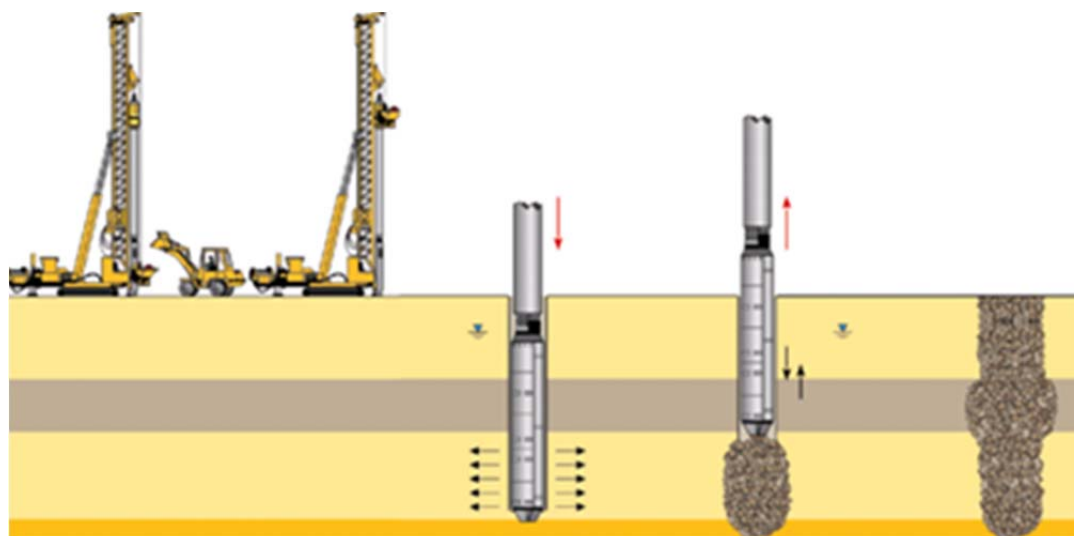


Figura 2. Fases de ejecución de una columna de grava

2. Rango de aplicación.

El uso de la técnica de columnas de grava es muy recomendable cuando nos enfrentamos a un problema de asientos no admisibles en una cimentación y que respecto a capacidad portante no presenta demasiados problemas.

La utilización de las columnas de grava como elementos portantes es una técnica sobre la que no existe gran experiencia, por tanto debe de realizarse adoptando precauciones.

Su aplicación óptima es en terrenos con suelos granulares de compacidad muy blanda o media ($N_{SPT} < 20$) para estructuras que transmitan al terreno cargas repartidas de escasa entidad ($< 2 \text{ Kg/cm}^2$) sin importantes cargas concentradas puntuales y en superficies importantes.

El CTE-SE-C define como suelos muy flojos o muy blandos ($N_{SPT} < 10$). Estos suelos tienen unos parámetros resistentes y deformacionales no caracterizados con un valor mínimo en la tabla D-23 del citado código. Por ello las columnas de grava deben mejorar como mínimo a los terrenos que tienen estas características de baja compacidad ($N_{SPT} < 10$).

3. Estudio geotécnico

Los estudios geotécnicos que debemos de afrontar en un suelo para valorar de manera correcta la aplicación de esta técnica son los que usaríamos para realizar un correcto cálculo de asientos.

De manera general indicamos que hay mucha formulación empírica para el cálculo de asientos en un terreno sometido a las acciones de una cimentación superficial. En muchas de estas formulaciones con los resultados de un ensayo de penetración suele ser suficiente para el cálculo de un asiento aproximado.

Cuanto más datos conozcamos del terreno el cálculo se podrá realizar de manera más aproximada y efectiva. En las obras que hemos participado, con suelos granulares, el cálculo de asientos se realizó según el método de Stennbreinner dando resultados teóricos muy cercanos a los que posteriormente se comprobaron en la realidad.

Para aplicar este último método es necesario tener el módulo de deformación del suelo y su coeficiente de Poisson. Ambos parámetros obtenidos a partir de un ensayo de corte directo de una muestra inalterada.

También es importante contar con ensayos edométricos, que nos permitan valorar la velocidad de consolidación y calcular si los ensayos que se van a producir serán relativamente inmediatos o tendrán una movilización larga en el tiempo, conocimiento imprescindible para valorar las posibles soluciones de cimentación.

4. Diseño y cálculo

4.1 Diseño

Los parámetros a definir en un diseño de una mejora del terreno mediante columnas de grava son el diámetro, la disposición en planta y la profundidad del tratamiento.

El diámetro final de una columna de grava depende siempre del terreno. Normalmente los diámetros varían entre 0,90 m y 1,20 m, siendo habitual considerar en el cálculo a priori que el diámetro de la columna es de 1,00 m.

Para una misma densidad de puntos de tratamiento por unidad de área, la distancia entre sus centros es máxima en una malla de triángulos equiláteros, por ello se realizan distribuciones triangulares variando el espaciamiento entre columnas dependiendo del cálculo.

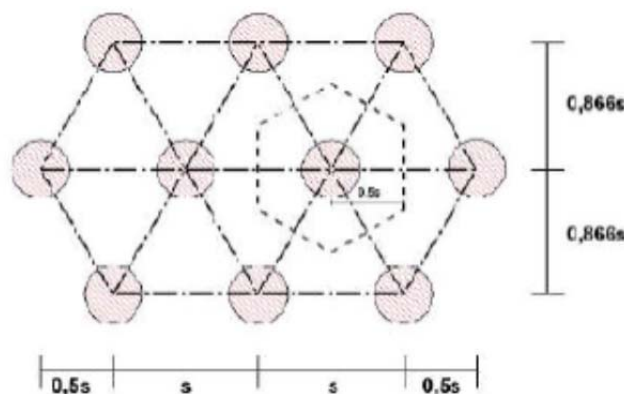


Figura 3. Esquema de malla tipo de columnas de grava

Para repartir los asientos de manera uniforme a todo el terreno es necesario que debajo de la losa de cimentación haya una capa de un espesor entre 30 y 50 cm homogénea y granular. En las obras en las que hemos participado ha funcionado muy bien el extendido de un material limpio de cantera de granulometría 0/300 mm (rachón).



Figura 4. Material homogéneo en formación de encepado de columnas de grava

4.2 Cálculo

La Guía de Cimentaciones en Obras de Carreteras del Ministerio de Fomento es la normativa de referencia a nivel nacional para el cálculo de las columnas de grava. En su artículo 7.2.7 establece los criterios y fórmulas a seguir para el cálculo.

El asiento de un terreno mejorado con columnas de grava se calcula con un factor de reducción sobre el asiento del terreno sin mejorar, teniendo en cuenta el porcentaje de sustitución de suelo.

Para el cálculo de asientos en el terreno natural hay diferentes métodos. En las obras en las que hemos participado se utilizó el método elástico de Steinbrenner para Cálculo Elástico de Asientos comprobándose a posteriori que los resultados alcanzados se asemejaban mucho a la estimación realizada.

Una vez realizado el cálculo de asientos que tendría el terreno natural con las cargas aplicadas se sigue la metodología de la Guía de Cimentaciones, en la cual a partir del porcentaje de sustitución de suelo se obtiene un factor de reducción de asiento.

La profundidad de tratamiento tendrá que ser tal que logre unos asientos que la estructura en cuestión pueda adsorber y siempre tendrá que ser tal que mejore el terreno con compacidad muy flojas ($N_{SPT} < 10$).

Si la velocidad de consolidación del suelo es baja sería necesario hacer un análisis de consolidación. En caso de que las velocidades sean altas el asiento se produce de manera instantánea. Este asiento instantáneo

hace que una vez acabada la construcción del elemento los asientos debidos al peso propio de la estructura ya han sido materializados y no se deberían tener en cuenta para analizar los asientos diferenciales con otras estructuras y/o elementos.

5. Ejecución y aspectos a tener en cuenta durante la misma.

5.1 Descripción de la ejecución.

De manera descriptiva la ejecución de la unidad se realiza de la manera siguiente:

Una vez posicionada la máquina en su localización se hince el vibrador, llevándolo hasta la profundidad de diseño o hasta rechazo si éste se produce antes. La longitud de las columnas puede ser menor a la de diseño en caso de que el equipo alcance antes el rechazo.

La incorporación de gravas al terreno se realiza a través de una tolva alimentada a nivel del suelo con una pala cargadora. La grava baja a través del tubo alimentador interior hasta llegar a la punta inferior del vibrador donde se encuentra el orificio de salida.

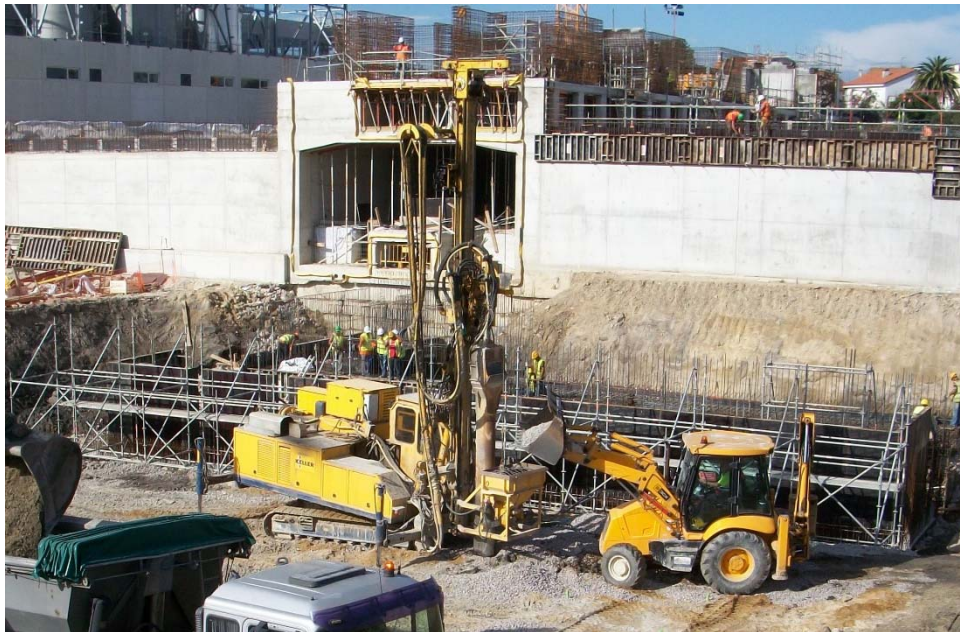


Figura 5. Alimentación de tolva de máquinas de columna de grava con pala mixta

Alcanzada la profundidad de diseño 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 tiene que volver a bajar sobre el material aportado para compactarlo por medio de la presión ejercida por el útil así como por la vibración que éste transmite.

A medida que las capas inferiores se van compactando, se va subiendo el mástil realizando pasadas sucesivas de amplitud ente 50 y 100 cm para conseguir rellenar toda la perforación hasta alcanzar la superficie y asegurar la continuidad de la columna en todo su desarrollo y una adecuada compactación que permita a la columna desarrollar la capacidad de carga para la que ha sido dimensionada.

Como se mencionó en el apartado de diseño una vez ejecutadas las columnas se tiene que regularizar la base de apoyo mediante la aportación de un material homogéneo y drenante.

5.2 Grava a utilizar.

Los distintos subcontratistas suelen requerir la utilización de gravas que cumplan las siguientes características:

Ángulo de rozamiento de la grava: $\alpha = 38^\circ$ (rodado) - $\alpha = 40^\circ - 42^\circ$ (machaqueo)

Desgaste Ensayo de Los Ángeles :< 35 %.

Granulometría: 10-40 mm

Finos:<2%

En Galicia es muy común las gravas de machaqueo d naturaleza granítica. Estas gravas nunca tienen un desgaste menor del 35%. Dependiendo de la situación de las canteras y la calidad de su producto pueden oscilar valores entre 36% y 38%, aunque rara vez las canteras se comprometen por contrato a suministrar una grava que tenga un desgaste menor del 40%.

Este tipo de gravas graníticas las hemos usado sin que existan problemas de ejecución ni de eficacia de la solución de la columna de grava.

El desgaste es un parámetro que se fija con el fin de mantener la grava relativamente limpia, homogénea y drenante una vez que se ha ejecutado la columna de grava.

Un aspecto importante es la granulometría de la grava, aunque no suele dar problemas su cumplimiento, ya que las canteras tienen unos parámetros de calidad en la utilización y mantenimiento de sus procesos de tamizado que aseguran la correcta granulometría del material. El problema que puede surgir durante la ejecución de las columnas con el tamaño de la grava, es que sea muy gruesa y se quedé en el tamiz superior de la tolva de vertido, complicando la ejecución con paradas indeseables y la necesidad de recurrir a limpiezas manuales del tamiz y desatracos del equipo.

5.3 Medios e instalaciones auxiliares requeridos.

Para la ejecución de las columnas necesitamos contar con una máquina cargadora que alimente de grava a la máquina de columnas. Por las dimensiones de la tolva de alimentación suele utilizarse una retroexcavadora mixta ya que el tamaño de su cazo se adapta mejor que el de una pala cargadora de mayor tamaño.

Es importante contar con una superficie de acopio de la grava relativamente cercana a la zona de trabajo y con acceso a las bañeras provenientes de cantera. De esta manera evitaremos acopios intermedios de material que siempre suponen un encarecimiento de la unidad.

Hay que tener en cuenta que el consumo teórico diario de grava puede estar entre las 800 y 1.000 t con unos rendimientos muy buenos de ejecución. Será necesario fijar con la cantera este ritmo de suministro y gestionar el acopio en obra de manera efectiva y en concordancia con la cantera y el transporte para evitar paradas indeseadas de la maquinaria.

También es importante contar con un equipo de topografía correctamente dimensionado. Recomendamos replantear la posición de cada columna de grava y su profundidad si el diseño no se realiza hasta rechazo. Este replanteo y su identificación con el número de columna del plano de ejecución serán necesarios para que el parte diario, del que hablaremos en el apartado de aseguramiento de la calidad, se cubra correctamente.

5.4 Preparación del terreno

La máquina de ejecución de columnas de grava es una máquina muy pesada y debido a su configuración bastante inestable mientras está ejecutando la columna, ya que su centro de gravedad está bastante alto.



Figura 6. Dificultades de posicionamiento de una máquina columnas de grava

Cómo las zonas en las que se actúa con la técnica de las columnas de grava son zonas en las cuales el material es de escasa compacidad es normal que se produzcan problemas con la puesta en obra de la maquinaria, con hundimientos e inestabilidades indeseables.

Es necesario tener en cuenta que aunque se consiga una superficie estable de trabajo, la propia ejecución de las columnas por parte de la máquina y su movimiento puede inestabilizar la superficie y aunque sea factible la ejecución de las columnas después se podrán gastar bastantes recursos en la retirada de material no válido y la limpieza de la plataforma.



Figura 7. Plataforma de ejecución de columnas de grava

Para solventar este problema y considerando la capa granular homogénea que hay que extender a posteriori de las columnas como encepado de las mismas, nosotros hemos optado con éxito por realizar de manera previa una preparación de la plataforma mediante un extendido de geotextil y una capa de material limpio de cantera grueso en un espesor de entre 30 y 40 cm.

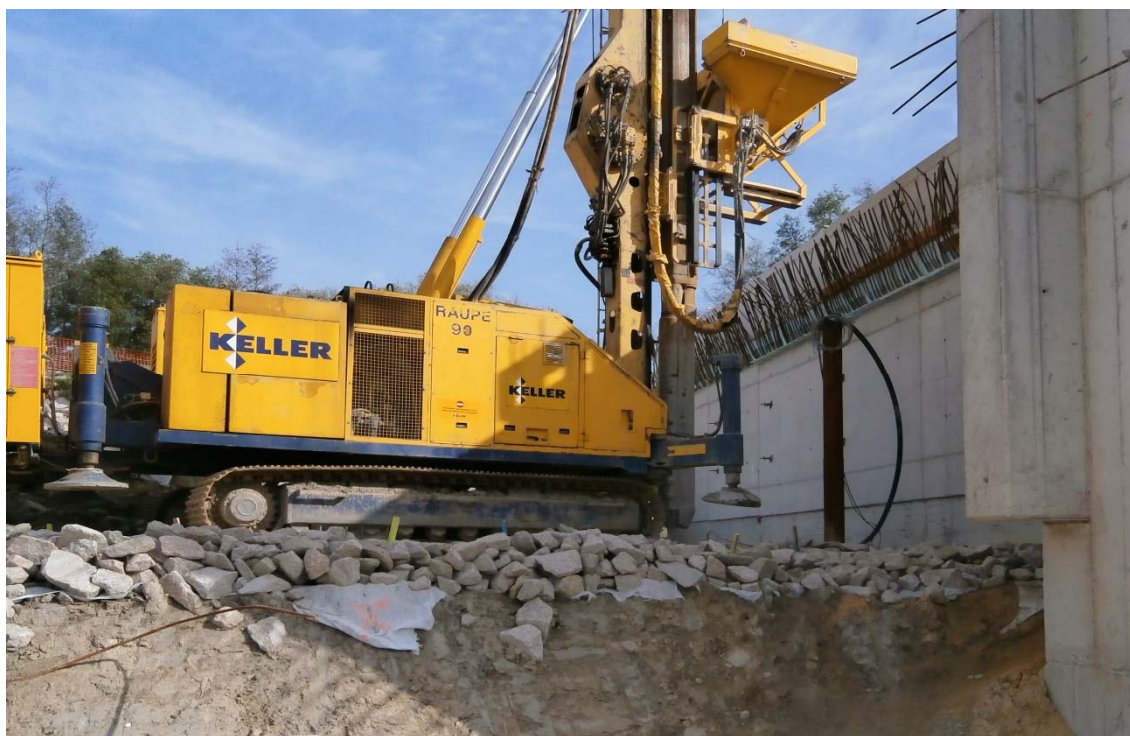


Figura 8. Capa previa de piedra y geotextil separador en plataforma de trabajo

De este modo se consigue estabilizar la plataforma de trabajo, que de un modo general el encachado de piedra no se contamine con el relleno inferior por la separación efectiva del geotextil.

Posteriormente a la ejecución de las columnas se receba con una capa de grava de 10 cm este encachado previo formando de modo definitivo el encepado completo con una potencia de entre 40 y 50 cm.

Ese modo de ejecución “a priori” de parte del encepado hace mejorar también el plazo global de los trabajos.

5.5 Rendimientos de ejecución

Los rendimientos de ejecución de las columnas varían dependiendo de la potencia de la maquinaria utilizada, la longitud de las columnas y de la compacidad del terreno.

Un rendimiento teórico máximo cuando hablamos de columnas de longitud importante, sobre 8-10 m, en terrenos de compacidad muy floja y sin inconvenientes durante la producción puede rondar entre los 180 y 200 m.

Según nuestra experiencia estos rendimientos máximos se convierten en rendimientos medios reales en el entorno de 120 m en cuanto las longitudes de las columnas son menores y se requiere más movimientos de las máquinas y teniendo en cuenta inconvenientes y paradas de producción que se producen por múltiples motivos.

5.6 Diámetro real de ejecución de la columna

Cómo dijimos en el apartado de diseño el diámetro final de una columna de grava depende siempre del terreno. La reacción que ofrece el terreno al movilizar su empuje lateral frente a la acción de compresión de la grava de la columna efectuada por la vibración y el empuje estático del vibrador determinará el diámetro final de la columna.

La expansión de una columna irá ligada a los valores de presión límite (e indirectamente a los módulos presiométricos) del suelo atravesado, de modo que cuanto más baja sea la presión límite más se expandirá la columna.

Normalmente los diámetros varían entre 0,80 m y 1,20 m, siendo habitual considerar en el cálculo a priori que el diámetro de la columna es de 1,00 m.

Dado que el cálculo del número de columnas se realiza a partir de la relación de sustitución del suelo, hay que prestar atención a la evolución del diámetro según su ejecución.

La determinación del diámetro de la columna, se realiza en obra por parte del maquinista. A partir de la profundidad alcanzada, dato ofrecido por el registro continuo (ver aseguramiento de la calidad), y la grava consumida en cada columna se estima el diámetro de la misma. El consumo de la grava en cada columna se

realiza en obra mediante el conteo del número de cazos de la pala alimentadora. Este método no es muy preciso, pero es la única manera de efectuar el cálculo del diámetro de modo rápido y eficaz. Por ello es recomendable al principio de los trabajos hacer alguna prueba que determine el volumen medio estimado de cada cazada de la pala.

En el parte diario de trabajos (ver aseguramiento de la calidad) el maquinista deberá de indicar el diámetro estimado de cada columna.

Una vez vista la evolución de los diámetros de las columnas en cada zona se podrá recalcular la separación de las mismas para que el coeficiente de sustitución sea el calculado.

5.7 Otros aspectos a considerar

El confinamiento del terreno que circunda la columna, es una de las razones que hace que esta técnica funcione. Por este motivo la columna tiene que estar confinada lateralmente y es necesario mantener distancias de seguridad respecto a taludes de terraplén.

Las recomendaciones de distancia suelen ser de 1,5 diámetros desde el borde la columna hasta la cabeza de talud.

6. Aseguramiento de la calidad

6.1 Control de ejecución.

Asegurar la calidad de la ejecución de la columna de grava es una tarea sencilla, pero a la vez la comprobación de la calidad final del producto acabado resulta muy complicada.

El concepto de funcionamiento de una columna de grava viene determinado por que en el terreno natural se introduce otro material con unas características mucho mejores. De tal manera que los cálculos de la columna se basan en el factor de sustitución de suelo (aunque no se sustituye) y en la profundidad alcanzada por la columna. Asegurar durante la ejecución estos dos parámetros de diseño es sencillo.

Al ser la columna de grava una técnica de mejora del terreno global no hay métodos de ensayo eficaces que permitan comprobar cómo se comporta el nuevo terreno formado por la dualidad *columna de grava-terreno natural compactado* en una superficie lo suficientemente amplia y con influencia a varios metros de profundidad. Habría que recurrir a pruebas de carga a escala real, obviamente con una logística complicada.

En ciertas bibliografías se recomienda la ejecución de ensayos de comprobación sobre la columna de grava ejecutada a modo de aseguramiento de la calidad. Hemos visto que se propone el uso de ensayos de

penetración dinámica o de placas de cargas. El primer problema que nos hemos encontrado en obra para aplicar estas técnicas de control es en primer lugar determinar el lugar del ensayo. Una vez que se han realizado las columnas de grava en una zona no es sencillo identificar el centro de una columna de grava para posicionar la maquinaria necesaria para realizar el ensayo. Recuperamos parte de la foto de la figura 7 para ilustrar la problemática:



Figura 9. Plataforma de trabajo una vez ejecutadas las columnas de grava

Nosotros hemos tenido experiencia con la ejecución de penetrómetros de control y los resultados fueron insatisfactorios. En primer lugar se identificaron las columnas por los puntos de replanteo iniciales, con el consiguiente error en la determinación. En segundo lugar la naturaleza de la grava hace que el varillaje sufra deformaciones a medida que se realizan los golpes y por lo tanto la columna de ensayo tenga desviaciones sobre la vertical teórica. Con ello se obtuvieron resultados de golpeo incoherentes que en concordancia con la Dirección de Obra se achacaron a que el varillaje se salía de la columna.

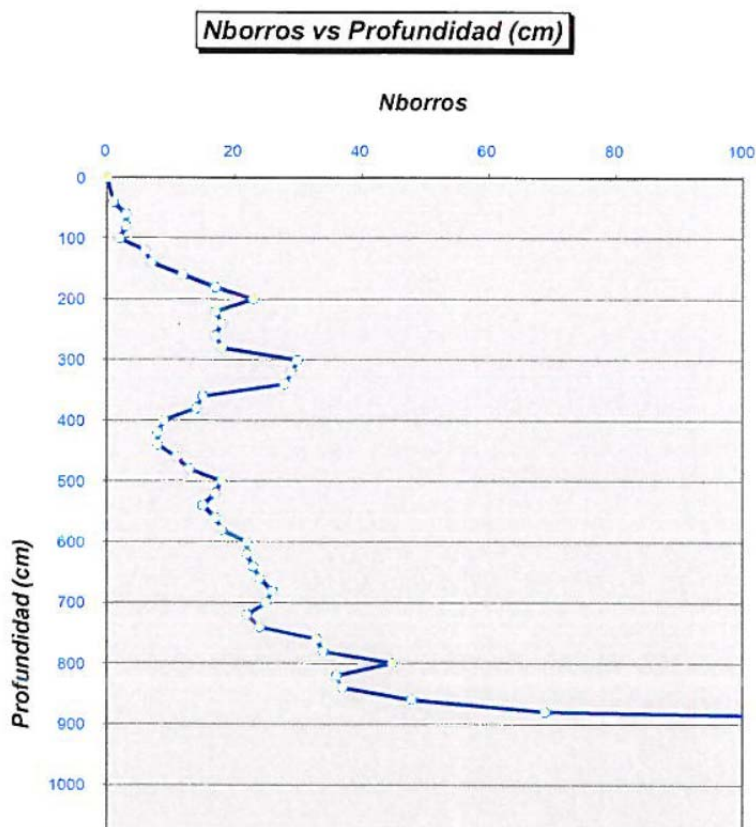


Figura 10. Valores de penetración ensayos borros en una columna de grava

Tampoco las placas de carga creemos que sean un método de control efectivo. Dadas las pequeñas dimensiones de la propia placa utilizada para la realización del ensayo se limita la distribución de tensiones en el terreno, por lo que el ensayo sólo es representativo para un espesor de aproximadamente 1 metro por debajo de la placa y no para toda la profundidad del terreno mejorado. También cabe señalar que este ensayo no modeliza adecuadamente la tipología de apoyo de zapata o losa de cimentación, en cuanto al reparto de carga, ya que se apoya sobre la columna de grava y no sobre el terreno colindante.

Por estos motivos de dificultad de control del producto final somos partidarios de que se realice un control exhaustivo durante el proceso de ejecución de las columnas, recurriendo a los registros de la máquina y a los partes diarios realizados por el maquinista.

En un 100% de las columnas se recomienda realizar un registro de los siguientes parámetros de ejecución:

- El tiempo empleado en su ejecución.
- La profundidad realmente ejecutada en función del tiempo.
- La intensidad de corriente empleada por el vibrador en función del tiempo.
- La presión de contacto empleada por el vibrador en función del tiempo.
- La admisión de grava de cada columna y por lo tanto el diámetro medio de cada columna.

La maquinaria actual obtiene estos registros de manera automática, excepto la admisión de grava de cada columna, y su análisis es fundamental para asegurar la calidad de la unidad ejecutada.

En los registros aparecerán además tres gráficos; en uno de ellos se representará la profundidad del vibrador (eje horizontal del gráfico) en función del tiempo (eje vertical), mientras en los otros se representará la intensidad de corriente y la presión de contacto empleadas por el vibrador (eje horizontal del gráfico) en función del tiempo (eje vertical). La presión de contacto se indica en bar o kN, y la intensidad de corriente en amperios.

La parte superior de ambas gráficas corresponderá a la fase de perforación, en la que sólo se produce la penetración del vibrador, sin aportación de grava, hasta la profundidad de rechazo, o de diseño en el caso de columnas flotantes.

Una vez alcanzada la profundidad máxima, se comienza a representar la aportación de la grava y su compactación en sucesivas fases, realizando las columnas desde el fondo hasta la superficie. Cada tolva aportada de material estará representada en los gráficos mediante cada fase de compactación (líneas en zig-zag), en las que el vibrador asciende y desciende en pasadas sucesivas de entre 0,5 m y 1,0 m de amplitud.

Dependiendo de la maquinaria utilizadas los parámetros recomendables de intensidad de corriente y de la presión de contacto empleada por el vibrador son los siguientes:

Intensidad de la corriente:

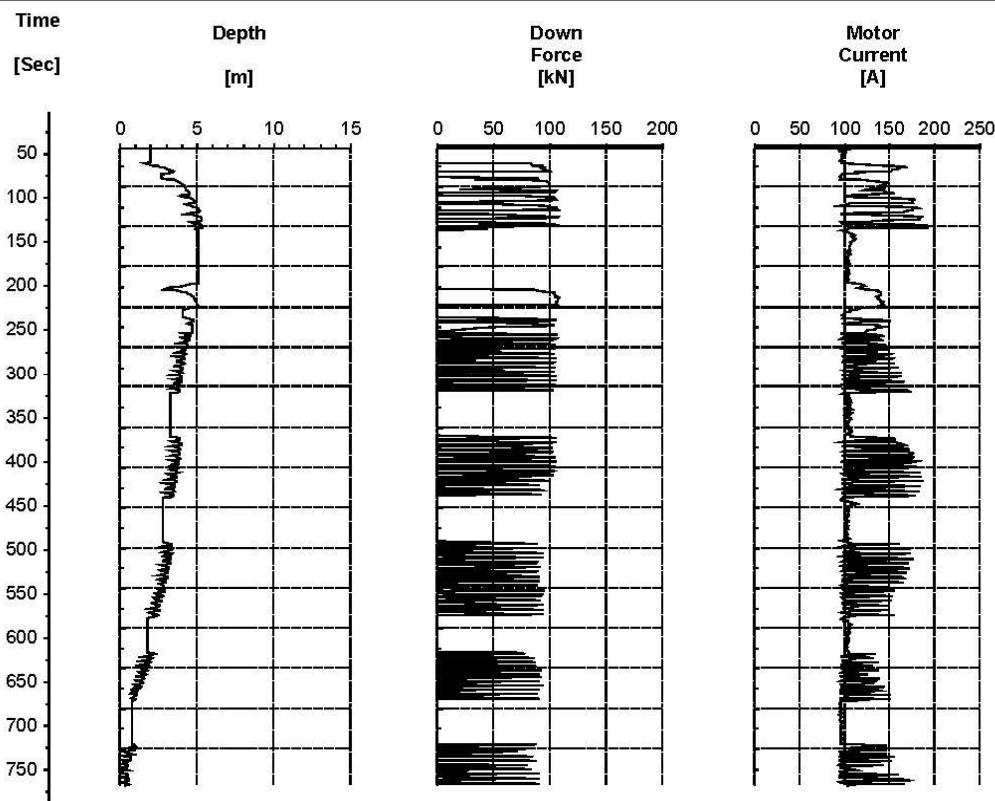
- Entre 90 y 180 amperios en la fase de perforación.
- Entre 90 y 150 amperios en la fase de compactación.

Presión de contacto:

- Entre 60 y 120 kN (100 y 180 bares) en la fase de perforación.
- Entre 60 y 110 kN (100 y 160 bares) en la fase de compactación.

A modo de ejemplo se incluye una hoja de registro de una de las obras en la que hemos participado ejecutada por Keller Terra.

Keller Grundbau GmbH		M5 Inv.No.: 91301533 / Version: 01.03.09		 Keller Grundbau GmbH
Date:	27.06.2013 08:19:34	Date UTC:	27.06.2013 06:19:34	
Site:	k09957v	City of Site:	vigo	
Point No.:	22	Lot:	103	
		Program:	Vibro 3	



Event	Time	Depth	E.Energy Point	E.Energy Column	Slurry Point	Weight Net	Weight Total	Inclination Rgt/Lft	Inclination Frd/Bck	Vibro Temp.		
No	Type	Description	hh:mm:ss	[m]	[kVAh]	[kVAh]	[cbm]	[to]	[to]	[degree]	[degree]	[°C]
01	09	Start Point	08:19:37	2,0	0,00	0,00	0,00	1,07	0,00	+0,4	-0,3	38
02	10	End Point	08:32:51	-0,3	17,68	0,00	0,00	0,78	0,00	+0,0	+0,5	64

End Point No: 22	Total Time: 13,23 min Column Length: 5,4 m	Max. Depth: 5,4 m
------------------	---	-------------------

Figura 10. Registro de datos obtenido de la maquinaria tras la ejecución de una columna de grava

El otro documento de aseguramiento de la calidad es el parte diario de trabajos, que sirve para identificar las columnas realizadas, comprobar la profundidad alcanzada junto con el registro y determinar la grava introducida.

Cómo comentamos en apartados anteriores es recomendable al principio de los trabajos hacer alguna prueba que determine el volumen medio estimado de cada cazada de la pala alimentadora de la máquina.

Mostramos un parte diario de trabajos que incluye toda la información necesaria:

[illegible]

Figura 11. Parte diario real de ejecución de una columna de grava

6.2 Control de la grava.

En una columna también es importante el control de la grava. Para ello se realizará un ensayo semanal durante la ejecución de las columnas de grava sobre una muestra de material recogido en obra para verificar que el mismo cumple con las características exigidas:

- Limpia, sin presencia de finos.
- Granulometría limitada: entre 10-40 mm.
- Desgaste de Los Ángeles inferior a 40.

7. Proveedores

En el territorio nacional no hay muchos proveedores que utilicen esta técnica de columnas de grava por vía seca.

Nosotros hemos trabajado con Keller Cimentaciones, que antiguamente formaba parte del grupo Terratest. El otro proveedor con el que hemos contactado es el grupo Rodio-Kronsa, aunque nunca hemos tenido la oportunidad de trabajar conjuntamente.

8. Coste

En este punto presentamos un orden de magnitud de los costes de la unidad de columna que nos hemos encontrado en proyectos realizados. También relacionamos todos los conceptos y elementos que supondrán un coste a la hora de ejecutar la columna de grava.

Los distintos elementos, su rendimiento y su coste se presentan a continuación:

- Ud Transporte y montaje de maquinaria.

Obviamente la medición dependerá del número de fases en las que se ejecutarán las columnas. La magnitud del coste es del entorno de 10.000 €.

- ml Ejecución de columna de grava.

Es el precio por metro lineal de columna que nos remita el proveedor. Será necesario tener en cuenta si incluye la aportación de la pala alimentadora y el suministro de grava y en qué condiciones.

Habitualmente la medición se realiza desde la plataforma de trabajo, que por diferentes motivos puede no coincidir con la parte superior de la columna. En tal caso, si la columna de grava no tiene que prolongarse hasta la cota de plataforma puede cortarse el suministro de grava en la zona que no sea necesaria la columna.

Un precio de referencia que incluye la pala alimentadora y que no incluye el suministro de grava es de 30 €/ml.

- t Suministro de grava.

En este elemento es importante contabilizar correctamente las pérdidas de material. Ante la incertidumbre previa del diámetro de la columna aconsejamos utilizar para el cálculo del coste previsto un diámetro máximo (1,20 m por ejemplo).

A partir de aquí se pueden estimar una densidad de 1,7 t/m³ y unas pérdidas del 30% del material, que seguramente quede extendido en la plataforma y mezclado con el terreno natural.

Se podría intentar que el ejecutor de las columnas asuma el riesgo de las pérdidas de material y de diámetro introduciendo la grava en el precio de contratación de la columna.

Con los aspectos comentados se puede estimar el consumo máximo de grava por columna en 2.5 t/ml, que dependiendo de las canteras existentes y de la distancia de transporte pueden suponer un coste en el entorno de 20 €/t

- h Equipo de tierras en arreglo explanada.

Cómo dijimos será necesario dedicar recursos a la preparación de la explanada para mejorar los rendimientos de la maquinaria y evitar sobrecostes a posteriori.

Los rendimientos de esta maquinaria y sus precios pueden variar en gran medida dependiendo del material y el ámbito geográfico de trabajo. Nuestra experiencia es que el coste puede rondar el 1,5 €/m², que repercutirá en el precio de la columna dependiendo de su profundidad y reparto.

- M2 Formación de encepado.

Normalmente la formación del encepado será de abono cómo otra unidad de obra, pero es necesario tenerlo en cuenta para el cálculo del coste correcto de la solución global de las columnas.

En la formación del precio habría que considerar el geotextil, el material de cantera en un espesor de 50 cm y el equipo necesario para su ejecución.

- Imprevistos.

Personalmente siempre me gusta considerar un pequeño porcentaje de coste imprevisto en el cálculo del coste de una unidad. En el caso de las columnas los imprevistos principales pueden ser paradas ajenas al subcontratista de la maquinaria, las cuales nos cobrará, y el arreglo de la plataforma de trabajo.

Cuando realizo mis cálculos de coste supongo un 5% del coste total de la unidad.

Con estos elementos se podrá componer el precio de coste directo que dependerá de muchos factores, pero que para tener un orden de magnitud para un número rápido podríamos asumir un coste de 50 €/ml.

9. Grado de satisfacción y resultado final

Nosotros hemos trabajado con esta técnica en la obra de la EDAR LAGARES en Vigo. Obra cuya propiedad fue ACUAES, la Asistencia Técnica a la Dirección Facultativa UTE FULCRUM – G.O.C. y el Contratista UTE EDAR LAGARES (GS INIMA, OHL, CORSÁN – CORVIAM E ISOLUX INGENIERÍA).

El diseño de la solución de las columnas fue realizado por CONSULTORÍA DE INGENIERÍA, MEDIO AMBIENTE Y ARQUITECTURA, S.L. (CIMARQ, S.L.) y la ejecución de las columnas por KELLER CIMENTACIONES.

En esta obra se hizo una medición importante de columnas de grava, superior a 12.000 ml y fueron empleados en elementos diversos, desde conducciones hidráulicas de gran diámetro hasta depósitos de hormigón.

El material sobre el que se apoyaban la mayoría de los elementos eran rellenos litorales areno-limosos de compacidad baja y con una velocidad de consolidación alta.

En todos los elementos los asientos reales conseguidos fueron muy similares a los inicialmente estimados dando buenos resultados de funcionamiento global y siendo el grado de satisfacción de utilización de la técnica bueno por parte de la Propiedad, la Dirección Facultativa y el Contratista.