

Valores límites de la resistencia al corte sin drenaje para la aplicación de columnas de grava en suelos muy blandos

Enmanuel Carvajal Díaz¹
Keller Cimentaciones, SLU

Goran Vukotić
Keller Cimentaciones, SLU

Tema : Aplicaciones de sistemas de tratamiento, mejora y refuerzo del terreno

RESUMEN

Se presenta un análisis de la resistencia al corte sin drenaje del suelo y su influencia en el comportamiento de columnas de grava ejecutadas mediante equipos de vibración profunda. En este sentido se describe la relación entre la capacidad de carga de las columnas de grava y el nivel de confinamiento y soporte lateral proporcionado por el suelo circundante a las columnas. Dicho confinamiento y soporte lateral puede expresarse en términos de la resistencia al corte sin drenaje en el caso de arcillas blandas, que son habitualmente tratadas mediante columnas de grava. En el análisis se realiza un recuento de varias metodologías para la estimación teórica de la capacidad de carga de las columnas aisladas y grupos de columnas, esencialmente en función de la resistencia al corte sin drenaje. En especial, se describe la capacidad real de las columnas al considerar los efectos que el procedimiento de ejecución por vibración profunda produce en el suelo alrededor de las columnas, y al respecto se citan y describen varios casos prácticos donde se comprueba este hecho. Asimismo, se cita y describe un estudio de laboratorio donde se reproducen los efectos del método de ejecución por vibración profunda y se estudian los efectos producidos en el suelo alrededor de columnas de grava. Entre las conclusiones más relevantes puede resaltarse que (a) el factor limitante más importante asociado a la aplicación de columnas de grava en suelos de muy baja resistencia al corte sin drenaje, consiste en la adopción de un método de ejecución que haga posible la formación de las columnas, (b) el comportamiento y capacidad final del suelo blando tratado mediante columnas de grava depende en gran medida de la velocidad de aplicación de las cargas, (c) las columnas de grava pueden aplicarse en suelos extremadamente blandos con resistencias al corte sin drenaje de hasta 5 kPa, de acuerdo a la experiencia en obras reales y al análisis que se presenta.

Columnas de grava, resistencia al corte sin drenaje, efectos de ejecución, suelos muy blandos, consolidación, sensibilidad.

¹ Enmanuel Carvajal Díaz, e.carvajal@keller-cimentaciones.com. Calle Argentina 15, Alcalá de Henares, 28806, Madrid.

1 INTRODUCCIÓN

La mejora de suelos mediante columnas de grava por vibro-sustitución se ha venido empleando durante décadas en muchos tipos de obras, situadas en zonas con suelos muy blandos. Inicialmente, la aplicación de columnas de grava se consideraba limitada en los casos de presencia de suelos caracterizados por una muy reducida resistencia al corte sin drenaje, c_u , con valores del orden de 15 kPa. Sin embargo, tras la acumulación de una extensa experiencia en el tratamiento de suelos extremadamente blandos mediante columnas de grava, y a partir de un mejor estudio del problema, hoy en día se han podido establecer unos valores de referencia para la resistencia al corte sin drenaje que puede llegar a limitar la aplicación de columnas de grava con valores de aproximadamente 5 kPa.

En los apartados siguientes se describen el problema y las metodologías para analizar la aplicabilidad de las columnas de grava en suelos muy blandos, básicamente en función de la capacidad de soporte de las columnas en estos tipos de suelo. Asimismo, se presentan algunas experiencias con este tipo de aplicaciones.

2 PROCEDIMIENTO DE EJECUCIÓN Y EFECTOS EN EL SUELO

Las columnas de grava, o vibro-sustitución, es una técnica de vibración profunda, realizada mediante perforación y compactación por desplazamiento y sin extracción de suelo, introduciendo un vibrador en profundidad que desplaza el suelo movilizándolo su empuje lateral pasivo, y finalmente deposita y compacta la grava. Figura 1.

En suelos arenosos este procedimiento produce la densificación del material circundante. Particularmente, en arenas limpias no es necesario introducir grava, y el método suele denominarse vibro-compactación.

En arcillas es necesario introducir grava, y como consecuencia del método de ejecución se produce un fuerte incremento de las tensiones horizontales y de las presiones de poro, las cuales se disipan rápidamente debido al efecto de drenaje de las columnas.

Este incremento de tensiones producido durante la ejecución de las columnas en suelos finos (limos y arcillas), puede considerarse como un tipo de precarga. Existen muchas referencias de mediciones de incrementos de presiones de poro inducidos por la ejecución de las columnas de grava de entre 0,5 y 2,5 kg/cm², lo cual equivale al peso de terraplenes de precarga de entre 3 y 12 m de altura. La Figura 2 muestra un ejemplo de medición de presiones de poro durante la ejecución de columnas de grava, donde se observa que durante la instalación de una columna aislada las sobre-presiones de poro pueden alcanzar los 1 a 1,3 kg/cm², mientras que para un grupo de columnas las sobre-presiones de poro medidas fueron de entre 1 y 2 kg/cm².

En definitiva, la combinación de ambos aspectos (procedimiento de ejecución y capacidad de drenaje de las columnas) produce una mejora del suelo por precarga y consolidación lateral, que origina unas mejores condiciones de confinamiento y ayuda al soporte y capacidad de carga vertical de las propias columnas de grava. Estos aspectos muestran la importancia del método de ejecución en la mejora final obtenida.

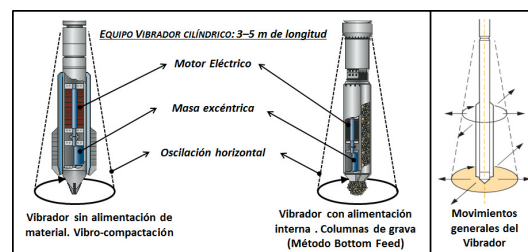


Figura 1. Técnicas de vibración profunda.

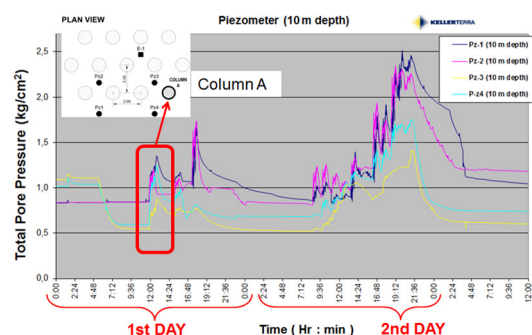


Figura 2. Presiones de poro durante la ejecución de columnas de grava (Carvajal et al. 2013).

3 MECANISMO DE SOPORTE DE LAS COLUMNAS DE GRAVA

3.1 Principios generales

El análisis teórico se basa en el concepto de célula unitaria, a partir del cual se representa la situación de una malla de columnas de extensión infinita bajo el efecto de una carga distribuida también de dimensiones infinitas. Figura 4.

Debido a la simetría de carga, el contorno de la célula unitaria se considera sin deformaciones laterales ni esfuerzos cortantes, quedando su interior en condiciones edométricas, y con una concentración de carga en la columna.

La columna de grava en el interior de la célula queda en condiciones triaxiales, sujeta a deformaciones laterales y verticales. Siguiendo estas hipótesis, puede considerarse que en toda la profundidad se cumple el equilibrio de esfuerzos según la Ecuación (1), y que existe compatibilidad de asentamientos en la columna y el suelo ($S_{col} = S_s$).

$$P = P_s \cdot a_s + P_{col} \cdot (1 - a_s) \quad (1)$$

donde: P = carga cimentación; P_s = carga en el suelo; P_{col} = carga en la columna; a_s = relación de sustitución A_{col}/A ; A = área total de la célula unitaria; A_s y A_{col} = área del suelo y la columna.

La mejora introducida por la concentración de esfuerzos en las columnas supone una reducción de asentamientos y un aumento de la capacidad de carga, comparado con la situación sin mejora.

Las columnas de grava transmiten la carga concentrada mediante la expansión de su diámetro, provocando empujes laterales sobre el suelo.

Bajo este estado de carga, las columnas tienden a fallar por su ensanchamiento y la falta de soporte lateral del suelo circundante. Así, la capacidad de las columnas para soportar cargas verticales depende fundamentalmente del soporte lateral proporcionado por el suelo (Figura 3). La transferencia de cargas en la interfaz suelo - columna supone un empuje lateral activo en las co-

lumnas mientras el suelo responde con su empuje lateral pasivo (Figura 4).

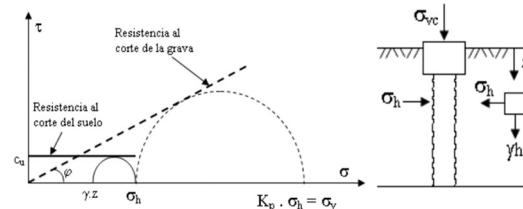


Figura 3. Capacidad de carga de las columnas.

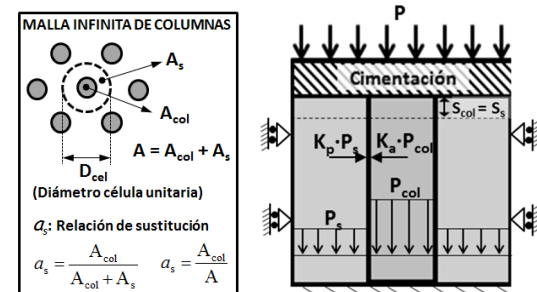


Figura 4. Hipótesis de la célula unitaria.

Considerando las condiciones triaxiales de las columnas de grava en el interior de la célula unitaria, la carga última vertical que éstas pueden soportar viene expresada según la forma de la Ecuación (2a), propuesta por varios autores (Greenwood 1970, Hughes y Withers 1974).

$$\sigma_{vc} = K_p \cdot \sigma_{hs} \quad (2a)$$

Siendo:

$$K_p = \frac{1 + \text{sen} \phi_c}{1 - \text{sen} \phi_c} \quad (2b)$$

$$\sigma_{hs} = N_k \cdot c_u + \sigma_{vs} \quad (2c)$$

$$N_k = 1 + \ln \left(\frac{E_{oed,s}}{3 \cdot c_u} \right) \quad (2d)$$

donde: σ_{hs} = resistencia lateral pasiva del suelo; K_p = coef. empuje pasivo; ϕ_c = ángulo rozamiento columnas; N_k = factor de influencia; c_u =

resistencia al corte sin drenaje; $E_{oed,s}$ = módulo edométrico del suelo.

3.2 Columnas aisladas y grupos de columnas

El comportamiento y mecanismo de rotura de las columnas de grava depende en gran medida de las condiciones de carga a la que se ven sometidas. En el caso de columnas aisladas, donde la carga se aplica únicamente en el área ocupada por la propia columna, se obtiene una capacidad de carga vertical reducida, debido al escaso confinamiento lateral proporcionado por el suelo circundante. En estas condiciones el ensanchamiento máximo de las columnas tiende a producirse cerca de la superficie, donde el confinamiento es menor. En cambio, si la carga se aplica en un área mayor que la ocupada por la columna se tendría un mayor confinamiento lateral, y el ensanchamiento de las columnas se produciría a mayor profundidad, alcanzándose mayores niveles de capacidad de carga vertical de las columnas. En la Figura 5 se muestran dos esquemas ilustrativos de este comportamiento.

En los grupos de columnas, por un lado, se tiene el comportamiento de las columnas situadas en el centro de la cimentación, cuyo confinamiento y capacidad de carga es mayor, y por otro lado, puede considerarse que las columnas situadas próximas a los bordes de la cimentación poseen un confinamiento y capacidad de carga más reducida. Además, el mecanismo de carga de grupos de columnas se rige por la interacción entre la carga de cimentación y el conjunto suelo-columnas, así como la interacción entre el suelo y las columnas, y las columnas entre sí. En la Figura 6, se muestra un esquema ilustrativo de las diferentes interacciones descritas (Kirsch 2010).

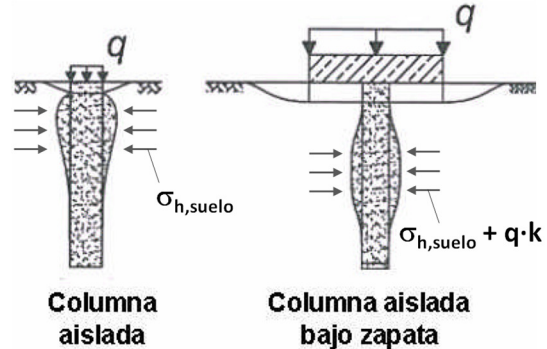


Figura 5. Comportamiento de columnas aisladas.

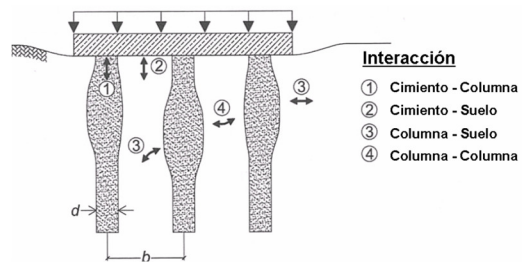


Figura 6. Comportamiento de grupos de columnas.

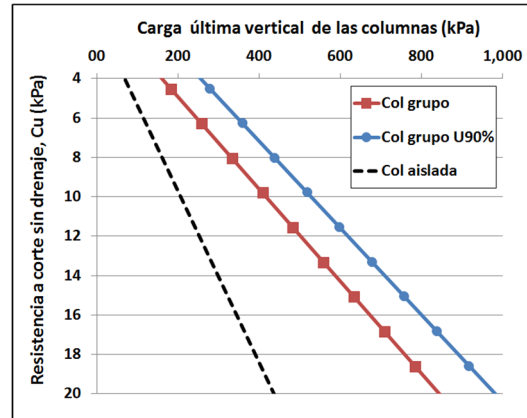


Figura 7. Comportamiento de columnas aisladas.

A modo de ejemplo, la Figura 7 muestra una comparación entre la capacidad de carga de una columna aislada, con la carga aplicada sólo en el área ocupada por la columna, y una columna situada en el centro de un grupo de columnas, donde el confinamiento es proporcionado tanto por las tensiones pre-existentes como las transmitidas por la cimentación. Mediante el empleo de las ecuaciones 2a a 2d puede observarse que para un suelo con resistencia al corte sin drenaje

de $c_u = 4$ kPa la capacidad de carga de la columna aislada es de 75 kPa, lo cual coincide con las relaciones empíricas propuestas por varios autores que sugieren estimar la capacidad de carga de las columnas con un valor de 15 a 25 veces c_u (Barksdale y Bachus 1983, Mitchell 1981, Bergado y Lam 1987, Guía de Cimentaciones MFOM 2002).

En el caso de columnas en el centro de un grupo, instaladas en el mismo suelo con $c_u = 4$ kPa, y una carga de cimentación o inducida al suelo durante el proceso de ejecución de 150 kPa, la capacidad de las columnas sería 170 kPa.

Para este último caso, sí se contara con un grado de consolidación de U90% la capacidad se incrementaría hasta alcanzar los 270 kPa.

Además, en este ejemplo simplificado, puede notarse que la capacidad de carga de las columnas aumenta linealmente en función de c_u del suelo antes de la mejora. Para un nivel de c_u de entre 8 y 10 kPa, correspondiente a un suelo muy blando, se obtienen capacidades de carga de 150 a 200 kPa en el caso de la columna aislada, y de 300 a 500 kPa para el caso de columnas situadas en el centro de un grupo y tras el proceso de consolidación.

En los casos en que c_u inicial es superior a 20 kPa, correspondientes a suelos de consistencia blanda a media firme, las columnas de grava situadas en medio de un grupo podrían alcanzar capacidades de carga superiores a 1000 kPa. Sin embargo, en la práctica habitual se limita el nivel de carga vertical máxima en las columnas a un valor admisible de 800 kPa, considerando un factor de seguridad de 2.

Es importante notar que la pendiente (K_p) con que crece la capacidad de las columnas en función de c_u depende fundamentalmente del ángulo de rozamiento de la grava. En el ejemplo se ha considerado un $\phi_c = 42$ grados, aunque este valor es superior a 45 grados en la mayoría de los casos. En la Tabla 1 se indica la recopilación de valores del ángulo de rozamiento de la grava compactada en las columnas, realizada por Herle et al. (2007). Esta tabla ofrece unos valores orientativos del ángulo de rozamiento de la grava para un diseño apropiado.

Tabla 1. Ángulos de rozamiento de columnas de grava (Herle et al. 2007).

Type of gravel	$\phi_{c,max}$ (degrees)	$\sigma_{c,min}$ (kN/m ²)	$\phi_{c,min}$ (degrees)	$\sigma_{c,max}$ (kN/m ²)	Remarks
Crushed lime stone	63.1	50	53.8	200	DS
River gravel	58.8	50	51.9	200	DS
River gravel, sub-round	57.1	50	50.9	200	DS, $d_{60}/d_{10} = 2.6$
River gravel, sub-round	59.2	50	53.2	200	DS, $d_{60}/d_{10} = 2.1$
River gravel, crushed	60.4	50	55.2	200	DS
Basalt	71.8	8	45.6	240	TX, $D_{50} = 30$ mm
Basalt	70.0	8	51.1	120	TX, $D_{50} = 39$ mm
Basalt	64.2	27	45.6	695	TX
Sandstone	60.1	27	37.4	695	TX
Dolomite	64.0	15	43	500	TX, $\gamma = 1.7$ g/cm ³
Dolomite	54.0	15	40	500	TX, $\gamma = 1.5$ g/cm ³

$\phi_{c,min}$; $\phi_{c,max}$: ángulo de rozamiento mínimo y máximo

$\sigma_{c,min}$; $\sigma_{c,max}$: presión de confinamiento mínima y máxima

DS: ensayo corte directo; TX: ensayo triaxial; d_{60}/d_{10} : coeficiente uniformidad

4 INSTALACIÓN Y FORMACIÓN DE LAS COLUMNAS

En los apartados anteriores se ha visto la fuerte influencia del procedimiento de ejecución en el nivel de confinamiento lateral de las columnas, así como la importancia de dicho confinamiento para alcanzar una determinada capacidad de carga vertical de las columnas de grava.

Las tensiones inducidas durante la ejecución de las columnas, tras un cierto grado de consolidación, incrementan las tensiones efectivas del suelo circundante y por consiguiente el confinamiento necesario para que las columnas puedan soportar las cargas verticales. Por tanto, la correcta instalación y formación de las columnas en toda la profundidad tratada cobra una importancia esencial, debido a que con ello se garantiza su funcionamiento como un potente dren vertical y como consecuencia se facilita el incremento continuo del confinamiento y capacidad de carga a medida que se consolida el suelo circundante.

Así, el aspecto clave para la formación de las columnas de grava compactada consiste en garantizar un nivel mínimo de resistencia al corte sin drenaje del suelo a tratar. En un medio sin ninguna resistencia al corte, como el agua, con $c_u \approx 0$ kPa, en lugar de un elemento tipo columna se depositaría toda la grava en profundidad adoptando la forma cónica típica de acopios de materia a granel. Por el contrario, en un suelo con $c_u \geq 5$ kPa es posible la formación de las columnas.

La Figura 8 muestra unos esquemas ilustrativos de este hecho.

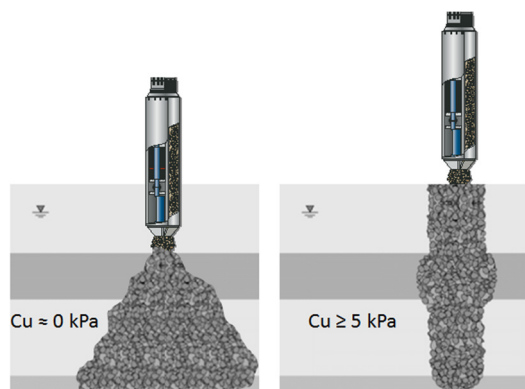


Figura 8. Formación de columnas de grava.

Perlea (2000) y Wehr (2006) realizaron una investigación mediante un modelo de laboratorio a escala reducida (1:10) con el objetivo de determinar los valores límites de c_u que permiten la formación de las columnas.

Para esta investigación se reprodujo un equipo vibrador cubierto por un tubo de PVC, y se ensayaron varias muestras reconstituidas de limos muy blandos con c_u de entre 2 y 5,5 kPa, contenidas en un depósito de PVC de 29 cm de diámetro y 60 cm de altura. En la Figura 9 se muestra el modelo con el vibrador utilizado, y en las Tablas 2 y 3 se muestran las propiedades de los materiales utilizados en la investigación.

Tras un análisis previo, se estableció como criterio de fallo la obtención de diámetros de columnas superiores a 2 veces el diámetro exterior del tubo PVC que recubre el vibrador. Para comprobar estos diámetros se inyectó una lechada de agua-cemento en las columnas, a fin de preservar su configuración al momento de excavar las muestras (Figura 10). Adicionalmente, la investigación incluyó el estudio de posibles fallos por licuación de los limos blandos y sensitivos, debido a la fuerte energía vibratoria inducida por los equipos vibradores.

Los resultados del experimento mostraron que en las muestras con c_u de 2 y 3,5 kPa se alcanzó la situación de fallo. En cambio, en las muestras con c_u de 4 y 5,5 kPa las columnas se formaron satisfactoriamente sin alcanzar la situación de fallo en el suelo.

Como conclusión de este estudio, y en base a la amplia experiencia citada en el mismo, se ha podido comprobar un valor límite de c_u de 4 a 5 kPa para permitir la formación de las columnas. Este valor límite coincide con lo observado en práctica habitual de los últimos 20 años, donde se han empleado distintos tipos de equipos para la ejecución de vibro-sustitución.

En muchos casos de tratamientos en suelos extremadamente blandos, la solución más eficaz consiste en la ejecución de las columnas considerando un orden de ejecución de al menos 2 mallas de columnas superpuestas. Esto supone la ejecución de una primera malla de columnas con aproximadamente el doble de separación entre ejes de columnas comparado con la separación de la malla final, de modo que el suelo adquiera un incremento del confinamiento antes de la ejecución de la segunda malla de definitiva.

Tabla 2. Propiedades de las muestras de suelo

Muestras	1	2	3	4
Contenido agua, W%	29,0	30,5	32,0	35,5
c_u (kPa)	5,5	4,0	3,5	2,0

Tabla 3. Propiedades de las columnas

Material	d_{50} mm	e_{max}	e_{min}
Arena gruesa de silica, uniforme	0,77	0,875	0,434



Figura 9. Formación de columnas de grava.



Figura 10. Formación de columnas de grava.

5 EXPERIENCIA EN SUELOS MUY BLANDOS

En la Tabla 1 se muestran algunas de las referencias más relevantes sobre la aplicación de columnas de grava en suelos muy blandos, recopilada de acuerdo a la experiencia del grupo Keller en la ejecución de proyectos en varios países y mediante distintos tipos de equipos vibradores profundos para ejecutar columnas de grava en vía seca y con alimentación interna.

Tabla 1. Referencias de aplicación de columnas de grava en suelos muy blandos, citados en Wehr (2006).

Referencia	C_u (kPa)	Tipo obra	Localidad País
Marte et al. (2005)	5-10	Edificación Comercial	Klagenfurt, Austria
Völzke (2001)	11-26	Edificación Industrial	Lübeck-Herrenwyk, Alemania
Borchert et al. (2004)	5-20	Terraplén ferroviario	Mering, Alemania
Wehr (2006)	12-18	Edificación Industrial	Rethen, Alemania
Zimmermann, (2003)	4-8	Presa	Zossen, Alemania
Raju y Hoffmann (1996), Raju (1997)	4-20	Infraestructuras para carreteras	Shah Alam, Malasia
	6-40		Shah Alam, Malasia
	8-50		Sri Petaling, Malasia
	5-15		Shah Alam, Malasia
Raju (2012)	5-20		Putrajaya, Malasia
Marte et al. (2005)	5-10	Carretera	Polonia
Martinez (2014)	4-20	Varios proyectos infraestructura vial e industrial	Huelva y Cádiz, España

Merece una especial mención las experiencias de aplicación de columnas de grava en las arcillas extremadamente blandas y con materia orgánica (arcilla gyttja) de Suecia, con resistencias al corte sin drenaje de entre 5 y 20 kPa, y sensibilidad de entre 10 y 30, según se ha reportado en Wehr (2008). Figuras 11 y 12.

A partir de la experiencia en los proyectos realizados en Suecia, donde existe el riesgo de licuación de suelos muy blandos y sensitivos, así como a través de la investigación realizada por Wehr (2006) y Perlea (2000) sobre los límites de c_u para aplicar las columnas de grava, se han podido identificar los ajustes necesarios que deben adoptarse en los parámetros de ejecución para hacer posible la formación de las columnas y cumplir con los objetivos de mejoras planteados,

fundamentalmente, es de esencial importancia el ajuste de la frecuencia de vibración de los equipos, los tiempos de compactación de la grava y el empuje estático vertical que se aplica. En los casos más extremos es necesaria la instrumentación y auscultación de las zonas tratadas a fin de conocer la evolución de los estados de tensiones, presiones de poro y resistencias del suelo tratado durante la ejecución de los trabajos.

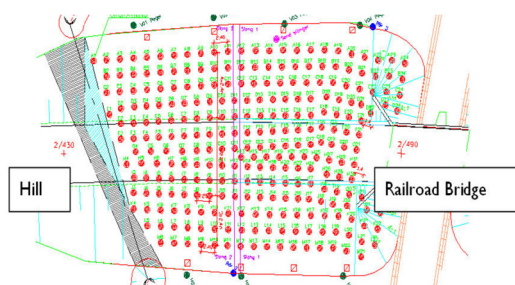


Figura 11. Columnas de grava para cimentación de terraplén en arcillas muy blandas, en Frövifors, Suecia.



Figura 12. Ejecución de columnas de grava en Frövifors, Suecia.

6 CONCLUSIONES

Entre las conclusiones más relevantes puede resaltarse las siguientes:

(a) las columnas de grava realizadas mediante equipos de vibración profunda (vibro-sustitución) pueden aplicarse en suelos extremadamente blandos con resistencias al corte sin drenaje de hasta 5 kPa, de acuerdo a la experiencia en obras reales y al análisis que se presenta.

(b) el factor limitante más importante asociado a la aplicación de columnas de grava en sue-

los de muy baja resistencia al corte sin drenaje, consiste en la adopción de un método de ejecución que haga posible la formación de las columnas de grava, para que actúen como drenes verticales y faciliten las condiciones requeridas de confinamiento.

(c) el comportamiento y capacidad final del suelo blando tratado mediante columnas de grava depende en gran medida del proceso de consolidación que haya tenido lugar tras la ejecución de las columnas, y/o de la velocidad de aplicación de las cargas, lo cual supone la consideración de condiciones drenadas o sin drenaje.

(d) En caso de suelos extremadamente blandos ($c_u \approx 5$ kPa) y con el nivel freático próximo a la superficie, suele considerarse la ejecución de las columnas mediante 2 mallas de columnas superpuestas; lo cual supone la ejecución de una primera malla de columnas con aproximadamente el doble de separación entre ejes de columnas comparado con la separación de la malla final, de modo que el suelo adquiera un incremento del confinamiento antes de la ejecución de la segunda malla de definitiva.

(e) En los casos más extremos, con presencia de suelos sensitivos con cierto potencial de licuefacción, es necesaria la instrumentación y auscultación de las zonas tratadas a fin de conocer la evolución de los estados de tensiones, presiones de poro y resistencias del suelo tratado durante la ejecución de los trabajos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece encarecidamente al Dr.-Ing. Jimmy Wehr, de los servicios corporativos de Keller Group, por su contribución en el aporte de información para la presentación de este artículo.

BIBLIOGRAFÍA

Barksdale, R.D. y Bachus, R. C. (1983). Design and Construction of Stone Columns Vol. I and II, Report No. FHWA/RD-83/026, Washington, D.C.

Bergado, D.T. y Lam, F.L. (1987). Full scale load test of granular piles with different densities and different propor-

tions of gravel and sand in the soft bankok clay. *Soils and Foundations* 27, 87-93.

Carvajal E., Vukotić G., Castro J. y Wehr W. (2013). Comparison between theoretical procedures and field test results for the evaluation of installation effects of vibro-stone columns. *Proc. International Conference on Installation Effects in Geotechnical Engineering*. Rotterdam. GEO-INSTALL.

Greenwood, D.A. (1970). Mechanical Improvement of soils below ground surface. *Conference on Ground Engineering, Institution of Civil Engineers, London*. Pp 11-22.

Guía de Cimentaciones (2002). Guía de cimentaciones de obras de carretera. Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, España.

Hughes, J.M.O. y Withers, N.J. (1974). Reinforcing of soft cohesive soils with stone columns. *Ground Engineering*, 7(3), 42-49.

Herle I., Wehr J. y Arnold M. (2007). "Influence of pressure level and relative density on friction angle of gravel in vibrated stone columns". *Pfahl Symposium 2007*. TU Braunschweig, 84.

Kirsch K. y Kirsch F. (2010). "Ground Improvement by Deep Vibratory Methods." Spon Press.

Perlea V., Liquefaction of cohesive soils, soil dynamics and liquefaction 2000, *ASCE geotechnical special publication no. 107*, 58-76, 2000

Mitchell, J.K. (1981). Soil improvement state of the art Report. *10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Estocolmo, Vol. 4, pp. 509-565.

Wehr, W. (2006). The undrained cohesion of the soil as criterion for the column installation with a depth vibrator. *International Symposium TransVib, Paris*. 157-162.

Wehr, W. (2008). Stone columns in very soft clays in Sweden. *11th Baltic sea geotechnical conference, "Geotechnic in Maritime Engineering"*. Gdansk, Poland. 119-122.