



Métodos de ejecución de columnas de grava y su influencia en el suelo mejorado

Ingeniería Geotécnica y Seguridad en las obras

***Enmanuel Carvajal Díaz
Keller Cimentaciones, S.L.U.***

***Pablo Ruiz-Terán
Ferrovial Construcción, S.A.***

Keller Cimentaciones, S.L.U.
c/ Argentina, 15
28806 Alcalá de Henares (Madrid)
Info.es@Keller.com
www.keller.com.es

Métodos de ejecución de columnas de grava y su influencia en el suelo mejorado

Enmanuel Carvajal Díaz¹, Pablo Ruiz-Terán²

¹ Keller Cimentaciones, S.L.U., Madrid, España

² Ferrovial Construcción, S.A., Madrid, España

Resumen

Las columnas de grava por vibrosustitución constituyen un método de mejora de suelo muy utilizado en todo el mundo, cuya antigüedad se remonta a los años 1960. Actualmente, continúa aplicándose para el desarrollo de todo tipo de obras. Esta experiencia ha servido de base para la diversificación de los métodos de ejecución de las columnas de grava. Además de los métodos de vibración profunda que han venido desarrollándose desde el inicio de la técnica, caracterizados por el uso de vibradores profundos introducidos en el suelo por desplazamiento, han surgido otros métodos que implican una perforación y extracción del suelo previo a la conformación de las columnas, así como otros métodos con perforación por desplazamiento y uso de vibradores externos que no se introducen en el terreno. En este artículo se presentan las diferencias más relevantes que existen entre estos métodos, y se expone la influencia de los efectos provocados por los métodos de ejecución en el comportamiento final del suelo mejorado. Asimismo, se analizan las propiedades geomecánicas y características principales de las columnas de grava realizadas mediante los distintos métodos, con el objetivo de aportar recomendaciones útiles para el diseño, ejecución y control.

Palabras clave: columnas de grava 1, efectos de instalación 2, método de ejecución 3, suelo mejorado 4 y consolidación 5.

I Introducción

Las columnas de grava realizadas con equipos de vibración profunda se han empleado con éxito en múltiples obras desde los años 60s, para reforzar suelos blandos o sueltos de elevada compresibilidad, acelerar el proceso de consolidación, reducir asentamientos, aumentar la capacidad portante y mitigar el riesgo de licuación. En el procedimiento de ejecución de columnas de grava en vía seca (método Bottom-Feed), en una primera fase, se introduce en el suelo por desplazamiento lateral, todo el sistema, junto al vibrador, con vibración eléctrica, empuje vertical y aire comprimido. Una vez alcanzada la profundidad deseada, el sistema de tubos estabiliza la cavidad creada y facilita la introducción de grava y su descarga por la parte inferior del vibrador que la compacta en movimientos verticales y horizontales (Figura 1a). Los movimientos del vibrador inducen al suelo elevados desplazamientos y fuerzas laterales, así como un alto nivel de energía vibratoria, que en combinación producen una importante mejora en el suelo alrededor de las columnas, registrándose en tiempo real de toda la información relevante de las

columnas (profundidad, grava consumida, energía de compactación, tiempo de ejecución, etc). Debido a la naturaleza del procedimiento de ejecución a este tipo de tratamiento habitualmente se le denomina vibrosustitución. Durante los 1990s surgió la metodología de ejecución de columnas de agregado apisonado. En este caso, las perforaciones se realizan con extracción de material y se rellenan de grava desde la plataforma de trabajo y hasta el fondo de la perforación. La compactación se realiza únicamente en sentido vertical, por medio de apisonado por impacto producidos por una placa en contacto con la grava (Figura 1b). En este método es particularmente importante garantizar la estabilidad de las perforaciones ante la presencia de agua freática y/o suelos muy blandos.

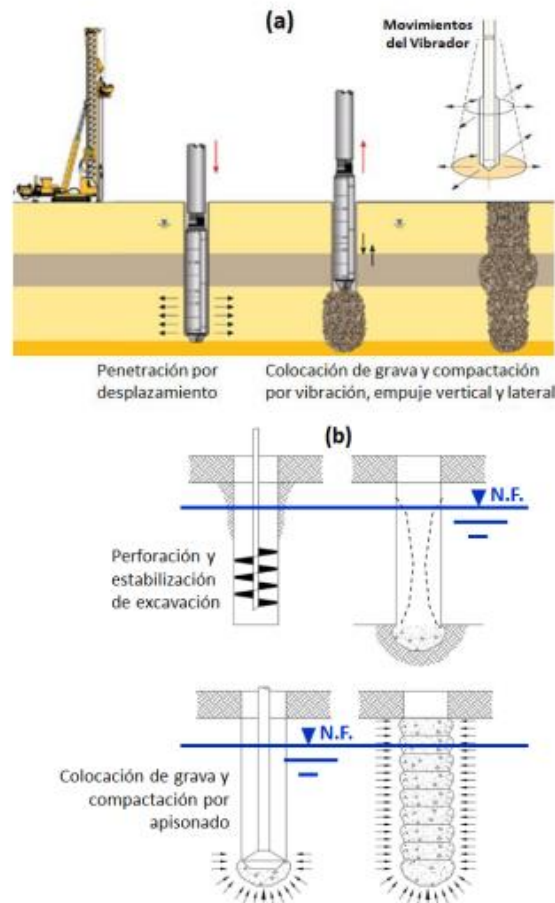


Figura 1. Método de ejecución: (a) vibro columnas de grava en vía seca; (b) columnas de agregado apisonado

Mientras que con la vibrosustitución, la expansión del diámetro de las columnas siempre depende de la rigidez del suelo, obteniéndose mayores diámetros en las capas más blandas, lo cual indica que el vibrador moviliza el empuje pasivo del suelo, en el caso de las columnas de agregado apisonado, es habitual la obtención de diámetros prácticamente constantes, lo cual es un indicador de que no se ha desplazado el suelo lateralmente movilizando el empuje pasivo, al menos en la misma proporción que se obtiene mediante las columnas de grava con vibradores profundos.

1.1 Efectos de mejora producidos por los equipos de vibración profunda

De acuerdo con la experiencia existente, los equipos de vibración profunda para columnas de grava son esenciales para obtener la mejora y comportamiento final esperados en el terreno mejorado, debido a los distintos efectos que estos equipos producen:

1. El desplazamiento lateral aumenta las tensiones laterales del suelo y mejora el coeficiente de empuje en reposo.
2. Las fuerzas y desplazamientos horizontales de los vibradores generan fuertes sobrepresiones de poro en el suelo circundante, las cuales se disipan durante la instalación de las columnas gracias a su capacidad de drenaje.
3. La transmisión de la fuerte energía vibratoria produce una mejora por densificación.

En la Figura 2 se presenta el ábaco empírico desarrollado por Báez (1995) para la estimación del incremento del golpeo SPT en el suelo alrededor de las columnas por vibrosustitución, en función de la relación de áreas (A_r).

Por otro lado, la mejora producida en limos y arcillas alrededor de las columnas ha sido estudiada por varios autores (Castro y Karstunen, 2010; Egan et al., 2008; Kirsch, 2006; Carvajal et al., 2013). Los efectos de la ejecución de columnas de grava en suelos arcillosos saturados provocan su remodelo en la zona más cercana al vibrador, así como un incremento importante en las presiones de poro, que se disipan rápidamente durante el proceso de ejecución, incrementando la rigidez del suelo, que finalmente desarrolla un mayor confinamiento lateral a las columnas. Estos efectos de mejora varían con la distancia radial al eje de las columnas. La Figura 3, desarrollada en base a comprobaciones experimentales de Kirsch (2006), indica el incremento de los módulos del ensayo presiométrico (E) en suelos arcillo-limosos y limo-arenosos con la distancia radial al eje de las columnas.

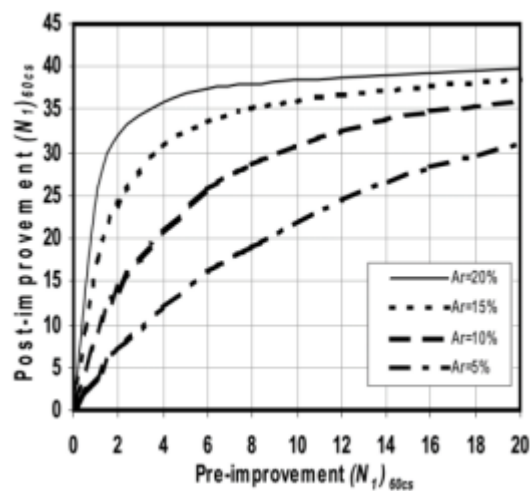


Figura 2. Golpeo SPT antes y después del tratamiento, en arenas limpias (Báez 1995)

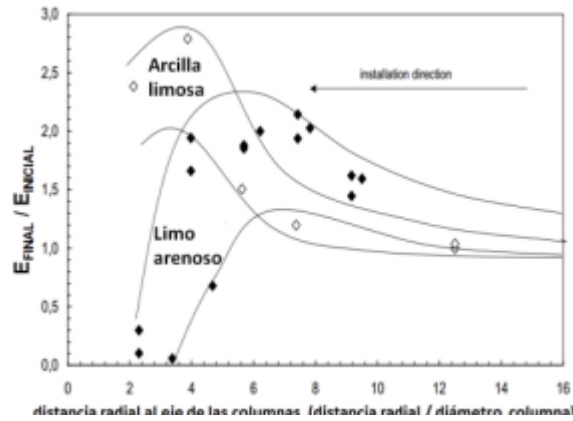


Figura 3. Mejora por instalación de vibro columnas de grava en suelos finos (arcillas y limos) (Kirsch 2006)

2 Aspectos especiales de diseño

A continuación, se explican los valores habituales de parámetros mecánicos utilizados para columnas por vibrosustitución y las razones por las que otros procedimientos alternativos deberían adoptar rangos de parámetros similares.

2.1 Diámetro de las columnas de grava y la relación de áreas

El método de Priebe (1995) es la referencia más conocida para el diseño de columnas de grava, contrastado a través de obras auscultadas e incluido en guías de diseño en todo el mundo. Establece la relación de áreas como parámetro fundamental de diseño, debido a su fuerte influencia en el nivel de mejora que se puede obtener. Interpreta el nivel de mejora mediante el factor de mejora (n), el cual representa el grado en que se disminuyen los asentamientos esperados y aumenta la capacidad de carga del suelo mejorado. Para explicar este aspecto puede considerarse el caso de suelos con golpeo SPT de 5 a 10, donde el diámetro medio esperado por la vibrosustitución es de 0,85 m, y de 0,60 m para las columnas de agregado apisonado. Esto supone que, en general, la relación de áreas de columnas por vibrosustitución es 2,6 veces mayor que la obtenida mediante columnas de agregado apisonado. La Figura 4 y Tabla I muestran un ejemplo gráfico a partir del ábaco principal de Priebe (1995).

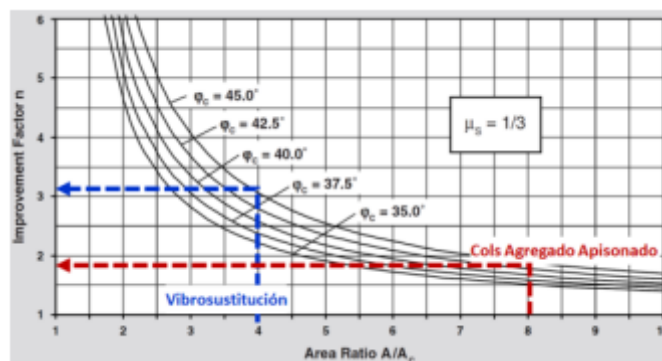


Figura 4. Ejemplo comparativo, según Priebe (1995) para la determinación del Factor de Mejora Básico (n)

Parámetros	Cols agregado apisonado	Cols por vibro-sustitución
Área ref., A (m ²)	2,25	2,25
Diám. Col (m)	0,60	0,85
Área col, A _C (m ²)	0,28	0,56
Relación áreas A/A _C	7,95	3,96
Relación áreas A _C /A	0,13	0,25
% Sustitución	13%	25%

Tabla 1. Ejemplo comparativo sobre la influencia de la relación de áreas en la mejora alcanzada

Se observa que un mayor diámetro y mayor relación de áreas supone que el factor de mejora logrado por la vibrosustitución sea cerca de 2 veces mayor que el obtenido mediante columnas de agregado apisonado. Esto se debe a que el % de sustitución es también 2 veces mayor para el caso de la vibrosustitución, considerando una misma área de referencia de suelo tratado.

2.2 Ángulo de rozamiento de diseño para las columnas de grava.

Tradicionalmente, en las columnas por vibrosustitución, el ángulo de rozamiento se limita a 40 grados. En cambio, en las columnas de agregado apisonado, se ha planteado la posibilidad de considerar valores de 48 a 50 grados. Esta última premisa puede ser muy arriesgada, por varios aspectos que se aclaran en los siguientes apartados.

2.2.1 Influencia de la tensión de confinamiento (σ'_3).

En la mecánica de suelo se ha comprobado que a medida que la tensión de confinamiento aumenta se reduce el valor del ángulo de rozamiento de un suelo determinado (Bolton, 1986; Duncan et al., 2007; Duncan et al., 2014; Robertson y Campanella, 1983; Schmertmann, 1975).

Es particularmente útil la investigación realizada por Duncan et al. (2007) sobre el mismo tipo de material utilizado en las columnas de grava (tamaños 10 a 40 mm, aprox.), donde se demuestra que la grava medianamente densa a muy densa podría tener ϕ_{col} del orden de 55 grados para un muy reducido nivel de presión de confinamiento, del orden de 28 kPa (posiblemente en capas situadas entre 1,5 y 2,5 m de profundidad); sin embargo la misma grava, y con el mismo nivel de densidad relativa, experimenta una importante reducción del ϕ_{col} hasta valores de 40 a 47 grados cuando la presión de confinamiento es mayor de aproximadamente unos 80 kPa (es decir, a profundidades mayores de 4,5 a 7,0 m, aprox.).

La Figura 5 muestra la ley de variación de ϕ_{col} en función de la presión de confinamiento y la Tabla 2 muestra las características granulométricas de la grava considerada en dicho estudio. Es muy importante notar los riesgos que podrían asumirse si se realizase una errónea interpretación del ϕ_{col} de diseño para las columnas de grava, de acuerdo con el nivel de presión de confinamiento que tendrían, el cual no solo depende del estado de tensiones iniciales del suelo, sino también del estado de tensiones al que se verán sometidos el suelo y las columnas debido a la aplicación de las cargas de cimentación.

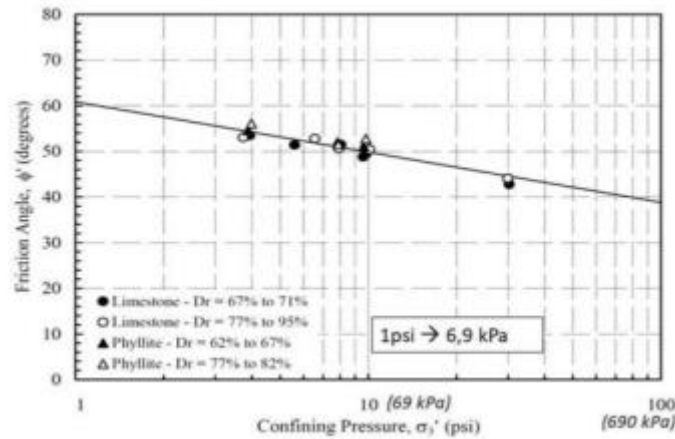


Figura 5. Investigación de Duncan et al. (2007), sobre ángulos de rozamiento interno en agregado grueso tipo AASHTO #57, como el usado en columnas de grava

Tamaños	1,5	1.0	0,5	4,75	2,36	0,053
	Pulg	Pulg	Pulg	mm	mm	mm
Aashto No. 57	100	95-100	25-60	0-10	0-5	0

Tabla 2. Granulometría AASHTO #57 de la grava considerada en el estudio de Duncan et al. (2007)

2.2.1 Influencia del nivel de deformación que experimenta la grava

En la mecánica de suelo también se ha comprobado que el ángulo de rozamiento tiene una fuerte dependencia del nivel de deformación que experimenta un determinado suelo, por lo que ϕ_{col} se reduce de un valor pico (ϕ_p), a un valor crítico (ϕ_{cv}) y posteriormente a un valor residual (ϕ_r), en función del nivel de deformación que experimenta el material (Bolton, 1986; Kulhawy y Mayne, 1990; Schofield y Wroth, 1968; Ladd et al., 1977).

La Figura 6a muestra un esquema conceptual de este comportamiento elaborado por Kulhawy y Mayne (1990), mientras que la Figura 6b muestra un ejemplo real de este comportamiento, a partir de ensayos sobre una grava escalada en el laboratorio del CEDEX para el estudio de una obra de columnas de grava de KELLER en España.

Métodos de ejecución de columnas de grava y su influencia en el suelo mejorado

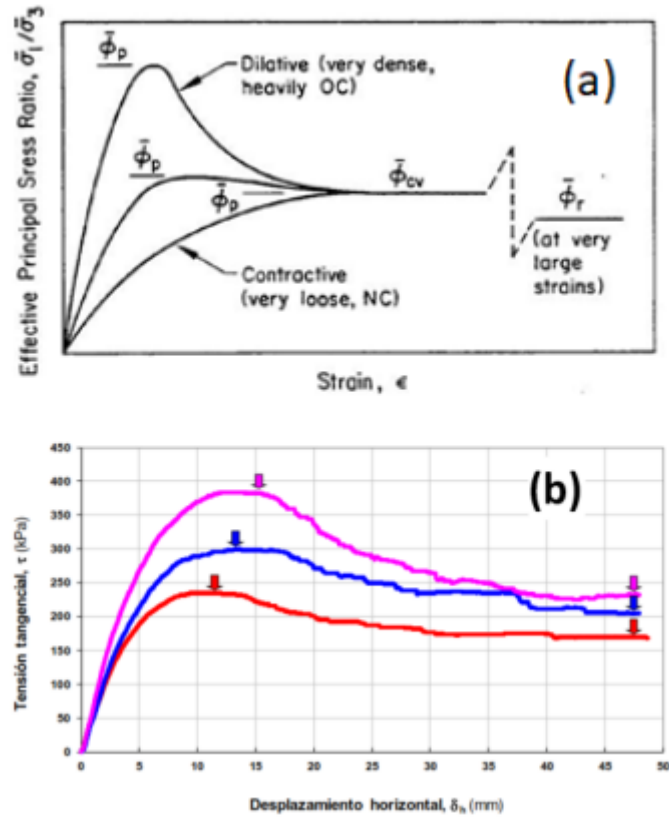


Figura 6. ϕ_{col} en función del nivel de deformación: (a) esquema ilustrativo según manual de propiedades de suelo, EPRI (Kulhawy y Mayne 1990); (b) Ensayo CD real con grava escalada en laboratorio del CEDEX

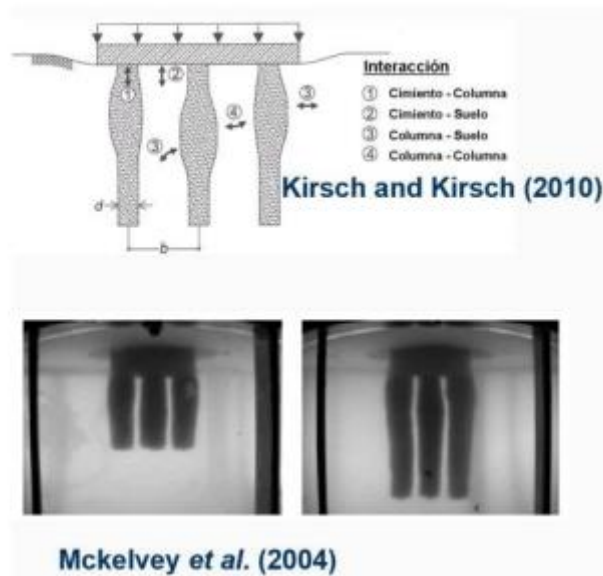


Figura 7. Mecanismo de carga y deformación de las columnas, por ensanchamiento lateral de su sección

Es importante notar los riesgos elevados que podrían asumirse si se realizase una errónea interpretación del ϕ_{col} de diseño para las columnas de grava de acuerdo con el nivel de deformación que podrían experimentar. Varios investigadores han demostrado que el mecanismo de transferencia de carga y deformación de las columnas consiste en absorber las cargas verticales de la cimentación y transmitir las

fundamentalmente en dirección lateral al suelo circundante, debido a la tendencia a deformarse lateralmente en forma de abombamiento (Figura 7) (Kirsch y Kirsch, 2010; Hu, 1995; Mckelvey et al., 2004; Wehr, 2004).

Este comportamiento supone que las zonas más cargadas de las columnas desarrollen niveles de deformación que corresponden a un ángulo de rozamiento menor al de valor pico ($\phi_{real} < \phi_{pico}$). Por tanto, es esencial evitar el uso del valor pico del ángulo de rozamiento para prevenir fallas repentinas o frágiles de la grava.

2.2.3 Influencia de la densidad (o compactación) de la grava

Los comportamientos descritos anteriormente son independientes del nivel de compactación o densidad relativa que pueda alcanzarse en las columnas de grava. Sin embargo, es muy importante asegurar la máxima compactación posible de las columnas de grava con el objetivo de obtener las mejores propiedades posibles.

La vibrosustitución con vibradores eléctricos produce una trituración (crushing) de la grava por el efecto abrasivo de las vibraciones, que mejora la granulometría de la grava, aumentando su coeficiente de uniformidad hasta valores de material bien graduado ($C_u = D_{60}/D_{10} > 3-4$). Este efecto incrementa considerablemente la aptitud del material para ser compactado, preservando la capacidad de drenaje de las columnas. Estos efectos permiten que el índice de vacíos de la grava tras su compactación (e) sea incluso menor que el índice de vacíos mínimo posible de la grava original (e_{min}), lo cual supone grados de compactación superiores al 100% respecto a la densidad máxima del material original. Las Figuras 8a y 8b muestran los resultados de comprobación de estos efectos investigados por Herle et al. (2007) para columnas de grava realizadas con los equipos de ejecución de KELLER.

Los índices de hueco (e) y grados de compactación tras la ejecución de las columnas, fueron medidos a partir de ensayos “in situ” de densidad con el método del cono de arena (Figura 8C).

A partir de la investigación de Herle et al. (2007) sobre la compactación de las columnas realizadas con equipos eléctricos de vibrosustitución también se ha podido investigar y comprobar los ángulos de rozamiento obtenidos.

Métodos de ejecución de columnas de grava y su influencia en el suelo mejorado

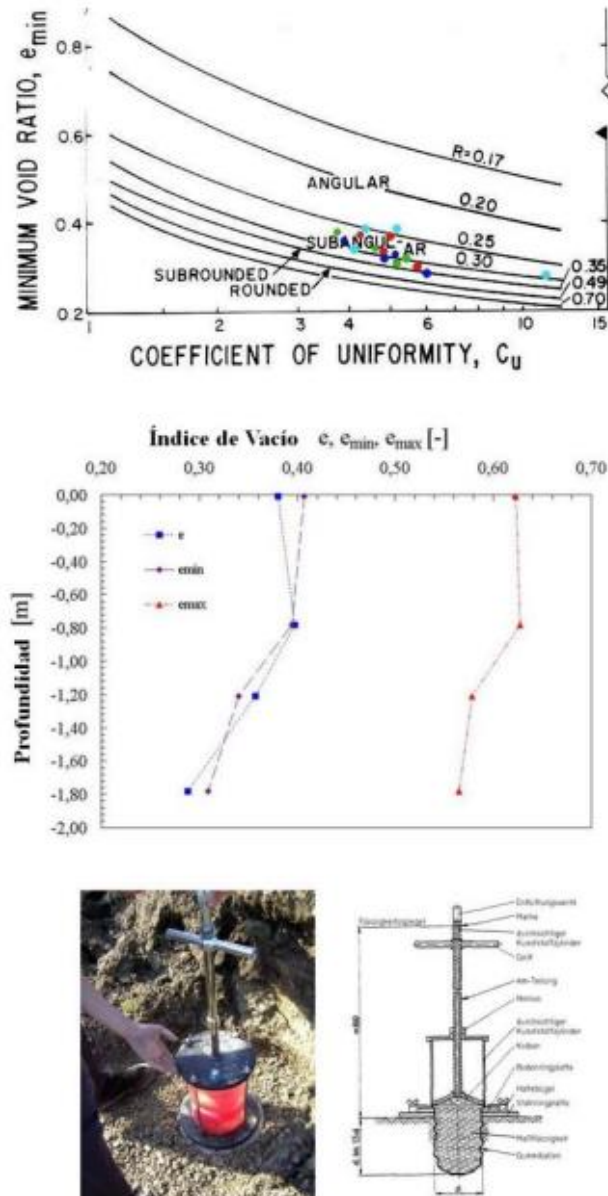


Figura 8. Compactación en las columnas de grava realizadas con vibradores profundos de KELLER: (a) mejora del coeficiente de uniformidad de la grava; (b) índices de vacíos tras la ejecución de las columnas de grava, indicando grados de compactación superiores al 100%; (c) cono de arena para la medición “in situ” del grado de compactación de las columnas de grava

La Tabla 3 muestra los resultados de una investigación en laboratorio, donde Herle et al., (2007) determinaron los ángulos de rozamiento para ensayos triaxiales (TX) y de corte directo (DS) sobre gravas típicas utilizadas para vibrosustitución, en la que puede verse que para niveles reducidos de presión de confinamiento (8 a 50 kPa) se obtienen $\phi_{col} = 54$ a 71 grados, mientras que para niveles elevados de confinamiento la mayor parte de los resultados muestran $\phi_{col} = 43$ a 53.

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

$\phi_{c,min}$; $\phi_{c,max}$: minimum and maximum friction angle
 $\sigma_{c,min}$; $\sigma_{c,max}$: minimum and maximum confinement pressure
 DS : Direct Shear Test ; TX: Triaxial Test ; d_{60}/d_{10} : uniformity coefficient

Tabla 3. Compilación ángulos de rozamiento típicos en columnas de grava realizadas con vibradores profundos de Keller. Extracto sacado de Herle et al. (2007)

Aunque estos resultados de ϕ_{col} son en general mayores de 50 grados, para diseños de obras reales se recomienda emplear un rango de $\phi_{col} = 40$ a 48 grados (con valor medio frecuentemente usado de $\phi_{col} = 45$ grados), debido a la consideración de los efectos comentados respecto al nivel de confinamiento, nivel de deformación y grado de compactación, así como para adoptar diseños dentro de rangos de seguridad que garanticen la integridad de las obras durante su vida útil.

2.3 Módulo de deformación de diseño para las columnas de grava

Tradicionalmente, en las columnas por vibrosustitución, el módulo de deformación se limita a 100 MPa. En cambio, en las columnas de agregado apisonado, se ha planteado la posibilidad de considerar valores de 170 a 280 MPa. Esta última afirmación atribuye unos valores exageradamente altos de módulos de deformación a las columnas de agregado apisonado, que en ningún caso tendrían mayores módulos de deformación que las columnas realizadas mediante procedimientos de vibración profunda.

Las condiciones de evaluación más representativas de lo que realmente ocurre en las obras corresponde al estado de compresión triaxial (Figura 9).

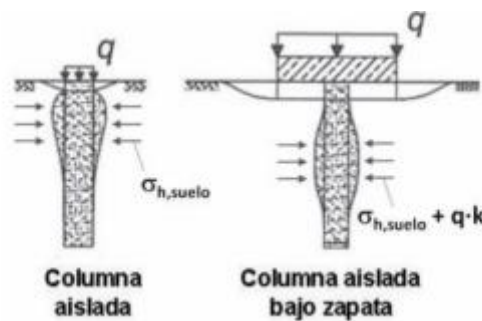


Figura 9. Condiciones triaxiales de columnas de grava bajo cimentaciones y ensayos de placas de carga con diámetro igual al diámetro de la columna.

Las columnas de grava se deforman en condición de compresión triaxial soportadas por la tensión de confinamiento horizontal que ofrece el suelo de alrededor. Este comportamiento ha sido comprobado y minuciosamente descrito por varios investigadores (Priebe, 1976; Priebe, 1995; Barksdale y Bachus, 1983; Goughnour y Bayuk, 1979; Kirsch y Kirsch, 2010; Greenwood y Kirsch, 1983; Hu, 1995; Castro y Sagaseta, 2009). El rango más habitual de valores de módulos de deformación de columnas de grava en condiciones triaxiales varía de 20 a 100 MPa, aproximadamente, de acuerdo con lo comprobado por muchos investigadores en ensayos de laboratorio, pruebas “in situ” y modelamiento numérico (Han y Ye, 2001; Balaam y Booker, 1981; Castro, 2017; Barksdale y Bachus, 1983; Kirsch y Kirsch, 2010). En los suelos más blandos que ofrecen menores niveles de confinamiento ($SPT = 0$ a 1 ; $S_u = 5$ a 15 kPa) se obtienen los valores más bajos (del orden de 20 a 25 MPa).

Aunque el módulo en condiciones triaxiales es el más representativo y utilizado para la caracterización de las columnas de grava, con menor frecuencia suele considerarse el módulo de reacción o rigidez unidimensional (habitualmente denominado “coeficiente de balasto”). En algunas obras se considera la ejecución de placas de carga (0,30 a 1,0 m) para intentar evaluar un parámetro de rigidez de las columnas de grava, ya que se trata de un tipo de prueba con tiempos y costos de ejecución asequibles.

Sin embargo, estas pruebas conllevan una serie de limitaciones que dificultan una correcta evaluación de la rigidez de las columnas, como son:

1. Solo alcanzan una profundidad de entre 0,6 y 1,5 m por lo que solo se podría estudiar una parte muy reducida de las columnas.
2. El diámetro de las placas suele coincidir con el diámetro de las columnas, lo cual impide estudiar la situación real de columnas bajo una cimentación (zapata, losa, terraplén, etc.) que cubre mayor área que las columnas y transmite una pequeña proporción de la carga en el suelo circundante.
3. Los ensayos se realizan mediante procedimientos de carga y descarga rápida para completar la prueba en pocas horas de modo que los resultados corresponden únicamente a deformaciones elásticas y recuperables.

2.4 Pruebas de carga en columnas de grava.

Stuedlein y Holtz (2008) realizaron un amplio estudio respecto a los resultados de una serie de pruebas de carga sobre grupos de columnas de grava y columnas aisladas, observando comportamientos muy similares en las columnas de grava realizadas con ambos métodos de ejecución (vibrosustitución y columnas de agregado apisonado), demostrado que los módulos de deformación son del mismo orden.

3 Conclusiones

Las columnas de grava por vibrosustitución se han aplicado satisfactoriamente durante más de 60 años en todo el mundo. Se ejecutan mediante vibradores profundos que se introducen en el suelo por desplazamiento, descargando la grava por su interior y cuentan con sistemas de control automatizado de parámetros de ejecución. Hacia los años 1990s se desarrollaron otros métodos alternativos de ejecución, entre los que se encuentran las columnas de agregado apisonado. Se ejecutan mediante perforación con extracción de material y compactación de la grava por golpeo o apisonado. Mientras que con vibrosustitución los diámetros de columnas dependen de la rigidez del suelo natural y de la capacidad del vibrador para movilizar el suelo lateralmente, con columnas de agregado apisonado

los diámetros suelen ser constantes al estar determinados por la herramienta de perforación. Los ángulos de rozamiento de las columnas de grava en ningún caso deberían ser superiores a 45 grados, ya que puede suponer un alto riesgo de diseño. Los módulos de las columnas de grava deben ser evaluados en condiciones triaxiales con valores de 20 a 100 MPa. Emplear valores superiores conlleva un riesgo de diseño. Las pruebas de carga sobre columnas aisladas y grupos de pocas columnas muestran comportamientos muy similares en las columnas de grava realizadas con ambos métodos. Las pruebas sobre columnas aisladas con pequeñas dimensiones de placa solo permiten estudiar hasta 1,0 a 1,5 m de profundidad por lo que no representan el comportamiento real de toda la columna

Bibliografía

- Balaam, N. P. y Booker, J.R. 1981. Analysis of rigid rafts supported by granular piles. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 5, N° 4, pp. 379-403.
- Báez, J. 1995. A design model for the reduction of soil liquefaction by vibro stone columns. Thesis, University of Southern California.
- Barksdale, R. D. y Bachus, R. C. 1983. Design and Construction of Stone Columns. Federal Highway Administration, Washington DC, Final Report SCEGIT-83-104.
- Bolton, M.D. 1986. The strength and dilatancy of sands. *Geotechnique*, vol. 36, N° 1, pp. 65-78.
- Carvajal, E., Vukotic, 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*, pp. 205-211. Castro, J. 2017. Modeling Stone Columns. *Materials*, vol. 10, N° 7, pp. 782-804.
- Castro J. y Karstunen M. (2010). Numerical simulations of stone column installation. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 47, N° 10, pp. 1127-1138.
- Castro, J. y Sagasetta, C., 2009. Consolidation around stone columns. Influence of column deformation. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 33, N° 7, pp. 851-877.
- Egan, D., Scott, W. y McCabe, B. 2008. Installation effects of vibro replacement stone columns in soft clay. *Geotechnics of Soft Soils: Focus on Ground Improvement*. Taylor & Francis Group.
- Duncan, J. M., Brandon, T., Jian, W., Smith, G., Park, Y., Griffith, T., Corton, J., Ryan, E. 2007. Densities and Friction Angles of Granular Materials with Standard Gradations 21b and #57. Center for Geotechnical Practice and Research, Virginia Tech, Report N°. 45.
- Duncan, J. M., Wright, S. G., and Brandon, T. L. 2014. *Soil Strength and Slope Stability*. John Wiley & Sons Inc.
- Goughnour, R.R. y Bayuk, A.A. 1979. Analysis of stone column-soil matrix interaction under vertical load. *Colloque International Renforcement des Sols: Terre Armée et Autre Méthodes*, vol. 1, pp. 271-277.
- Greenwood, D.A. y Kirsch, K. 1983. Specialist ground treatment by vibratory and dynamic methods. The Institution of Civil Engineers.

Métodos de ejecución de columnas de grava y su influencia en el suelo mejorado

Han, J. and Ye, S.L. 2001. Simplified method of consolidation rate of stone column reinforced foundation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 127, N° 7, pp. 597–603.

Hu, W. 1995. Physical modelling of group behaviour of stone column foundations. Thesis. University of Glasgow.

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*. TU Braunschweig, 84.

Kirsch F. 2006. Vibro stone column installation and its effect on ground improvement. *Proc. International Conference on Numerical Simulation of Construction Processes in Geotechnical Engineering for Urban Environment*, pp. 115-124.

Kirsch K. y Kirsch F. 2010. *Ground Improvement by Deep Vibratory Methods*. Spon Press.

Kulhawy, F. H. y Mayne, P. W. 1990. *Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design*. Cornell University.

Ladd, C. C., Foote, R., Ishihara, K., Schlosser, F., y Poulos, H. G. 1977. Stress-Deformation and Strength Characteristics. *Proc. 9 th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, vol. 2, pp. 421-494.

McKelvey, D., Sivakumar, V., Bell, A., y Graham, J. 2004. Modelling vibrated stone columns in soft clay. *Geotechnical Engineering*, vol. 157, N° 3, pp. 137–149.

Priebe, H. (1995). Design of vibro replacement. *Ground Engineering*, vol. 28, N° 10, pp. 31-37.

Robertson, P. K. y Campanella, R. G. 1983. Interpretation of Cone Penetration Tests. Part I: Sand. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 20, N° 4, pp. 718-733.

Schmertmann, J. H. 1975. Measurement of In-Situ Shear Strength. *Proc. ASCE Specialty Conference on In-Situ Measurement of Soil Properties*, vol. 2, pp. 57-138.

Schofield, A., y Wroth, P. 1968. *Critical State Soil Mechanics*. McGraw-Hill.

Stuedlein, A.W. y Holtz, R.D. 2008. Statistical Analyses of Aggregate Pier Load Tests. *Proc. 2 nd U.S.-Japan Workshop on Ground Improvement, Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*.

Wehr, J. 2004. Stone columns – single columns and group behaviour. *Proc. 5 th International Conference on Ground Improvement Technologies*, pp.