

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE
GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
CIVIL



**Columnas de grava para el mejoramiento
de suelos**

Francisco José Milián Gutiérrez
Trabajo de graduación presentado para optar
Al grado académico de Ingeniero Civil

Guatemala
2005

Columnas de grava para el mejoramiento de suelos

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE
GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
CIVIL

Columnas de grava para el mejoramiento de
suelos

Francisco José Milián Gutiérrez
Carné 01042
Trabajo de graduación presentado para optar
Al grado académico de Ingeniero Civil

Guatemala
2005

Vo.Bo.

(f)

Ing. Alberto José Pérez Zarco
Asesor

Tribunal

(f)

Ing. Alberto José Pérez Zarco

(f)

Ing. Alejandro Maldonado Lutomirsky

(f)

Ing. Wilma Xiomara de León

Fecha de aprobación: viernes 12 de diciembre de 2,005

CONTENIDO

	Página
I. INTRODUCCIÓN	1
II. JUSTIFICACIÓN	2
III. OBJETIVOS	3
IV. ANTECEDENTES	4
A. Mejoramiento de suelos	4
1. Definición	4
B. Vibrocompactación	4
1. Proceso constructivo	5
2. Ventajas	6
3. Desventajas	7
C. Compactación dinámica	7
1. proceso constructivo	7
2. ventajas	8
3. desventajas	9
D. Columnas de grava	9
1. Definición	9
2. Fundamentos teóricos de las columnas de grava	9
a. Mecanismos de falla	10
b. Relaciones básicas	11
3. Análisis de carga última	15
4. Asentamiento	20
a. Método de Equilibrio	21
b. Método de Priebe	21
c. Método de Greenwood	22
d. Método Incremental	23
e. Método del Elemento Finito	23
f. Distribución de esfuerzos en grupos de columnas de grava	23
g. Velocidad de consolidación primaria	24
h. Asentamiento por consolidación secundaria	26
i. Aumento de la resistencia al corte debido a	

consolidación	27
5. Análisis de estabilidad de taludes	27
6. Diseño Sísmico de las columnas de grava	28
a. Aspectos Importantes del diseño sísmico	28
b. Resistencia a cargas laterales	29
c. Resistencia al desplazamiento provista por la matriz de suelo	29
d. Resistencia total	30
e. Presión pasiva del suelo	30
V. DESCRIPCIONES	31
A. Tipos de Columnas de grava	31
1. Vibroreemplazo	31
2. Vibrodesplazamiento	32
3. Columnas compactadas de grava	33
4. Pilas de arena compactada	34
5. Columnas de vibro-concreto	34
6. Geopiers	34
B. Construcción de columnas de grava	34
1. Materiales	34
a. Suelos	34
b. Material de relleno	35
c. Agua	35
2. Equipo	35
a. Vibrador	35
b. Grúa	36
3. Proceso constructivo	36
C. Análisis y síntesis de diseño	37
D. Consideraciones generales para la implementación de columnas de grava	39
1. Graduación del suelo	39
2. Resistencia al corte	39
3. Graduación de la grava	39
4. Capacidad última	40
5. Área de reemplazo	40

6. Diámetro de las columnas de grava	40
7. Densidad de la grava	40
8. Aplicaciones para licuefacción	41
E. Verificación de diseño y pruebas de campo	41
VI. CONCLUSIONES	42
A. Ventajas	42
B. Desventajas	42
C. Aplicaciones	42
1. Cimentaciones superficiales	43
2. Estabilidad de taludes y reforzamiento de terraplenes ..	43
3. Asentamiento en el suelo	43
4. Licuefacción	43
VII. RECOMENDACIONES	44
A. Metodología para la verificación en campo	44
1. Pruebas e investigación del suelo	44
2. Parámetros del Suelo	44
3. Carga Última de las Columnas Grava	45
B. Criterios de Selección	45
VIII. BIBLIOGRAFÍA	46

FIGURAS

Figura	Página
1. Unidad Vibratoria	5
2. Vibro-compactación	6
3. Compactación dinámica	8
4. Falla por abultamiento	10
5. Falla por corte bajo las columnas de grava	10
6. Falla por corte en las columnas de grava	11
7. Falla por corte en el suelo bajo las columnas de grava	11
8. Célula unitaria	12
9. Estado de falla por esfuerzos triaxiales	15
10. Coeficientes de la expansión de la cavidad	17
11. Curvas de diseño de Priebe	22
12. Curvas de diseño de Greenwood	23
13. Patrones de flujo de agua	25
14. Método de esfuerzos promedio	28
15. Vibro-reemplazo	31
16. Vibro-desplazamiento	33
17. Corte transversal de la unidad vibratoria	36
18. Curvas de granulometría	39

INTRODUCCIÓN

Las urbes en Guatemala han venido creciendo vertiginosamente durante los últimos años por lo que los desarrolladores de proyectos inmobiliarios y de infraestructura empiezan a encontrarse con terrenos con suelos difíciles y hostiles, laderas pronunciadas inestables, orillas de barrancos, cuerpos de agua muy cercanos y un sinnúmero de inconvenientes. Todos estos se deben solucionar de una forma u otra, ya que esta forma de crecimiento es inevitable. Es decir, cada vez nos acercamos más a las laderas y los terrenos difíciles porque se van acabando las tierras con condiciones favorables, esto es especialmente notorio en las urbes del país (principalmente la ciudad de Guatemala). Esta necesidad de utilizar lugares con condiciones adversas requiere de técnicas nuevas y métodos innovadores. En nuestro medio, los ingenieros están sujetos a mucha información, pero con poca orientación. Lo que hace que en varias ocasiones se deje de escoger la solución más adecuada por la falta de conocimiento de la misma.

Uno de los problemas más comunes que los proyectistas encuentran hoy en día en nuestro país son condiciones pobres de subsuelo, como suelos blandos y compresibles. Esto se puede solucionar removiendo y reemplazando el suelo existente la construcción de una cimentación profunda o la construcción de una losa de cimentación. Estas opciones son costosas y requieren mucho tiempo. Sin embargo, estos problemas han creado la necesidad de desarrollar tecnología para el mejoramiento de suelos y ahora es posible reforzar casi cualquier tipo de suelo. El mejoramiento de suelos puede hacerse utilizando opciones clásicas de la geotecnia o empelando tecnologías emergentes.

El presente trabajo profesional empieza mostrando lo que significa mejorar un suelo y las diferentes opciones que existen para hacerlo. De las diferentes opciones para mejorar suelo la vibrocompactación y la compactación dinámica son predecesoras a la tecnología de las columnas de grava, que surgió como una necesidad para mejorar suelos que las dos anteriores técnicas no podían. Este trabajo presenta las generalidades de estos dos métodos predecesores de las columnas de grava, para luego adentrarse y presentar los tipos de columnas, los fundamentos teóricos y el proceso constructivo. Los fundamentos teóricos son una parte muy importante que sirve para adentrarse en el análisis y la síntesis de diseño presentada más adelante.

Finalmente, este trabajo profesional pretende ser una guía para evaluar las columnas de grava como una alternativa para mejorar suelos, y dar directrices para su evaluación y diseño preliminar.

II. JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo profesional se fundamenta en la necesidad de investigar sobre nuevos materiales, así como el incremento en la utilización de soluciones geotécnicas sofisticadas en los proyectos. Asimismo, con la amplia variedad de productos y soluciones existentes en el mercado es difícil elegir la más adecuada, por lo que dar a conocer las características, ventajas, desventajas y criterios de elección para el mejoramiento de suelos por medio de columnas de grava es de mucha utilidad.

Actualmente existen en nuestro país muchos proyectos que se están desarrollando en terrenos donde las condiciones no son favorables. Por lo general las soluciones geotécnicas clásicas resultan muy costosas, en algunos casos han llevado a provocar que el proyecto no sea viable económica ni funcionalmente. Por esto es necesario un sistema que permita a los desarrolladores y constructores llevar a cabo este tipo de proyectos sin que la cimentación sea un problema.

En nuestro medio existe una serie de posibles soluciones para mejorar los suelos, pero muchas veces los profesionales del ramo no cuentan con la información ni el conocimiento necesario para determinar la mejor solución. Por eso es necesario dar a conocer estos nuevos sistemas para que la persona que tome la decisión evalúe varias posibilidades adecuadas y de éstas escoja la que mejor se adapte a sus necesidades.

III. OBJETIVOS

- Dar un panorama general del estado de desarrollo en el diseño y construcción de columnas de grava.
- Establecer una metodología de diseño simple y efectiva y dar criterios generales para la selección de las columnas de grava como método de mejoramiento de suelos.

IV. ANTECEDENTES

A. Mejoramiento de suelos

1. Definición

En diversidad de sitios de construcción los suelos, en su estado natural, no tienen las características y propiedades necesarias para cimentar la estructura, y otras técnicas (cimentaciones profundas, excavar y rellenar, etc.) no son viables, entonces se recurre a métodos geotécnicos de construcción para alterar estas propiedades y características de los suelos. Esta alteración mejora las propiedades de los suelos pudiendo cimentar la estructura efectivamente. El mejoramiento de suelos tiene las siguientes funciones:

- Incrementar la capacidad de carga, corte o fricción
- Incrementar la densidad
- Controlar las deformaciones
- Acelerar la consolidación
- Disminuir la carga impuesta
- Proveer de estabilidad lateral
- Formar drenes o rellenar vacíos
- Disminuir el potencial de licuefacción

En la tecnología del mejoramiento de suelos se han desarrollado numerosos métodos entre ellos están:

- Drenes verticales prefabricados
- Rellenos livianos
- Vibrocompactación
- Compactación dinámica
- Refuerzo de taludes y suelo armado
- Suelo clavado
- Columnas de grava
- Mezcla de suelos
- Inyección de grouting bajo presión

B. Vibrocompactación

La vibrocompactación es una técnica para el mejoramiento de suelos que utiliza unidades vibratorias, para la densificación de arenas y gravas sueltas. Esta técnica fue desarrollada en Alemania a principios de la década de 1930. Originalmente se denominaba Vibroflotación ya que se utilizaba agua a presión. Cuando aparecieron equipos con mayor potencia y mayor tolerancia al amperaje se pudo utilizar un proceso en seco (Bell, 1978).

Las vibraciones correctamente aplicadas y la aplicación simultánea de agua (para vibroflotación) eliminan la fricción intergranular de suelos no cohesivos, provocando un reacomodo de los granos y la mayor densidad alcanzada, dándole al suelo una compactación permanente. El suelo cerca de la unidad vibratoria, como consecuencia de la vibración, se satura y licua localmente por un período de tiempo corto (FHWA, 1999).

La vibrocompactación se utiliza para:

- Mejorar la capacidad de soporte del suelo.
- Reducir los asentamientos
- Disminuir el potencial de licuefacción
- Incrementar la resistencia al corte
- Reducir la permeabilidad
- Incrementar la densidad
- Evitar la erosión y los efectos del agua

1. Proceso Constructivo

Para densificar el suelo mediante la vibrocompactación es necesario utilizar una unidad vibratoria como la que se muestra en la figura 1:

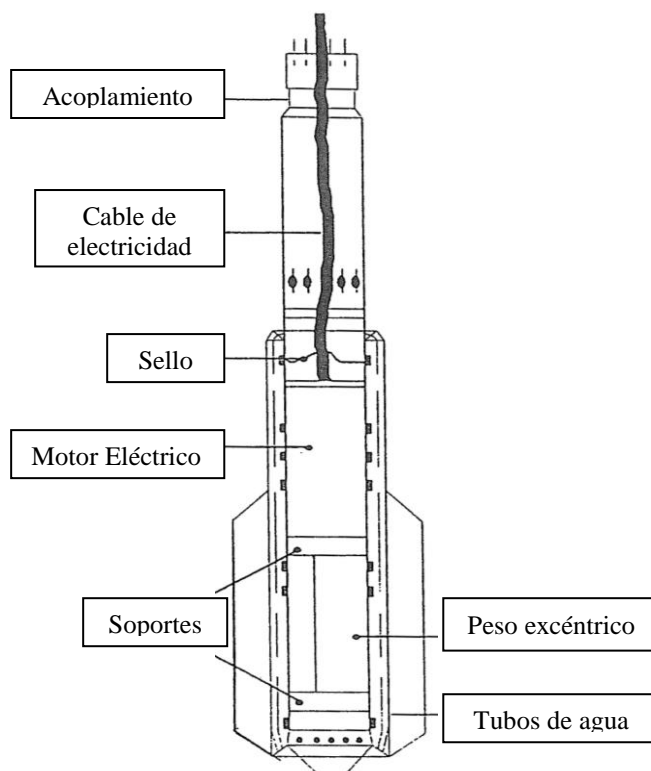


Figura 1: Unidad vibratoria (FHWA, 1999)

Esta unidad vibratoria se monta en una grúa y se inserta en el suelo con la ayuda de agua a presión para ir densificando el suelo. Las vibraciones son horizontales ya que es más eficiente que la vibración vertical.

El grado de compactación depende de la graduación del suelo y de la distancia entre las penetraciones. También la permeabilidad del suelo es importante, ya que para tener una compactación adecuada se debe disipar cierta presión en los poros.

El proceso constructivo se muestra en la figura 2:

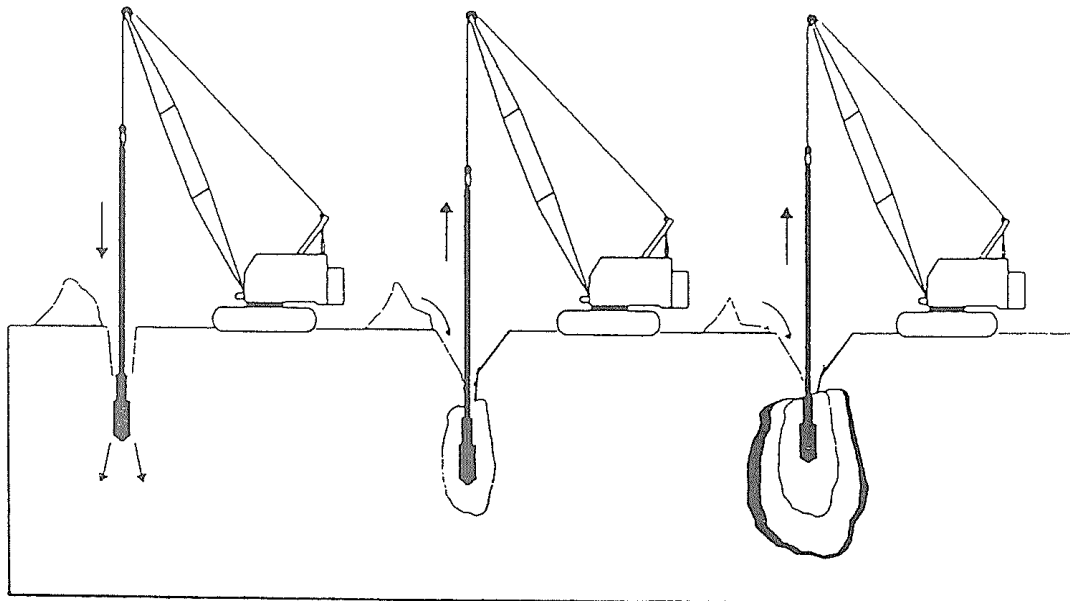


Figura 2: Vibrocompactación (FHWA, 1999)

Primero se debe hacer penetrar a la unidad vibratoria, ya sea en seco o con la ayuda de agua a presión. Debido a que durante el proceso de construcción, el volumen del suelo disminuye se debe sustituir este con material de relleno para alcanzar una compactación adecuada. La función de este material de relleno es transmitir las vibraciones de la unidad vibratoria hacia el suelo. Se puede utilizar arena fina, grava, piedra triturada y cualquier material sin finos ni cohesión. La compactación se va haciendo de abajo hacia arriba para que el material de relleno llegue hasta la profundidad deseada para poder alcanzar la compactación requerida.

2. Ventajas

Es una técnica de mejoramiento de suelo bastante simple y económico. Debido a la densificación del suelo se reduce el potencial de licuefacción de los suelos. Muchas veces es más barato hacer esto que excavar y reemplazar los suelos con características pobres. Se alcanza un mejoramiento en suelos hasta profundidades mayores a los 30 metros. Otra ventaja del sistema es que se puede construir en presencia de un nivel freático (sin importar si es somero o no).

3. Desventajas

La mayor desventaja de este sistema es que es efectivo sólo en suelos granulares sin cohesión. Cuando los suelos granulares contienen más de 15 por ciento de limos y 2 por ciento de arcilla la cohesión no permite que las partículas se reacomoden como consecuencia de la compactación, por lo que el suelo no se densifica correctamente. Otra desventaja es que se requiere un análisis más profundo que los necesarios para cimentaciones profundas. Las pruebas necesarias son ensayos de penetración estándar antes, durante y después de la compactación así como granulometría del lugar para considerar este método como una posibilidad.

C. Compactación dinámica

Impactar los suelos con masas suspendidas a diferentes alturas ha sido utilizado por siglos. Se sabe que los romanos lo utilizaban para densificar suelos sueltos. El primer reporte de la utilización de este proceso data de 1812 en Alemania. Este método de mejoramiento de suelos como resultado de la aplicación de niveles altos de energía en la superficie de suelo densifica el suelo por la acción de impacto. El proceso involucra una masa suspendida de 5 a 18 toneladas a una altura entre 9 y 30 metros. Esta masa se eleva por medio de un cable conectado a una grúa que permite que se suelte la masa sin ninguna restricción. Los impactos de la masa en el suelo provocan la densificación a una profundidad proporcional a la energía aplicada. Luego de aplicada la energía se pueden ver cráteres en la superficie del terreno. El suelo está suelto de la parte inferior del cráter hasta la superficie inicial, este suelo suelto se compacta utilizando métodos de compactación convencionales. Debido a que se busca una reacomodación de los granos este método es aplicable sólo en suelos granulares.

Principalmente, el método de compactación dinámica se utiliza para densificar depósitos sueltos para reducir los asentamientos. La densificación resulta de la reducción en la relación de vacíos debido a la compactación de las partículas granulares del suelo. Asimismo, la compactación dinámica se utiliza para hacer colapsar cualquier vacío dentro de la masa de suelo para evitar asentamientos diferenciales. Para poder evaluar la presencia de cavidades o vacíos en una masa de suelo se debe conocer cómo se formó geológicamente el depósito de suelo (FHWA, 1999)

El diseño para la compactación dinámica es muy empírico. El principio básico es la física fundamental y la energía potencial disponible. Para poder evaluar el grado de mejoramiento se deben hacer pruebas in-situ.

1. Proceso Constructivo

Para mejorar un suelo por medio de la compactación dinámica es necesaria una grúa con capacidad para suspender una masa de 5 a 18 toneladas a una altura de entre 9 a 30 metros. La energía aplicada y por lo tanto el grado de compactación alcanzado por este método dependen de estas dos

variables: masa y altura a la que está suspendida, además del espaciamiento entre localidades en que cae el martillo.

Luego de elevar la masa a la altura indicada, se procede a soltarla, ésta impacta la superficie del suelo directamente, formando un cráter y densificando el suelo. En la siguiente figura se muestra este proceso:

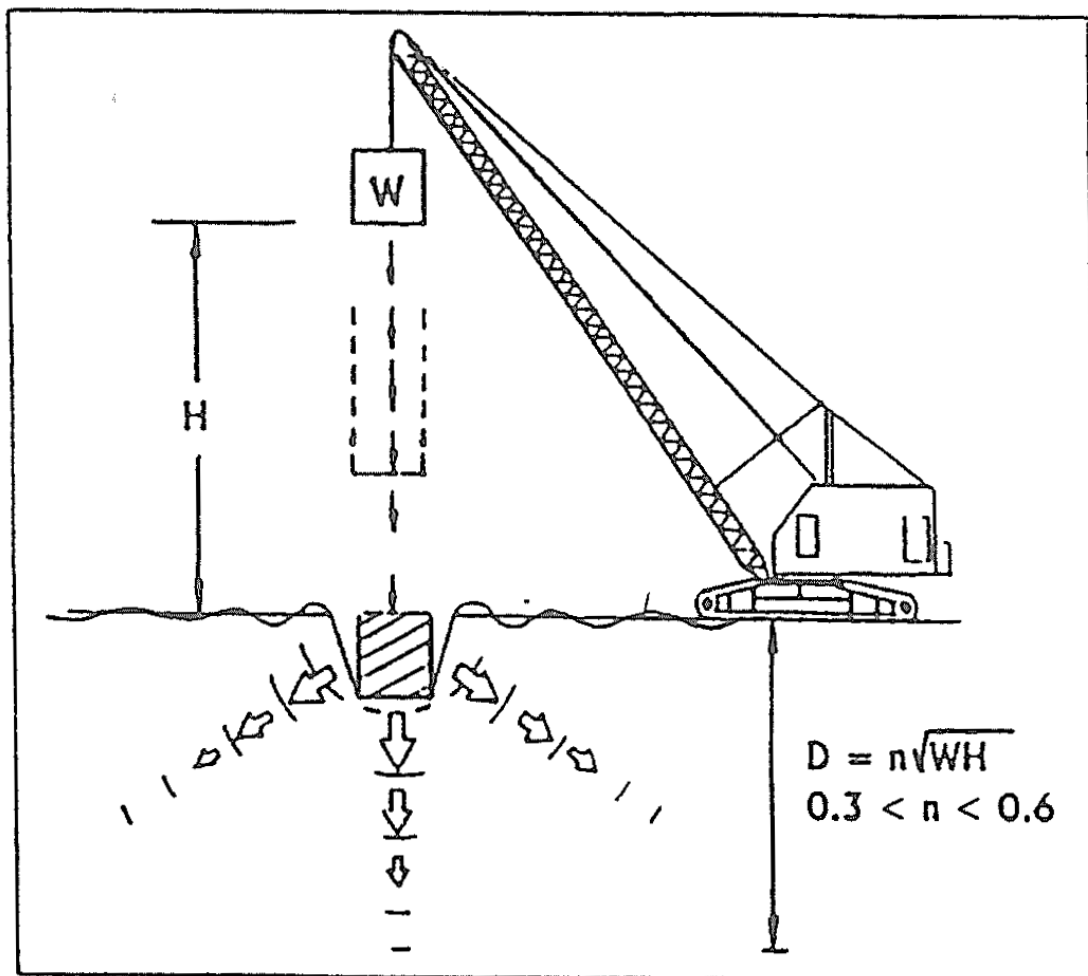


Figura 3: Compactación dinámica (FHWA, 1999)

2. Ventajas

La técnica de construcción es muy sencilla y puede ser realizada sin necesidad de equipo sofisticado. La compactación dinámica provee retroalimentación sobre cómo se comporta el suelo, dando al ingeniero los elementos necesarios para decidir si existe o no una mejora justificable en el suelo.

Otra ventaja del sistema es que durante la construcción se puede ver si está ocurriendo una densificación correcta. Por ejemplo, si se aplica la energía en un lugar dado y luego se vuelve a pasar por el mismo lugar la profundidad del cráter la segunda vez debería ser menor, ya que el suelo se densificó la primera vez.

Este tipo de mejoramiento de suelo puede utilizarse en suelo con cualquier tipo de graduación, es decir se puede utilizar desde suelos rocosos hasta limos.

Por último la compactación dinámica puede realizarse sin importar las condiciones climáticas.

3. Desventajas

La compactación dinámica produce vibraciones en el suelo que pueden ser molestas para estructuras adyacentes o para la ocupación humana cercana al proyecto. Otra desventaja es que el nivel freático debe estar a por lo menos 2 metros de profundidad de la superficie del suelo para prevenir que la superficie se ablande o que la masa se atore en el suelo. Asimismo, se debe tener cuidado con elementos enterrados ya que la masa puede causar su ruptura, especialmente si se trata de tuberías. También la compactación dinámica está limitada por la permeabilidad del suelo ya que se requiere disipación en la presión de poro.

D. Columnas de grava

1. Definición

Las columnas de grava son un método de mejoramiento de suelos, que surgió a principios de los años de 1950, como un derivado natural de la vibrocompactación y la compactación dinámica. Las columnas de grava tienen un proceso similar de construcción que la vibrocompactación, pero difieren en la forma en que trabajan. La vibrocompactación y la compactación dinámica densifican el suelo, mientras que las columnas de grava lo refuerzan. También, las columnas de grava se construyen excavando un pozo vertical, que luego se rellena en capas compactadas de grava que llegan hasta el nivel de piso, mientras que para la vibrocompactación se va relleno para llenar el volumen disminuido a causa de la compactación. Al igual que la vibrocompactación la excavación y compactación se hace con un vibrador especial. Existen diversos tipos de columnas de grava que dependen, principalmente, del método de construcción y el material de relleno.

2. Fundamentos Teóricos de las columnas de grava

Para poder utilizar las columnas de grava adecuadamente, debe considerarse la teoría detrás de este tipo de mejoramiento de suelos. Se debe considerar el asentamiento, capacidad de soporte y estabilidad general para columnas de grava individuales o grupos. También es fundamental conocer los mecanismos de falla que presentan las columnas de grava, para poder diseñar con base en esto.

a. Mecanismos de falla en las columnas de grava

i) Abultamiento de una columna de grava

Cuando en la estratigrafía del suelo a mejorar existen estratos muy débiles, orgánicos y de poco espesor este modo de falla es muy crítico en el diseño.

En la figura 4 se muestra este tipo de falla:

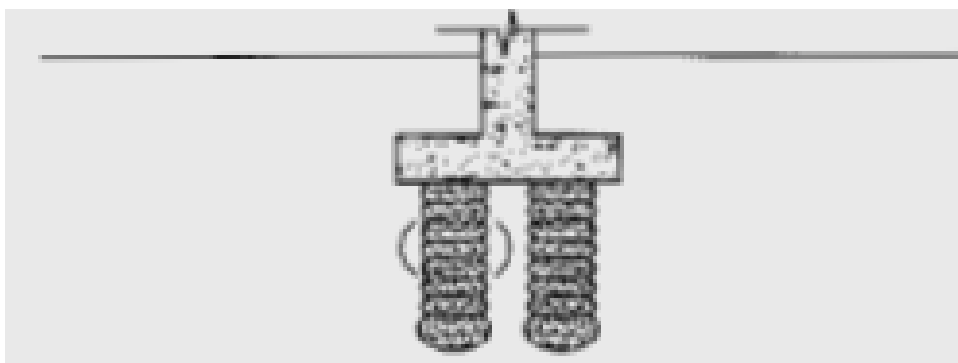


Figura 4: Falla por abultamiento (Wissman, 1999)

ii.) Corte bajo la base de columnas de grava

El potencial para el corte en la parte inferior de una columna de grava se ilustra en la figura 5. Este tipo de falla se conoce también como falla de punzonamiento.

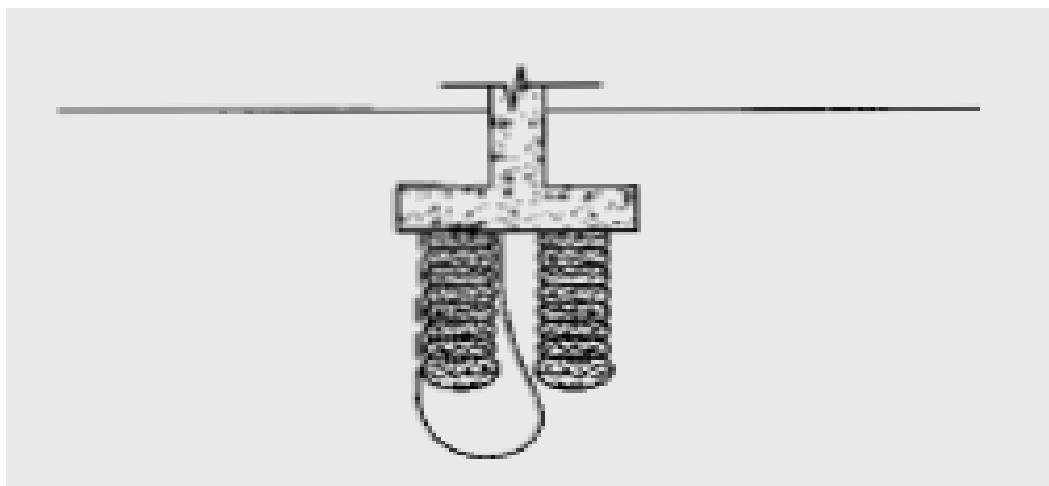


Figura 5: Falla por corte bajo las columnas de grava (Wissman, 1999)

iii) Corte en las columnas de grava

Para este modo de falla, se asume que los planos de corte pasarán por las columnas de grava y la matriz de suelo y luego subirán hacia los suelos circundantes, como se muestra en la siguiente figura:

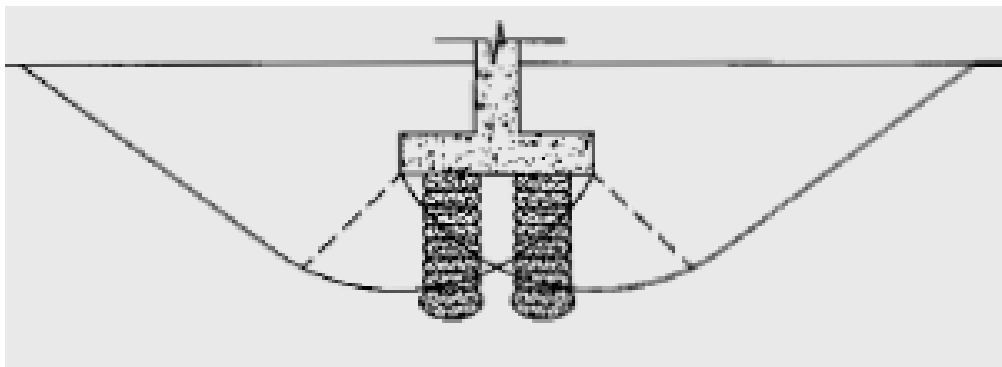


Figura 6: Corte en las columnas de grava (Wissman, 1999)

iv) Corte en la matriz de suelo bajo la columna de grava

Esta falla, como se muestra en la figura 7, ocurre por corte debajo de las columnas de grava. Este tipo de falla puede ocurrir fácilmente y significaría la falla global de cada columna individual.

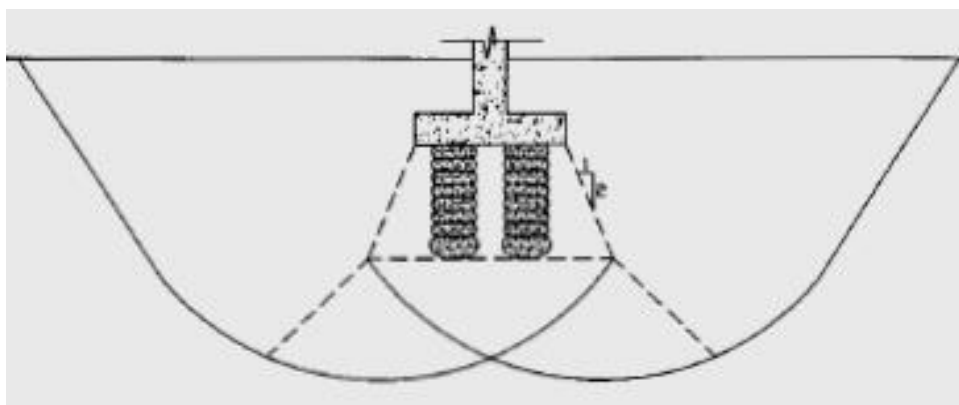


Figura 7: falla por corte en el suelo bajo las columnas de grava (Wissman, 1999)

b. Relaciones Básicas

Comúnmente, las columnas de grava son construidas formando triángulos equiláteros o cuadrados. Utilizando el esquema triangular, en un área de suelo dada, se alcanza la mejor densificación del suelo posible.

i. Célula Unitaria:

Es el cilindro imaginario de un diámetro, D_e , que depende de la geometría con que se coloquen los grupos de las columnas de grava. Para una disposición en forma de triángulo equilátero el diámetro es de:

$$D_e = 1.05 s$$

y para un esquema cuadriculado la ecuación es:

$$D_e = 1.13 s$$

Se asume que debido a la simetría existente en la geometría y la carga, las deformaciones fuera de la célula unitaria no pueden ocurrir, asimismo los esfuerzos de corte fuera de la célula unitaria son cero. Podemos resumir lo anterior modelando la célula unitaria como un contenedor cilíndrico simétrico con un exterior rígido y sin fricción que envuelve al área tributaria (incluyendo la columna de grava), como se muestra en la figura 8:

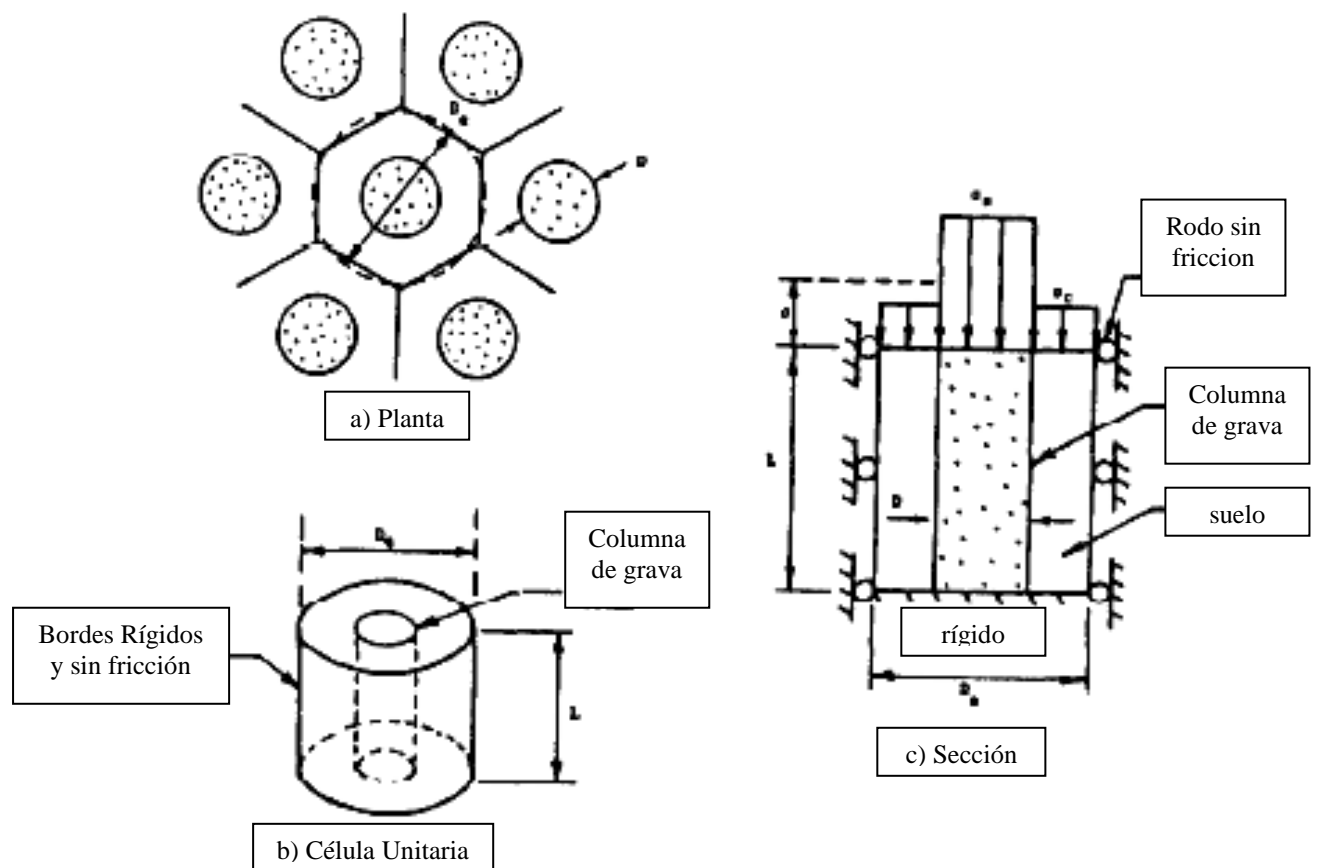


Figura 8: célula unitaria (Barkdale y Bachus, 1983)

ii) Razón de Área Reemplazada

El volumen de suelo reemplazado con las columnas de grava tiene un efecto importante en el desempeño del suelo mejorado. Para cuantificar la cantidad de suelo reemplazado utilizamos la siguiente ecuación de la razón de reemplazo de área:

$$a_s = A_s/A$$

donde A_s es el área de la columna después de la compactación, y A es el área total de la célula unitaria.

También podemos expresar la razón de reemplazo de área en términos de diámetro y espaciamiento entre columnas:

$$a_s = c_1 \left(\frac{D}{s} \right)^2$$

Donde D es el diámetro de la columna de grava compactada, s es la distancia entre centro y centro de columnas, c_1 es una constante que depende del patrón escogido para colocar las columnas de grava. Para un patrón cuadrado $c_1 = \frac{\pi}{4}$ y para un patrón triangular

$$c_1 = \frac{\pi}{(2\sqrt{3})} \text{ (Barkdale y Bachus, 1983).}$$

iii). Concentración de Esfuerzos

Debido a que el asentamiento vertical de las columnas de grava y la matriz de suelo circundante es aproximadamente igual, y como las columnas de grava son más rígidas que el suelo adyacente (ya sea un suelo cohesivo o sin cohesión), entonces los esfuerzos se concentran en las columnas de grava. Para el diseño de las columnas de grava es conveniente expresar esto como un factor, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$n = \sigma_s / \sigma_c$$

donde σ_s es el esfuerzo en las columnas de grava y σ_c es el esfuerzo en el suelo adyacente.

El esfuerzo promedio σ que debe haber sobre el área de la matriz de suelo a una profundidad dada debe, para que haya equilibrio de fuerzas verticales, ser igual a:

$$\sigma = (\sigma_s \cdot a_s) + \sigma_c (1 - a_s)$$

(Barkdale y Bachus, 1983)

para un área de reemplazo dada.

Resolviendo la ecuación anterior para esfuerzos en arcilla y grava y utilizando el factor de concentración de esfuerzos, n tenemos:

$$\sigma_c = n\sigma / [1 + (n-1)a_s] = \mu_c \sigma$$

y

$$\sigma_s = n\sigma / [1 + (n-1)a_s] = \mu_s \sigma$$

donde μ_c y μ_s es la relación de esfuerzos entre los esfuerzos de la arcilla y la grava y el esfuerzo promedio sobre el área tributaria. Los esfuerzos σ , σ_s y σ_c son provocados por la carga aplicada. Adicionalmente, los efectos iniciales de la carga superpuesta y los esfuerzos

laterales a una profundidad dada son también de magnitudes importantes (Barkdale y Bachus, 1983).

Para las ecuaciones anteriores se asume que el concepto de la célula unitaria es válido, se satisface la estática y el valor del factor de concentración de esfuerzos, n , ya se sabe o se calcula haciendo pruebas en campo o por medio del método teórico presentado en la sección D.2.b.iv

Generalmente el factor n se obtiene de pruebas de carga a gran escala realizadas in-situ, pero también existe un método teórico para calcularlo.

iv. Cálculo del factor n y el Módulo de Elasticidad de las Columnas de grava

Para el diseño es necesario conocer el módulo de elasticidad de las columnas de grava. El módulo de elasticidad varía según el estado de esfuerzo desarrollado en la columna durante y después de la construcción de la misma. El módulo de elasticidad puede calcularse utilizando la siguiente ecuación:

$$E_s = (\sigma_1 - \sigma_3) / \varepsilon_a$$

donde, $\sigma_1 - \sigma_3$ es el esfuerzo desviador desarrollado bajo la carga aplicada, σ_1 es el esfuerzo vertical en la columna de grava, σ_3 es el esfuerzo lateral en la columna de grava y ε_a es la deformación axial. Los datos necesarios para calcular el módulo de elasticidad de las columnas de grava se obtienen de la prueba de corte triaxial y pruebas de carga (Barkdale y Bachus, 1983)

El factor n se puede obtener teóricamente utilizando la teoría elástica y asumiendo un esfuerzo vertical constante. El asentamiento vertical de la columna de grava se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$S_s = \frac{\sigma_s L}{\tilde{D}_s}$$

donde S_s es el desplazamiento vertical de la columna de grava, σ_s es el esfuerzo promedio aplicado a la columna de grava, L es el largo de la columna de grava y \tilde{D}_s , es el módulo restringido de la columna de grava que es igual a E_s de la ecuación anterior, para la parte superior de la columna de grava (Barkdale y Bachus, 1983)

Si asumimos un asentamiento vertical constante de la columna de grava y el suelo adyacente tenemos la siguiente relación:

$$\sigma_s / \sigma_c = \tilde{D}_s / \tilde{D}_c$$

3. Análisis de Carga Última

Generalmente, la capacidad de soporte de las cimentaciones soportadas por columnas de grava es controlada por el asentamiento. Sin embargo, también es posible aplicar una carga lo suficientemente grande, como para alcanzar la capacidad última de las columnas de grava. Para determinar la capacidad última de las columnas de grava se deben evaluar los cuatro modos de falla:

a) Falla por abultamiento

En las teorías desarrolladas para calcular la capacidad última de una columna de grava, que puede fallar por abultamiento, asumen que ésta está en un estado de esfuerzos triaxiales, como se ilustra en la figura 9:

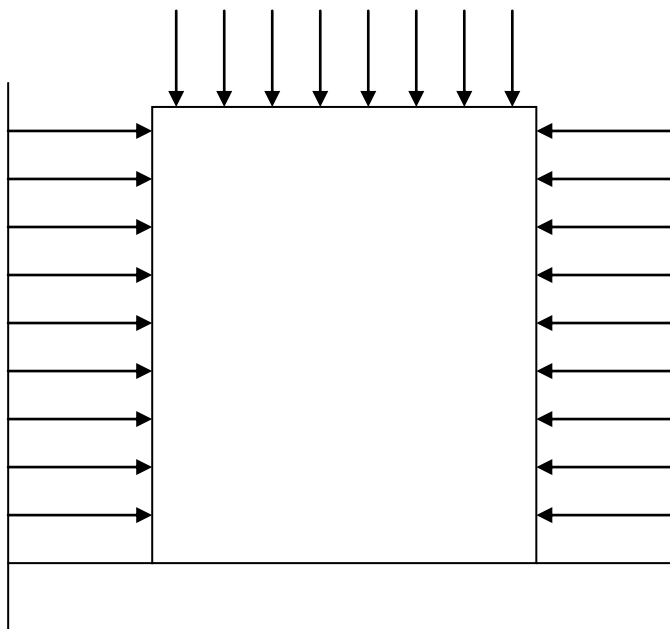


Figura 9: Estado de falla por esfuerzos triaxiales

El esfuerzo lateral de confinamiento, σ_3 , se le da un valor igual a la resistencia pasiva última que el suelo adyacente puede movilizar a medida que la columna de grava se abulta. Como se asume que la columna de grava está a punto de fallar o dicho de otra forma está en equilibrio plástico, el esfuerzo último vertical, σ_1 , que la columna puede soportar se considera igual al coeficiente de presión pasiva, K_p , de la columna de grava multiplicado por el esfuerzo lateral de confinamiento, σ_3 , que podemos expresar como:

$$\sigma_1/\sigma_3 = \frac{1 + \sin \phi_s}{1 - \sin \phi_s}$$

y como:

$$\frac{1 + \sin \phi_s}{1 - \sin \phi_s} = \tan^2(45 + \phi_s/2)$$

Podemos escribir la ecuación como:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \tan^2(45 + \phi_s/2)$$

donde ϕ_s es el ángulo de fricción interna de las columnas de grava y la razón de esfuerzos σ_1/σ_3 es igual a la presión pasiva del suelo K_p para la columna de grava.

Teoría de la Expansión de la cavidad: La resistencia pasiva desarrollada por la matriz de suelo adyacente, puede ser modelada como un cilindro infinitamente largo que se expande respecto al eje de simetría, hasta alcanzar la resistencia pasiva última del suelo. La cavidad cilíndrica expandida simula la falla por abultamiento de una columna de grava.

Hughes y Wither desarrollaron una ecuación para calcular la resistencia última lateral no drenada, utilizando una cavidad infinitamente larga:

$$\sigma_3 = \sigma_{ro} + c \left[1 + \ln \left(\frac{E_c}{2c(1+\nu)} \right) \right]$$

donde σ_3 es la resistencia última lateral no drenada, σ_{ro} es el esfuerzo inicial aplicado después de la construcción de las columnas de grava, pero antes de aplicar la carga de la cimentación, E_c es el módulo de elasticidad del suelo, c es el corte no drenado y ν es la razón de Poisson para el suelo.

Si sustituimos σ_3 de la ecuación (9) en la ecuación (8) y siendo $\sigma_1 = q_{ult}$ tenemos:

$$q_{ult} = \left\{ \sigma_{ro} + c \left[1 + \ln \frac{E}{2c(1+\nu)} \right] \right\} \tan^2(45 + \phi_s/2)$$

A.S. Vesic (1972), desarrolló una solución general con la cual se puede calcular la capacidad última para suelos con cohesión y fricción. La resistencia lateral ultima σ_3 en el suelo es:

$$\sigma_3 = cF_c' + qF_q'$$

donde:

- c = cohesión

- q = esfuerzo promedio a la profundidad de la falla.

- F_c' F_q' = factores de expansión de la cavidad que son funciones del ángulo de fricción interna, ϕ_s , del suelo adyacente y del Índice de Rigidez, I_r , que se calcula con la siguiente ecuación:

$$I_r = \frac{E}{2(1+\nu)(c + q \tan \phi_c)}$$

donde:

- E es el módulo de elasticidad del suelo adyacente que se ve afectado por la expansión de la cavidad.
- c es la cohesión del suelo adyacente
- ν es la relación de Poisson del suelo adyacente
- q es el esfuerzo promedio dentro de la zona de falla

A continuación se muestra una gráfica para los coeficientes de la expansión de la cavidad, encontrados a partir del ángulo de fricción interna:

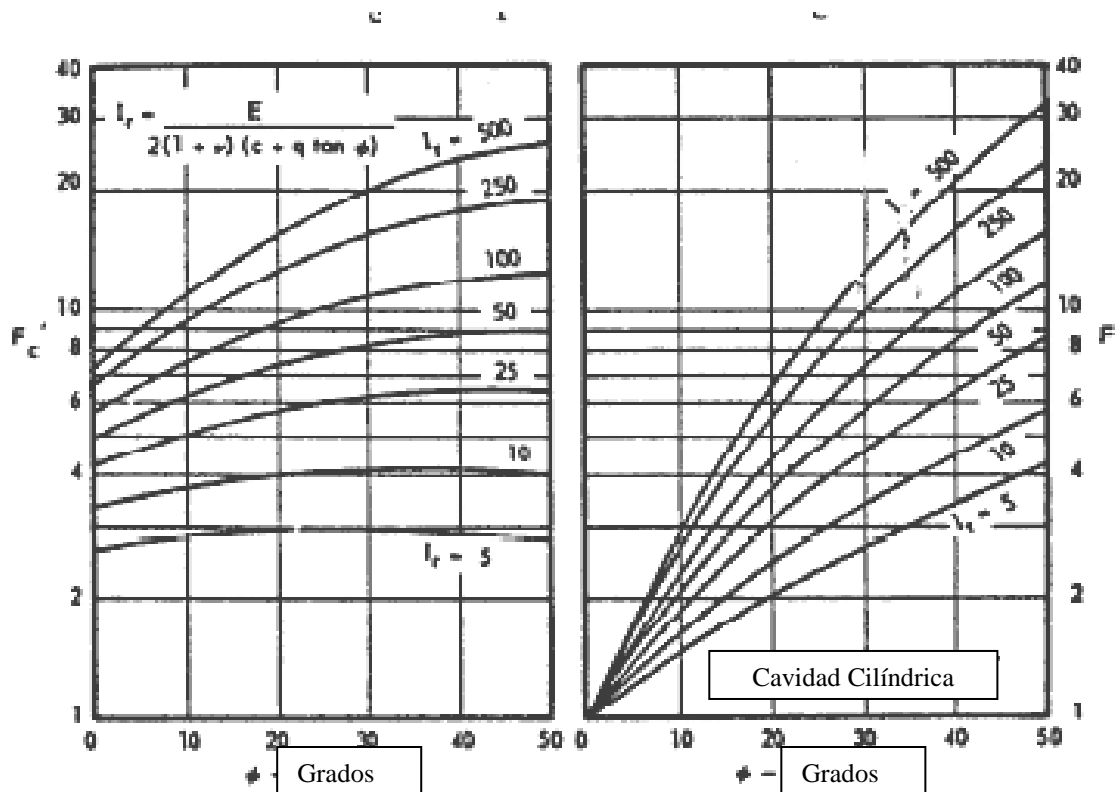


Figura 10: Coeficientes de la expansión del cavidad (Barkdale y Bachus, 1983)

b) Falla por corte en las puntas de las columnas de grava

La carga última para resistir el corte en las puntas de las columnas de grava se hace utilizando la teoría de la capacidad de carga última de Terzaghi para cimentaciones superficiales.

La capacidad de soporte de la punta de la columna de grava puede estimarse utilizando la clásica ecuación de Terzaghi (Das, 2001):

$$q_{tip,g} = q_{ult} = cN_c + 0.5d_f \gamma N_\gamma + \sigma_v^3 N_q$$

Donde N_c , N_q , y N_γ son factores adimensionales de la capacidad de soporte, γ es el peso unitario del suelo circundante, y σ_v^3 es la sobrecarga aplicada a la parte superior de la columna de grava y d_f es el diámetro de la columna de grava (Das, 2001).

Los factores adimensionales dependen del ángulo de fricción interna de la columna de grava y se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$N_q = \tan^2(45 + \phi_s/2) e^{\pi \tan \phi_s}$$

$$N_c = (N_q + 1) \cot \phi_s$$

$$N_\gamma = 2(N_q + 1) \tan \phi_s$$

(Das, 2001)

1) Condiciones no drenadas

Para condiciones no drenadas, la fricción promedio (f_s) a lo largo de la cavidad es la resistencia a corte no drenado (c) de la matriz de suelo circundante cercana al pozo de la columna de grava. La expresión para la capacidad de soporte de la punta en suelos arcillosos se puede simplificar como (Meyerhof, 1976):

$$q_{tip} = cN_c$$

La consecuencia de un esfuerzo normal excesivo en las puntas de las columnas de grava es el asentamiento, y no la rotación global de la cimentación. Esto porque los esfuerzos de la cimentación serán transmitidos a la matriz de suelo circundante a medida que los pozos de las Columnas de grava se asienten más de lo anticipado. A pesar que en los cálculos geotécnicos no se utilizan factores de seguridad normalmente, un factor de seguridad de 1.5 es considerado prudente para este modo potencial de deflexión.

Los cálculos presentados en esta sección son aplicables únicamente a suelos para los cuales la disipación del exceso en la presión de poro es más lenta que la aplicación de carga. Por esto se recomienda que el diseño de las columnas de grava a ser instaladas en arcillas muy blandas se realice basado en los resultados de pruebas de carga hechas en el campo.

2) Condiciones Drenadas

Para condiciones drenadas, la fricción promedio (f_s) es el producto de la presión horizontal (σ_h^3) por la tangente del ángulo de fricción del suelo circundante $[\tan(\phi_s)]$. La presión promedio horizontal se puede estimar, conservadoramente, como el producto del esfuerzo efectivo vertical que actúa a la mitad de la cavidad (σ_{avg}^3) y el coeficiente de presión pasiva

del suelo de Rankine (k_{ps}) de la matriz de suelo. Por tanto, la fricción unitaria puede expresarse como:

$$\begin{aligned} f_s &= \sigma_{vavg}^3 \tan(\phi_s) k_{ps} \\ &= (d_f + H_{shaft}/2) \gamma \tan(\phi_s) \tan^2(45 + \phi_s/2) \end{aligned}$$

Donde d_f es la distancia de la parte inferior de la cimentación debajo de la grava adyacente, H_{shaft} es la profundidad que tiene la cavidad, medida desde la parte inferior de la cimentación, γ es el peso unitario del suelo circundante, y ϕ_s es el ángulo de fricción interna de la matriz de suelo. La capacidad de soporte de la punta de las Columnas de grava se puede calcular utilizando la ecuación 9, arriba, donde el primer término c está omitido debido a que se considera igual a cero, y donde el segundo término no aparece debido a que estamos calculando Columnas de grava poco profundas; el factor de capacidad de soporte N_q depende del ángulo de fricción del suelo.

c) Corte en las columnas de grava

La capacidad de corte de los materiales a lo largo de esta zona de falla depende de la fricción dentro de la matriz de suelo (t_s) y de la resistencia al corte debido a la fricción entre las columnas de grava y el suelo adyacente. Este modo de falla depende de parámetros compuestos de la resistencia al corte. La capacidad de soporte de la matriz de suelo compuesta puede ser estimada utilizando la teoría de la capacidad de carga última de Terzaghi, vista en la sección anterior.

Para calcular los parámetros compuestos del suelo; específicamente el ángulo de fricción interna compuesto (ϕ_{comp}) y la cohesión compuesta (c_{comp}) utilizamos la ecuación propuesta por Priebe (1978):

$$\phi_{comp} = \tan^{-1} [a_s n \tan(\phi_g) + (1 - a_s n) \tan(\phi_s)]$$

y

$$c_{comp} = (1 - a_s) c$$

Donde a_s es el factor de área de reemplazo, n es la relación de esfuerzos entre el esfuerzo aplicado a la columna de grava y el esfuerzo aplicado al suelo circundante (concentración de esfuerzos), ϕ_g es el ángulo de fricción de la columna de grava, ϕ_s es el ángulo de fricción del suelo adyacente y c es la cohesión del suelo (sin las columnas de grava).

En grupos de columnas de grava podemos asumir que la superficie de falla es lineal por lo que esta superficie de falla forma un ángulo β con la cimentación que es igual a:

$$\beta = 45 + \frac{\phi_{comp}}{2}$$

Para calcular la capacidad última se debe determinar el valor de σ_3 . Este se obtiene utilizando la teoría clásica de la presión del suelo para una cimentación infinitamente larga, entonces tenemos:

$$\sigma_3 = \frac{\gamma_c B \tan \beta}{2} + 2c$$

donde:

- σ_3 es la presión lateral de confinamiento promedio
- γ_c es el peso unitario saturado del suelo cohesivo
- B es el ancho de la cimentación
- c es la resistencia al corte no drenada del suelo natural (sin las columnas de grava)

Utilizando la teoría de expansión de cavidades tenemos que la capacidad última es:

$$q_{ult} = \sigma_3 \tan^2 \beta + 2c_{comp} \tan \beta$$

d) Corte en la matriz de suelo debajo de la columna de grava

Una solución conservadora para este problema se obtiene comparando los esfuerzos inducidos en la parte inferior de las columnas de grava con la capacidad última obtenida de la teoría de la capacidad de carga última de Terzaghi. Los esfuerzos inducidos en el suelo mejorado que se encuentra bajo las columnas de grava puede ser calculado asumiendo que la transmisión de la carga aumenta en una proporción de 2:1 (vertical a horizontal) debajo de la cimentación, entonces tenemos:

$$q_{bajocg} = q \left\{ \frac{BL}{[(B+H)(L+H)]} \right\}$$

Donde q es la capacidad de carga de la cimentación, B es el ancho de la cimentación, L es el largo de la cimentación y H es el espesor del estrato mejorado con columnas de grava.

4. Asentamiento

Los métodos para calcular el asentamiento se dividen en dos categorías:

- Métodos simples aproximados que asumen diversos factores para hacer simplificaciones importantes.
- Métodos sofisticados basados en la elástica fundamental o en la teoría de la plasticidad (como el elemento finito), en los cuales se modelan el material y las condiciones de frontera.

Todos estos enfoques para calcular el asentamiento asumen un área de carga infinitamente ancha reforzada con columnas de grava, y que tienen un diámetro y un espaciamiento constante. Los asentamientos se puede dividir en dos categorías:

- asentamientos que ocurren en la zona reforzada por las columnas de grava
- asentamientos que ocurren debajo de la zona reforzada por columnas de grava.

Generalmente, los asentamientos debajo de la zona reforzada por columnas de grava son muy pequeños y pueden obviarse, aunque se debe tener especial cuidado si se tiene un estrato orgánico o si la columna de grava no está directamente apoyada en un estrato firme.

a. Método de Equilibrio

Este método ofrece un enfoque ingenieril muy simple y realista para estimar la reducción de asentamiento en un suelo mejorado con columnas de grava. El factor de concentración de esfuerzos (n) por lo general se obtiene de pruebas de campo, aunque como se vio anteriormente se puede calcular teóricamente.

Para hacer cálculos de asentamiento con este método se debe asumir lo siguiente:

1. la teoría de la célula unitaria es válida.
2. La carga vertical aplicada a la célula unitaria es igual a la suma de la fuerza soportada por la columna de grava y el suelo adyacente.
3. El desplazamiento vertical de la columna de grava y del suelo es igual.
4. El esfuerzo vertical uniforme debido a la carga externa se da a lo largo de la columna de grava.

Es importante notar que para este método se deben calcular, por aparte, los asentamientos que ocurren debajo de las columnas de grava.

De la teoría unidimensional de consolidación tenemos:

$$S_t = \left(\frac{C_c}{1 + e_o} \right) \log \left(\frac{\bar{\sigma}_o + \sigma_c}{\bar{\sigma}_o} \right) \cdot H$$

donde S_t es la consolidación primaria, H , es la altura de suelo reforzado para la cual se están calculando los asentamientos, $\bar{\sigma}_o$ es el esfuerzo inicial efectivo en el estrato de arcilla, σ_c , es el cambio en esfuerzo en la arcilla debido a la carga superpuesta, C_c es el índice de compresión obtenido de la prueba unidimensional de consolidación y e_o es la relación de vacíos inicial.

Mejoramiento de Suelos: de la ecuación anterior podemos decir que para arcillas normalmente consolidadas, la razón de asentamientos del suelo mejorado con columnas de grava a suelo sin refuerzo, S_t/S es:

$$\frac{S_t}{S} = \frac{\log \left(\frac{\bar{\sigma}_o + \mu_c \sigma}{\bar{\sigma}_o} \right)}{\log \left(\frac{\bar{\sigma}_o + \sigma}{\bar{\sigma}_o} \right)}$$

b. Método de Prueba

Priebe propuso un modelo que también utiliza el concepto de célula unitaria. Se asume que la columna de grava está en un equilibrio plástico bajo esfuerzos triaxiales. Se idealiza el suelo dentro de la célula unitaria como un material elástico. En este método se asume que la columna de grava es

incompresible por lo que el cambio de volumen en el suelo está directamente relacionado con el acortamiento vertical de la columna cilíndrica. La deformación radial del suelo elástico se determina utilizando un cilindro hueco, infinitamente largo y elástico. Este cilindro elástico de suelo, que tiene una frontera rígida que coincide con la frontera de la célula unitaria, está sujeto a una presión interna uniforme. También se asume que el asentamiento será igual para la columna de grava y para el suelo, los esfuerzos serán uniformes en los dos materiales y las columnas se apoyan en un estrato firme.

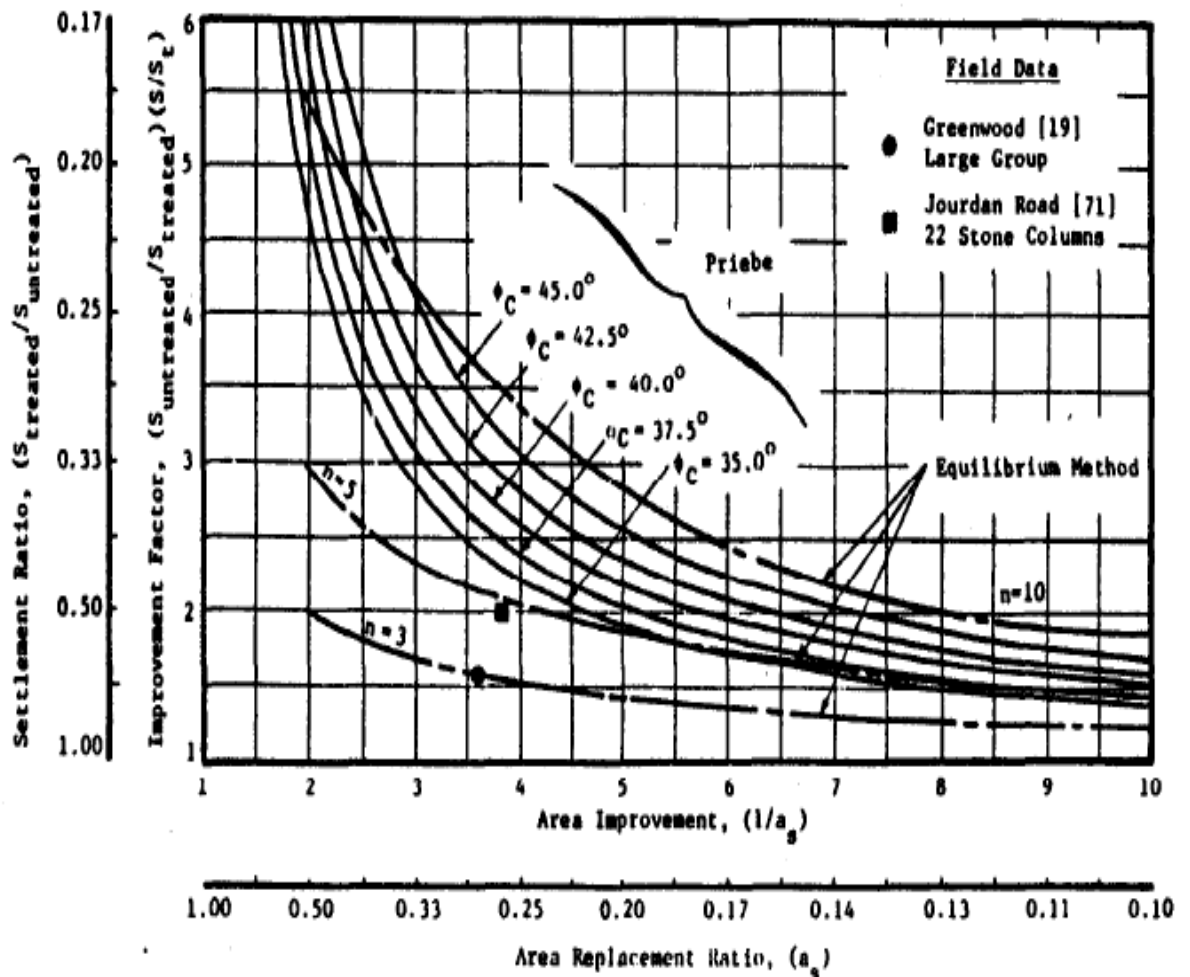


Figura 11: Curvas de diseño de Priebe (Barkdale y Bachus, 1983).

La relación de asentamiento de suelo mejorado con columnas de grava y suelo no mejorado, S/S_t es dado como una función del área reemplazada a_s y el ángulo de fricción interna, ϕ_s .

c. Método de Greenwood

Greenwood desarrolló un método para el cálculo de asentamientos, basado en evidencia empírica. Estas curvas presentan la relación de las áreas transversales de las columnas y el área total del suelo contra el asentamiento sin columnas de grava y el asentamiento con columnas de grava.

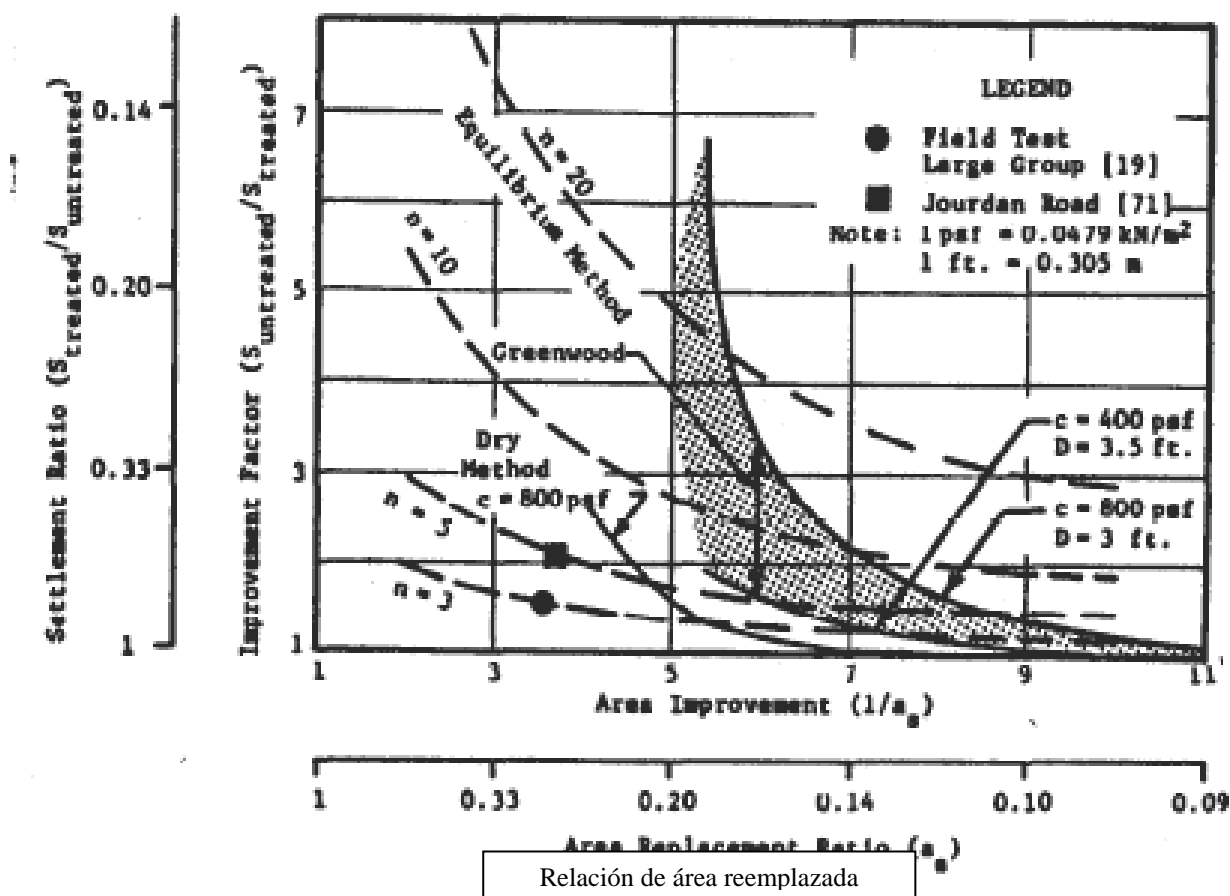


Figura 12: Curvas de diseño de Greenwood (Barkdale y Bachus, 1983)

d. Método Incremental

Goughnour y Bayuk desarrollaron este método basados en el concepto de unidad celular y una solución elasto-plástica iterativa.

e. Método del Elemento Finito

El método del elemento finito ofrece el mejor enfoque teórico para modelar el suelo mejorado con columnas de grava. Se puede modelar de forma real las propiedades no lineales de los materiales condiciones de borde adecuadas. A pesar de que se pueden usar modelos en tres dimensiones, desde un punto de vista práctico se utilizan modelos planos de deformación.

f. Distribución de Esfuerzos en Grupos de Columnas de Grava

Muchas situaciones donde se pueden utilizar columnas de grava, requieren el uso de grupos de columnas de grava de un limitado tamaño. Se requiere entender cómo se distribuyen los esfuerzos en el

suelo mejorado, para estimar el asentamiento por consolidación. Adicional a esto, los esfuerzos verticales son factores a tomar en cuenta para hacer análisis de estabilidad.

El esfuerzo aplicado a grupos limitados de columnas de grava se expande lateralmente hacia fuera a una profundidad dentro del suelo adyacente. La expansión del esfuerzo vertical dentro del suelo adyacente a las columnas de grava, ocurre de forma muy parecida a como ocurre en suelos homogéneos. Sin embargo, en suelos mejorados con columnas de grava, la presencia de estos elementos rígidos hace que los esfuerzos se concentren en esos puntos adyacentes. También, los esfuerzos en las columnas de grava son mayores que los que ocurren en el suelo adyacente.

El mejor método para calcular la distribución del esfuerzo vertical en el suelo mejorado con columnas de grava es por medio del elemento finito. Cabe mencionar que un método práctico y muy útil para calcular este asentamiento es utilizar la teoría de distribución de esfuerzos de Boussinesq:

$$\Delta\sigma = \frac{q}{\pi} [\beta + \sin\beta \cos(\beta + 2\delta)]$$

g. Velocidad de Consolidación Primaria

Las ecuaciones anteriores dan la magnitud de los asentamientos que pueden ocurrir en el suelo, pero estas ecuaciones no dan ninguna información respecto a la velocidad con que ocurre la consolidación primaria. Terzaghi (1925) propuso la primera teoría para considerar la velocidad de la consolidación unidimensional. Esta teoría se basa en las siguientes suposiciones:

- El suelo está saturado con un líquido incompresible
- Los componentes minerales (sólidos) son incompresibles.
- Se aplica la ley de Darcy.
- El coeficiente de permeabilidad es constante
- El coeficiente de compresibilidad es constante para el rango de presión aplicado.
- La relación de vacíos es constante

Adicionalmente se asume que:

- El drenado es infinitamente permeable e incompresible
- Sólo ocurre compresión vertical

En un suelo cohesivo mejorado con columnas de grava, el agua fluye hacia la columna de grava formando un patrón con componentes de flujo verticales y radiales, como se muestra en la siguiente figura:

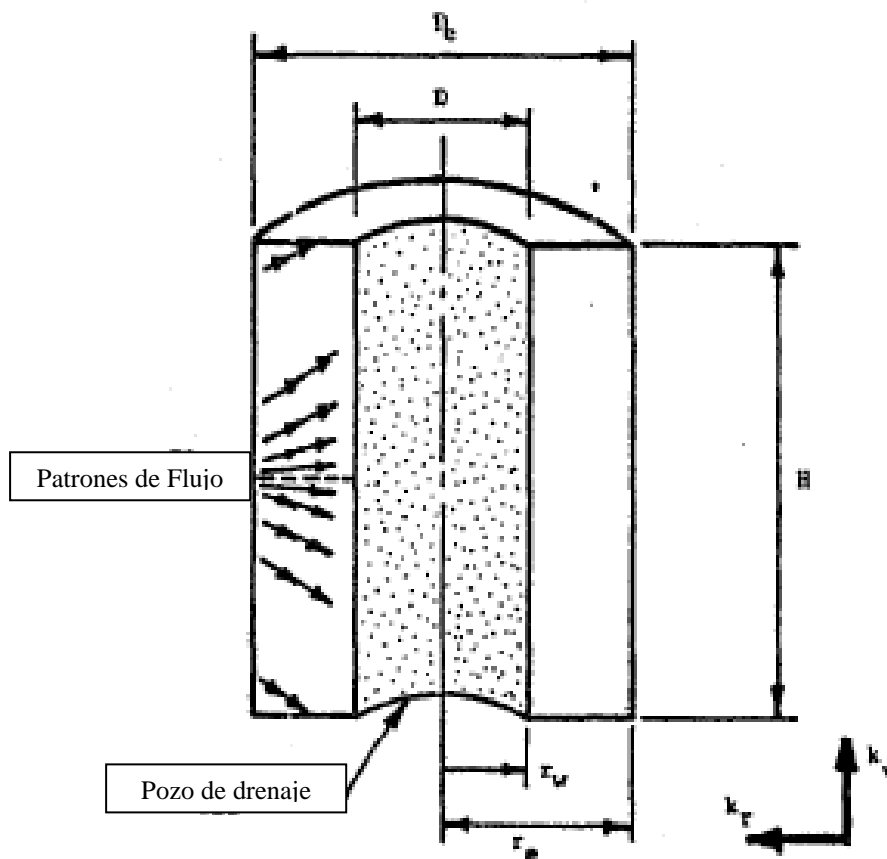


Figura 13: Patrones de flujo de agua (Barkdale y Bachus, 1983)

Para calcular la velocidad con que ocurren los asentamientos en suelos mejorados con columnas de grava, la teoría se basa en los drenes de arena. Siguiendo el método de separación de variables de Newman, el grado de consolidación primaria de la capa de suelo se calcula:

$$U_{z,r} = 1 - (1 - U_z)(1 - U_r)$$

donde $U_{z,r}$ es el grado de consolidación primaria de la capa de suelo, considerando que drena vertical y radialmente, U_z es el grado de consolidación primaria considerando únicamente un flujo vertical y U_r es el grado de consolidación considerando sólo flujo radial.

El asentamiento por consolidación primaria en un tiempo t para un suelo cohesivo mejorado con columnas de grava, está dado por:

$$S'_t = U \cdot S_t$$

donde S'_t es el asentamiento por consolidación en un tiempo t , S_t es el asentamiento último por consolidación del suelo mejorado, U es el grado de consolidación.

Según la teoría de consolidación primaria de Terzaghi, el grado de consolidación en la dirección vertical, U_z , es una función del factor adimensional de tiempo T_z . este factor de tiempo para la dirección vertical está dado por:

$$T_z = C_v t / (H/N)^2$$

donde T_z es el factor de tiempo en la dirección vertical, C_v es el coeficiente de consolidación en la dirección vertical, t es el tiempo transcurrido, H es la altura del estrato de suelo cohesivo y N es el número de superficies permeables arriba o debajo del estrato en mención ($N = 1$ o 2)

La ecuación anterior se puede extender para incluir el flujo radial, entonces la ecuación se convierte en:

$$T_r = C_{v_r} t / (D_e)^2$$

donde T_r es el factor de tiempo para flujo radial, C_{v_r} es el coeficiente de consolidación radial, t es el tiempo transcurrido y D_e es el diámetro equivalente de la célula unitaria.

h. Asentamiento por consolidación Secundaria

A medida que el agua es exprimida de los poros debido a la carga aplicada, el esfuerzo efectivo aumenta y la consolidación primaria ocurre. Luego que el exceso en la presión de poro (presión creada por la carga aplicada) se ha disipado, ocurre una reducción en el volumen del suelo cohesivo, que causa que el asentamiento continúe bajo un esfuerzo efectivo constante. Este cambio de volumen que ocurre bajo un esfuerzo efectivo constante se le llama consolidación secundaria.

La teoría para estimar la consolidación secundaria parte de la relación lineal que hay entre el logaritmo del tiempo y la consolidación secundaria.

Entonces el asentamiento que ocurre en un estrato de suelo de altura H , que está sujeto a un esfuerzo vertical promedio de σ_c está dado por:

$$\Delta S = C_\alpha H \log \frac{t_2}{t_1}$$

donde ΔS es la consolidación secundaria, C_α es una constante que se obtiene de una prueba de consolidación unidimensional cuando ya ha ocurrido la consolidación primaria y para un incremento apropiado en la carga.

i. Aumento en la Resistencia al Corte debido a la Consolidación

Cuando se construyen cimentaciones sobre suelos cohesivos blandos resulta en un esfuerzo adicional sobre éste. Esto hace que la presión de poro aumente y produzca una consolidación que conlleva un aumento en la resistencia al corte.

Para un suelo cohesivo su resistencia no drenada al corte se expresa como:

$$c = K_1 \times \bar{\sigma}$$

donde c es la resistencia no drenada al corte, $\bar{\sigma}$ es la presión efectiva y K_1 es una constante que define la linealidad entre la carga superpuesta y la resistencia al corte (más carga aplicada existe mayor resistencia al corte en el suelo).

5. Análisis de Estabilidad de Taludes

Las columnas de grava pueden utilizarse para aumentar el factor de seguridad de un talud hasta un valor aceptable, para fallas de rotación o una falla lineal de estabilidad.

El análisis se hace exactamente de la misma forma que para taludes convencionales sólo que se debe tomar en cuenta la resistencia al corte del suelo mejorado con columnas de grava.

Para el diseño o análisis de estabilidad se utiliza el método de la resistencia al corte promedio. Básicamente este método utiliza una resistencia al corte compuesta del suelo y las columnas de grava. Esta resistencia al corte depende de la resistencia no drenada al corte del suelo in-situ, la resistencia a la fricción de la columna de grava, la razón de área de reemplazo y la condición de carga.

Para calcular la resistencia promedio al corte utilizamos la ecuación de criterio de falla de Mohr-Coulomb incorporando los parámetros compuestos, así:

$$\tau_f = (1 - a_s)c_u + a\sigma_v \tan \phi_s$$

donde a_s es el área de reemplazo, c_u es la resistencia no drenada al corte del suelo natural, ϕ_s es el ángulo de fricción interna de la columna de grava, y σ_v es el esfuerzo inducido por la carga aplicada.

Para calcular el peso unitario promedio se utiliza la siguiente ecuación:

$$\bar{\gamma} = \gamma_c a_s + \gamma_s (1 - a_s)$$

donde $\bar{\gamma}$ es el peso promedio unitario del suelo compuesto, γ_c es el peso unitario de las columna de grava, a_s es el área reemplazada y γ_s es el peso unitario del suelo.

En la figura 14 se muestra gráficamente los parámetros utilizados en el análisis.

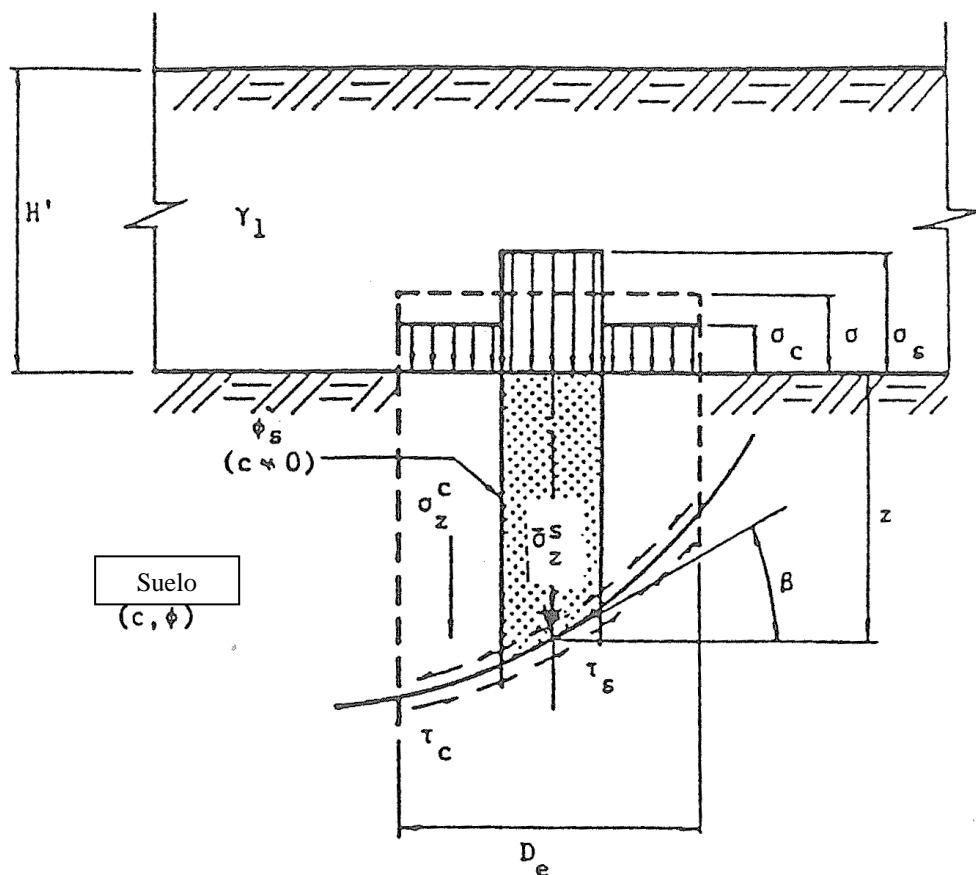


Figura 14: Método de esfuerzos promedio (FHWA, 1999)

6. Diseño Sísmico de las Columnas de Grava

a. Aspectos Importantes del Diseño Sísmico

La licuefacción de los suelos sueltos no cohesivos ocurre debido a las características propias de estos suelos. Cuando se instalan columnas de grava en estos suelos el potencial de licuefacción disminuye debido a que se incrementa la densidad del suelo, se incrementa la presión de confinamiento, la rigidez del suelo compuesto es mucho mayor que la del suelo sin columnas de grava y además se controla o previene el aumento, a niveles peligrosos, de la presión de poro. Actualmente, los enfoques de diseño sísmico únicamente consideran el aumento en la densidad. Aparte del potencial de algunos suelos de licuarse, éstos deben resistir las cargas laterales provocadas por los sismos.

La presión horizontal del suelo, terremotos y el viento causan que la estructura se vea sometida a carga laterales. Estas deben ser transmitidas y resistidas por la cimentación. Las cimentaciones poco profundas soportadas por columnas de grava resisten las cargas de la misma manera que lo hacen las cimentaciones poco profundas:

- Presiones pasivas del suelo adyacente a la cimentación.
- Deslizamiento de la base a lo largo de la parte inferior de la cimentación.

b. Resistencia a Cargas Laterales

Las cargas laterales transmitidas a cimentaciones poco profundas son resistidas por el deslizamiento en la base y la presión pasiva de suelo que se genera en la parte frontal de la cimentación a medida que ésta es empujada a los suelos adyacentes.

La resistencia en la base de cimentaciones soportadas por columnas de grava se puede dividir en dos componentes: 1) deslizamiento entre la base de la cimentación y la parte superior de las Columnas de grava y 2) el deslizamiento entre la cimentación y la matriz de suelo.

La resistencia al deslizamiento provista por las Columnas de grava se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$F_g = q_g \tan \phi'_g A_g$$

donde, q_g es el esfuerzo normal que actúa sobre el elemento, ϕ'_g es el ángulo de fricción interna de la columna de grava y A_g es el área transversal de la columna de grava.

El esfuerzo normal en las columnas de grava depende de la sobrecarga aplicada (q) en la zapata, la rigidez (R_s) entre las Columnas de grava y la matriz de suelos, y la relación entre el área transversal del área de la parte inferior de la zapata y la suma de las áreas de todas las Columnas de grava bajo la zapata (R_a)

$$q_g = [qR_s / (R_a R_s + 1 - R_a)]$$

El esfuerzo en las columnas de grava es mucho mayor que el esfuerzo en los suelos circundantes debido a que las columnas de grava tienen una rigidez mayor. Gracias a este esfuerzo normal en las columnas de grava y al ángulo de fricción alto, casi toda la carga lateral es resistida por el deslizamiento en la parte de arriba de las columnas de grava.

c. Resistencia al deslizamiento provista por la matriz de suelo

La resistencia al deslizamiento (F_m) provista por la matriz de suelo está dada por la siguiente ecuación:

$$F_m = q_s \tan \phi'_m A_m + c_m A_m$$

donde, q_s es esfuerzo normal (hacia abajo), ϕ'_m es el ángulo de fricción interna del suelo, A_m es la diferencia, en área, entre la huella de la cimentación y la suma de todas las secciones transversales de las Columnas de grava, y c es la cohesión del suelo.

El esfuerzo en la matriz de suelos se calcula con la siguiente ecuación:

$$q_s = q_g / R_s$$

donde, q_g es el esfuerzo en las Columnas de grava y R_s es la relación de rigidez entre las columnas de grava y el suelo circundante.

d. Resistencia Total

La resistencia total al deslizamiento a lo largo de la base de la cimentación (F_t) se calcula con la siguiente ecuación:

$$F_t = F_g + F_m$$

e. Presión pasiva del suelo

La presión pasiva del suelo se desarrolla en la matriz de suelo cuando la parte frontal de la cimentación empieza a deslizarse. La fuerza pasiva (F_p) que resiste el movimiento lateral depende del ancho de la zapata (B), el peso unitario del suelo (γ), el confinamiento de la cimentación (D_f), la presión pasiva del suelo (K_p) y la cohesión del suelo (c_m). Esta fuerza (F_p) la podemos calcular con la ecuación de Terzaghi-Peck:

$$F_p = (BK_p\gamma D_f^2 / 2) + (2c\sqrt{K_p}BD_f)$$

donde como hemos visto con anterioridad la presión pasiva del suelo depende del ángulo de fricción del suelo.

V. DESCRIPCIONES

A. Tipos de columnas de grava

El mejoramiento de los suelos con columnas de grava o arena puede ser implementado utilizando varias técnicas de excavación, reemplazo y compactación. El tipo de columna de grava, depende básicamente de la técnica utilizada en su construcción. Estas puede ser:

1. Vibroreemplazo

Este método consiste en hacer una excavación hasta la profundidad deseada, para luego por medio de presión colocar la grava en capas de 0.3 m a 1.2 m cada una. Estas capas se colocan por medio de un vibrador eléctrico o hidráulico, localizado cerca de la parte inferior de la perforación. El proceso húmedo es utilizado donde la estabilidad de la excavación es cuestionable. Por lo tanto, se recomienda utilizar este método para terrenos con suelos muy blandos a firmes, donde el nivel freático esté cerca de la superficie (FHWA, 1999)

Este método debe utilizarse en suelos muy blandos que no pueden mantener su cohesión cuando se excava en ellos. También es recomendado cuando se tiene un nivel freático elevado. Los chorros de agua en la parte inferior y a lo largo de la unidad facilitan la penetración del vibrador. Asimismo, permiten que el suelo suelto sea extraído del agujero. El agua corriendo estabiliza la excavación y remueve el suelo de los lados.

La principal desventaja con este método es que se requiere una gran cantidad de agua y que luego de ser utilizada debe desecharse sin estar contaminada.

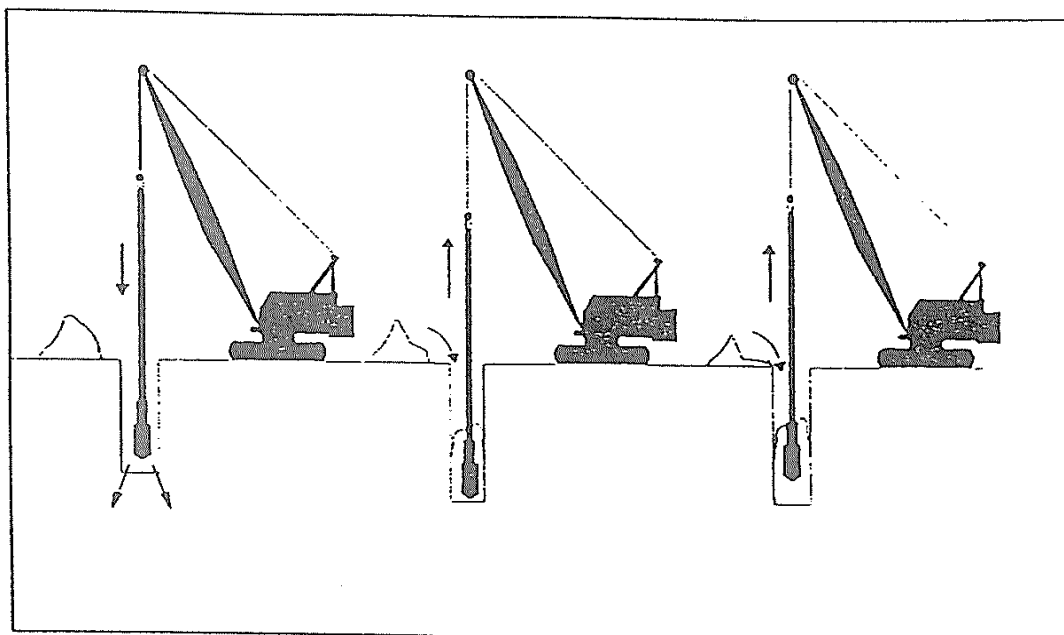


Figura 15: Vibro-reemplazo (FHWA, 1999)

2. Vibrodesplazamiento

Este es un método que se lleva a cabo en seco y comúnmente se le conoce como vibro-reemplazo en seco. La principal diferencia entre el vibrodesplazamiento y el vibroreemplazo es que en el primero existe una ausencia de agua a presión durante la fase inicial de la excavación, mientras en el otro se utiliza agua para mantener la estabilidad. Para utilizar este método es necesario que la excavación sea estable, es decir que permita la extracción de la unidad vibratoria sin que colapse la excavación. Por esto, para que se pueda utilizar este método los suelos deben tener resistencias no drenadas al corte mayores que 40 kN/m^2 a 60 kN/m^2 con el nivel freático a una profundidad que no interfiera con la exploración.

Este método es mucho más limpio que el método húmedo, esto se debe a que en el seco no se utilizan los chorros de agua. Para poder utilizar este método se debe estar seguro que no hay peligro que la excavación colapse. Esta técnica es adecuada para suelos saturados parcialmente que se verán densificados debido a la vibración lateral. A menudo se utiliza aire para facilitar la extracción del vibrador.

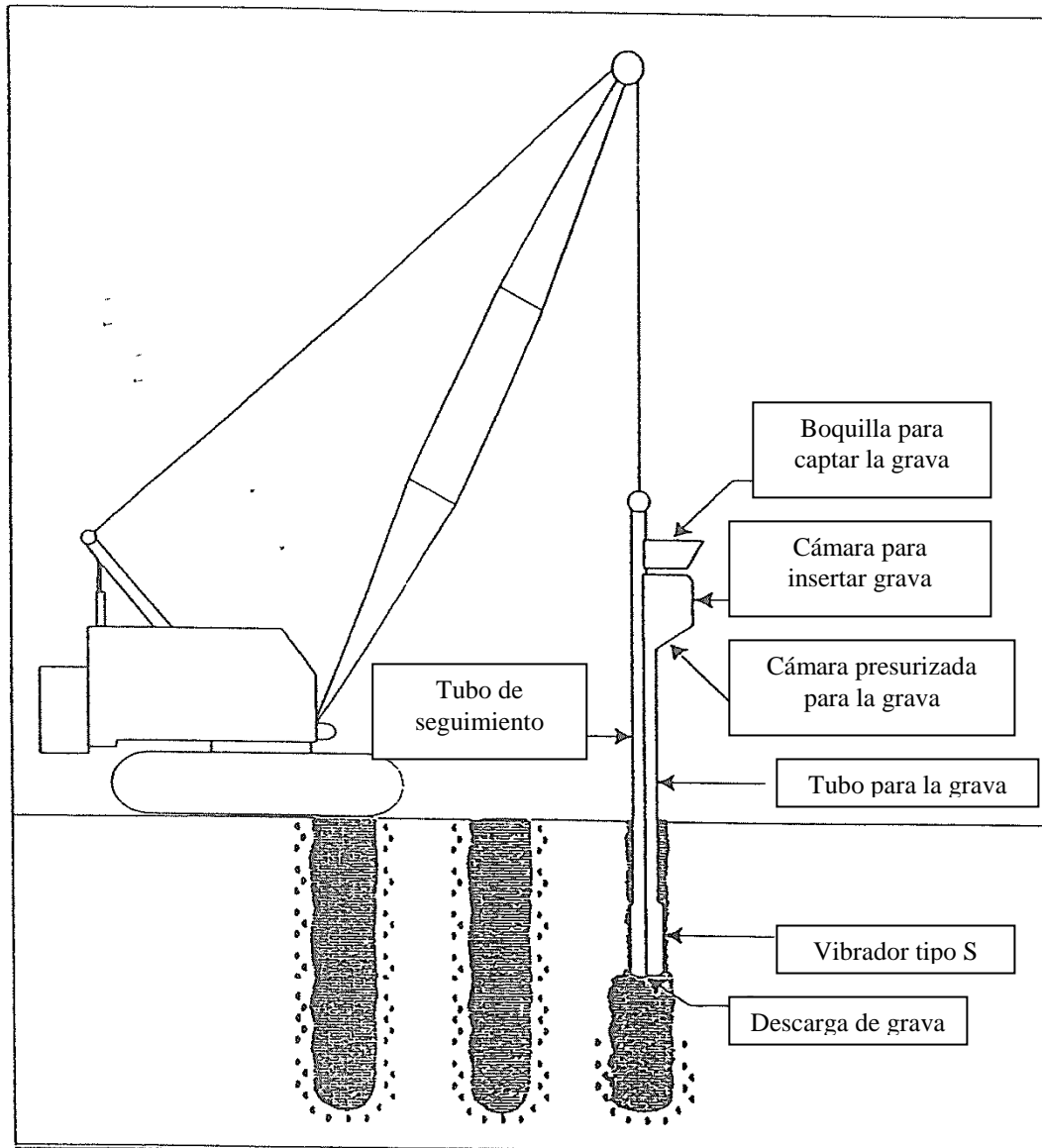


Figura 16: Vibro-desplazamiento (FHWA, 1999)

3. Columnas de grava compactada

Estas se construyen de dos formas: 1) se puede llevar un tubo cerrado o abierto de un lado hasta la profundidad deseada o, 2) haciendo una excavación convencional. Capas de arena y grava se van colocando dentro de la excavación. Estas capas se compactan, comúnmente, utilizando un peso muerto considerable. Los suelos sensibles se ven afectados por la acción de compactación, lo que limita la utilidad de este tipo de columnas en este tipo de suelos.

4. Pilas de Arena compactada

Estas se construyen martillando, con un martillo vibratorio, un molde de acero hacia la profundidad deseada. A medida que el molde es insertado, éste se llena de arena. Luego el molde es removido repentinamente y después vuelto a insertar parcialmente. Cuando se han completado las pilas de arena, el molde ha sido removido de la arena completamente. Este método es utilizado para estabilizar arcillas blandas con un nivel freático elevado.

5. Columnas de Vibro-concreto

Estas columnas utilizan concreto en vez de grava para mejorar el suelo. El concreto es bombeado hacia el fondo de la excavación, por medio de un tubo auxiliar. Este método ofrece las ventajas del mejoramiento de suelos de los sistemas vibratorios con la capacidad de carga de cimentaciones profundas (como pilotes).

El proceso de construcción de este tipo de columnas de grava utiliza un vibrador alimentado desde abajo, que pueda penetrar los suelos hasta un nivel que sea apropiado para cargar. El concreto es bombeado a través del vibrador durante la primera extracción. Luego el vibrador vuelve a penetrar el concreto, desplazándolo hacia el suelo adyacente, formando una base alargada de gran capacidad. Así se continúa extrayendo el vibrador a medida que se bombea concreto, hasta formar un pozo continuo de concreto que llega al nivel de piso.

6. Geopiers

Este tipo de columnas de grava es una derivación de las columnas compactadas de grava. La compañía Geopier ha introducido significativas mejoras a este tipo de columnas durante la última década. Los geopiers se construyen excavando un pozo (generalmente de entre 6 m y 10 m de profundidad), luego con un martinete especial se compacta un bulbo inferior que preesfuerza el suelo. Luego se construyen capas de 0.30 m con este martinete especial hasta llegar al nivel de piso.

B. Construcción de columnas de grava

1. Materiales

a. Suelos

El suelo presente en el área a mejorar debe presentar soporte lateral suficiente para confinar a la columna de grava.

b. Material de Relleno

El tamaño y la forma del material de relleno dependen del tipo de columna de grava a construir. En general se debe utilizar grava limpia, dura, libre de materiales orgánicos o desechos. Cuando se somete a la prueba de contenido de sulfato de magnesio (ASTM C88), el porcentaje de pérdida de peso perdido no debe ser mayor que el 15 por ciento. Cuando la grava se somete a la prueba de abrasión (ASTM C131), ésta debe tener una pérdida máxima del 40 por ciento a 500 revoluciones. Asimismo la graduación de la grava de acuerdo a la prueba AASHTO T-27. Asimismo se deben definir los parámetros de densidad compactada, densidad del material suelto y la gravedad específica así:

- Gravedad específica de acuerdo con la prueba ASTM C127
- Densidad del material suelto de acuerdo a la prueba ASTM C29
- Densidad compactada del material de acuerdo al ASTM C29

c. Agua

Puede utilizarse cualquier tipo de agua, ya sea dulce o salada que esté libre de cualquier sustancia que pueda comprometer las propiedades finales de las columnas de grava.

2. Equipo

a. Vibrador

El vibrador que se utiliza para construir las columnas de grava está impulsado por un motor eléctrico o hidráulico, con forma cilíndrica. Básicamente, el vibrador consiste en un motor eléctrico o hidráulico montado en una caparazón cilíndrica con un diámetro aproximado de 0.36 m a 0.46 m y de 2.0 a 4.5 m de largo. El motor mueve una serie de pesos excéntricos que le dan una vibración lateral y fuerza de compactación. A la unidad vibratoria se le colocan placas de desgaste en los laterales, para proteger de un desgaste excesivo de las piezas durante el proceso de construcción. Asimismo se colocan aletas que sirven para que el vibrador no rote sobre su eje. Un aislante de vibración de un diámetro menor se coloca entre la unidad vibratoria y los tubos que la siguen. Estos tubos tienen un doble propósito: 1) darle el impulso vertical necesario para poder penetrar el suelo y 2) darle la longitud mínima de 10 m.

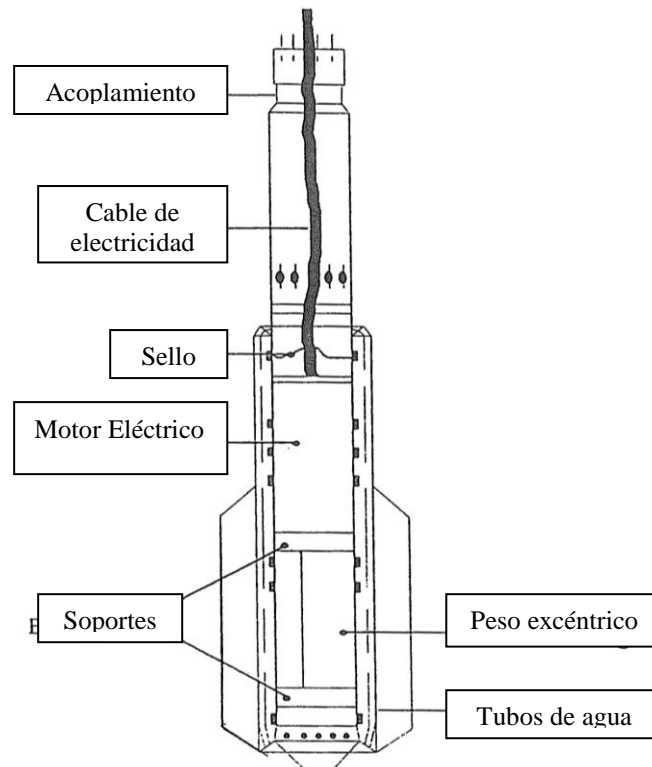


Figura 17: Corte transversal de la unidad vibratoria (FHWA, 1999)

b. Grúa

Se debe utilizar una grúa para suspender el vibrador y darle la movilidad necesaria para penetrar el suelo. Una unidad vibratoria de 10 m puede ser manejada fácilmente por una grúa de 36 toneladas con un brazo (boom) de 12 metros.

3. Proceso Constructivo

La columna de grava es llevada hasta la profundidad requerida utilizando la unidad vibratoria mencionada anteriormente. Después de haber excavado hasta la profundidad deseada utilizando el método húmedo, este es limpiado levantando y dejando caer el instrumento de exploración. Usualmente se debe repetir este proceso 2 o 3 veces.

Luego de hacer esta limpieza se debe dejar el instrumento de exploración dentro del agujero y con los chorros de agua funcionando. Esto ayuda a limpiar la grava y a colocarla rápidamente. Si la estabilidad de la excavación es cuestionada, siempre se debe dejar el instrumento de exploración en el interior de la excavación con los chorros de agua funcionando.

La graduación de la grava utilizada varía según la disponibilidad y las condiciones del subsuelo. En general se debe utilizar un agregado angular, sin graduación con una variación de 12 – 75 mm de largo. Se prefiere grava triturada aunque también se usa la piedra en su estado natural. Para el método húmedo no hay problema si la grava contiene un poco de finos ya que está es desechada por

medio del agua. Para el método seco se puede utilizar una piedra de 100 mm para asegurar que llegue hasta el fondo de la excavación.

La construcción de columnas de grava se hace en capas de 0.6 – 1.2 m. Se coloca la cantidad adecuada de piedra en el agujero, que será llevada hasta al fondo por medio de la compactación continua para asegurar la dosificación. A medida que la grava se densifica, la cantidad de energía utilizada por el vibrador aumenta. Este gasto de energía se utiliza para asegurar una buena densificación de la grava.

Debido al desplazamiento lateral de la grava durante la vibración, el diámetro luego de la construcción siempre es mayor que el diámetro inicial excavado. Los diámetros típicos de excavación varían entre 0.8 – 1.2 m dependiendo del tipo de suelo, su resistencia no drenada al corte, tamaño de la piedra, características del vibrador y el método de construcción. El diámetro final de la columna se estima utilizando una muestra de piedra y asumiendo una densidad compactada.

Este procedimiento de construcción se repite para las columnas subsecuentes. El espaciamiento típico entre columnas es de 1.8 a 2.7 m y no menor que 1.5 m debido a problemas en su construcción. A medida que el espaciamiento entre columnas decrece, la cantidad de suelo reemplazado crece. En columnas espaciadas cerca, las fuerzas laterales residuales de las columnas construidas pueden dificultar el mantener la estabilidad de la perforación contigua. Sin embargo, luego de construidas las columnas estos esfuerzos residuales ayudan a darle soporte lateral a la columna adyacente.

C. Análisis y síntesis de diseño

Las condiciones del suelo in-situ muchas veces no cumplen con los valores que la cimentación de la estructura exige. Para ello se debe recurrir a las columnas de grava si se requiere:

- Aumentar la capacidad de soporte del suelo
- Reducir los asentamientos excesivos o diferenciales
- Acelerar la velocidad de consolidación
- Aumentar la resistencia al corte
- Reducir el potencial de licuefacción
- Estabilizar taludes
- Cualquier combinación de las anteriores

El suelo mejorado debe ser capaz de soportar las cargas aplicadas y que los asentamientos estén en el rango permitido por el diseño de la cimentación.

Es importante notar que los procedimientos para diseñar columnas de grava se basan en las teorías clásicas de la geotecnia utilizando en las ecuaciones los parámetros compuestos que presenta el suelo mejorado (por ejemplo, el ángulo de fricción interna compuesto, el área de reemplazo, etc.) Estos parámetros compuestos y las suposiciones que esto conlleva, hace que el diseño de las columnas de grava sea empírico en algunos aspectos.

Para el diseño primero debemos calcular lo siguiente:

- El diámetro de la célula unitaria

- La relación de Área Reemplazada
- El factor de concentración de esfuerzos
- El ángulo de fricción interna compuesto

Después de encontrar los valores de estos conceptos básicos, se deben hacer análisis de carga última, cálculo de asentamientos, velocidad de consolidación y resistencia al corte.

Capacidad Última: se deben considerar los modos de falla de la columna de grava y calcular la capacidad última para cada uno, estos modos son:

- Abultamiento de una columna de grava
- Corte en la columna de grava
- Corte en la base de la columna de grava
- Corte en la matriz de suelo bajo la columna de grava

Estos esfuerzos últimos se calculan utilizando las ecuaciones clásicas de la geotecnia con los parámetros de esfuerzos y ángulo de fricción interna compuesta. Para calcular la capacidad última de un grupo de columnas de grava, se multiplica el valor de la capacidad de carga de una columna individual por la cantidad de columnas de grava en el área sujeta a carga superpuesta.

Asentamientos: Se recomienda realizar este análisis utilizando el método de equilibrio por su simplicidad y resultados satisfactorios. Se debe tener en cuenta que para este método asumimos lo siguiente:

1. la teoría de la célula unitaria es válida.
2. La carga vertical aplicada a la célula unitaria es igual a la suma de la fuerza soportada por la columna de grava y el suelo adyacente.
3. El desplazamiento vertical de la columna de grava y del suelo es igual.
4. El esfuerzo vertical uniforme debido a la carga externa se da a lo largo de la columna de grava.

Asimismo, debemos tomar en cuenta que se deben calcular asentamientos para la parte superior de la columna de grava así como para la parte inferior. Generalmente, el diseño de la columna de grava se basa en estas consideraciones de asentamiento y no por la carga última que pueden soportar.

Velocidad de consolidación: Esto se calcula utilizando la teoría de consolidación primaria de Terzaghi considerando que drena vertical y radialmente.

Diseño Sísmico: Las columnas de grava aumentan la capacidad de corte del suelo, y su densidad. Estas características hacen que las columnas de grava reduzcan el potencial de licuefacción. Esto se calcula utilizando los parámetros compuestos encontrados en los análisis anteriores y comprándolo con la magnitud de las cargas laterales provocadas por el sismo.

D. Consideraciones generales para la implementación de columnas de grava

1. Graduación del suelo

Las columnas de grava pueden ser construidas por el método de vibro-reemplazo desde gravas y arenas hasta arenas limosas, limo y arcillas. La construcción de columnas de grava en gravas muy saturadas es el único tipo de suelo que no es posible mejorar por columnas de grava, debido a que es muy difícil penetrarlos. Por lo general, estos suelos no necesitan mejoramiento alguno ya que tienen las propiedades requeridas por la cimentación de la estructura.

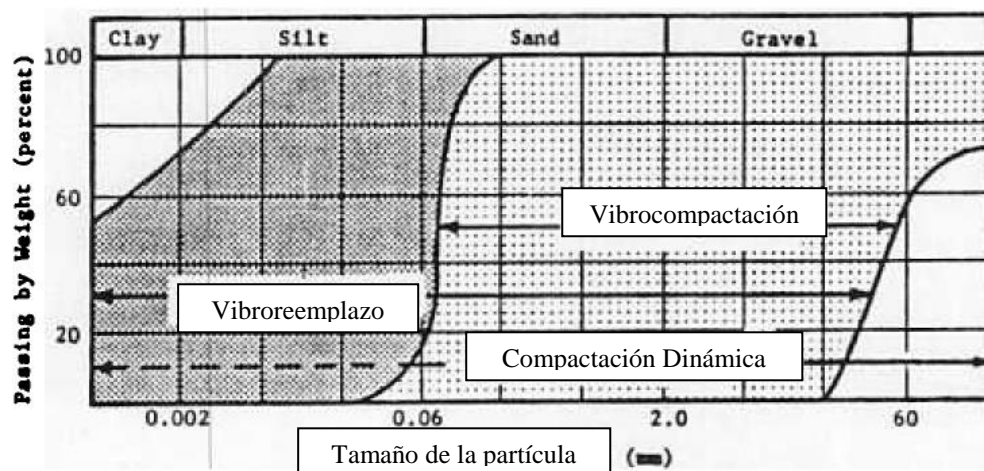


Figura 18: Curvas de Granulometría (Barkdale y Bachus, 1983)

2. Resistencia al corte del suelo

Las columnas de grava no deben considerarse como solución en suelos que tienen una resistencia al corte menor que 10 kN/m^2 . Tampoco debe considerarse para suelos con sensibilidad mayor que 5. Se debe tener sumo cuidado cuando se construyen columnas de grava en suelos con una resistencia al corte menor o igual a 19 kN/m^2 ; en estos suelos blandos el colapso de la excavación, la técnica de construcción y la interacción entre la columna de grava y el suelo circundante (acción compuesta y falla de capacidad de soporte por abultamiento) son factores muy importantes que deben tomarse en cuenta.

3. Graduación de la grava

La graduación seleccionada para diseñar debe seguir las características de la grava que puede ser conseguida económica y fácilmente en el lugar. También, debe ser áspera para que el asentamiento

ocurra rápidamente. En suelos muy blandos la intrusión del suelo entre los vacíos también es de considerarse; para estos casos se recomienda utilizar una graduación variada en la piedra

4. Capacidad última

Generalmente, los asentamientos tanto uniformes como diferenciales son los que determinan la carga última que pueden soportar las columnas de grava. Sin embargo, existen condiciones donde la carga aplicada excede la carga que puede soportar la columna de grava por lo que se debe hacer los análisis respectivos. El rango de diseño varía entre 20 y 30 toneladas por columna. La capacidad última de un grupo de columnas de grava se calcula multiplicando la resistencia última de una columna por el número de columnas en el grupo.

5. Área de reemplazo

Por lo general la relación de áreas varía entre 0.15 y 0.35; para la mayoría de aplicaciones el factor es mayor que 0.20. Las columnas de grava por lo general se construyen siguiendo el esquema de triángulos equiláteros y en menor medida siguiendo un patrón cuadrado. El espaciamiento uniforme utilizado para columnas de grava varía de 1.8 a 2.7 m, siendo 2.1 – 2.4 los valores típicos. No se recomienda un espaciamiento menor que 1.5 m debido a las dificultades en su construcción. Para análisis preliminares de diseño se recomienda comenzar con un valor de 0.20 y ajustarlo si es necesario.

6. Diámetro de las columnas de grava

El diámetro de la perforación varía de 0.80 m a 1.00 m. El diámetro de columnas de grava depende primordialmente del tipo de suelo presente. En menor escala el diámetro de la columna también varía dependiendo de la cantidad y velocidad del agua utilizada durante el proceso de construcción y también depende del número de veces que la unidad vibratoria se eleva y deja caer. También depende del tamaño del equipo y la perforadora que puede variar entre 0.80 m a 1.20 m y de la densificación alcanzada en el suelo.

7. Densidad de la grava

La densidad in situ de la columna de grava afecta tanto el diámetro estimado de la columna de grava y el ángulo de fricción. Por lo tanto, la densidad tiene un efecto directo sobre la resistencia al corte de la columna de grava, por lo que conocer este valor es fundamental. Para establecer las densidades relativas máxima y mínima se puede realizar la Prueba ASTM D-2049. Una alternativa conveniente a la prueba ASTM D-2049 es la prueba ASTM C-29 que fue desarrollada para el agregado grueso del concreto. La prueba C-29 es bastante más simple de realizar, pero puede dar un resultado un tanto menor de la densidad relativa máxima que el resultado que se obtiene de la prueba D-2049.

8. Aplicaciones para licuefacción

Las columnas de grava pueden ser una solución para prevenir la licuefacción durante movimientos sísmicos intensos. Las columnas de grava pueden soportar las cargas laterales, si se le da algún tipo de soporte alrededor de la misma. Asimismo, durante el proceso de construcción el suelo adyacente se densifica lo que disminuye el potencial de licuefacción en arenas sueltas. Debido a las dificultades teóricas para demostrar la densificación del suelo adyacente, ésta no se toma en cuenta. También, las columnas de grava actúan como drenes que evitan que se acumule la presión de poros durante un sismo en suelos no cohesivos.

E. Verificación de diseño y pruebas de campo

Como se vio anteriormente la interacción entre las columnas de grava y el suelo in-situ aún no se comprende del todo. Esto provoca que cuando se diseñan columnas de grava se asuman varios parámetros y comportamientos que deben ser verificados en el campo. Estas pruebas de campo se deben realizar antes, durante y después de la construcción.

Para poder evaluar alternativas primero se deben conocer las condiciones de terreno natural. Es necesario conocer la estratigrafía, el límite líquido y plástico del suelo, la existencia y profundidad del nivel freático, el contenido de humedad, tamaño de los granos y la resistencia del terreno. Durante la construcción se debe medir la capacidad de carga de las columnas de grava. Para ello existen tres tipos diferentes de pruebas de carga:

1. Pruebas de corto plazo que se utilizan para evaluar la capacidad última de la columna de grava.
2. Pruebas a largo plazo, que miden las características de consolidación.
3. Pruebas de Corte Compuesto, que miden la capacidad de corte para análisis de estabilidad.

De estos tres el más común es el primero, esto debido a su simplicidad y confiabilidad. Estas pruebas a corto plazo son similares a las efectuadas en pilotes y se deben hacer luego que se haya disipado toda la presión de poro.

VI. CONCLUSIONES

El sistema de columnas de grava para el mejoramiento de suelos representa una solución muy práctica en lugares donde los suelos son suelos cohesivos débiles y también en arenas sueltas limosas. Es muy importante notar que para cada caso, donde las condiciones de suelo no sean favorables, se debe evaluar todas las alternativas posibles para solucionar el problema. Este análisis debe hacerse incluyendo todos los tipos de columnas de grava y otros métodos de mejoramiento de suelos.

A. Ventajas

Las columnas de grava tienen varias ventajas sobre la técnica de excavación y reemplazo, ya que las primeras suelen ser más económicas, especialmente en áreas grandes donde el nivel freático está cerca de la superficie. El tiempo que requiere mejorar el suelo por medio de columnas de grava es menor que hacer una cimentación profunda o excavar y reemplazar el suelo.

Otra ventaja de las columnas de grava es que el material de relleno que requieren para su construcción es relativamente sencillo de conseguir en casi cualquier lugar, además el costo de los materiales es más barato que el concreto reforzado, el grout o el suelo cemento (esto no incluye las columnas de vibro-concreto). Las columnas de grava se pueden utilizar para cualquier tamaño y distribución de granos en suelos, se pueden utilizar desde gravas hasta arcillas.

B. Desventajas

Cuando existen estratos orgánicos o estratos de arcillas muy blandas que son más grandes que el diámetro de la columna de grava, éstas no son útiles ya que estos suelos no tienen suficiente soporte lateral.

Otra desventaja puede ser la complicación que supone el proceso constructivo, así como el desecho del agua contaminada que se obtiene del método de vibro-reemplazo.

C. Aplicaciones

Para cimentar una estructura existen dos posibilidades: (1) cimentaciones superficiales o (2) cimentaciones profundas. Las cimentaciones superficiales son más económicas y fáciles de construir que las cimentaciones profundas, pero dependen de las propiedades del suelo para poder utilizarlas. Si las propiedades del suelo no cumplen con los requerimientos de la cimentación superficial se puede recurrir a una tercera alternativa que es mejorar el suelo para poder cimentar superficialmente. Las columnas de grava pueden mejorar el suelo y permitir una cimentación superficial, evitando el gasto y las complicaciones que conllevan las cimentaciones profundas.

A continuación se describen las aplicaciones más generales de las columnas de grava.

1. Cimentaciones superficiales

Cuando la carga última de diseño de una cimentación superficial excede la capacidad de soporte del suelo, se pueden construir columnas de grava para aumentar la capacidad de soporte y poder utilizar la cimentación superficial.

2. Estabilidad de taludes y reforzamiento de terraplenes

La existencia de taludes inestables se debe a una resistencia al corte que es vencida por efectos de la gravedad. Cuando esto sucede, se pueden construir columnas de grava para aumentar la resistencia al corte. También, se pueden construir columnas de grava para reforzar taludes con limitaciones en el espacio de construcción.

3. Asentamiento en suelo

Las cimentaciones superficiales tienen asentamientos permitidos, cuando estos se exceden se pueden construir columnas de grava. Esto es posible ya que los esfuerzos en las columnas de grava son mayores que en el suelo adyacente, debido a que las columnas de grava tienen una rigidez mayor a la del suelo circundante y esto provoca una concentración de esfuerzos.

4. Licuefacción

En zonas sísmicas la licuefacción de suelos arenosos es muy común. Cuando las propiedades del suelo indican que el suelo es muy propenso a licuarse, se puede utilizar las columnas de grava para reforzar el suelo.

Columnas de grava pueden reducir el potencial de licuefacción de los suelos debido a que proveen al suelo de un refuerzo a corte.

Asimismo, densifican y proveen de drenaje, que disminuyen la presión de poros.

VII. RECOMENDACIONES

Las columnas de grava son una técnica para mejorar suelos, muy útil, y se debe considerar su implementación en futuros proyectos. Sin embargo las columnas de grava no son necesariamente la solución más económica o adecuada. Todas las alternativas deben ser comparadas considerando:

- La confiabilidad que se tenga en el sistema.
- Rendimiento general.
- Los costos totales del proyecto.
- Las condiciones específicas del proyecto como estratigrafía y propiedades de los suelos, tipo de estructura, tipo de cimentación, entre otros.

A. Metodología para la verificación en campo

Se recomienda seguir la siguiente metodología de pruebas de campo y de laboratorio para las columnas de grava:

1. Pruebas e investigación del suelo

Se deben realizar varios pozos de exploración o trincheras a distancias prudentes. Esta prueba sirve para localizar la existencia de suelos orgánicos, conocer la estratigrafía del suelo y la determinar la profundidad del nivel freático.

Una alternativa a este tipo de investigación es realizar Ensayos de Penetración Estándar (SPT). Este tipo de investigaciones se deben limitar a una profundidad de 3 metros.

2. Parámetros del suelo

Las siguientes pruebas se deben realizar para conocer los parámetros del suelo

- Límite líquido, límite plástico y contenido de humedad.
- granulometría.
- Prueba de triaxial no consolidada y no drenada
- Prueba de consolidación con consolidómetro (aplica si se trata de arcillas).
- Ensayo de cono de penetración (CPT)

Estas pruebas se deben realizar en la investigación previa de las condiciones del suelo in-situ, así como después de haber construido las columnas de grava.

3. Carga última de las columnas de grava

Se recomienda hacer una prueba de carga de placa. Para realizar esta prueba se debe cargar un área representativa del suelo mejorado para predecir directamente el asentamiento por consolidación primaria y secundaria.

También, como control rutinario, se recomienda realizar una prueba de carga de placa. En esta prueba se coloca una placa metálica de 600 mm en la parte superior de la columna de grava. Esta sirve para determinar si la carga última de diseño es la adecuada, y principalmente para determinar el comportamiento de deformación de la columna de grava.

B. Criterio de selección

A continuación se presenta una tabla que presenta las variables que se encuentran en el terreno, y las condiciones que se deben cumplir para poder mejorar el suelo con columnas de grava. El objetivo de esta tabla es dar una referencia rápida sobre si se puede o no mejorar el suelo con columnas de grava.

Variables	Condiciones que se deben cumplir
Tipo de mejora requerida	<ul style="list-style-type: none"> - Reducir los asentamientos - Estabilizar taludes - Aumentar la capacidad de soporte del suelo - Reducir el potencial de licuefacción
Tipo de suelo	<ul style="list-style-type: none"> - Arcillas hasta gravas con cualquier granulometría, excepto gravas de grano pequeño. - No se recomienda si existen estratos de suelos orgánicos cuyo espesor exceda en 1 o 2 veces el diámetro de la columna de grava. - Es una solución ideal para limos compresibles y arcillas.
Resistencia al corte del suelo	Resistencia al Corte entre 10 kN/m^2 – 100 kN/m^2
Estratigrafía	Cualquier estratigrafía que permita cimentar o que de una capacidad de fricción suficiente para que el largo de las columnas de grava sea menor a 10 m. Excepto si hay estratos muy grandes de suelos orgánicos.
Sensitividad	Sensitividad < 5

Variables	Condiciones que se deben cumplir
Contenido de limos y arcillas	Mas del 12 % de limos y menos del 3 % de arcilla, de lo contrario se puede utilizar la vibrocompactación que es un método más económico.
Largo de las columnas de grava	No mayor a 10 – 12 metros porque a profundidades mayores se vuelve muy costoso.

Si el ingeniero considera que el suelo cumple con lo anterior, se recomienda hacer un análisis y diseño preliminar utilizando la metodología presentada previamente.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

- Barkdale, R.D. y Bachus, R.C. (1983), *Design and Construction of Stone Columns—Vol 1*, Reporte No FHWA/RD-83/02C. Federal Highway Administration. Washington D.C., Estados Unidos, 194 pp.
- Barkdale, R.D. y Bachus, R.C. (1983), *Design and Construction of Stone Columns—Vol 2*, Appendixes, Reporte No FHWA/RD-83/02C. Federal Highway Administration. Washington D.C., Estados Unidos, 239 pp.
- Bell, F.G. (1978) *Foundation Engineering in Difficult Ground*, Butterworth & Co, Inglaterra, 598 pp
- Das, Braja (2001) *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*, Thomson Learning, México, 594 pp.
- Estrig, M.I. y Bachus, R.C. (1991). *Deep Foundations Improvements: Design, Construction, and Testing*. Proceeding of the ASTM Symposium on Design, Construction, and Testing of Deep Foundation Improvements: Stone Columns and Other Related Techniques. ASTM, STP 1089, Philadelphia, PA, EEUU.
- Federal Highway Administration (1999). *Ground Improvement Technical Summaries, Volume II. Demonstration Project 116*
- Federal Highway Administration (1999). *Ground Improvement Technical Summaries, Volume I. Demonstration Project 116*
- Lawton, E.C., Fox, N.S. y Handy, R.L. (1994), *Control of Settlement and Uplift of Structures using Short Aggregate Piers*, In-Situ Deep Soil Improvement, Publicación Geotécnica Especial de la ASCE No. 45, NY, NY, EEUU.
- Meyerhof, G.G. (1976), *Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations*, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, vol. 102 GT3, Marzo, pp 195-228.
- Vesic, A.C. (1972), *Expansion of Cavities in infinite soil mass*, Journal of the Soil Mechanics Foundation Engineering Division, ASCE vol. 98, No. SM3 pp 265-290.