



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

DEPARTAMENTO DE CIENCIA E INGENIERÍA DEL
TERRENO Y DE LOS MATERIALES

TESIS DOCTORAL

**ANÁLISIS EXPERIMENTAL EN MODELO
REDUCIDO DE LA CONSOLIDACIÓN RADIAL
Y DEFORMACIÓN DE UN SUELO BLANDO
MEJORADO CON COLUMNAS DE GRAVA**

Autora

ANA ISABEL CIMENTADA HERNÁNDEZ

Directora

ALMUDENA DA COSTA GARCÍA

Santander, Marzo de 2009

CAPÍTULO 1

ESTADO DEL CONOCIMIENTO

En este capítulo se presenta una revisión general de la bibliografía existente sobre el tratamiento de suelos blandos con columnas de grava. Se trata de un tema muy amplio con múltiples aspectos a considerar, por lo que resultaría difícil tratar de abarcar todos ellos. En esta Tesis Doctoral se repasan los siguientes:

1. Columnas de grava

Se realiza una breve descripción del tratamiento con columnas de grava, se plantean los objetivos de dicho tratamiento, la forma de trabajo del conjunto suelo-columna, se describen los métodos constructivos usuales y finalmente se detallan las características de las columnas de grava.

2. Modelos teóricos de comportamiento

Dentro de este punto se presentan algunas de las soluciones que analizan el proceso de consolidación para el caso particular de drenes verticales y columnas de grava, realizando un repaso previo de los conceptos generales empleados en su aplicación.

En cuanto al estudio del comportamiento deformacional y resistente del conjunto columna-suelo, se incluye un repaso de las diferentes soluciones sobre las deformaciones y reparto de tensiones.

3. Análisis en laboratorio

En primer lugar se presenta una breve justificación de los análisis en laboratorio con respecto a los de campo. En relación a las distintas investigaciones llevadas a cabo en laboratorio, se describen en primer lugar los estudios enfocados hacia la estimación del coeficiente de consolidación radial, parámetro que controla la velocidad de consolidación de un suelo. Se repasan los estudios del proceso de consolidación radial en suelos arcillosos, considerando las posibles magnitudes a medir, instrumentación a emplear y los problemas que podrían surgir durante la ejecución de los ensayos.

Por último, se presentan estudios generales sobre el comportamiento de las columnas de grava: modos de deformación, capacidad de carga, influencia de la geometría de la columna en la reducción de asientos y en el reparto de cargas, posible efecto de grupo al emplearlas en mallas, etc.

1.1. COLUMNAS DE GRAVA

1.1.1. Descripción

El tratamiento de suelos blandos con columnas de grava consiste en construir una serie de columnas que se disponen uniformemente en extensas mallas con diferentes geometrías triangulares, cuadradas, hexagonales, etc. Con ello se trata de mejorar o reforzar el suelo blando.

Este tratamiento se ha desarrollado como extensión de la vibrocompactación clásica, aplicada, en este caso, a suelos cohesivos.

La vibrocompactación clásica o vibroflotación es una técnica de mejora útil para suelos granulares. Se trata de un proceso en el que se consigue la densificación del material a mejorar mediante la introducción de un vibrador en el terreno hasta la profundidad de tratamiento deseada. La penetración del vibrador se consigue gracias a su peso, a la energía de vibración empleada en el proceso y al aporte de un chorro de aire o agua según el tipo de vibrador.

El intento de emplear la vibrocompactación para la mejora de suelos no granulares ha dado lugar a la técnica de columnas de grava. La incapacidad de los suelos cohesivos para densificarse mediante la introducción del vibrador, provoca la formación de perforaciones verticales. La técnica de mejora con columnas de grava consiste precisamente en rellenar estas perforaciones en sentido ascendente, con grava introducida y compactada por medio del vibrador. Como resultado, se forma una columna de material resistente en cada uno de los puntos tratados, es decir, una columna de grava.

Según lo anterior, las características del terreno a mejorar definen la idoneidad de uno u otro método, siendo necesario, por tanto, conocerlas para definir el tratamiento más adecuado. Los criterios comúnmente empleados se basan principalmente en el estudio de la granulometría. Existen numerosas curvas granulométricas donde han sido definidas las zonas en las que cada uno de los métodos es la solución más adecuada. En la Figura 1.1 se presenta la propuesta por Glover (1982).

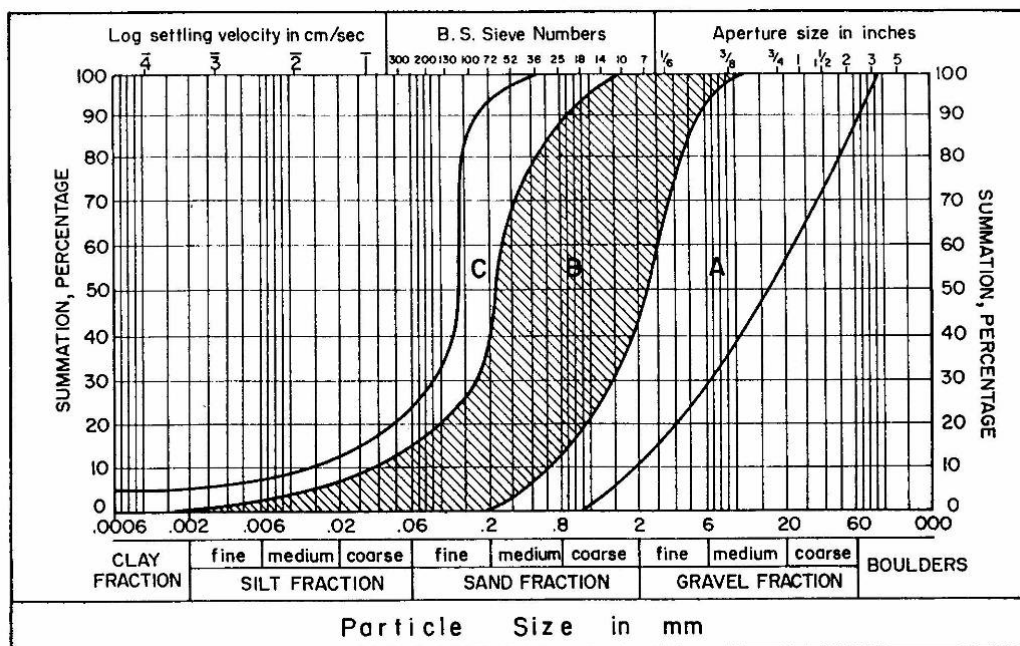


Figura 1.1. Criterio de adecuación de suelos para tratamiento por vibro-compactación (Glover, 1982)

La zona A corresponde a suelos con granulometrías vibrocompactables, si bien es cierto que las granulometrías de áridos gruesos próximas al límite derecho corresponden a grandes bloques que pueden impedir la penetración correcta del vibrador en el terreno.

La zona B define las granulometrías más adecuadas para su densificación mediante vibrocompactación. Se trata de arenas limpias con un contenido en finos menor del 10%.

En la zona C, la presencia de una importante fracción limosa hace que la vibración genere un hueco cilíndrico alrededor del vibrador, que se mantiene temporalmente estable e impide la transmisión de la energía vibratoria al suelo circundante. En este caso, la compactación sólo es posible con un aporte extra de material desde la superficie, consiguiéndose con ello rellenar los huecos formados, debido a que el terreno natural no fluye hacia el vibrador. Ésta es la zona de transición en el uso de la vibrocompactación y las columnas de grava.

Para granulometrías inferiores, situadas a la izquierda de la zona C, la solución más adecuada son las columnas de grava. Se establece por tanto la limitación de la fracción fina, tamaño máximo de 0,06 mm, en aproximadamente un 15%.

1.1.2. Objetivos

Las columnas de grava se emplean como tratamiento de suelos blandos con el fin de conseguir una o varias de las siguientes mejoras:

1. Reducción de asientos: dado que las columnas son inclusiones rígidas dentro de un suelo de menor resistencia, provocan una redistribución de la carga aplicada sobre el conjunto. Las columnas soportan una parte importante de la carga total, con lo que el suelo blando queda sometido a una carga nominal inferior, produciéndose la consiguiente reducción del asiento y una mayor uniformidad del mismo.
2. Aceleración del proceso de consolidación: las columnas de grava actúan como drenes verticales de gran diámetro debido a su alta permeabilidad. Su uso reduce de forma importante el camino de drenaje en el terreno, acelerando la consolidación producida por la aplicación de cargas, debido al flujo radial que se genera hacia ellas.
3. Aumento de la capacidad portante del suelo: como ya se ha comentado, la presencia de columnas de un material más resistente dentro del suelo blando mejora la resistencia.
4. Aumento de la estabilidad frente a deslizamientos: la resistencia al corte de las columnas es superior a la del suelo que las rodea, mejorando por tanto su comportamiento en ese aspecto.
5. Reducción de la posibilidad de licuefacción del suelo: esta característica hace que su uso sea relativamente frecuente y exitoso en zonas con gran actividad sísmica. Las columnas de grava son capaces de mantener su integridad estructural y, por tanto, su capacidad de disipación de presiones intersticiales, pese a las fuerzas de cizallamiento provocadas por un terremoto o cualquier fenómeno similar.

Las situaciones en las que se decide el refuerzo de un suelo con columnas de grava son diversas, y aunque se emplean en algunos casos como cimentación de estructuras, su uso principal es bajo terraplenes o cargas extensas. Así pues, se han empleado para la cimentación de edificios de gran extensión, cimentación de tanques de almacenamiento, cimentación de cajones de ampliación o creación de muelles, rampas de acceso a puentes y, sobre todo, bajo terraplenes, no sólo con el objetivo de aumentar la capacidad portante del suelo bajo los mismos sino, también, para mejorar la estabilidad de sus taludes.

1.1.3. Forma de trabajo. Interacción suelo-columna

A diferencia de los tratamientos con drenes, el empleo de columnas de grava supone no sólo una aceleración de la consolidación, sino además una reducción de los asentos. Esto se debe al reparto de carga entre el suelo y las columnas, que se produce en función de la relación de rigideces de ambos materiales. Esta relación módulos columna/suelo suele estar en el rango de 10 a 50, con un área de sustitución del terreno blando por columnas que oscila entre 5-30%. Esto supone que una parte importante de la carga aplicada es soportada por las columnas, descargando al suelo circundante.

En cuanto a la deformabilidad del conjunto, se pueden considerar dos situaciones extremas:

- a) Igual tensión en columnas y en suelo, con distintos asentos en ambos.
- b) Igual asiento en toda la superficie, con distintas tensiones en columnas y suelo.

Si en la superficie del terreno existe un elemento rígido, por ejemplo tratamientos con columna bajo cimentaciones rígidas de estructuras, la situación b) representa mejor la realidad. En el caso de tratamientos bajo terraplenes o estructuras flexibles, la realidad es una situación intermedia entre las dos, representando también el caso b) mejor la situación real, ya que la rigidez de las columnas, aún siendo superior a la del terreno de alrededor, no lo es tanto con respecto al terraplén superior.

El reparto de cargas se suele expresar por medio del denominado factor de concentración de tensiones, SCF , que se define como el cociente entre la tensión vertical en la columna, σ_{zc} , y en el suelo, σ_{zs} :

$$SCF = \frac{\sigma_{zc}}{\sigma_{zs}} \quad (1.1)$$

En algunos casos, se denomina factor de concentración de tensiones al cociente entre la tensión en la columna y la presión media aplicada, p_a . La diferencia entre el valor de este parámetro y el factor de concentración de tensiones es pequeña, y se pueden relacionar ambos parámetros mediante equilibrio de fuerzas verticales. Incluso, a veces la nomenclatura se emplea de forma indistinta. También se suele utilizar la relación entre la carga vertical soportada por el suelo y la presión media aplicada. Según esto, se pueden definir dos parámetros más, el factor de concentración de tensiones sobre la columna μ_c y sobre el suelo μ_s :

$$\mu_c = \frac{\sigma_{zc}}{p_a} ; \mu_s = \frac{\sigma_{zs}}{p_a} \quad (1.2)$$

La reducción del asiento que se produce al tratar el terreno con columnas, se evalúa por medio del parámetro denominado factor de mejora, n , definido como el cociente entre el asiento final del terreno sin columnas, s_0 , y con columnas, s_c . Su inverso se denomina factor de reducción de asientos, α :

$$n = \frac{1}{\alpha} = \frac{s_0}{s_c} \quad (1.3)$$

1.1.4. Métodos constructivos

En cuanto a los métodos de construcción de las columnas de grava, se distinguen dos tipos de técnicas: la vibrosustitución, también denominada vía húmeda; y el vibrodesplazamiento o vía seca. Las fases de construcción de ambos métodos son muy similares, la diferencia entre ellos radica principalmente en el aporte de aire comprimido o agua a presión como método de ayuda para la penetración del vibrador.

Vibrosustitución o vía húmeda

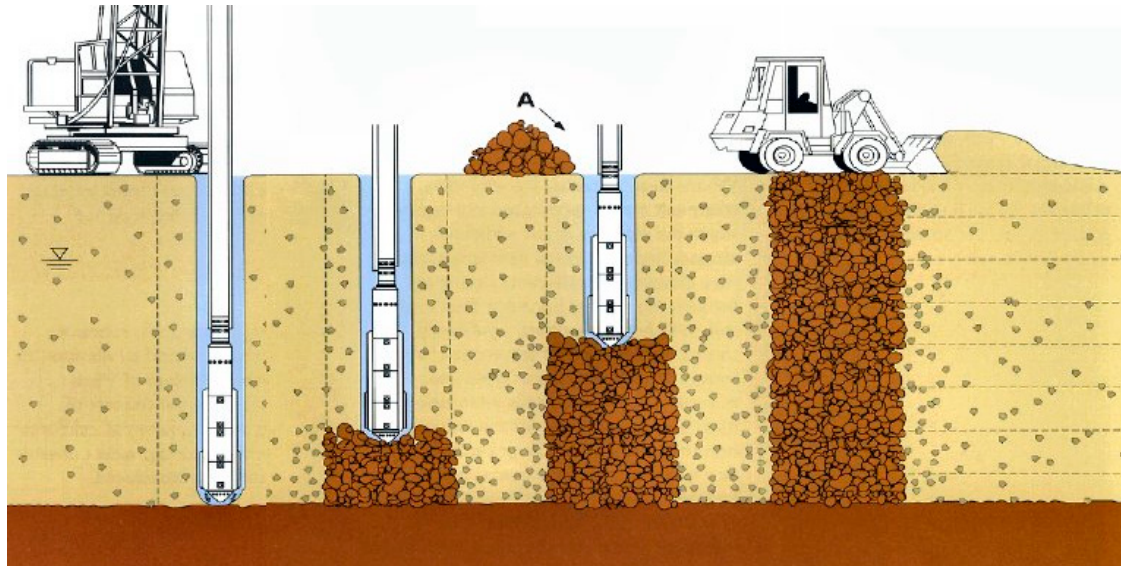


Figura 1.2. Esquema de construcción por vía húmeda (Raju et al., 2004)

La construcción de las columnas de grava mediante vía húmeda sigue la siguiente secuencia (Figura 1.2):

1. Penetración del vibrador: una vez posicionado el vibrador en el punto concreto de tratamiento, éste penetra en el terreno gracias al efecto combinado del peso propio, la energía de vibración y la acción de una lanza de agua a presión emergente en la punta del vibrador.
2. Ensanche de la perforación: el chorro de agua a presión crea un flujo hacia el exterior que remueve y arrastra los finos existentes, provocando así un ensanchamiento de la perforación inicial.
3. Sustitución: una vez alcanzada la profundidad deseada, se procede al relleno de la perforación con grava. El aporte de grava se realiza en tongadas de aproximadamente 50 cm, que se introduce y se compacta, por medio de movimientos ascendentes y descendentes del vibrador, en pequeños escalones. De este modo se sustituye el material original por grava, de ahí la denominación del método.

4. Terminado: el fin de cada escalón de ascenso y relleno lo determina la resistencia ofrecida por el material ya compactado a la bajada del vibrador. El proceso de ascenso y relleno se repite hasta alcanzar la cota en superficie, dándose por finalizada así la columna.

Vibrodesplazamiento o vía seca

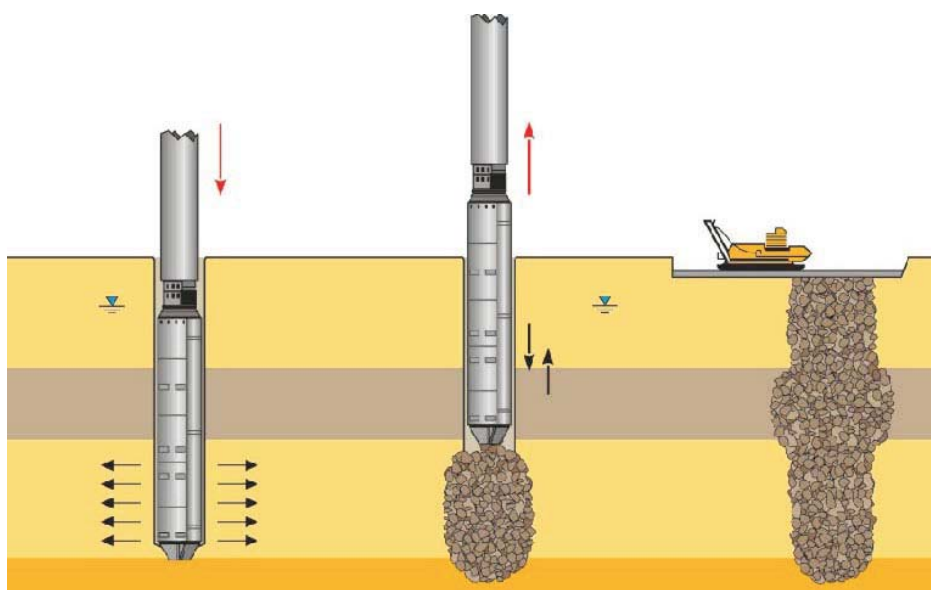


Figura 1.3. Esquema de construcción por vía seca (Raju et al., 2004)

La construcción de las columnas de grava por vía seca, ver Figura 1.3, conlleva la ejecución de las siguientes fases:

1. Posicionado y penetración del vibrador: en esta técnica, el vibrador desciende hasta la profundidad prevista con la ayuda de una lanza de aire comprimido en la punta, que va desplazando el terreno lateralmente, creando así una perforación de paredes estables.
2. Compactación: cuando se alcanza la profundidad requerida el vibrador es elevado y el material de aportación va ocupando el hueco liberado. El relleno con grava se realiza, también, mediante tongadas de 50 cm de espesor. Para compactar las tongadas se vuelve a introducir el vibrador, que actúa a modo de maza expandiendo la grava hacia abajo y lateralmente contra el suelo.

3. Acabado: la columna se ejecuta por pasadas sucesivas, hasta alcanzar el nivel de la superficie.

Comparación entre ambos métodos

La construcción de las columnas provoca una ligera alteración de la estructura original del suelo. Durante la perforación por vía seca, debido al fuerte desplazamiento lateral provocado, se produce una rigidización de la zona anular circundante, lo que conlleva una reducción de su permeabilidad. Este fenómeno se conoce como remoldeo y su efecto es menor si se emplea la vía húmeda.

Tanto en la vibrosustitución como en el vibrodesplazamiento, la aportación de la grava al orificio se puede realizar según dos métodos distintos (Figura 1.4): alimentación por fondo (bottom feed), donde el aporte de grava se realiza por la punta del vibrador; o alimentación exterior (top feed), en cuyo caso el aporte de la grava se realiza desde la superficie de la perforación.

La alimentación exterior en la vía seca, se realiza extrayendo por completo el vibrador e introduciendo la grava en la perforación. Durante los movimientos de izado del vibrador, es posible la aparición de inestabilidades en las paredes de la perforación, debido a la succión creada por el movimiento del mismo. A pesar de que el aire comprimido compensa dicha succión, facilitando además los movimientos de ascenso y descenso, esta técnica se encuentra limitada por la resistencia del suelo. Esto no ocurre en el caso de la vía húmeda, ya que el aporte se realiza lateralmente gracias al ensanche de la perforación.

La alimentación por fondo se desarrolló posteriormente con el objetivo de subsanar algunos inconvenientes de la alimentación por superficie. Para ello, una pala cargadora realiza el aporte de grava a una tolva situada en el mástil-guía del vibrador. La tolva asciende por él hasta una cámara de descarga situada en el extremo superior. La grava se deposita en dicha cámara y es conducida por el interior del conjunto tubo-vibrador hasta la punta del vibrador, realizando éste el aporte directamente en el fondo.

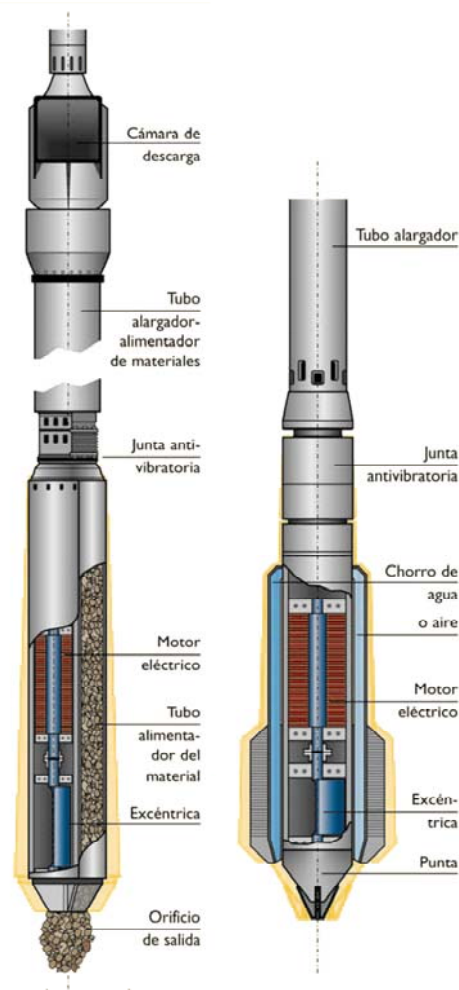


Figura 1.4. Vibradores para alimentación por fondo, bottom feed, (izquierda) y en superficie, top feed, (derecha). Terratest, 2007

La elección del método más adecuado en cada caso, dependerá de las características del suelo y de las condiciones en la obra, existiendo una serie de ventajas, tanto en lo que se refiere al uso de una u otra forma de alimentación, como al empleo de la vía seca o húmeda para la construcción de las columnas.

El uso de la vía húmeda precisa de un aporte importante de agua, lo cual no siempre es fácil de conseguir. Además, se debe plantear un sistema de gestión del agua y de los lodos generados durante la ejecución de las columnas. Por otra parte, la plataforma de trabajo se encuentra anegada de principio a fin y precisa de un tratamiento de restitución final. Con el método de la vía seca se eliminan todos estos inconvenientes, manteniendo una plataforma de trabajo transitable durante toda la ejecución de las columnas.

En cuanto a la aportación de material por fondo, presenta la ventaja de que el material llega directamente al orificio a la profundidad deseada, con lo que se asegura la continuidad de la columna. Además, en el caso de la vía seca desaparece la necesidad de que las paredes de la cavidad sean estables, pudiendo emplearse en suelos muy blandos, con resistencias al corte sin drenaje inferiores a 50 kPa.

Control durante la construcción

La construcción de las columnas se controla, en tiempo real, mediante el registro de diferentes parámetros como la profundidad de actuación, el avance, el empuje vertical sobre el equipo vibrador y la intensidad de corriente del mismo. Este último parámetro permite el control de la compactación conseguida en la columna. En cuanto al diámetro, se calcula a partir del volumen de grava aportado. También es posible un registro de la energía consumida. Todos estos parámetros se reproducen en forma de gráfico (Figura 1.5) en el monitor de control situado en la cabina donde se encuentra el operario.

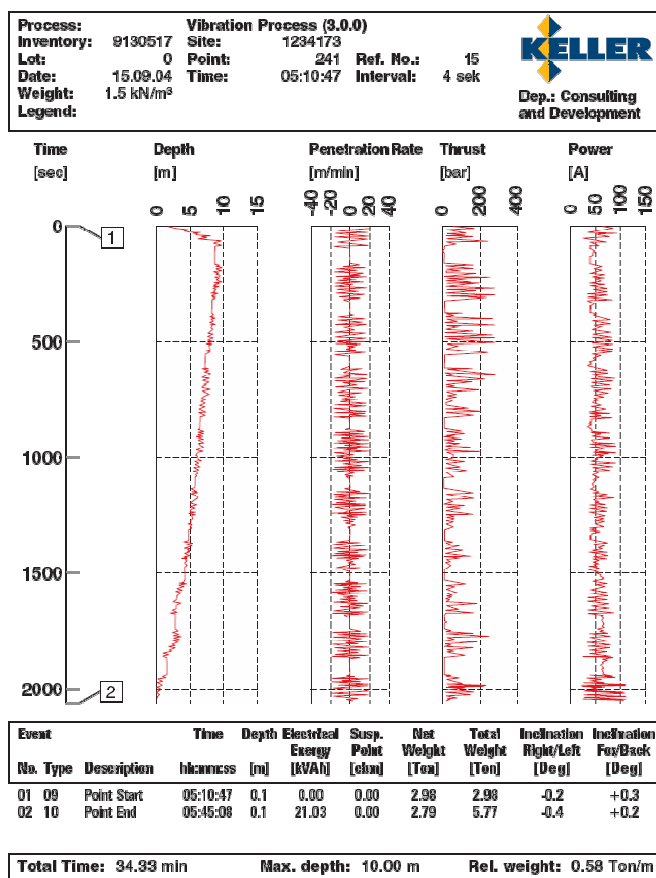


Figura 1.5. Hoja de control de la ejecución de una columna (Keller GmbH, 2005)

1.1.5. Características de las columnas de grava

Como norma general, el tamaño de árido empleado en las columnas es de 20/60 mm, aunque en algunos casos de alimentación por fondo, el diámetro del tubo requiere un tamaño de grava inferior, pudiendo ser 15/45 mm. Barksdale y Bachus (1983) recomiendan emplear áridos limpios, sin componentes orgánicos o deteriorables. Definen cuatro posibles granulometrías para el material susceptible de ser usado, y en todas ellas se recomienda que el desgaste en el ensayo Los Ángeles sea inferior al 45%. A título orientativo, dado que no existe norma alguna que lo especifique, Santiago (2006) aconseja para la construcción de columnas de grava por vía seca el uso de grava que puede ser rodada o de machaqueo, pero en ambos casos exenta de finos. Los áridos serán no friables, con un desgaste en el Ensayo de Los Ángeles inferior al 30 ó 35%.

El diámetro de las columnas de grava suele variar en un rango de 0,5 a 1,2 m, en función de la deformabilidad del suelo. Sin embargo, los valores más usuales se encuentran entre 0,8 y 1,0 m. En cualquier caso, existe una fuerte influencia del método constructivo elegido sobre el valor del diámetro resultante (Magnan et al., 2005), proporcionando la construcción de las columnas de grava por vía húmeda, valores ligeramente superiores a los conseguidos por vía seca.

Las longitudes usuales de columna oscilan entre 6 m y 10 m, aunque existen casos excepcionales en los que se han ejecutado columnas que superan los 20 m de profundidad. Estos valores dependen de la profundidad a la que se encuentre el sustrato rígido donde suelen ir apoyadas, aunque también existen casos en los que se dejan como elementos flotantes en el suelo blando, trabajando la columna, en este último caso, por rozamiento (Figura 1.6).

La densidad de la columna en los tratamientos reales se conoce solamente de manera aproximada debido a que su cálculo se realiza a partir de la cantidad de grava consumida en la compactación de un determinado volumen de columna. El valor del diámetro empleado en el cálculo no se conoce con exactitud, dado que suele variar con la profundidad por razones inherentes al propio método constructivo. También la existencia en algunas ocasiones de estratos de baja resistencia provoca un incremento del diámetro en esas zonas para garantizar una correcta compactación. Todo esto hace que el cálculo de la densidad sea poco fiable. Barksdale y Bachus (1983) miden

densidades de columna en un tratamiento real entre 16 y 16,5 kN/m³ y consideran para el diseño del tratamiento una densidad de la columna construida entre el 75% y el 100% de la densidad seca máxima del árido utilizado. Además, ponen de manifiesto que se debe ser muy cuidadoso con las medidas in situ de la densidad ya que la granulometría, y por tanto la densidad de la columna, puede variar con la profundidad debido a la rotura de partículas o a la intrusión de finos. Herle et al. (2008) presentan medidas directas de la densidad muy elevadas (entre 18,5 y 20,3 kN/m³), aumentando significativamente con la profundidad. Los valores obtenidos corresponderían a un índice de densidad en la columna superior a la unidad, lo que resulta imposible, poniendo de manifiesto la poca fiabilidad de esta práctica. Posteriormente, evalúan la distribución granulométrica a lo largo de la misma columna, lo que revela una disminución del tamaño de partícula. Esto verifica que durante la densificación con el vibrador se produce una rotura de las partículas provocando una segregación de los tamaños (las partículas más pequeñas caen hacia la parte baja de la columna).

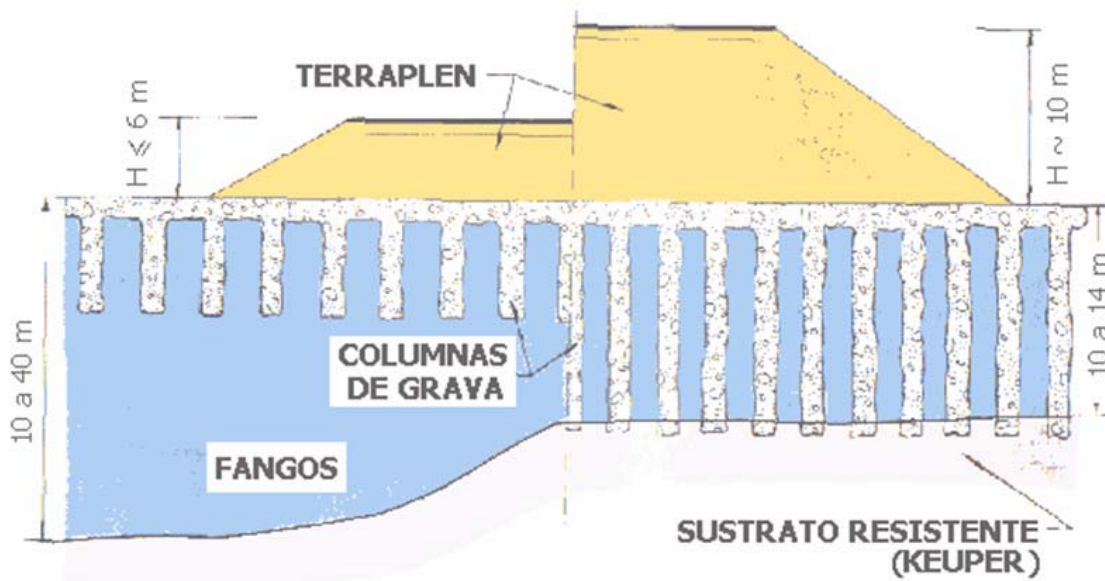


Figura 1.6. Esquema de empleo de columnas de grava (CEDEX, 2006)

1.2. MODELOS TEÓRICOS DE COMPORTAMIENTO

En el comportamiento de los suelos tratados con columnas de grava influyen múltiples aspectos difíciles de tener en cuenta de forma acoplada. Sin embargo, existen modelos analíticos que reproducen con bastante precisión el comportamiento real, en los que se tienen en cuenta los puntos principales del tratamiento, y que son empleados para la resolución teórica y el diseño de las columnas.

Concepto de celda unidad

En el estudio teórico de las columnas de grava, se realizan una serie de hipótesis sobre la geometría real del tratamiento, que simplifican el problema y lo hacen más sencillo. Como ya se ha comentado, en un tratamiento real, las columnas de grava se disponen uniformemente en mallas de diferentes geometrías: triangulares, cuadradas, hexagonales, etc. Una de las opciones comúnmente empleadas es el análisis de una única columna y su área tributaria de suelo, siendo ésta la porción de terreno que se encuentra alrededor de la columna y sobre la cual ejerce su acción de mejora. Seguidamente, se transforma la forma geométrica de esta área en un cilindro de diámetro tal, que la sección de ambas figuras sea la misma (Figura 1.7). El diámetro de la columna se mantiene constante en la transformación. A partir de esta situación, el estudio se puede realizar considerando una sección por el centro de la columna, con lo que el problema tridimensional se reduce a dos dimensiones.

Al conjunto de una única columna central y el anillo de suelo blando circundante se le suele denominar “celda unidad” o “celda unitaria”. Esta transformación supone un comportamiento idéntico en todas y cada una de las columnas de la malla.

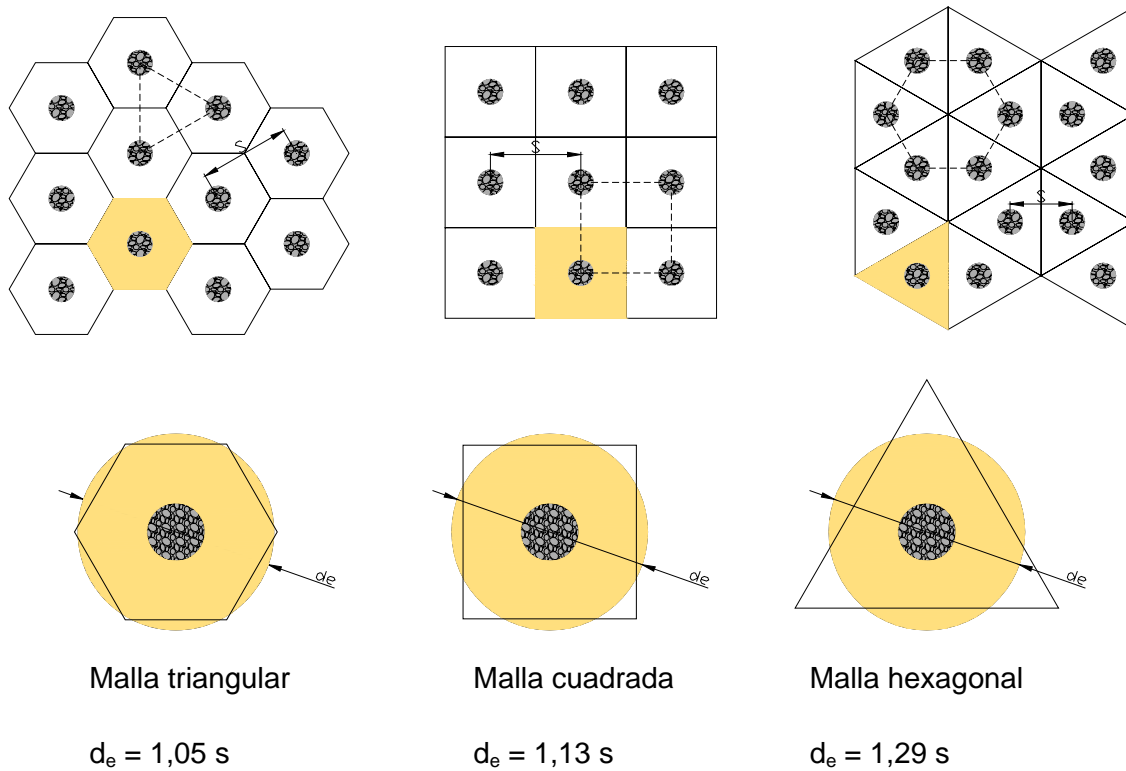


Figura 1.7. Disposiciones usuales de columnas. Celdas equivalentes

Partiendo de este concepto de celda unidad, es usual definir la geometría de una malla de columnas de grava a partir de su diámetro (d_c) y del parámetro razón de sustitución (a_r) que se define como el cociente entre el área de cada columna y su área tributaria:

$$a_r = \frac{A_c}{A_e} = \left(\frac{d_c}{d_e} \right)^2 \quad (1.4)$$

siendo d_e el diámetro del área tributaria correspondiente a la tipología de malla elegida (Figura 1.7), el cual depende del espaciamiento entre columnas (s). Es posible, también, emplear la relación entre los diámetros del área tributaria y de la columna (N) para definir la celda unidad, siendo en ese caso:

$$N = \frac{d_e}{d_c} = \sqrt{\frac{1}{a_r}} \quad (1.5)$$

1.2.1. Consolidación radial

Existen diversas soluciones teóricas para el estudio de la consolidación radial en un suelo. La solución básica de referencia para drenes verticales fue propuesta por Barron (1948). Esta solución permite tener en cuenta tanto la permeabilidad del dren como la de la zona remoldeada por la hincada ("smear"). Barron estudió los dos casos de carga extremos: carga flexible (tensión vertical uniforme en superficie) y carga rígida (deformación vertical uniforme), trabajando con una celda unitaria en simetría axial.

Aunque puede parecer que el análisis en condiciones de carga flexible es más acorde con el caso real de carga de terraplén, las soluciones para este caso son muy difíciles de manejar y la diferencia con la situación de carga rígida es despreciable para grados de consolidación no muy pequeños. Por ello, no resulta necesario ni cómodo su uso.

En el caso de carga rígida, sin zona de remoldeo y permeabilidad infinita del dren vertical, la solución obtenida para el valor de la presión intersticial en un radio determinado es:

$$\bar{u}_r = \frac{\left[\ln\left(\frac{r}{r_c}\right) - \frac{r^2 - r_c^2}{2r_e^2} \right]}{\mu} \quad (1.6)$$

siendo:

$$\bar{u}_r = u_0 e^{-8T_r/\mu} \quad (1.7)$$

$$\mu = \frac{r_e^2}{r_e^2 - r_c^2} \ln\left(\frac{r_e}{r_c}\right) - \frac{3}{4} + \frac{r_c^2}{4r_e^2} \quad (1.8)$$

$$T_r = \frac{c_r t}{4r_e^2} \quad (1.9)$$

$$c_r = \frac{k_r E}{\gamma_w} \quad (1.10)$$

y donde son:

u_o : incremento de presión intersticial inicial producido por la carga.

\bar{u}_r : incremento de presión intersticial medio para un tiempo t .

T_r : factor de tiempo adimensional para la consolidación radial.

r_e : radio del área tributaria.

r_c : radio de la columna.

k_r : permeabilidad del suelo en dirección radial.

c_r : coeficiente de consolidación radial.

E : módulo edométrico del suelo.

γ_w : peso específico del agua.

El grado de consolidación radial medio del suelo se define como:

$$\bar{U}_r = 1 - \bar{u}_r / u_o \quad (1.11)$$

y su valor con esta solución es:

$$\bar{U}_r = 1 - e^{-8T_r / \mu} \quad (1.12)$$

Esta solución, bajo las condiciones de dren de permeabilidad infinita y sin zona de remoldeo, coincide con la obtenida por Hansbo (1981), motivo por el cual, con bastante frecuencia, se denomina solución de Barron/Hansbo. Debido a su sencillez, es una de las más empleadas.

Si se tiene en cuenta la existencia de una zona de remoldeo, cuya permeabilidad es distinta a la del suelo blando inalterado, la solución obtenida por Barron en caso de carga rígida es:

$$u_r = \bar{u}_r \left[\frac{\ln\left(\frac{r}{r_c}\right) - \frac{r^2 - r_s^2}{2r_e^2} + \frac{k_r}{k_s} \left(\frac{r_e^2 - r_s^2}{r_e^2} \right) \ln\left(\frac{r_s}{r_c}\right)}{\mu} \right] \quad (1.13)$$

donde μ ahora es:

$$\mu = \frac{r_e^2}{r_e^2 - r_c^2} \ln\left(\frac{r_e}{r_c}\right) - \frac{3}{4} + \frac{r_s^2}{4r_e^2} + \frac{k_r}{k_s} \left(\frac{r_e^2 - r_s^2}{r_e^2}\right) \ln\left(\frac{r_s}{r_c}\right) \quad (1.14)$$

y siendo:

r_s : radio de la zona remoldeada.

k_s : permeabilidad en sentido radial de la zona remoldeada.

Las expresiones de la presión intersticial media y del grado de consolidación medio obtenido son idénticas a las de la solución anterior (ec. 1.7 y ec. 1.12) siendo μ el nuevo valor definido en la ec. (1.14).

Estas soluciones son de aplicación a drenes verticales, en los que la relación entre radios ($N = r_e/r_c$) es elevada y la rigidez del dren es prácticamente nula. A pesar de que estas dos condiciones no se dan en el caso de columnas de grava, estas soluciones se emplean y aplican su diseño, ignorando algunos de los aspectos fundamentales de su comportamiento. Sin embargo, se han desarrollado posteriormente otras soluciones más adaptadas a esta técnica.

La diferencia de rigidez entre la columna y el suelo conlleva una distribución de cargas entre ambos. Este fenómeno fue analizado por Han y Ye (2001), que presentaron la primera solución específica para la consolidación radial con columnas. En su análisis no sólo se tiene en cuenta una relación de rigideces columna/suelo, sino que, ésta varía con el tiempo durante el proceso de consolidación. Inicialmente, el suelo se deforma en condiciones no drenadas, presentando una rigidez relativamente alta. Durante el proceso de consolidación, el módulo de rigidez del suelo va disminuyendo hasta alcanzar su valor drenado, produciéndose una transferencia de carga hacia la columna. Esto implica considerar una carga vertical sobre el suelo variable durante el proceso de consolidación.

Suponiendo condiciones edométricas, tanto en el suelo como en la columna, la expresión para la carga vertical sobre el suelo ($\bar{\sigma}_{zs}(t)$) es:

$$\overline{\sigma_{zs}}(t) = \frac{p_a + \frac{E_{mc}}{E_{ms}} a_r \bar{u}(t)}{1 + a_r \left(\frac{E_{mc}}{E_{ms}} - 1 \right)} \quad (1.15)$$

donde son:

p_a : tensión aplicada.

E_{mc} : módulo edométrico de la columna.

E_{ms} : módulo edométrico del suelo.

Al asumir un confinamiento lateral perfecto de la columna y el suelo (comportamiento edométrico), el factor de concentración de tensiones al finalizar el proceso de consolidación es igual a la relación de módulos edométricos ($SCF = E_{mc} / E_{ms}$). En la Figura 1.8 se muestran los resultados obtenidos por Han y Ye para una relación de diámetros $N = 3$ y una relación de rigideces $E_{mc} / E_{ms} = 5$. El factor de concentración de tensiones aumenta con el tiempo, desde un valor nulo al inicio de la consolidación hasta su valor final E_{mc} / E_{ms} .

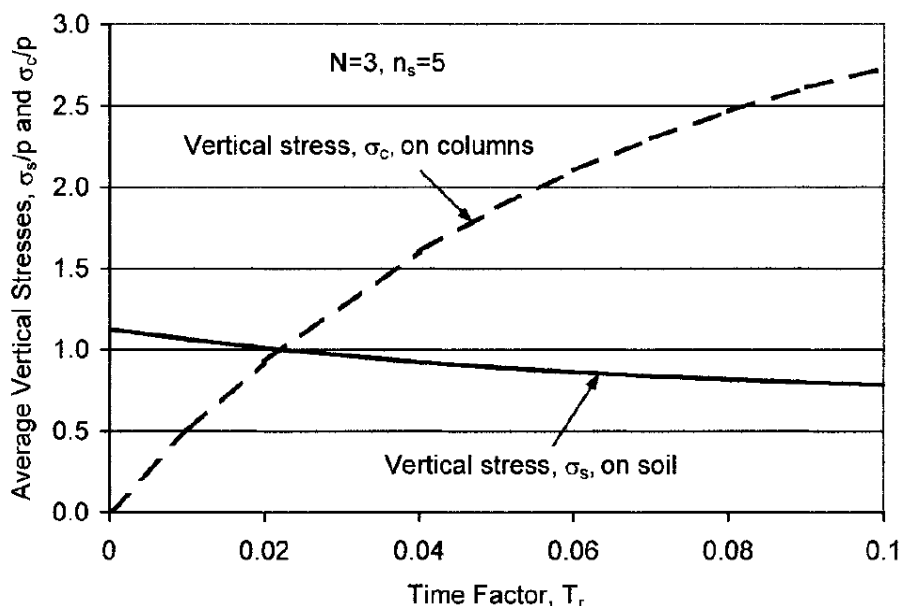


Figura 1.8. Reparto tensional en suelo y columna a lo largo del tiempo (Han y Ye, 2001)

Teniendo en cuenta esta carga vertical variable en el suelo, la solución de la consolidación resultante mantiene la misma forma que la vista anteriormente para

drenes verticales. Por ello, las expresiones 1.6 y 1.12 son válidas pero con un valor del coeficiente de consolidación radial equivalente (c_r^e) modificado:

$$c_r^e = c_r \left(1 + \frac{E_{mc}}{E_{ms}} \frac{a_r}{1 - a_r} \right) \quad (1.16)$$

Analizando la expresión, se deduce que el coeficiente de consolidación radial equivalente es siempre mayor que el del terreno, lo que implica una aceleración del proceso de consolidación.

Castro (2008) propone una solución en la que se elimina la hipótesis de confinamiento lateral para el suelo y la columna durante el proceso de consolidación. En el modelo se incluye la deformación radial de la columna, imponiendo el equilibrio horizontal de las tensiones radiales en el contacto columna-suelo. Además, extiende su análisis al comportamiento no elástico de la columna. Esta solución se encuentra resumida en Castro y Sagaseta (2008).

Para un comportamiento elástico de ambos materiales, el grado de consolidación radial medio resulta el mismo que el dado en la ec. (1.12), pero con un coeficiente de consolidación equivalente distinto:

$$c_{vr}^{zre} = c_{vr} \cdot \frac{[a_r(\lambda_c + 2G_c) + (1 - a_r)(\lambda_s + 2G_s)] [H - (\lambda_c - \lambda_s)] - (1 - a_r)(\lambda_c - \lambda_s)^2}{(\lambda_s + 2G_s)[H - (1 - 3a_r)(G_c - G_s)]} \quad (1.17)$$

donde:

$$H = G_s - G_c + (\lambda_c + G_c + G_s) \frac{1}{a_r} \quad (1.18)$$

siendo G el módulo de elasticidad transversal y λ la constante de Lamé (relacionada con E_m y G), para ambos materiales.

Si se considera que la carga aplicada puede producir una plastificación de la columna, la resolución del proceso de consolidación sigue el mismo procedimiento visto hasta ahora, con un nuevo coeficiente de consolidación equivalente, cuya expresión es:

$$c_{vr}^{zrp} = c_{vr} \cdot \frac{(1-a_r) + \frac{a_r}{(\lambda_s + 2G_s)} \left(\frac{\lambda_s}{k_{\psi c}} + \frac{J}{k_{ac}} \right)}{\left[1 + \frac{a_r}{(1-a_r)k_{\psi c}} \right] \left(1 - a_r + \frac{a_r}{k_{ac}} \right)} \quad (1.19)$$

con:

$$J = \lambda_s + \frac{G_s + a_r(\lambda_s + G_s)}{(1-a_r)k_{\psi c}} \quad (1.20)$$

siendo:

k_{ac} : coeficiente de empuje activo de la columna

$k_{\psi c}$: coeficiente de la ley de flujo de la columna

La influencia de la deformación radial y del comportamiento plástico de la columna en la distribución de tensiones entre el suelo y la columna se refleja en la Figura 1.9, para una relación de rigideces $E_{mc} / E_{ms} = 40$ y una razón de sustitución de 0,25.

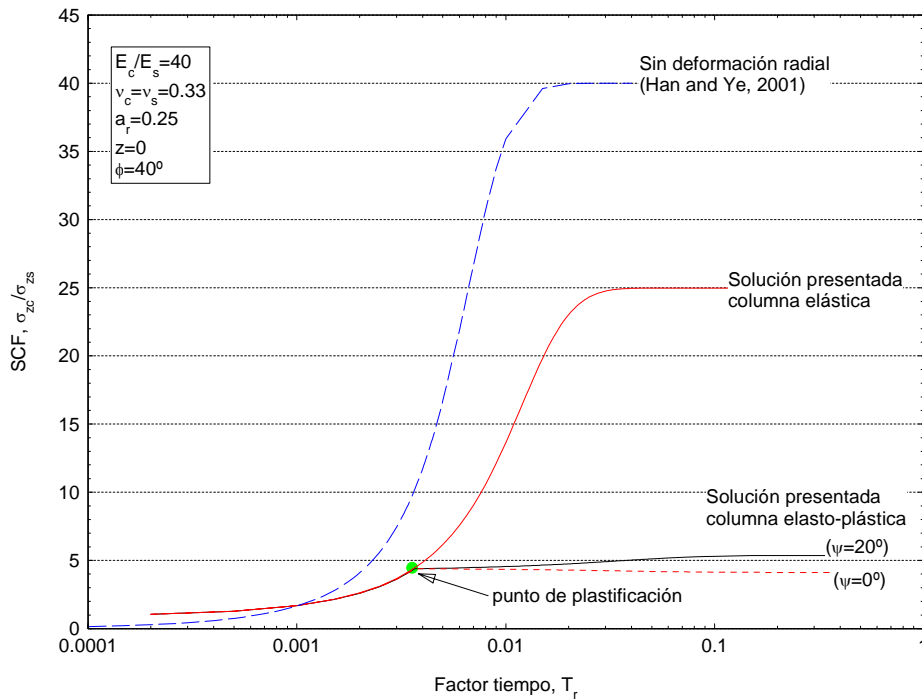


Figura 1.9. Factor de concentración de tensiones. Influencia de la deformación radial y deformaciones plásticas (Castro, 2008)

En condiciones edométricas (Han y Ye, 2001), el factor de concentración de tensiones parte de un valor inicialmente nulo y alcanza un valor final igual a la relación de módulos edométricos de los materiales, como ya se había comentado. Al considerar la deformación radial (Castro, 2008), el valor final del *SCF* disminuye considerablemente. Además, se produce un asiento inicial instantáneo, lo que supone un valor inicial no nulo. Las deformaciones plásticas en la columna reducen aún más el valor final del *SCF*, influyendo ligeramente la dilatancia del material granular.

1.2.2. Deformaciones y reparto de tensiones

Como ya se ha comentado anteriormente, una de las principales características de las columnas de grava es la reducción de los asientos producidos en el terreno. Esta reducción obedece a la distribución de la carga aplicada entre la columna y el terreno, lo que provoca un asiento final menor.

Existen varios análisis teóricos de las deformaciones y reparto de tensiones que se producen entre las columnas de grava y el suelo. En ellos se evalúan los parámetros factor de mejora (n) y factor de concentración de tensiones (*SCF*) definidos en el apartado 1.1.3. Se suelen centrar en un análisis en simetría axial, empleando por tanto el concepto de la celda unidad.

A continuación, se revisan aquellos más utilizados, en los que se considera las columnas de grava totalmente penetrantes en el suelo blando hasta alcanzar un sustrato rígido, la malla de columnas es muy extensa y se aplica una carga rígida en superficie.

Método de Priebe (1976, 1995)

Es el método más antiguo y probablemente el más utilizado para la obtención del factor de mejora. Se trata un método semi-empírico que, con el tiempo, ha ido experimentando una serie de mejoras y modificaciones hasta su versión actual (Priebe, 1995). La solución original contiene varias hipótesis simplificadoras que se enumeran brevemente a continuación:

1. La deformación vertical del suelo tiene lugar en condiciones edométricas, es decir, de confinamiento lateral.

2. La columna es rígido-plástica, es decir, sólo se deforma si la tensión radial en su contorno es inferior al empuje activo correspondiente a la tensión vertical a la que se encuentra sometida.
3. Alcanzada la situación activa, la columna se deforma sin cambio de volumen.
4. El coeficiente de empuje en reposo del suelo se supone igual a la unidad.
5. Si la presión radial actuante en la pared columna-suelo es tal que la situación difiere de la de reposo, el suelo se deforma elásticamente.

Partiendo de estas hipótesis, se calcula la deformación radial de la pared columna-suelo a partir de la solución de expansión de cavidad cilíndrica en un medio elástico. Esta expresión proporciona la deformación radial de la columna en función de las tensiones verticales en ella y en el suelo. Estableciendo la igualdad de las deformaciones verticales en el suelo y la columna y junto a la condición de equilibrio de tensiones verticales, se resuelve el problema. Se llega, finalmente, a la siguiente expresión del factor de mejora:

$$n = 1 + a_r \left(\frac{\frac{1}{2} + f(v_s, a_r)}{k_{ac} f(v_s, a_r)} - 1 \right) \quad (1.21)$$

siendo $f(v_s, a_r)$ una función de expresión:

$$f(v_s, a_r) = \frac{(1 - v_s)(1 - a_r)}{1 - 2v_s + a_r} \quad (1.22)$$

donde:

k_{ac} : coeficiente de empuje activo de la columna

v_s : coeficiente de la ley de flujo de la columna

Esta expresión se suele manejar en forma de gráfica (Figura 1.10).

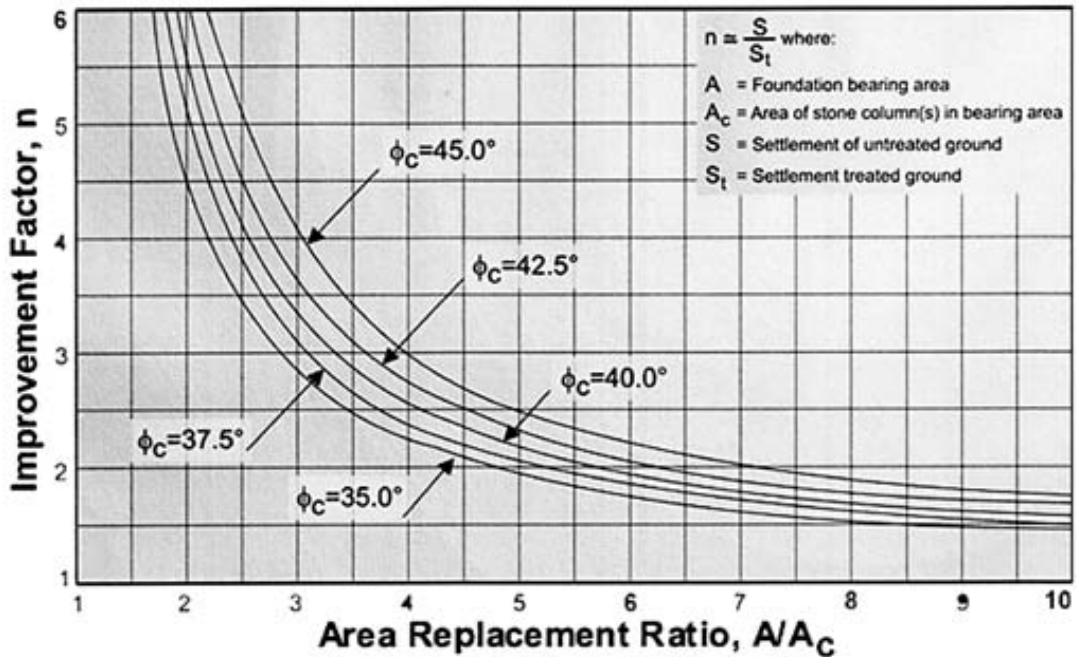


Figura 1.10. Factor de mejora (Priebe, 1995)

Aunque algunas de las hipótesis asumidas son cuestionables, el método proporciona unos resultados razonablemente próximos a la realidad, haciendo intervenir los parámetros más significativos del problema como son los módulos edométricos de suelo y columna, la razón de sustitución y el ángulo de rozamiento interno de la grava, a través de su coeficiente de empuje activo.

Método de Balaam y Booker (1981)

Es similar al anterior en el planteamiento general, pero realiza mejoras en algunas de las hipótesis cuestionables. Plantea un análisis elástico riguroso del sistema columna-suelo: la columna se trata como un cilindro en condiciones triaxiales, sometido a una tensión vertical y otra radial; el terreno circundante se analiza como un material elástico sometido a expansión de una cavidad cilíndrica por presión radial en su pared y, actuando simultáneamente, una presión vertical en superficie.

Estableciendo la igualdad de asientos de columna y terreno, y compatibilidad y equilibrio en la pared vertical columna-suelo, se dispone de las ecuaciones necesarias para resolver el problema, determinando simultáneamente las tensiones verticales en el

terreno y la columna, la presión radial en la interfaz y los desplazamientos verticales y horizontales.

En la Figura 1.11 se presenta el resultado del factor de reducción de asientos en función de la relación de diámetros de terreno y columna ($a/b = 1/N$) y la relación de módulos de columna (E_p) y suelo (E_s), para un valor del coeficiente de Poisson de 0,3 para ambos materiales.

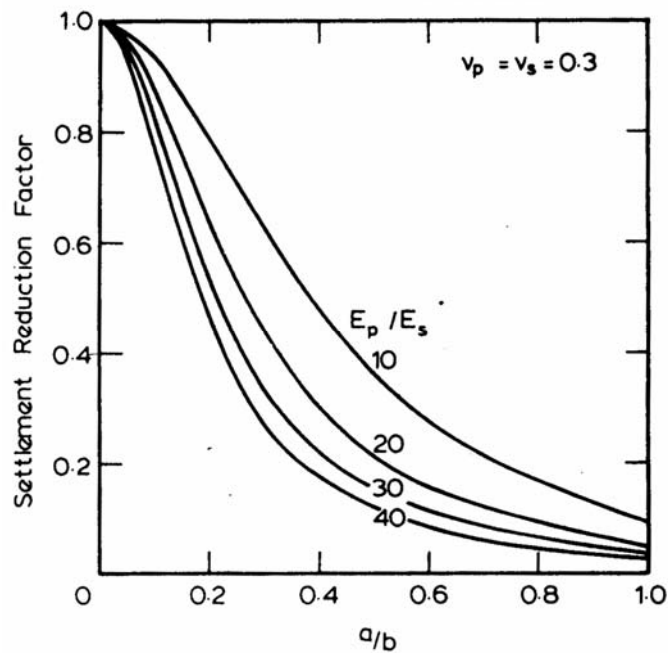


Figura 1.11. Influencia del área de sustitución en el factor de reducción de asientos (Balaam y Booker, 1985)

1.3. ANÁLISIS EN LABORATORIO

Los estudios experimentales existentes sobre columnas de grava se pueden dividir en dos grupos. Por un lado, varias investigaciones han ido encaminadas hacia la correcta determinación, tanto in situ como en laboratorio, del coeficiente de consolidación radial (c_{vr}) y de la permeabilidad horizontal del suelo (k_h), independientemente de que éste se encuentre reforzado con columnas de grava, drenes verticales, etc. Una vez obtenidos dichos parámetros se asume la idoneidad, en el análisis de la consolidación, de las soluciones teóricas descritas en el apartado 1.2. Los estudios experimentales realizados hasta ahora en este sentido, se repasan a continuación en el apartado 1.3.2.

Por otro lado se encuentran los que estudian el comportamiento de las columnas de grava (capacidad de carga, modo de deformación, influencia del proceso de construcción, reparto de carga suelo/columna, influencia de la longitud de la columna y reducción de asientos). La bibliografía existente en este sentido se presenta en el apartado 1.3.3.

1.3.1. Justificación. Limitaciones de los estudios en campo

Son varios los estudios realizados en campo para analizar el comportamiento de suelos blandos tratados con columnas de grava. Algunos de ellos han supuesto la construcción e instrumentación de terraplenes experimentales, bien para estudiar el comportamiento de las columnas con carácter meramente científico o para realizar un análisis previo del tratamiento a ejecutar en una zona próxima. McKenna et al. (1975) instrumentaron un terraplén experimental próximo a East Brent (Inglaterra) para investigar la efectividad de las columnas de grava en la reducción de asientos de grandes terraplenes. Este estudio fue previo al diseño de la autopista de Somerset en el suroeste de Inglaterra para ayudar en la decisión sobre el tratamiento a realizar en la obra real. Otra dirección seguida por los estudios en campo es la instrumentación de obras reales. Sopena (1992) analiza los resultados de la instrumentación de varios tramos de la Autovía de Aragón en Medinaceli en los que se trataron las zonas más problemáticas para el apoyo de un terraplén. Se plantearon dos tipos de tratamientos, la mejora con columnas cortas emplazadas en el seno del suelo blando y la construcción

de columnas largas hasta el sustrato duro, el cual se localizaba a profundidades en general muy altas (10 – 18m). Se observó un aumento de la velocidad de producción del asiento en las zonas tratadas con columnas de grava frente a las zonas sin tratar. Además, se consiguió una mejora de la estabilidad de los taludes del terraplén. Así, el valor del coeficiente de seguridad se situó por encima de la unidad para el tratamiento con columnas cortas (1,02 – 1,05), alcanzando valores superiores a 2 cuando el tratamiento realizado fue con columnas totalmente penetrantes, frente a valores inferiores a la unidad en la situación original sin columnas.

Debido a que éste no es el objeto de la presente Tesis Doctoral, no se realiza aquí un repaso exhaustivo de la bibliografía existente sobre este tipo de estudios. En cualquier caso se pueden encontrar referencias en varios artículos en revistas o en estudios como p.ej. el realizado por Castro (2008), quien recopila y describe parte de la bibliografía existente sobre este tema.

Los análisis a escala real presentan una mayor aproximación en cuanto al método constructivo habitual, sin embargo, implican una mayor dificultad para controlar otros parámetros. Así, por ejemplo, resulta complicado asegurar el valor del diámetro o del grado de compactación de una columna ejecutada en campo. En cuanto a la instrumentación, es difícil su disposición de manera exacta y la toma de lecturas no aporta toda la información que sería deseable. Todo ello es en parte debido a las grandes heterogeneidades del terreno in situ y la imposibilidad de controlar todos los parámetros que intervienen en el problema.

Todos estos motivos justifican el acudir a análisis experimentales en laboratorio donde muchos de estos inconvenientes se eliminan. Esta necesidad resulta aún mayor en el estudio del proceso de consolidación radial puesto que, el control de las condiciones de drenaje es muy difícil así como la medida precisa de presiones intersticiales.

1.3.2. Consolidación radial en un suelo blando. Estimación de c_{vr}

El tratamiento de un suelo blando con drenes verticales o columnas de grava produce una aceleración de la consolidación radial del suelo, debido a la disminución del camino de drenaje. El parámetro que controla la velocidad de consolidación radial

de un suelo se denomina coeficiente de consolidación radial u horizontal (c_{vr}). Este parámetro depende directamente del valor de la permeabilidad horizontal del suelo. Mediante el valor de c_{vr} de un suelo, introduciéndolo en alguno de los modelos teóricos de consolidación existentes (apartado 1.2.1), es posible diseñar un tratamiento adecuado con drenes verticales o con columnas de grava.

El coeficiente de consolidación radial puede determinarse según distintos métodos, tanto en laboratorio como en campo, y aunque existen ciertas incertidumbres en algunos de los métodos empleados, los resultados suelen ser satisfactorios.

McKinlay (1961) realiza un análisis de la consolidación en arcillas en condiciones de drenaje radial hacia el contorno exterior de una muestra de sección circular. Los ensayos se llevan a cabo en una célula edométrica convencional, en la que se realizan ligeros cambios para la imposición del drenaje radial. Se reemplaza el anillo rígido lateral por otro formado por un metal poroso y se eliminan las piedras porosas superior e inferior, sustituyéndolas por dos placas impermeables de idénticas dimensiones. La forma convencional de aplicación de la carga se mantiene. Se propone un método para obtener de forma sencilla el coeficiente de consolidación radial de un suelo (c_{rc}). Para ello, se representan los datos de asiento de la muestra frente al factor tiempo elevado a una determinada potencia, y se usa de manera similar al método de la raíz cuadrada o método de Taylor (1942), con la excepción del factor 1,15 para fijar el punto de 90% de consolidación que, en este caso, es 1,218. Una vez definido el tiempo para alcanzar un grado de consolidación del 90%, el coeficiente de consolidación radial del material con flujo radial exterior es:

$$c_{rc} = \frac{0,335R^2}{t_{90}} \quad (1.23)$$

siendo R el radio de la muestra.

Trautwein et al. (1981) han llevado a cabo ensayos en laboratorio para el cálculo de c_{vr} en una célula edométrica que permite el drenaje radial, tanto hacia el contorno exterior como hacia un dren interior central, y donde la aplicación de la carga es en dirección vertical. Para ello aplican soluciones teóricas de carga rígida y flexible,

comparando la calidad del ajuste a cada una de ellas. Al final se concluye que la solución de carga flexible es más apropiada.

Leminen y Rathmayer (1983) emplean la técnica de girar 90° la muestra inalterada obtenida del terreno para ensayarla en un edómetro convencional con consolidación unidimensional vertical. Además, comparan los resultados obtenidos con la estimación de c_{vr} en seis proyectos en campo donde se ejecutan drenes verticales en suelos blandos. Las determinaciones de c_{vr} en el laboratorio están en concordancia con las obtenidas a partir de las observaciones de asientos en campo y en ninguno de los casos se sobrestima dicho valor.

Tabla 1.1. Comparación de los resultados obtenidos de c_{vr} a partir de ensayos edométricos y mediante observaciones en campo (Leminen y Rathmayer, 1983)

Emplazamiento	Valores medios de c_{vr} (m ² /año)	
	Ensayos edométricos	Estimación a partir de los datos de campo
HELSINKI East Center	0,25	0,25
TURKU Airport	0,75	0,75
ESPOO Leppävaara	0,55	0,80
HELSINKI Tapanila	1,00	1,85
HELSINKI Torparinmäki	1,20	1,50
LAHTI Iijärvi	1,45	3,00

Este método ha sido adoptado por muchos investigadores para el cálculo de c_{vr} , sin embargo, resulta cuestionable puesto que la dirección de aplicación de carga en el edómetro difiere de la de in situ.

Sridharan et al. (1996) proponen varios métodos para el cálculo de c_{vr} a partir de la curva asiento-raíz cuadrada del tiempo obtenida en el laboratorio en un ensayo edométrico, para el caso de drenaje radial (dren central en la muestra) y carga rígida. Uno de ellos, es una extensión a la consolidación con drenaje radial del método de ajuste de Taylor convencional. El coeficiente de consolidación se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$(c_r)_{90} = \frac{T_r d_e^2}{t_{90}} \quad (1.24)$$

siendo T_r el factor de tiempo para consolidación radial y d_e el diámetro de la muestra.

La construcción para obtener el tiempo correspondiente a un grado de consolidación medio de 90% (t_{90}), es idéntica a la de Taylor, variando el factor multiplicador de la abscisa con la relación entre los diámetros del dren central y la muestra ensayada (n). Como caso general, se puede tomar 1,167 cualquiera que sea el valor de n , siendo insignificante el error que se produce (Figura 1.12).

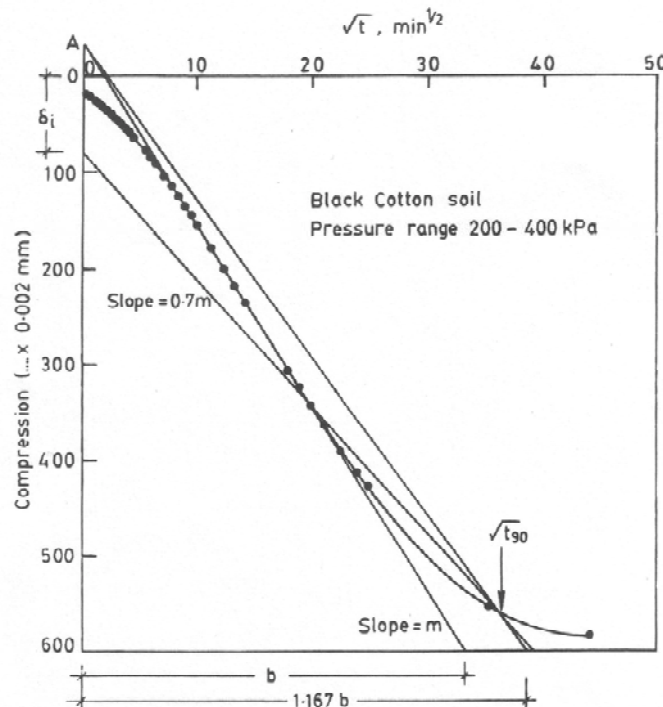


Figura 1.12. Método de ajuste de la raíz cuadrada de tiempo para drenaje radial (Sridharan et al., 1996)

Almeida et al. (2000) realizan un estudio en laboratorio sobre distintos métodos de obtención de c_{vr} y su fiabilidad. Para ello llevan a cabo ensayos (edométricos especiales, piezoconos) de los cuales obtienen el valor del coeficiente de consolidación radial del suelo. Estos valores son contrastados con el obtenido a partir de la instrumentación de una obra real realizada sobre el mismo tipo de suelo, en el cual se llevó a cabo un tratamiento de drenes verticales, con un resultado en la determinación de c_{vr} muy satisfactorio.

Stapelfeldt et al. (2007) realizan ensayos en laboratorio sobre dos tipos de arcillas blandas para el cálculo de su permeabilidad horizontal, determinando así su coeficiente de consolidación. Los valores obtenidos son comparados con medidas directas de la permeabilidad vertical. Emplean un edómetro convencional con ligeras modificaciones para asegurar únicamente drenaje radial en la muestra. La probeta tiene un diámetro de 8 cm, frente a una altura de 4 cm. El dren vertical se materializa mediante discos de geotextil colocados unos sobre otros. La permeabilidad de dicho material y su compresibilidad se estudia mediante un ensayo previo.

Chu et al. (2002) obtienen el valor de c_{vr} de una arcilla marina a partir de diferentes ensayos de laboratorio y de campo. Los ensayos in situ realizados fueron: medidas con permeámetro; con presiómetros autoperforantes; dilatómetros y piezoconos. Además, a partir de la medida de los asientos en campo se estima el valor de c_r . En laboratorio se realizaron ensayos de consolidación con deformación constante y en célula Rowe (Rowe y Barden, 1966) con muestras inalteradas. Como conclusión, llegan a valores muy próximos mediante piezocono y célula Rowe, siendo estos métodos los más aconsejables para estimar el valor de c_{vr} en el diseño de un tratamiento con drenes verticales.

Los ensayos de consolidación con deformación constante son ampliamente empleados (Wissa et al., 1971, Lee, 1981, Seah y Koslanant, 2003, Yune y Chung, 2005) con resultados satisfactorios. Presentan ciertas ventajas frente a los ensayos convencionales de tensión controlada en edómetros o células Rowe, como la menor duración de los ensayos, la obtención de gráficos continuos y, frente a la célula Rowe, mayor facilidad para obtener muestras inalteradas del tamaño necesario para el ensayo.

1.3.3. Comportamiento de las columnas de grava

Los avances realizados en laboratorio en cuanto al estudio de las columnas de grava han estado encaminados hacia el conocimiento de la capacidad de carga y los modos de fallo de las columnas, su deformación, la influencia del proceso constructivo e influencia de la longitud de la columna, siendo menor la información disponible acerca de los asientos y su evolución en suelos tratados sometidos a cargas en su superficie.

La mayoría de los estudios existentes se realizan en laboratorio a 1g. sin embargo, también existen estudios en centrífuga que se describen más adelante.

Sobre la deformación que sufre una columna de grava inmersa en un material blando, al aplicar una carga sobre ella, existen diversos estudios que confirman un aumento de diámetro en la zona superior de la columna. Algunos de estos estudios analizan también la capacidad de carga de la columna.

A continuación se resumen algunas de las investigaciones más relevantes sobre este tema.

Hughes y Withers (1974) y Hughes et al. (1975) han estudiado el comportamiento de una columna de grava aislada, contenida en arcilla dentro de una cámara cilíndrica.

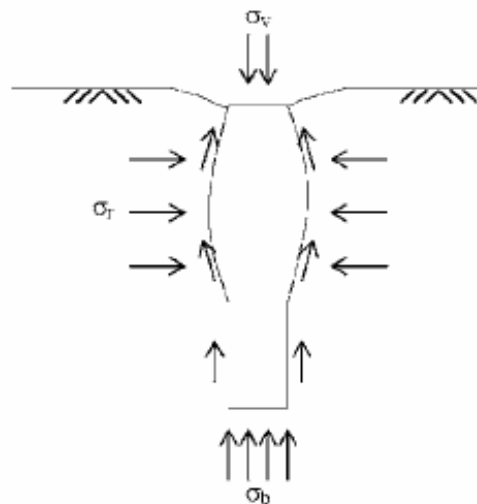


Figura 1.13. Deformación y tensiones durante la aplicación de una carga, de una columna vibrada (Hughes y Withers, 1974)

de la columna. La zona abombada se sitúa a una longitud aproximada de 2,5 a 3 veces el diámetro de la columna, resultado muy similar al observado por Hughes et al. (1975).

Recientemente, Sivakumar et al. (2007) estudiaron los mecanismos de fallo de las columnas de grava, usando un material transparente desarrollado en el Trinity College de Dublín, cuyas propiedades son similares a las de un suelo arcilloso. Sus características fueron investigadas por Gill (1999). Este material permite un examen visual directo del comportamiento de las columnas durante la aplicación de carga. El material es amasado con una consistencia fluida, y posteriormente consolidado a una tensión vertical de 70 kPa. Después se construyen tres columnas de grava de 25 mm de diámetro, aplicando sobre ellas una carga de cimentación circular y rectangular, respectivamente. En el exterior de la célula se sitúa una cámara digital que registra la deformación de las columnas durante el ensayo.

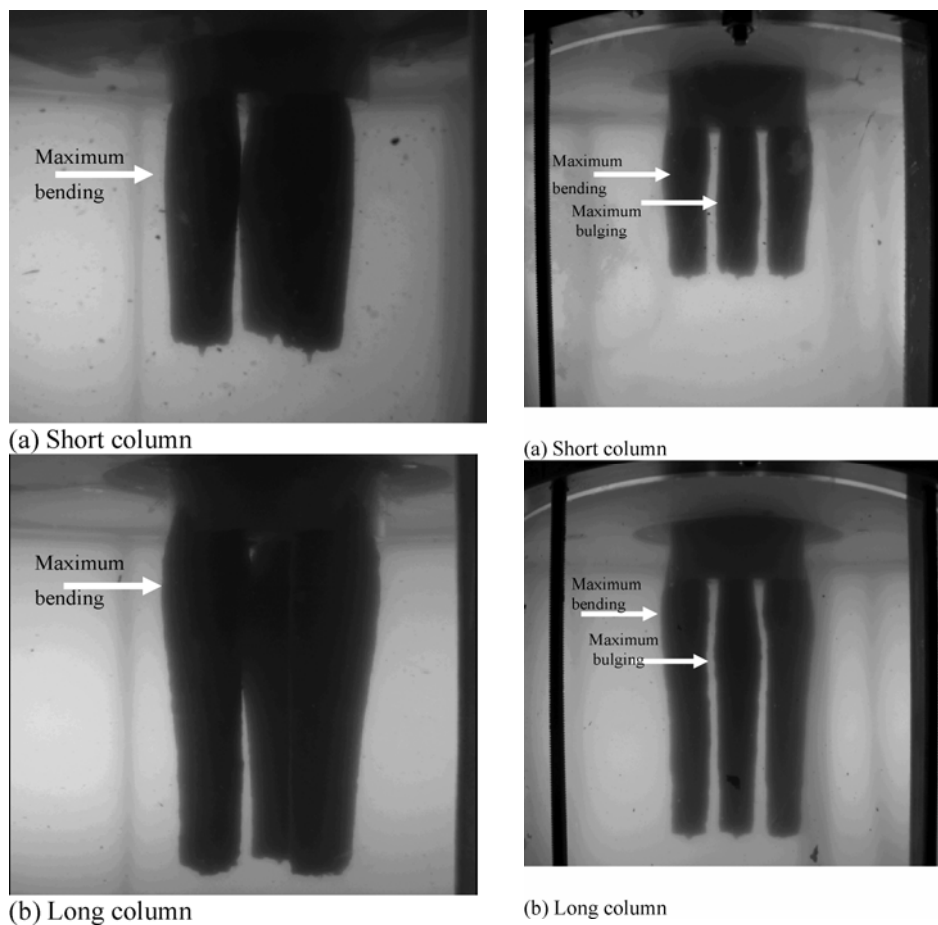


Figura 1.15. Deformación de las columnas bajo cimentación circular (Izq.) y rectangular (Dcha.). Sivakumar et al., 2007

La Figura 1.15 muestra claramente al menos tres mecanismos de fallo en las columnas: (1) penetración o hundimiento de la columna en el suelo blando (punching); (2) abombamiento de la columna en el caso de expansión simétrica en el suelo circundante, siendo máximo el aumento del diámetro a una profundidad igual a 3 veces el diámetro de la columna, independientemente de la geometría de la cimentación. La importancia del fenómeno depende de la resistencia del suelo arcilloso (bulging); (3) pandeo o desplazamiento lateral de la columna. Este mecanismo se observa en ambas geometrías de cimentación y es causado por cargas excéntricas, por eso predomina en las columnas perimetrales (bending).

La interacción entre el suelo y la columna depende de varios factores, siendo algunos de ellos el proceso de carga y su velocidad de aplicación, el área de sustitución, la consolidación debido al drenaje hacia la columna que se produce durante la aplicación de la carga, los posibles efectos de grupo, etc. Juran y Guermazi (1988) llevaron a cabo ensayos con una célula triaxial, para investigar los efectos de estos parámetros en el asiento de un suelo blando mejorado con columnas de grava. El modelo de ensayo es un cilindro de suelo limoso con una columna central de arena de río compactada. Los ensayos de compresión triaxial se realizan bajo distintas condiciones de contorno y drenaje.

Para la investigación los autores modificaron una célula triaxial, instrumentándola con cuatro transductores de medida de presión intersticial en la base de la muestra, y dos células de carga situadas en la superficie, para medir simultáneamente la carga total aplicada al conjunto suelo-columna, y la soportada por el suelo blando. El drenaje radial del suelo a la columna se realiza mediante una piedra porosa situada sobre ésta (Figura 1.16).

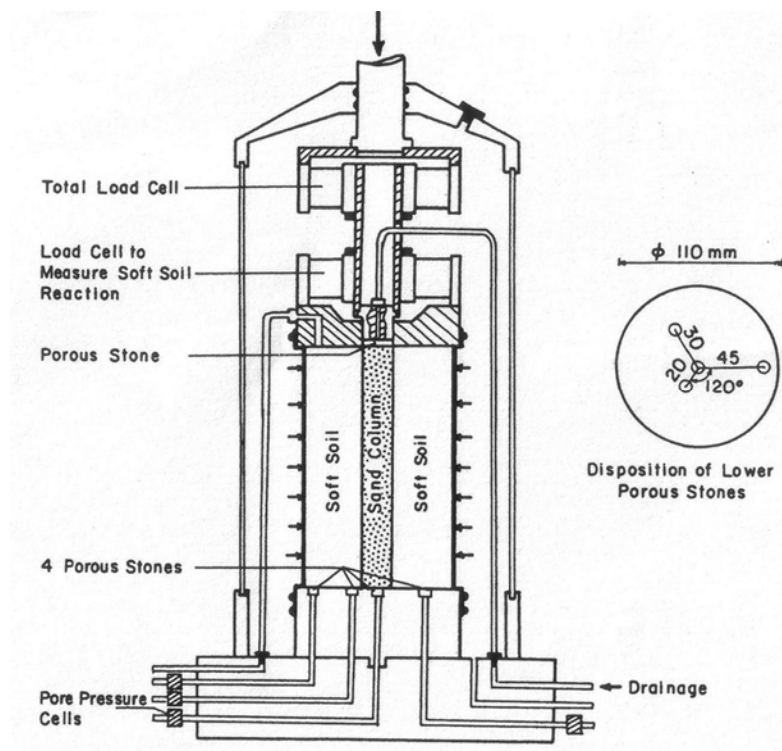


Figura 1.16. Célula triaxial instrumentada. Modelo de ensayo. (Juran y Guermazi, 1988)

Para estudiar el efecto del drenaje parcial que se produce cuando todavía se está aplicando la carga sobre la muestra, se comparan dos tipos de ensayos de compresión triaxial con tensión radial constante: (1) sin drenaje y (2) con drenaje radial permitido. Del análisis de los resultados concluyeron que la carga soportada por la columna en condiciones drenadas es dos veces mayor que en condiciones no drenadas.

Para investigar el mecanismo de transferencia de carga entre el suelo y la columna durante el proceso de consolidación, llevaron a cabo ensayos con diferentes etapas o fases de carga y drenaje. Los ensayos consistían en: (1) aplicación de carga axial sin drenaje de la muestra; (2) apertura del drenaje de la columna; (3) consolidación del suelo blando bajo carga constante; (4) aplicación de un nuevo escalón de carga sin permitir el drenaje de la muestra.

El posible efecto de grupo fue reproducido a partir del concepto de la celda unidad. Según esto, si la celda unidad reproduce cada una de las columnas del tratamiento, el desplazamiento del contorno externo de la celda ha de ser nulo por simetría. Por tanto, se compararon ensayos de compresión triaxial bajo las siguientes condiciones: (1) tensión radial constante; y (2) desplazamiento lateral nulo del contorno.

Al anular la deformación radial de la muestra, la tensión de confinamiento aumenta, y con ella la resistencia del conjunto suelo-columna.

Por último, llevaron a cabo ensayos con distintos diámetros de columna, asumiendo también en este caso el concepto de celda unidad (desplazamiento lateral nulo). De este modo, analizaron la influencia del área de sustitución en el asiento de la muestra suelo-columna, observando que un incremento en el área de sustitución conlleva un incremento de la resistencia del suelo mejorado con columna.

Un estudio de la influencia de la longitud de la columna en la carga soportada fue realizado por Malarvizhi e Ilamparuthi (2004). Para ello realizaron ensayos sobre columnas de grava tanto flotantes, con distintas relaciones longitud/diámetro (l/d), como totalmente penetrantes, contenidas todas ellas en un suelo arcilloso. Los resultados fueron comparados también con los obtenidos en el suelo arcilloso sin tratar, observando el aumento de la capacidad de carga con la relación l/d y siendo máxima para las columnas totalmente penetrantes. También se realizaron ensayos en los que la columna de grava se refuerza con distintos geotextiles y geomallas. Del análisis de la respuesta carga-asiento del conjunto concluyeron que, las columnas reforzadas con algún material geosintético resultan más rígidas que las no reforzadas. El asiento disminuye a medida que aumenta la rigidez del refuerzo de la columna. La capacidad de carga resultante con columna reforzada y con columna de grava es tres y dos veces superior a la del suelo blando.

Un programa de ensayos con distintas relaciones de l/d para la columna fue llevado a cabo también por Sivakumar et al. (2004). En los ensayos emplearon una célula triaxial dentro de la cual se alojaba la muestra. Para la instalación de la columna en el suelo arcilloso emplearon dos técnicas: la compactación de la arena húmeda por tongadas y la congelación previa de la columna. La aplicación de la carga se realizó de dos maneras distintas: repartida uniformemente en toda la superficie de la probeta y únicamente sobre la columna. Los resultados obtenidos en cuanto a relaciones de carga-deformación mostraron el aumento de la capacidad de carga con la longitud de la columna, no existiendo diferencias notables entre los dos métodos de fabricación de la columna. Además se consiguió conocer el mecanismo de fallo en todos los casos

ensayados. En esta investigación se analizó también la posibilidad de reforzar las columnas con geotextiles, lo cual aumenta la capacidad de carga.

Charles y Watts (1983) estudiaron la reducción del asiento que se produce en el suelo tratado, ligándola al valor del área reemplazada y a la reducción de la tensión vertical en la arcilla. Para ello realizaron ensayos sobre muestras de distintos diámetros de columna en las cuales se medían las tensiones en la columna y en el suelo blando, así como la variación de diámetro de la columna. De los resultados obtenidos en laboratorio concluyeron que, la reducción del asiento conseguido con la instalación de columnas está directamente relacionada con la reducción de la tensión vertical soportada por el suelo arcilloso. Para conseguir un valor significativo de reducción de asiento se precisa un área de sustitución elevada. Para los suelos empleados en la investigación, el área reemplazada por la columna de grava ha de ser 0,3 veces el área total de la muestra, para alcanzar una reducción del asiento del 33%. En campo, estas condiciones corresponderían a una relación espaciamiento/diámetro de columnas de 1,7 para una disposición de malla triangular.

Matsui et al. (2001) estudiaron la interacción entre suelo y columna enfocando el análisis en el reparto de cargas entre ambos y la reducción del asiento que provoca la presencia de la columna de grava. Para ello realizan ensayos en modelo reducido en los que se miden presiones intersticiales y tensiones totales en el suelo y en la columna, además del asiento de la muestra (la disposición de los transductores se puede ver en la Figura 1.17). Los ensayos se realizan con cuatro valores distintos del área de sustitución (0, 5, 10 y 25%), teniendo la muestra un diámetro de 280 mm y una altura que oscila entre 380 y 390 mm, aproximadamente. Se aplican varios escalones de carga, permitiendo el drenaje vertical del suelo hacia la base y hacia la superficie y el radial hacia la columna. El estudio se complementa reproduciendo los ensayos mediante elementos finitos que dieron lugar a resultados analíticos muy próximos a los experimentales.

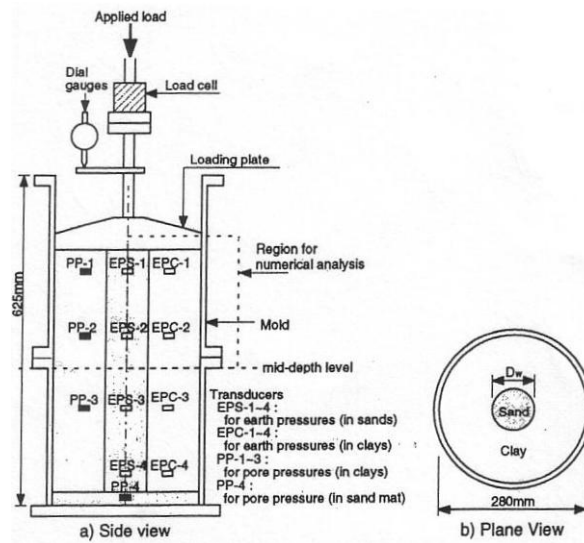


Figura 1.17. Esquema del modelo de ensayo (Matsui et al., 2001)

Los resultados de los ensayos mostraron un aumento del factor de concentración de tensiones (n) y una disminución del factor de reducción de asentamientos (β) al aumentar el área de sustitución (a_s) de la muestra ensayada (ver Figura 1.18).

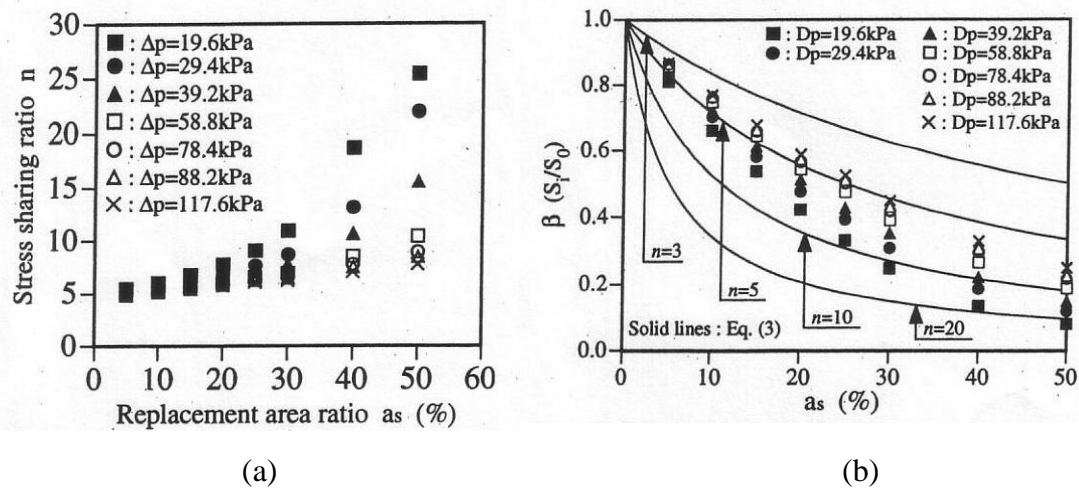


Figura 1.18. Relación entre (a) el factor de concentración de tensiones y el área de sustitución (b) el factor de reducción de asentamientos y el área de sustitución (Matsui et al., 2001)

Black et al. (2006) desarrollan un equipo triaxial para evaluar el asentamiento de una cimentación superficial aislada sobre un suelo blando mejorado con columnas de grava. Las principales características son el tamaño de la muestra, de 300 mm de diámetro y

400 mm de altura; y la posibilidad de consolidación de la muestra con desplazamiento lateral nulo (consolidación K_0) al tiempo que se aplica la carga de cimentación en un área pequeña y limitada de la superficie de la muestra. Para la comprobación del correcto funcionamiento del sistema se realizaron varios ensayos con distintas relaciones altura/diámetro de la columna (H/D): (1) Ensayo T1. Suelo blando sin reforzar; (2) Ensayo T2. Suelo blando reforzado con una columna aislada de 25 mm de diámetro y 125 mm de altura ($H/D = 6$); (3) Ensayo T3. Suelo blando reforzado con una columna aislada de 25 mm de diámetro y 250 mm de altura. ($H/D = 10$).

El ensayo consiste en una primera consolidación inicial isotrópica a una tensión efectiva de 75 kPa, y con una presión de cola de 200 kPa. Después, se aplica la carga de cimentación sobre la columna, al tiempo que las tensiones radial y vertical aumentan, manteniendo una relación K_0 . Los resultados obtenidos son coherentes con anteriores investigaciones, así, en la Figura 1.19 se muestran resultados de carga aplicada en cada tipo de ensayo frente a asiento de la muestra, observando que, para una misma carga, el asiento es menor para la muestra mejorada con columna. Comparando entre sí los ensayos con columna, el asiento disminuye en el caso de mayor longitud. Al final de cada ensayo, se realiza un examen visual de la deformación de las columnas, revelando una mayor variación de diámetro para la columna de mayor longitud.

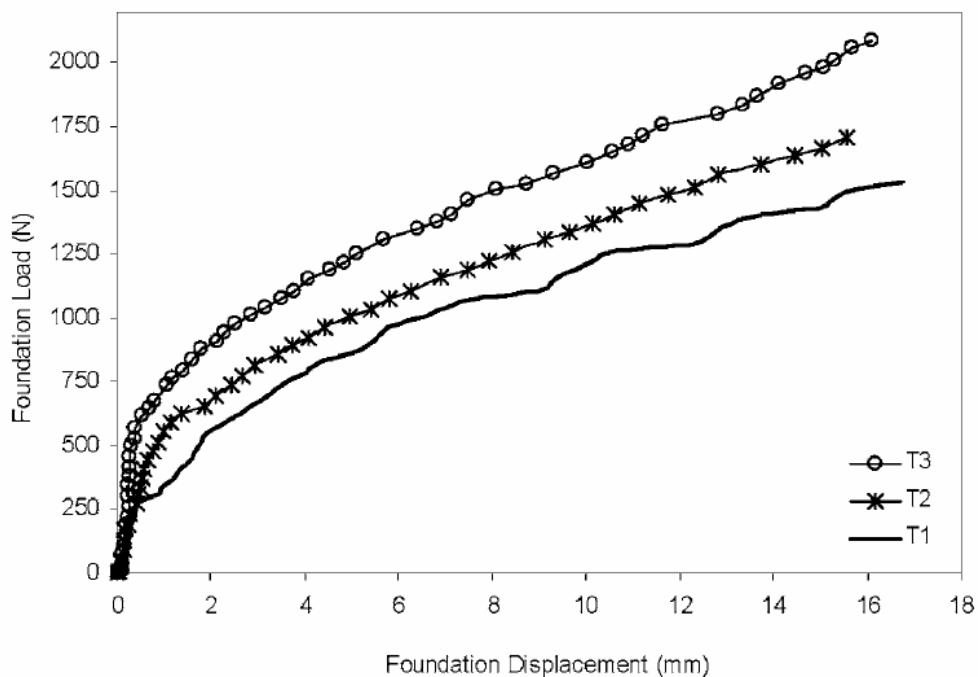


Figura 1.19. Carga de cimentación vs. asiento (Black et al., 2006)

Aunque para su diseño se asume que la columna de grava actúa de forma independiente, en realidad siempre son utilizadas en grupos para la mejora de un suelo, siendo esperable ciertos cambios en el comportamiento de las columnas en grupo. En el caso de columnas próximas entre sí, la deformación de una columna aislada por abultamiento puede esperarse que sea resistida o impedida por las columnas vecinas. Además, las columnas centrales transmitirán las cargas soportadas a una profundidad mayor. La información disponible para el diseño de grupos de columnas es muy escasa. Muir Wood et al. (2000) desarrollaron un estudio cuyo objetivo fue conocer el efecto de la variación del diámetro de las columnas, el espaciamiento entre ellas y su longitud, en la transferencia de cargas en un grupo de columnas bajo una carga rígida. El modelo y el procedimiento de construcción utilizados fueron dados por Hu (1995). Los ensayos se realizaron con grupos de columnas dispuestas según una malla cuadrada con distintas geometrías. Se colocaron transductores de medida de presión sobre la superficie de varias columnas aisladas, así como en varios puntos de la arcilla, para conocer la distribución de la carga aplicada. Los resultados obtenidos mostraron distintos tipos de fallo de las columnas según su posición, y una distribución no uniforme de la carga sobre las distintas columnas (Figura 1.20). El incremento de rigidez que se produce en el centro del grupo no es tenido en cuenta en el diseño del tratamiento.

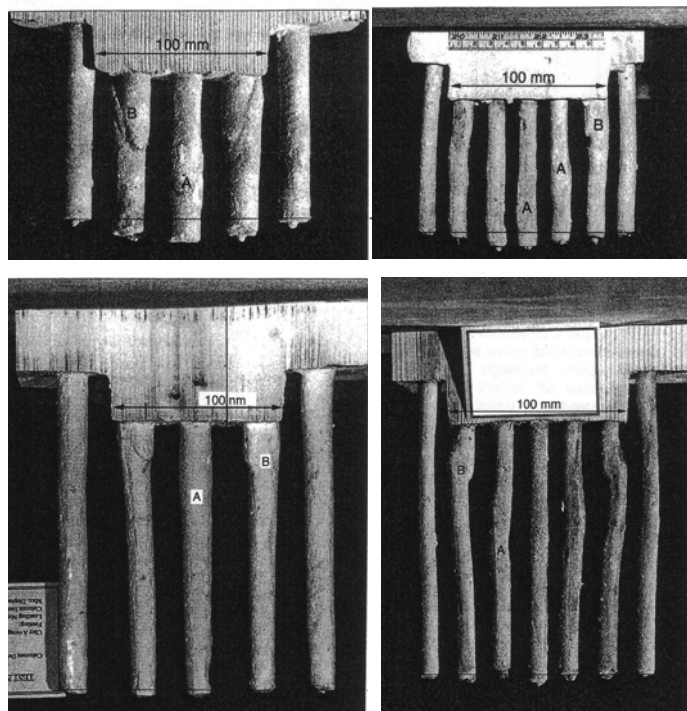


Figura 1.20. Deformación de las columnas al final del ensayo (Muir Wood et al., 2000)

La investigación realizada por Ambily y Gandhi (2007) también estudia la diferencia de comportamiento entre una columna aislada y un grupo. Para ello, realizaron ensayos de carga aplicada únicamente sobre una columna aislada, con carga repartida uniformemente sobre toda la superficie para una columna aislada y para un grupo de siete columnas, midiendo la tensión mediante células de presión en la columna y en el suelo (Figura 1.21).

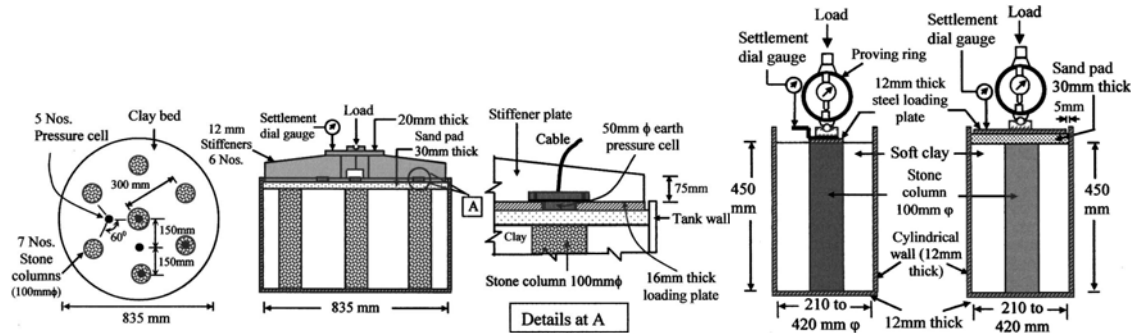


Figura 1.21. Detalles del programa de ensayos realizado (Ambily y Gandhi, 2007)

Los resultados fueron comparados con los obtenidos a partir de la modelización mediante un programa de elementos finitos y con distintas teorías existentes. Observaron una disminución de la capacidad de carga a medida que aumenta el espaciamiento entre columnas, produciéndose también un aumento del asiento del terreno. El factor de mejora de la rigidez del conjunto es independiente del valor de la resistencia al corte sin drenaje (c_u) de la arcilla, dependiendo principalmente del espaciamiento y del diámetro de las columnas.

Black et al. (2007) realizan también una investigación enfocada en este sentido. Se analiza la respuesta de una probeta de 100 mm de diámetro, formada por caolín reforzado con una columna de arena aislada de 32 mm de diámetro, y con un grupo de tres columnas de 20 mm de diámetro. El conjunto suelo-columna se consolida con un aparato triaxial, aplicando posteriormente una carga de compresión axial con y sin drenaje permitido. Las columnas construidas son totalmente penetrantes y con relación de altura columna-muestra de 0,6 y 0 (sin columna). El comportamiento se evalúa en términos de carga aplicada frente a asiento de la muestra ensayada.

Los resultados obtenidos mostraron un incremento del 33% de la capacidad de carga en el caso de la columna aislada totalmente penetrante, frente a la muestra de suelo no mejorado, siendo este aumento menor en el caso de columna de grava flotante. En cuanto al comportamiento de las columnas en grupo, el aumento de la capacidad de carga no es significativo si el área de sustitución del grupo es similar al de la columna aislada. Por otro lado, el comportamiento observado bajo carga sin drenaje no es afectado por el número de columnas instaladas en la muestra de ensayo.

Aunque los ensayos en laboratorio son una forma factible de conocer el comportamiento de las columnas, la exactitud en la realización de ensayos a una determinada escala pasa por simular adecuadamente en el modelo las propiedades y la distribución de tensiones inducida por el peso propio del material. Estas fuerzas son dominantes y gobiernan el comportamiento de la masa de suelo. Para realizar una réplica de las tensiones inducidas por la gravedad a escala real en un modelo reducido a una escala $1/n$, es necesario realizar el ensayo en un campo gravitacional n veces el del prototipo (Figura 1.22). Los ensayos en centrífuga poseen las herramientas necesarias para realizar las pruebas en campos con mayor fuerza gravitatoria, consiguiendo así el objetivo deseado.

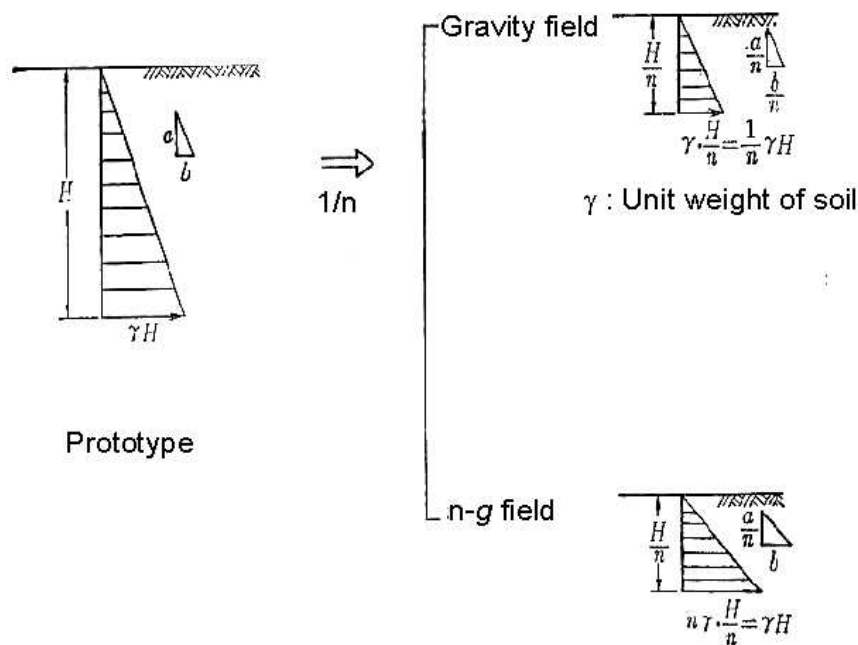


Figura 1.22. Modelización en un campo bajo gravedad artificial (Kimura y Kusakabe, 1987)

Weber et al. (2006) estudiaron el comportamiento de un tratamiento de columnas de grava bajo un terraplén mediante ensayos en centrífuga a 50g. El ensayo se realiza en un recipiente separado en dos secciones, en una de ellas se estudia el comportamiento del suelo sin aplicar mejora y en la segunda sección se construye el grupo de columnas de grava. El modelo representa un suelo de 7m de espesor mejorado con una malla cuadrada de columnas cuyo espaciamiento es de 1,7m y con longitud y diámetro de columna de 5m y 0,6m respectivamente, lo cual equivale a un área mejorada del 10%. Para la construcción y compactación de las columnas de grava, se desarrolló (Weber, 2004) un equipo que reproduce el proceso de construcción por vía seca con alimentación del material granular por fondo (Figura 1.23).

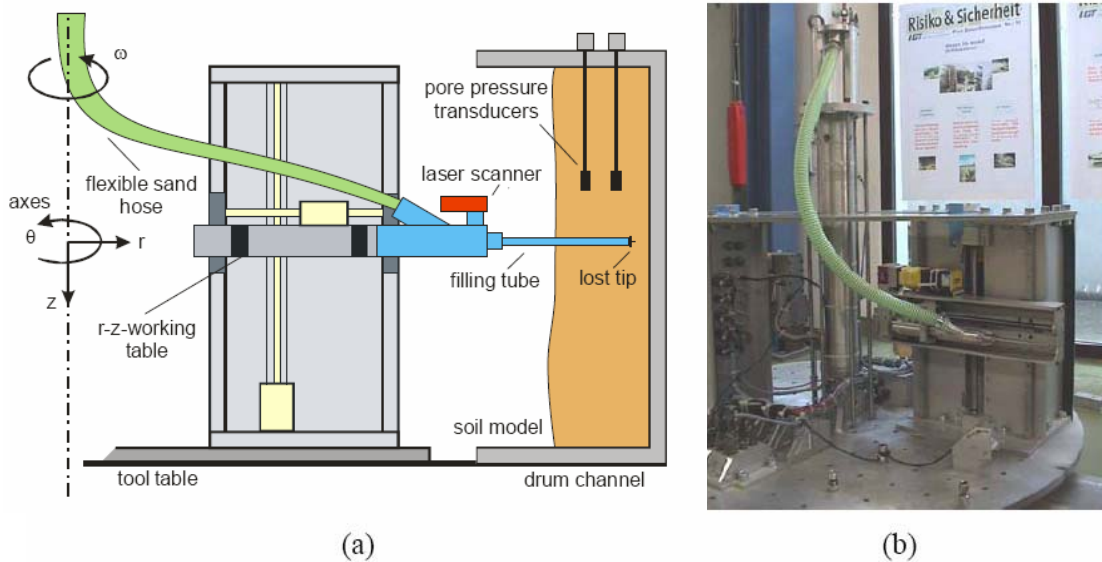


Figura 1.23. Herramienta para la instalación de las columnas. a) Esquema del equipo b) Disposición para el ensayo en centrífuga (Weber, 2004)

El terraplén construido en el modelo aplica una sobrecarga en superficie de 90 kPa, lo que representa un terraplén real de 5 m de altura, aproximadamente (Figura 1.24).

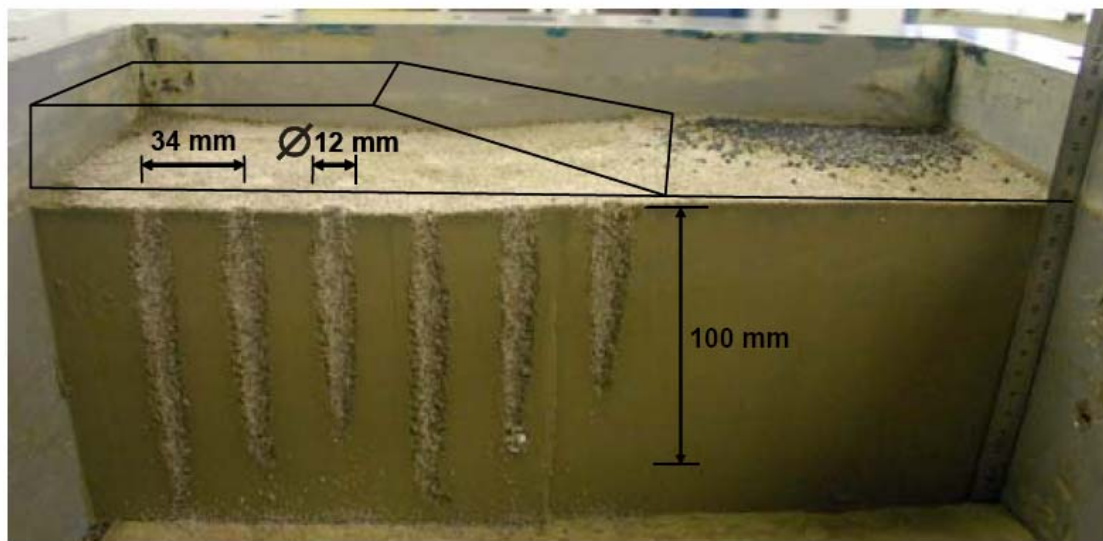


Figura 1.24. Sección del modelo después de un ensayo (Weber et al., 2006)

Se registran las presiones intersticiales generadas durante la construcción del terraplén a distintas profundidades, así como durante la construcción de las columnas de grava en la segunda sección, y se lleva el seguimiento de su desarrollo con el tiempo para conocer la aceleración que se produce en el proceso de consolidación con las columnas de grava. Se obtuvo un tiempo para el 90% de consolidación cinco veces inferior con la mejora. Además, para ambas situaciones se obtiene el asiento en dos puntos: uno de ellos situado en la superficie del terraplén y otro en la superficie del suelo. En cuanto a asientos, el factor de mejora medido es de 2. Con métodos analíticos y empíricos, para un 10% de área reemplazada se obtienen valores muy similares aunque siempre inferiores.