



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 TEÓRICO DE LA  
CONSOLIDACIÓN Y DEFORMACIÓN  
ALREDEDOR DE COLUMNAS DE GRAVA

Autor

JORGE CASTRO GONZÁLEZ

Director

CÉSAR SAGASETA MILLÁN

Santander, 2008

# Capítulo 1

---

## COLUMNAS DE GRAVA. INTRODUCCIÓN

---

Las columnas de grava son perforaciones verticales en el terreno, que se rellenan en sentido ascendente con grava introducida mediante un vibrador, que va realizando su compactación. Constituyen un método de mejora o refuerzo del terreno.

El concepto de emplear inclusiones granulares para mejorar un suelo blando es relativamente antiguo. Ya en 1836 el coronel francés Burbach empleó por primera vez columnas de arena como cimentación profunda para sustituir a los pilotes de madera, muy comunes por aquel entonces pero que se degradan rápidamente en terrenos sometidos a fluctuaciones del nivel freático (Schlosser y Simon, 2006). Sin embargo, no ha sido hasta los años 50 del pasado siglo cuando las columnas de grava empezaron a utilizarse. Surgieron como consecuencia de intentar emplear la vibrocompactación clásica en suelos no granulares, en los cuales, la cohesión e impermeabilidad del terreno no permite el reordenamiento instantáneo de las partículas en configuraciones más

densas. Fueron utilizadas por primera vez en 1957 por la compañía Keller y hasta 1972 no se empezaron a utilizar en Estados Unidos.

En el presente capítulo se describen someramente las diferentes técnicas de mejora y refuerzo del terreno para mostrar una visión general del problema. Se analiza cómo se encuadran las columnas de grava dentro de estas técnicas y qué ventajas e inconvenientes presentan frente al resto. Por último, se detallan las diferentes técnicas constructivas y las principales aplicaciones de las columnas de grava.

## **1.1. MÉTODOS DE MEJORA Y REFUERZO DEL TERRENO**

Son diversas las situaciones y los motivos por los que se mejora o refuerza un terreno. En general, todo terreno, por bueno que sea, puede ser tratado para mejorar sus características, como ocurre en la cimentación de presas. Sin embargo, estas actuaciones son más comunes en terrenos blandos. Antes de mejorar o reforzar un terreno debe considerarse la posibilidad de retirarlo y sustituirlo por otro de mejores características. Por ello, la sustitución, parcial o total, es la primera alternativa que debe tenerse en cuenta.

En la Guía de Cimentaciones en Obras de Carretera (Ministerio de Fomento, 2002) se enuncian los siguientes métodos:

- Sustitución
- Compactación con rodillo
- Precarga
- Mechas drenantes
- Vibración profunda
- Compactación dinámica
- Inyecciones
- Inyecciones de alta presión (Jet-grouting)
- Columnas de grava
- Columnas de suelo-cemento
- Claveteado o cosido del terreno (Bulones)
- Geosintéticos
- Otros: explosivos, tratamientos térmicos, congelación, electroósmosis

A continuación se muestran las diferentes clasificaciones de los métodos, y se describen y comparan algunos de éstos, fundamentalmente aquellos que pueden ser empleados para cimentar un terraplén sobre suelo blando que es el problema objeto de estudio.

## **Clasificaciones**

Existen numerosos intentos de clasificación de estas técnicas, y cualquier tratado sobre el tema comienza por un intento de clasificación de las mismas. En general, atendiendo a diversos aspectos de su ejecución o de sus objetivos, se puede hablar de técnicas:

- Estáticas o dinámicas
- Puntuales o en masa
- Con inclusiones de elementos o no
- Por desplazamiento o por extracción
- Temporales o permanentes
- Sistemáticas (previas) o para remediación (a posteriori)
- De mejora o de refuerzo

Mitchell (1981) realizó un amplio resumen de éstas técnicas en su ponencia del Congreso Internacional celebrado en Estocolmo. En la Figura 1.1 se muestra la clasificación que realizó en función de la granulometría del suelo a tratar.

Van Impe (1989) propuso una clasificación de acuerdo con la temporalidad del método y la adición de materiales:

- Temporales, limitados al periodo de la obra
  - Rebajamiento del nivel freático
  - Congelación del terreno
  - Electroósmosis
- Permanentes, sin adición de materiales
  - Compactación superficial, dinámica, por explosivos o con elementos vibrantes
  - Tratamientos térmicos
  - Precarga sin drenes
- Permanentes, con adición de materiales

- Estabilización con cemento o cal
- Columnas de cal o cemento
- Inyecciones
- Precarga con drenes
- Refuerzo del suelo con bandas metálicas (tierra armada), con geotextiles o con bulones (suelo claveteado)

Otras clasificaciones se centran en diferenciar entre mejora o refuerzo del terreno, como ocurre en Schaefer (1997). Se clasifican en tres grandes grupos (Tabla 1.1) que dan título a la publicación: Mejora del Terreno (“Ground Improvement”), Refuerzo del Terreno (“Ground Reinforcement”) y Tratamiento del Terreno (“Ground Treatment”).

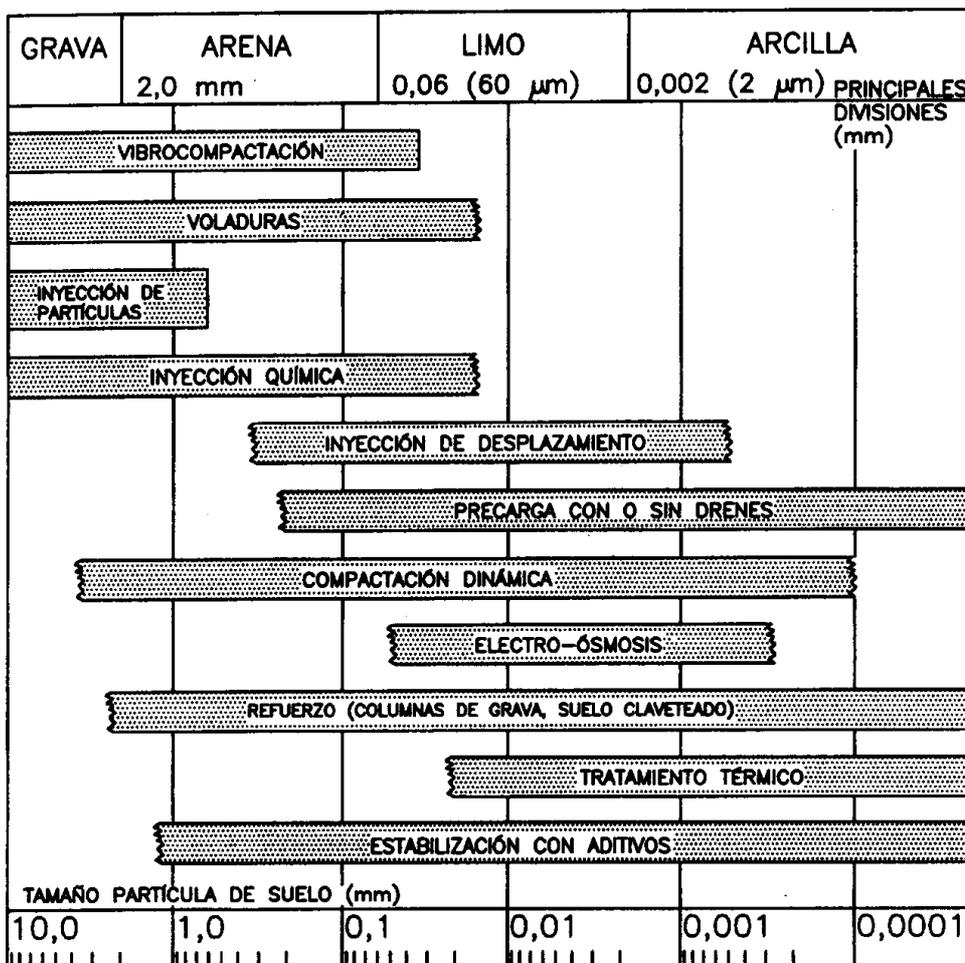


Figura 1.1. Aplicabilidad de las técnicas de mejora y refuerzo del terreno en función del tamaño de partículas (Mitchell, 1981; adaptado por Bielza, 1999)

**Tabla 1.1. Clasificación de los métodos de mejora y refuerzo del terreno (Schaefer, 1997)**

<i>Refuerzo</i>	<i>Mejora</i>	<i>Tratamiento</i>
Columnas de grava	Compactación dinámica	Mezcla con cemento
Jet-grouting	Precarga	Mezcla con cal
Anclaje	Drenaje (PVD)	Cenizas volantes
Bulonado	Electroósmosis	Drenaje por vacío
Micropilotes	Compactación mediante explosiones	Calentamiento
Columnas de cal		Congelación
Columnas de suelo-cemento (VCC)		Vitrificación
Geosintéticos		

Es importante señalar que no está clara la separación entre un tratamiento de mejora del terreno y un refuerzo del mismo. Las columnas de grava son uno de los métodos que pueden considerarse mejora o refuerzo. En algunos casos (Ministerio de Fomento, 2002), se incluyen los métodos de refuerzo en los de mejora, denominando a ambos únicamente por métodos de mejora.

La Sociedad Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (ISSMGE) tiene asignado a este tema el Comité Técnico nº 17 bajo el nombre de Mejora del Terreno (“TC-17: Ground Improvement”) dentro del mismo se establecía la siguiente clasificación: Mejora del Terreno, Refuerzo e Inyecciones y Adiciones. En esta clasificación las columnas de grava se consideran refuerzo en lugar de mejora del terreno (Tabla 1.2).

Más recientemente, en 2006, este comité científico ha clasificado las diferentes técnicas en las siguientes categorías:

- Mejora del terreno sin adiciones en terrenos no cohesivos
- Mejora del terreno sin adiciones en terrenos cohesivos
- Mejora del terreno con adiciones
- Mejora del terreno con mezclas aditivas tipo “grouting” (lechadas)
- Tierra reforzada en relleno
- Tierra reforzada en trinchera

**Tabla 1.2. Clasificación de los métodos de mejora y refuerzo del terreno (TC-17, 2004)**

<i>Refuerzo</i>	<i>Mejora</i>	<i>Inyecciones y Adiciones</i>
Refuerzo con acero (hinca de carriles)	Compactación dinámica	Inyecciones (Jet-grouting)
Tierra armada	Vibrocompactación	Mezclas superficiales
Geosintéticos	Drenaje por vacío	Mezclas profundas
Fibras sintéticas	Drenaje (PVD)	Columnas de cal y cemento (LCC)
Micropilotes	Precarga	
Anclajes	Compactación mediante explosiones	
Bulones	Calentamiento	
	Congelación	
	Vibrosustitución (Columnas de grava)	
	Vibrodesplazamiento (Columnas de grava)	
	Columnas de cal	
	Sistemas electro-químicos	

## **Precarga**

La precarga es un método de compactación estático. Mediante la aplicación de cargas estáticas en superficie se logra sobreconsolidar el suelo ante futuras cargas. De esta manera, se reducen los asentos y se disminuyen los fenómenos de consolidación secundaria.

Aunque, en general, la manera de aplicar la carga estática es mediante rellenos de tierra, existen múltiples maneras:

- Tanques de agua
- Rebajamiento del nivel freático
- Técnicas de vacío
- Precarga radial

Esta técnica sirve para mejorar prácticamente casi todo tipo de terreno, aunque es más empleada en suelos arcillosos. Por el contrario, tiene el inconveniente de que la duración del tratamiento suele ser elevada, por lo que muchas veces, su aplicación es imposible para los tiempos de construcción fijados.

## **Drenes verticales**

Son pozos verticales muy permeables que permiten la expulsión del agua y disminuyen la distancia de drenaje. Su misión es disminuir el tiempo que tarda en consolidar un determinado suelo. Este sistema se puede emplear combinado con una precarga o con técnicas de vacío para disminuir el tiempo de duración del tratamiento.

Inicialmente estos pozos drenantes eran de arena y se construían con técnicas similares a las del pilotaje. Con la aparición de los geotextiles, estos drenes de arena se han sustituido por mechas de geotextil permeable, comúnmente denominados drenes mecha o drenes verticales prefabricados.

## **Compactación dinámica**

Este método consiste en golpear sucesivamente el suelo para aumentar su densidad. Este golpeo se realiza mediante pesas de 10 a 30 T que se dejan caer desde una altura de 15 a 40 m en función de la energía que se quiera aplicar.

La aplicación de estos golpes se suelen realizar en una malla regular con una separación entre 3 y 10 m, con un número de pasadas de 1 a 3 y con 5-10 golpes por pasada.

Este sistema es más eficaz cuanto más arenoso sea el terreno y menor sea su índice de densidad. Su empleo es apropiado en suelos poco saturados o suelos permeables bajo el nivel freático. En suelos poco permeables bajo el nivel freático, es factible pero menos eficaz. Cuanto menos permeable sea el suelo, mayor es el número de pasadas necesario.

Entre sus limitaciones se encuentra la imposibilidad de compactar bajo capas rígidas. Por ello, en la primera pasada conviene que los golpes no se solapen para no generar una capa rígida. Además, debido a la gran influencia de los fenómenos de dilatación, no puede superarse una densidad crítica. Finalmente, es un método que afecta a las zonas circundantes, no siendo recomendable en zonas urbanas.

## **Sustitución dinámica**

La sustitución dinámica se basa en la misma técnica que la compactación dinámica, con la diferencia de que en este caso se realiza un aporte de balasto o grava en el cráter provocado por la maza que golpea. Este balasto es compactado mediante los mismos golpes.

Es indicado en arcillas o limos blandos y en sustratos con poca profundidad (4-5 m). La energía de cada impacto puede variar entre 250 y 300 Tm.

## **Compactación por explosiones**

Se realizan explosiones controladas bajo el terreno que queremos densificar. Es adecuado para suelos arenosos o areno-limosos saturados. Lógicamente, no es adecuado en zonas urbanas. Si se domina la técnica, resulta más económico que la vibroflotación.

## **Vibroflotación**

Es otro método de compactación dinámica. Se introduce un vibrador en el terreno que permite su densificación mediante la energía aportada en forma de vibración. El vibrador se introduce en el terreno gracias a su propio peso, a la vibración y al aporte de un chorro de aire o agua.

Este método sólo es útil en suelos arenosos con un contenido de finos inferior al 15%; en caso contrario, la energía vibratoria se disipa rápidamente y sólo se consigue una compactación muy localizada. A profundidades elevadas también resulta más difícil esta compactación debido a la elevada presión existente, y es necesario un mayor aporte de energía.

El tratamiento se suele realizar según una malla regular de columnas compactadas.

## **Vibrosustitución y vibrodesplazamiento**

Éstas son las dos técnicas más empleadas para ejecutar columnas de grava. Surgieron al intentar aplicar la vibroflotación a suelos cohesivos, de la misma forma que la sustitución dinámica deriva de la compactación dinámica. Ambas técnicas constructivas aparecen comentadas más adelante en el apartado 1.2, correspondiente a los métodos de construcción de las columnas de grava.

## **Comparación de los diferentes métodos**

En la Guía de Cimentaciones en Obras de Carretera (Ministerio de Fomento, 2002) se recoge una tabla resumen de la aplicabilidad y características de los diferentes métodos (Figura 1.2).

Para la cimentación de un terraplén sobre un suelo blando, existe un amplio abanico de posibilidades, que se muestran en la Figura 1.3 en función de que el terraplén presente problemas de estabilidad o de asiento. Las alternativas más comunes para reducir el asiento residual se comparan en la Figura 1.4. Se recoge la reducción de asientos lograda por cada técnica frente a su coste económico y temporal. Así, se puede comprobar que las columnas de grava son bastante competitivas para este caso, ya que

además de acelerar el ritmo con el que se producen los asientos, reducen su valor final sin requerir excesivo tiempo y con unos costes menores que los de una cimentación convencional.

TÉCNICA O TRATAMIENTO	TERRENO		MEJORA DE			PROFUNDIDAD EFICAZ DEL TRATAMIENTO
	GRANULAR	COHESIVO	RESISTENCIA	DEFORMABILIDAD	PERMEABILIDAD	
Sustitución del terreno	Cualquier suelo problemático (suelos blandos, arcillas expansivas, suelos colapsables)		Sí	Sí	Sí	Moderada (normalmente menos de 3 m)
Compactación con rodillo	Cualquier terreno no saturado		Sí	Sí	No	Pequeña (normalmente menos de 1 m).
Precargas	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Hasta varias decenas de metros
Mechas drenantes	No	Sí	No	No	Sí	Hasta varias decenas de metros
Vibración profunda	Sí Vibroflotación	Sí Vibrosustitución	Sí	Sí	No	Normalmente hasta 15 m de profundidad
Compactación dinámica	Cualquier tipo		Sí	Sí	No	Véase epígrafe 7.2.4
Inyecciones	Impregnación (véase nota al pie)	No aplicable	Algo	Algo	Sí	Hasta más de 100 m
	Hidrofracturación: cualquier terreno		Algo	Sí	Sí	
	Desplazamiento: cualquier terreno		Sí	Sí	Sí	
Jet-grouting	Cualquier tipo		Sí	Sí	Sólo con columnas secantes	Normalmente menos de 20 m
Columnas de grava	Cualquier tipo de suelo blando		Sí	Sí	Sí	Normalmente menos de 20 m
Columnas de suelo cemento	Cualquier tipo de suelo blando		Sí	Sí	No	Normalmente menos de 20 m
Claveteado o cosido del terreno	Suelos de consistencia media o superior		Sí	Sí	No	Normalmente menos de 10 m

NOTA: La permeabilidad inicial del terreno que se requiere para poder impregnarlo, depende del producto inyectado:

Lechadas de cemento:  $k_{\text{terreno}} > 10^{-2}$  cm/s  
 Lechadas de microcemento:  $k_{\text{terreno}} > 10^{-3}$  cm/s  
 Geles y otros productos químicos:  $k_{\text{terreno}} > 10^{-4}$  cm/s

**Figura 1.2. Campo de aplicación de las principales técnicas de mejora del terreno (Ministerio de Fomento, 2002)**

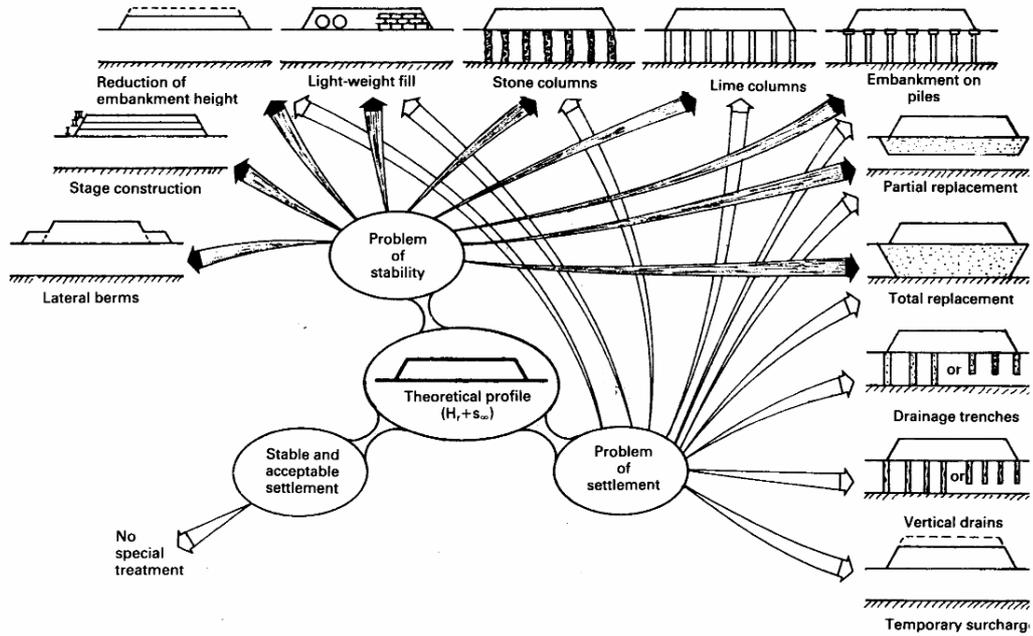


Figura 1.3. Alternativas para cimentar un terraplén (Leroueil et al., 1985)

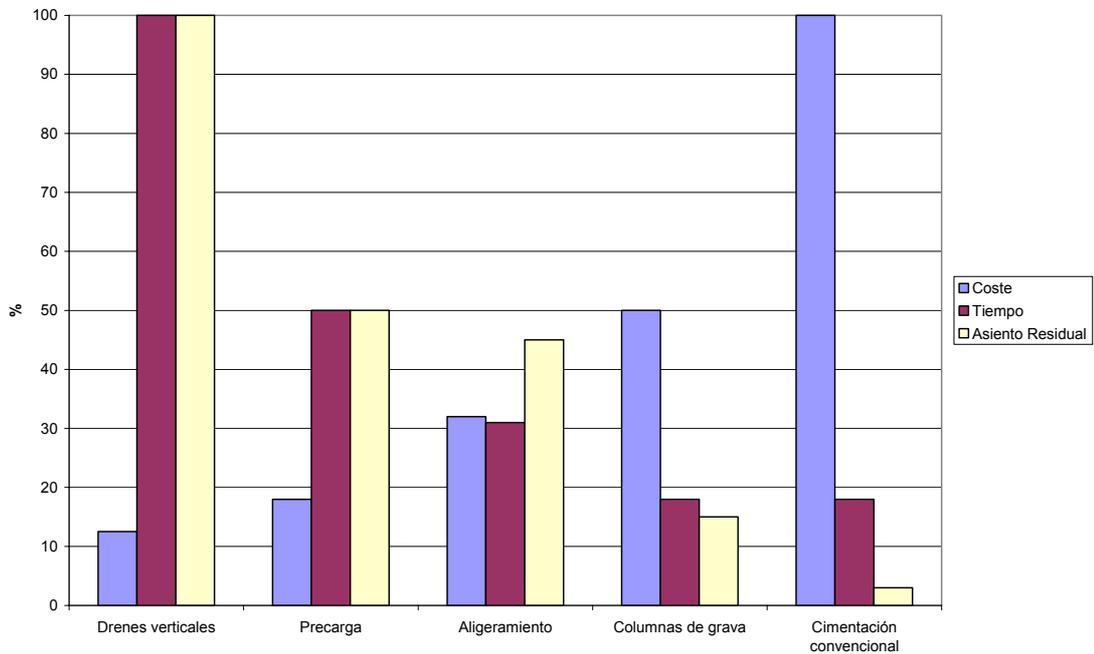


Figura 1.4. Comparación de las posibles cimentaciones de un terraplén sobre suelo blando (adaptado de Visschedijk, 2005)

**Tabla 1.3. Utilización de algunos métodos de mejora del terreno (IKD Statistics, 2005)**

<i>Tecnología</i>	<i>Nº</i>	<i>%</i>
Consolidación por vacío	13	■ 13.13
Compactación dinámica	42	■ 42.42
Vibrocompactación	6	■ 6.06
Precarga	6	■ 6.06
Columnas de grava	28	■ 28.28
Drenaje	3	■ 3.03
Columnas de cal	1	■ 1.01
<b>Total</b>	99	0       100

Para ver su importancia relativa se recoge también el nivel de empleo de cada tecnología dentro de este campo (Tabla 1.3). Estas estadísticas han sido realizadas como parte de un proyecto de investigación del TC-17 (IKDGIT). Sin embargo, no se pueden considerar del todo representativas, ya que están realizadas sobre muy pocos casos recogidos (99), de los cuales la mitad aproximadamente son en Estados Unidos, donde el uso de la compactación dinámica es muy elevado.

Como se ha comentado, las columnas de grava surgieron al intentar aplicar la vibroflotación o vibrocompactación clásica a suelos no granulares. Se debe, por tanto, analizar en qué tipo de suelos es posible aplicar la vibrocompactación y en cuáles es necesario recurrir a las columnas de grava. La idoneidad de uno u otro método depende fundamentalmente de la granulometría del suelo a tratar. Existen multitud de curvas granulométricas que lo delimitan, aquí se recoge una de ellas (Figura 1.5). Se distinguen tres zonas. La zona B, constituida por arenas limpias, es la más adecuada para la vibrocompactación. La zona A, aunque es adecuada para la densificación, puede presentar problemas para la hincada del vibrador por la abundancia de gravas. 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 estable temporalmente e impide la

transmisión de la vibración hacia fuera. En estos casos, se puede introducir material granular de aporte para el relleno del hueco y compactar la zona externa. Es la frontera entre uno y otro método. Los suelos situados a la izquierda de esta zona C requerirán el empleo de columnas de grava.

En general, la limitación por contenido de finos (<0.06 mm) se suele establecer en un 15%, tal y como se observa en el quiebro brusco de la gráfica y suele ser un parámetro bastante estricto. En la frontera entre ambas situaciones se puede justificar el empleo de columnas de grava en terrenos sísmicos para reducir la posibilidad de licuefacción en caso de terremoto.

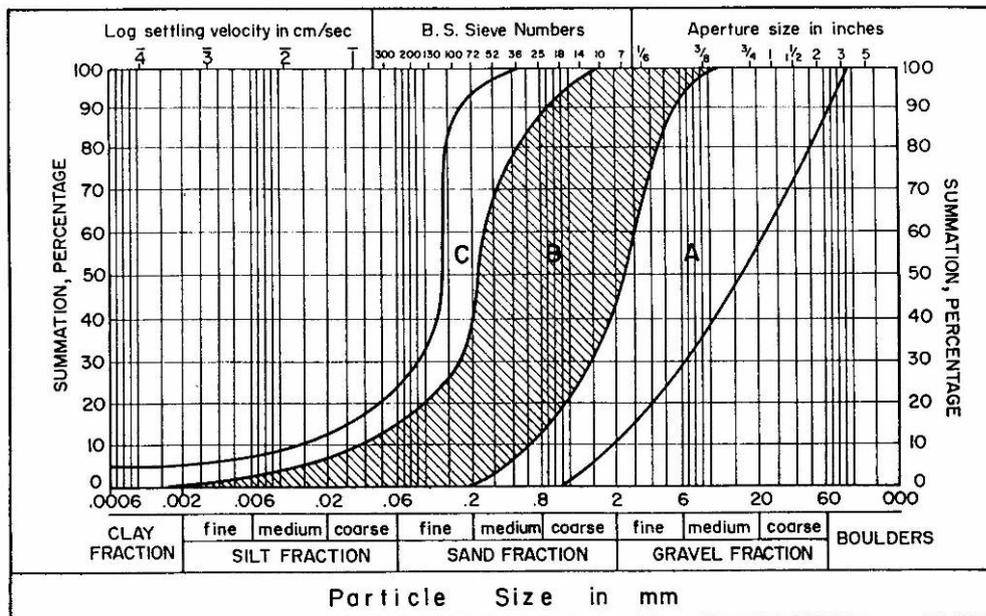


Figura 1.5. Criterio de adecuación de suelos para tratamiento por vibro-compactación (Glover, 1992)

## 1.2. CONSTRUCCIÓN Y CARACTERÍSTICAS

Las columnas de grava se encuadran dentro de los métodos de mejora o refuerzo del terreno realizados mediante compactación dinámica por vibración. Estos métodos son la vibroflotación o vibrocompactación clásica, el vibrodesplazamiento y la vibrosustitución. Estos dos últimos son las dos técnicas habituales para ejecutar columnas de grava. También se denominan vía seca (“dry-way”) o vía húmeda (“wet-way”) respectivamente. En ambos métodos un vibrador cilíndrico, que puede ser eléctrico o hidráulico, penetra en el suelo comprimiendo el suelo lateralmente y formando una perforación que posteriormente se rellena con grava compactada por el vibrador. La diferencia fundamental entre la vía seca y la vía húmeda, como su propio nombre indica, es el empleo de agua o aire para facilitar la penetración del vibrador.

Las fases de construcción de ambas técnicas son muy similares (Figura 1.6):

- 1) Penetración: El vibrador penetra en el terreno con la ayuda de aire comprimido o agua. El aporte de aire comprimido es fundamental para compensar los efectos de la succión en el caso del vibrodesplazamiento (vía seca).
- 2) Esta segunda fase es la que no existe en el vibrodesplazamiento y consiste en el ensanchamiento del agujero debido al flujo de agua. Este flujo limpia los finos del suelo tratado. La denominación de vibrosustitución se debe a que este material eliminado es sustituido por grava, mientras que en el vibrodesplazamiento no se elimina nada de suelo, simplemente se desplaza lateralmente.
- 3) Aporte de la grava. Una vez alcanzada la profundidad deseada se procede al aporte de la grava en tongadas de unos 50 cm.
- 4) La grava aportada es compactada por la vibración. Esta vibración provoca que la grava penetre en las paredes del terreno natural. La finalización de cada tongada viene indicada por la resistencia a bajar del vibrador, medida por la intensidad aplicada al vibrador, que representa el consumo de energía. En las zonas menos resistentes la grava penetrará más en el suelo, por ello el diámetro de la columna variará con la altura, coincidiendo los estratos más blandos con los diámetros mayores.

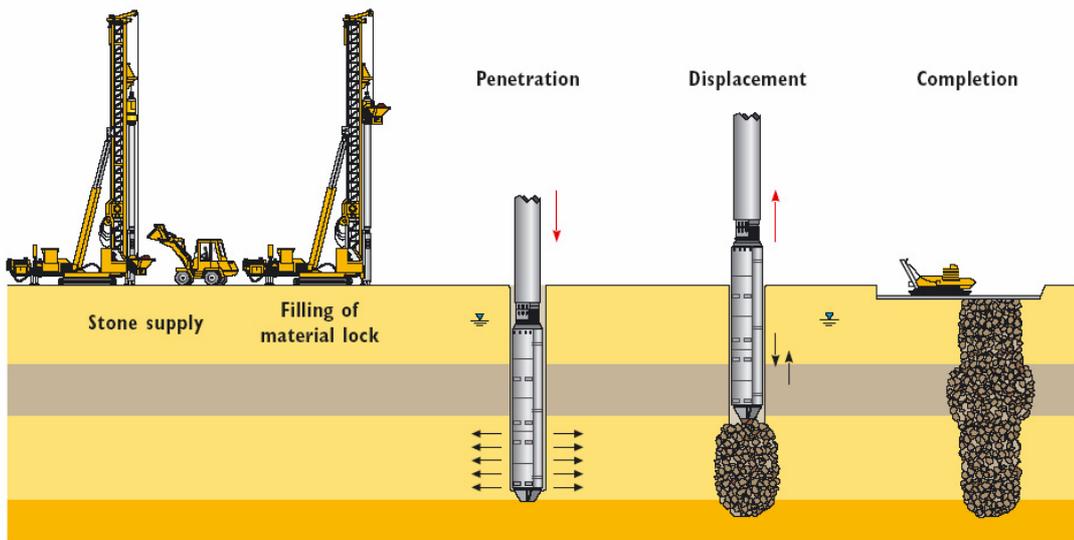


Figura 1.6. Esquema de construcción por vía seca (Raju et al., 2004)

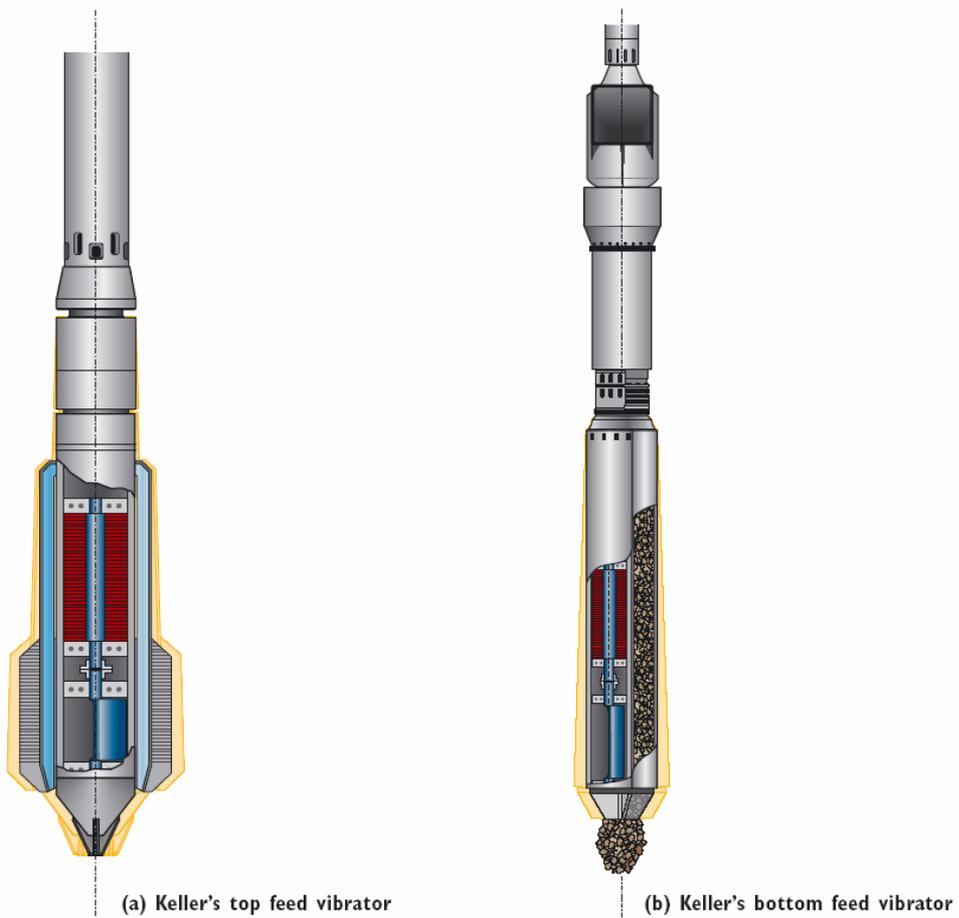


Figura 1.7. Vibradores para alimentación (a) por superficie y (b) por fondo (Raju et al., 2004)

El aporte de la grava puede realizarse en superficie, a la cota del terreno natural (aporte superior o “top-feed”), o por la punta del vibrador (aporte inferior o “bottom-feed”), ver Figura 1.7. Para la técnica del aporte superior, en el caso de la vibrosustitución se aporta la grava por el lateral de la cavidad, y en el caso del vibrodesplazamiento se saca el vibrador y se aporta el material, lo que requiere que la cavidad sea estable. Para solucionar este inconveniente surgió la técnica del aporte inferior.

En la técnica del aporte inferior se acopla un tubo “tremie” al vibrador. De esta manera, la grava se carga en una tolva a la cota del terreno natural, la tolva se eleva y se vierte la grava en la parte superior del tubo, por el que la grava desciende y se deposita en la perforación por la punta del vibrador. Esta técnica permite el empleo de la vía seca en terrenos muy blandos en los que no se garantiza la estabilidad de la perforación (resistencias al corte sin drenaje inferiores a 50 kPa). El hecho de aportar la grava por un tubo de diámetro limitado puede obligar a variar la granulometría de la grava aportada, eliminando los tamaños mayores para evitar la obturación del tubo. Como caso general la grava aportada suele ser 15/60, y para el caso de aporte inferior se puede limitar a 20/40.

En general, se considera que la vía seca es mucho más respetuosa con el medio ambiente, más limpia en obra y no necesita un uso elevado de agua, aunque es ligeramente más cara y si el terreno es duro, requiere gran potencia en el vibrador. Estos motivos hacen que la técnica más habitual actualmente en España sea la vía seca con aporte inferior.

La construcción de las columnas produce cambios en la estructura original del suelo a mejorar. Sin embargo, éstos no se suelen tener en cuenta en su diseño. En la vía seca, el fuerte desplazamiento lateral provocado por el vibrador puede provocar una rigidización del terreno (Kirsch, 2004) y una reducción de la permeabilidad en el anillo circundante (“smear”). Estos dos efectos no son tan importantes en la vía húmeda, ya que se reduce el desplazamiento lateral y se eliminan los finos de la zona cercana a la columna. En general, no existen datos ni estudios exhaustivos de los efectos derivados de la construcción de las columnas de grava.

Además de estos dos métodos de construcción específicos de las columnas de grava, éstas siempre pueden realizarse por los mismos procedimientos que un pilotaje convencional. La construcción de las columnas de grava por técnicas de pilotaje no produce un cambio importante en las características del terreno original.

Algunas características de las columnas de grava son:

- El rango de diámetros es de 0.5 a 1.2 m, siendo el más común actualmente el de 0.7-0.8 m para la vía seca. Los diámetros conseguidos mediante la vía húmeda siempre son mayores que los conseguidos por la vía seca. El diámetro depende en gran medida de la deformabilidad del suelo. Como referencia, con un vibrador de 0.65 m de diámetro y vía seca se alcanzan diámetros superiores a 1 m para una resistencia del suelo inferior a 4 golpes del ensayo SPT (ensayo de penetración dinámica estándar), y para golpes superiores a 10, el diámetro es el del vibrador.
- Las profundidades habituales de las columnas están entre 6 y 10 m. Aunque se puede llegar a profundidades de 30 m, no suele ser rentable salvo casos excepcionales. Normalmente, las columnas se llevan hasta una capa rígida, aunque también se pueden dejar como elementos flotantes que trabajan por rozamiento (Figura 1.8).
- Es recomendable la construcción de una capa superficial de grava (“blanket”) de un espesor aproximadamente igual al radio de la columna. Ésta sirve para expulsar el agua, homogeneizar los asientos y repartir las cargas.
- Para que pueda servir de referencia y sólo como valores estimativos, en el año 2007, el precio de construcción de las columnas por metro lineal podía ser de 65 € por vía húmeda y de 85 € por vía seca.

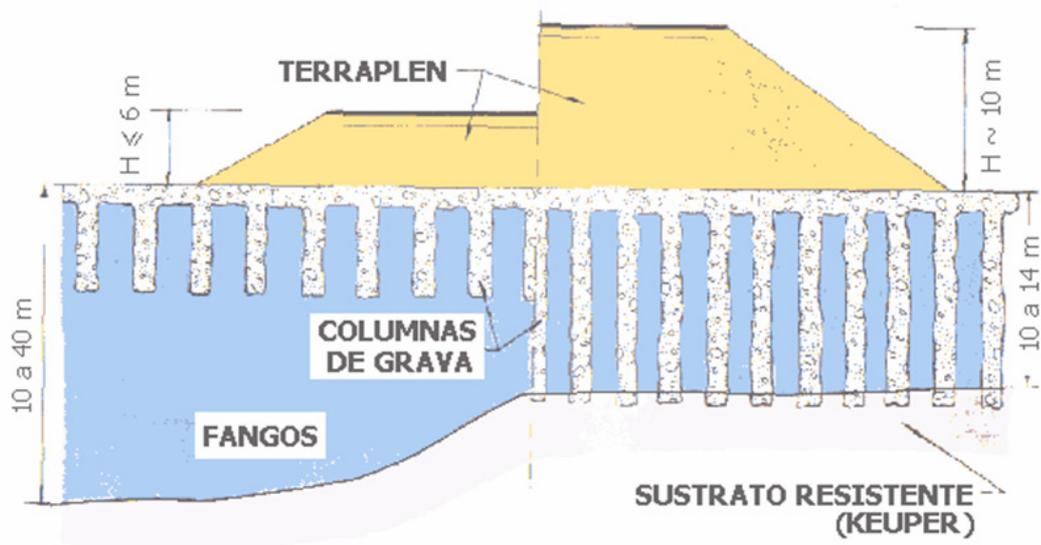
En la Tabla 1.4, se resumen algunas de las características de las últimas obras realizadas en España en las que se han empleado columnas de grava.

**Tabla 1.4. Obras recientes de columnas de grava en España (Fuentes: Keller, 2005; Geocisa, 2006; Pennine, 2007)**

<i>Obra</i>	<i>Localización</i>	<i>Constructora</i>	<i>D<sub>c</sub></i> (m)	<i>L</i> (m)	<i>d</i> (m)	<i>Tipo</i>	<i>Rend.</i> (ml/turno)	<i>Consumo</i> (m <sup>3</sup> /ml)	<i>Cimentación</i>	<i>Fecha</i>
Enlace de Arbuio	Bilbao	Keller	0.7	11	3	D-B			Terraplén	2005
Variante de Sueca	Valencia	Geocisa y Keller	0.8	9	2.8	D-B y W-T			Terraplén	2006
Pontona en el Puerto de Valencia	Valencia	Geocisa-Pennine		10		Offshore				2006
Viga Carril Puerto de Valencia	Valencia	Geocisa								
Pontona Puerto de Algeciras	Cádiz	Geocisa-Pennine	0.8	20		Offshore				
Terminal Graneles Puerto Santander	Cantabria	Geocisa				D-B W-T			Nave graneles	2005
Parque Dona Casilda Ria Bilbao 2000	Bilbao	Geocisa								
Prologis Sant Boi de Llobregat	Barcelona	Keller		8		D-B			Nave industrial	2001/02
Ensanche de la Carretera Orce-Galera	Granada	Keller	0.8-1.1	7.4	2		111		Estribo	Marzo 2003
Variante N-I Tramo Villafria-Rubena	Burgos	Keller	0.8	8					Terraplén	Jul-Sep 2003
Autovía M-50 Boadilla del Monte	Madrid	Keller	0.9-1.0	2.0-4.0	1.2,1.5,3,3.5		170	0.59-0.88	Terraplén	
Autovía Minera Gijón	Asturias	Keller		4.0-6.0					Terraplén	Ag-Sep 2001
Ministerio de Defensa Calatayud	Zaragoza	Keller	0.9-1.0	8	2.12	D-B	150	0.62-0.93	Naves	
Depósito PCI Decathlon Getafe	Madrid	Keller	0.7	10		D-B				Enero 2004
Ctral. Térmica Cielo Combinado Cartagena	Murcia	Keller				D-B			Central Térmica	Mar-Ag 2004
Nave industrial Colmenar Viejo	Madrid	Keller				D-B			Nave industrial	Marzo 2004
Nave para cámaras frigoríficas P.I. Guitiriz	Lugo	Keller	0.8	3.5					Nave industrial	Sep-Oct 2004
Pabellón Colegio Fondo Nois en Foz	Lugo	Keller	0.7	3.0-8.0		D-B			Polideportivo	Octubre 2004
EDAR Castro Ribeiras do Lea	Lugo	Keller	0.8	7		D-B			EDAR	Sep 2004
Variante Pto. de Santa Maria y Pto. del Real	Cádiz		1	11		W-T	160	0.9		

D-B: Dry-Way Bottom-Feed (vía seca con alimentación por fondo)  
W-T: Wet-Way Top-Feed (vía húmeda con alimentación por superficie)  
Offshore: Columnas ejecutadas en el lecho marino

*D<sub>c</sub>*: Diámetro de la columna  
*L*: Longitud de la columna  
*d*: Espaciamiento  
*Rend.*: Rendimiento



**Figura 1.8.** Esquema de empleo de columnas de grava (CEDEX, 2005)

Las columnas de grava también se ejecutan con éxito en el fondo marino. En este caso, los métodos constructivos se adaptan ligeramente y necesitan de alguna técnica específica para el aporte de la grava.

Existen multitud de variantes y técnicas similares a las columnas de grava. Estas técnicas surgen como variaciones en la técnica de construcción o como consecuencia de la adición de otros materiales como puedan ser cal o cemento. Habitualmente, estas técnicas son patentadas por la empresa constructora que las desarrolla. Como ejemplo, se mencionan:

- “Rammed Stone Columns” o “Geopiers”. La particularidad de esta técnica es que la grava se compacta mediante golpeo con un martillo. Así, se forman los diferentes bulbos que constituyen la columna y se garantiza una elevada densidad y un empuje lateral sobre la columna próximo al pasivo.
- “Vibro Concrete Columns” (VCC) o Columnas de Módulo Controlado (CMC). En este tipo de columnas se añade mortero o lechada a la grava. De esta forma, se garantiza su estabilidad en terrenos muy blandos que no proporcionan suficiente confinamiento lateral.

Para el control de la ejecución de las columnas se emplean varios parámetros, el más importante es la compactación conseguida en la columna construida, este parámetro se controla mediante la intensidad aplicada al vibrador. El diámetro de la columna se puede calcular a partir de la cantidad de grava aportada. Uno de los problemas más comunes en la construcción de las columnas es la continuidad en estratos de baja resistencia, que obliga a incrementar el diámetro de la columna en estas zonas para garantizar una correcta compactación.

En la Figura 1.9 se muestra una hoja de control tipo de la ejecución de una columna de grava. Se puede observar que el tiempo que tarda el vibrador en realizar la perforación es pequeño (1 o 2 minutos en función del tipo de terreno) mientras que la compactación de la grava aportada consume el resto del tiempo que se tarda en ejecutar una columna (25 minutos aproximadamente).

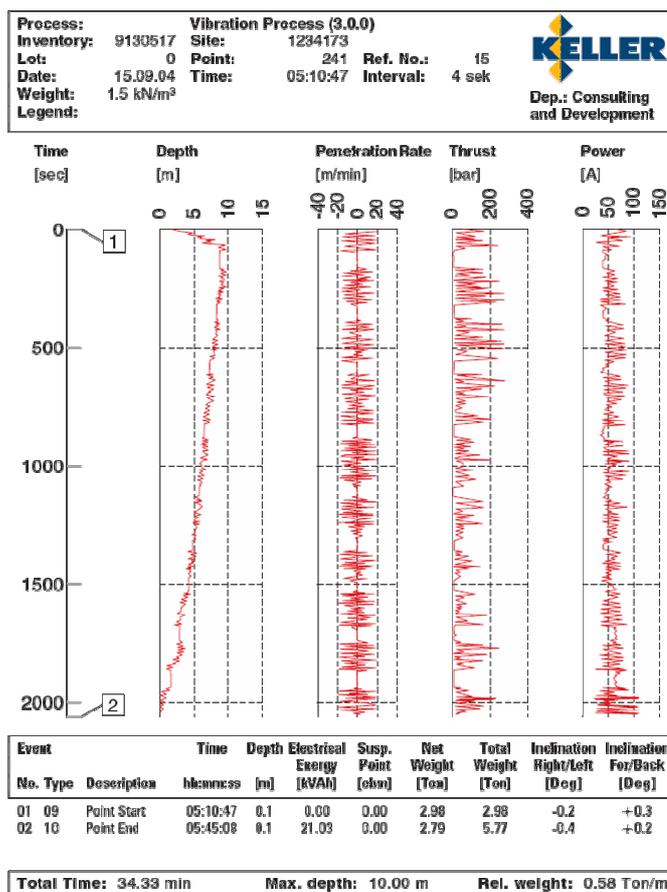


Figura 1.9. Hoja de control de la ejecución de una columna (Keller, 2005)

### 1.3. APLICACIONES

Las columnas de grava como inclusiones rígidas provocan una redistribución de las tensiones aplicadas y una concentración de éstas sobre las columnas. Así, se aumenta la rigidez del conjunto, disminuyendo los asientos y haciéndolos más uniformes. Además de la reducción del valor final del asiento, las columnas de grava debido a su alta permeabilidad constituyen excelentes drenes verticales, que reducen el camino de drenaje y aceleran la consolidación del suelo circundante bajo la aplicación de cargas.

Al introducir en el suelo blando un material granular que posee unas características resistentes mejores, la capacidad portante y la estabilidad frente a deslizamiento del terreno resultante aumenta.

Por último, gran parte del éxito que tienen las columnas de grava en la costa oeste de Estados Unidos y en Japón se debe a su capacidad para reducir la posibilidad de licuefacción en caso de terremoto. Su eficacia para mitigar este fenómeno se debe a su capacidad de disipar las presiones intersticiales sin que los fuertes cizallamientos provocados por un terremoto o una carga cíclica, como un fuerte oleaje, dañen completamente su integridad e impidan que sigan funcionando como drenes, a diferencia de lo que ocurre en los drenes prefabricados.

Como resumen, las cinco funciones que un tratamiento mediante columnas de grava es capaz de desarrollar son:

- Reducción de los asientos totales y diferenciales
- Aceleración del proceso de consolidación
- Aumento de la capacidad portante del suelo
- Aumento de la estabilidad frente a deslizamientos
- Reducción de la posibilidad de licuefacción del suelo

El rango de aplicación de las columnas de grava se sitúa entre aquellos casos en los que el empleo de cimentaciones profundas convencionales (pilotaje) no es necesario por estar el estrato resistente a poca profundidad y/o por no ser la carga a soportar de suficiente entidad, y aquellas situaciones en las que la sustitución o estabilización de todo el sustrato blando superior es muy costosa, al ser éste de gran espesor.

Su empleo está justificado en la cimentación de un gran número de elementos, como por ejemplo:

- Terraplenes. No sólo en la parte central para aumentar su capacidad portante, disminuir y acelerar su asiento, sino también en los laterales para aumentar la estabilidad del pie del talud (Figura 1.10).
- Tanques de almacenamiento. Estas estructuras generan cargas muy repartidas en las que resulta muy costoso emplear pilotaje. Sin embargo, las exigencias en cuanto a asientos totales y diferenciales son muy restrictivas (Figura 1.11).
- Accesos a puentes. El paso de una estructura muy flexible (terraplén) a una muy rígida (puente) puede provocar escalones y saltos no deseados. Este acercamiento al estribo puede realizarse de una manera más continua si se emplean sistemas de cimentación que permitan ir rigidizando poco a poco el terraplén, como por ejemplo las columnas de grava (Figura 1.12).
- Edificaciones de gran extensión y poca altura. En este tipo de edificaciones su gran extensión supone un elevado coste para el pilotaje y sin embargo, debido a su escasa altura, las cargas a soportar no son elevadas. Este tipo de estructuras se pueden cimentar mediante zapatas apoyadas en columnas de grava. Si la solera va a soportar cargas elevadas, como puede ocurrir en naves de almacenamiento, también deberá cimentarse sobre columnas.

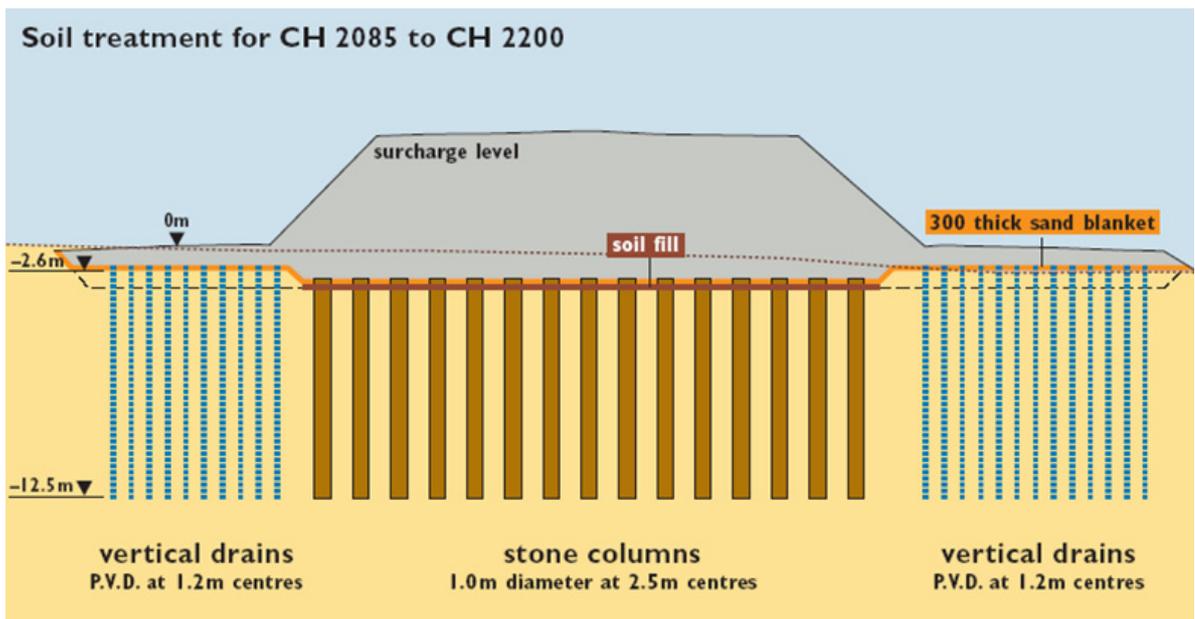


Figura 1.10. Terraplén de una autovía en Malasia (Raju et al., 2004)

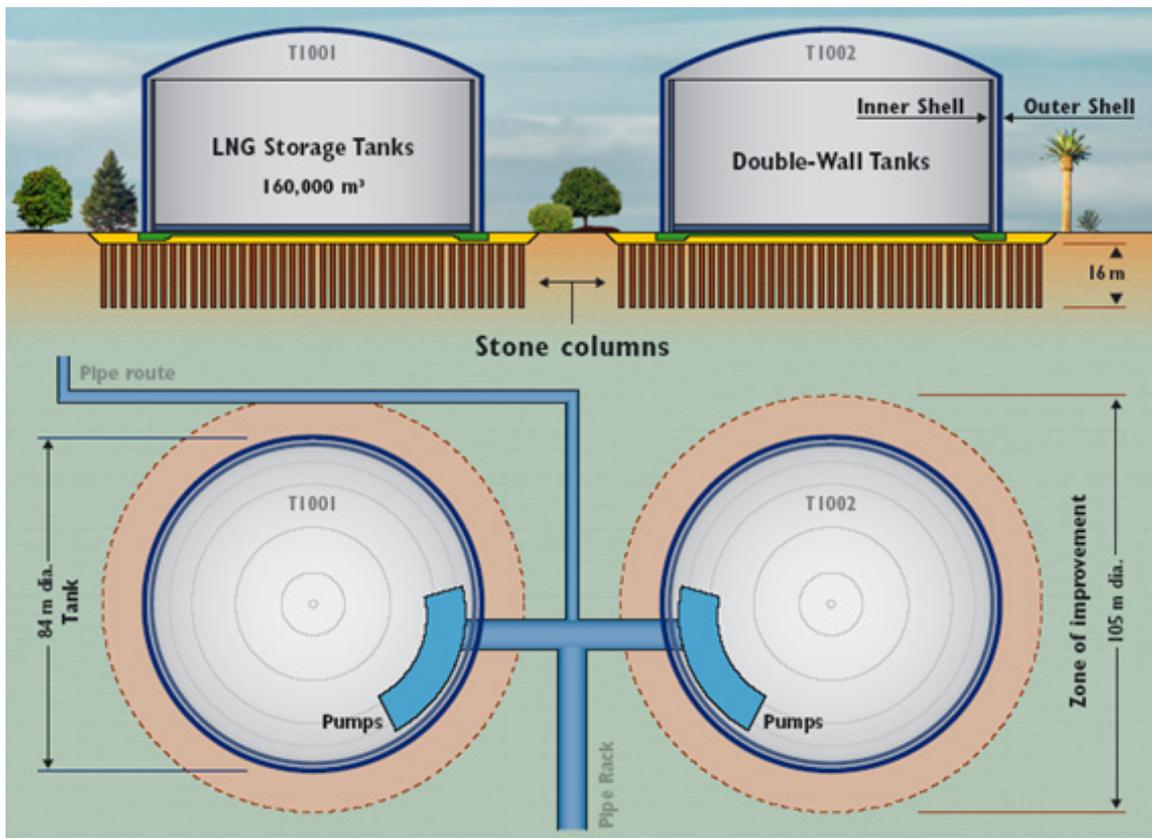


Figura 1.11. Depósitos para gas líquido en la India (Raju et al., 2004)

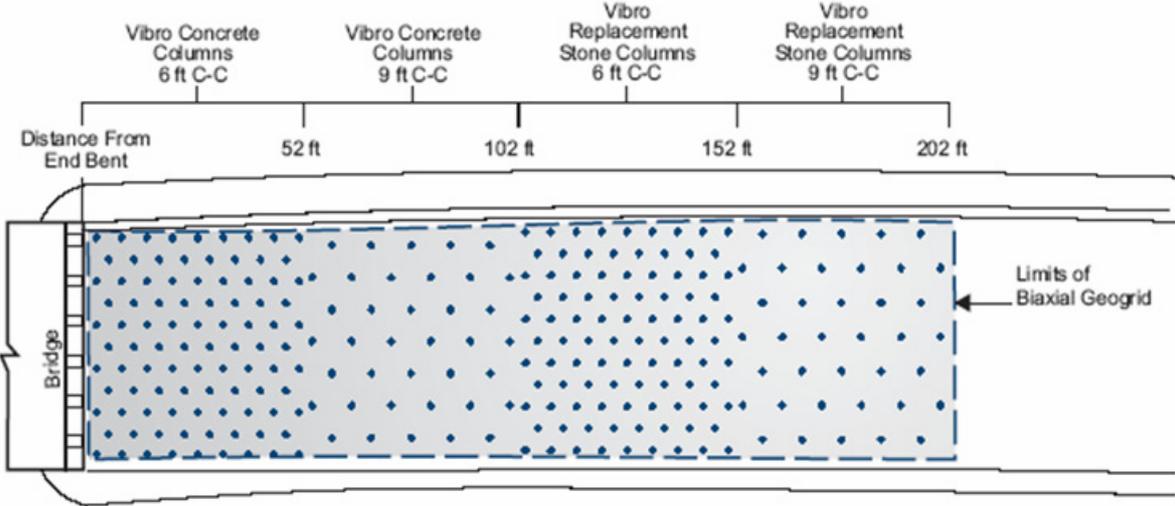


Figura 1.12. Terraplén de acceso a un puente en EE.UU. (Keller, 2005)