

Capítulo 4

Mejoramiento de un suelo potencialmente licuable

4.1 Soluciones de mejoramiento

4.1.1 Depósitos de suelo

Las propiedades de las arenas contractivas, sean depósitos granulares de origen natural o rellenos hidráulicos, pueden modificarse mediante técnicas que tienen por objeto densificarlas para incrementar su resistencia a sufrir deformaciones de flujo a la licuación. Un depósito de arena mejorada deberá soportar cargas dinámicas, con asentamientos tolerables sin que se presente la licuación, para las excitaciones sísmicas de diseño. Se han demostrado en muchos lugares que los suelos y rellenos granulares sueltos responden positivamente a la energía dinámica producida por impactos o vibración con lo que se mejora sus características como densidad relativa, rigidez, resistencia y disminuye su deformabilidad. La aplicación de cargas estáticas temporales (precarga) también mejora las propiedades de estos suelos, aun que es mucho menos efectiva que los métodos dinámicos de compactación.

La naturaleza de la energía dinámica requerida para lograr que un depósito de arena suelta licuable, se convierta en uno estable, para el sismo de diseño, depende del método que se emplee para mejorarlo y varía desde los que consisten en la aplicación de impactos hasta los que aplican oscilaciones armónicas con vibradores. En estos últimos, la intensidad de las vibraciones inducidas dentro de la masa de suelo determina el tipo de su respuesta. A bajas aceleraciones, menores de 0.5g, los suelos responden esencialmente en forma elástica; las deformaciones plásticas predominan cuando las aceleraciones crecen de 0.5 a 1.0 g, resultando en la densificación del depósito. Para aceleraciones del orden de 1.5 g casi todos los suelos fluyen (*Van Impe y Madhav, 1995*).

La habilidad del depósito para transmitir las vibraciones se reduce a medida que pierda resistencia al corte; así a medida que el suelo se degrada, las vibraciones se tornaran en locales y no serán transmitidas a largas distancias, por lo tanto la densificación solo ocurrirá alrededor de la fuente. El núcleo fluidizado será sucesivamente rodeado por una zona plástica, una zona compactada y una zona elástica.

4.1.2 Técnicas de mejoramiento

El mejoramiento de los rellenos granulares sueltos generalmente involucra grandes volúmenes de material y por ello la selección del método idóneo para cada caso suele involucrar aspectos económicos que en muchas ocasiones, se privilegian en detrimento de las consideraciones exclusivamente técnicas. Los costos varían notablemente de uno a otro método y por ello los ingenieros geotecnistas deben conocer las características de los métodos disponibles, así como su efectividad probable y las dificultades para implantarlos en situaciones particulares.

La mayoría de los métodos de mejoramiento aprovechan la capacidad del suelo para deformarse e incluso licuarse para lograr el mejoramiento deseado. Por lo tanto, es imprescindible tener conocimiento claro de las características y propiedades del depósito, para lograr las metas esperadas. Sería imposible presentar y describir detalladamente en este trabajo, los métodos para el mejoramiento de suelos propensos a licuación arenas. Para ello se recomienda recurrir al trabajo de *Van Impe y Madhav (1995)*.

A continuación se describen brevemente algunos métodos de mejoramiento de suelo, atendiendo a la frecuencia con que estos han sido utilizados.

4.2 Compactación dinámica

4.2.1 Compactación de impacto

Probablemente la técnica más antigua para el mejoramiento de suelos; utilizada por los romanos y en Estados Unidos desde el siglo pasado, pero realmente racionalizada por Mennard (1975). Las experiencias han demostrado que este método es el menos confiable, pues es difícil lograr el mismo nivel de control y por ello también requiere de ensayos de verificación extensivos. Se recomienda para mejorar rellenos de poco espesor pues el efecto del impacto decrece rápidamente con la profundidad. En México se tienen varias experiencias en la aplicación de este método (*Girault, 1989*).

Este método consiste en dejar caer una masa repetidamente desde una cierta altura. La reacción del suelo ante la compactación dinámica depende del tipo de suelo y de la energía que le sea impartida por los impactos que tienen un arreglo predeterminado. La energía es función de la masa, altura de caída, espaciamiento de la cuadrícula y número de caídas en cada punto, figura 4.1. Las masas son usualmente bloques de concreto, bloques de acero o una serie de placas de acero sujetas entre sí.

Comúnmente se utilizan pesos de 6 a 20 t, con una altura de caída de 20 m; sin embargo, se han llegado a utilizar pesos de más de 30 t con una altura de caída de 30 m.



*Figura 4.1 Compactación dinámica con una grúa convencional
Impacto de la masa causando un cráter.*

En proyectos donde se requiere compactar suelos que se localizan a gran profundidad se han llegado a fabricar trípodes especiales con alturas de caída de hasta 40 m utilizando masas de hasta 200 t. Las masas se dejan caer de 2 a 10 veces en el mismo lugar, siguiendo un patrón de cuadrícula con espaciamientos entre 1.80 y 5 m. El procedimiento normalmente se hace con más de una pasada o serie de apisonamientos, rellenando los cráteres que se forman entre pasadas, figura 4.2.



Figura 4.2 Masa de acero suspendida para compactación dinámica (Hayward Baker Inc.).

Por lo general, el subsuelo por mejorar se considera constituido por tres capas: la más profunda es mejorada por la primera serie de apisonamientos, con un determinado número de repeticiones, con las mayores separaciones entre los puntos de impacto, y el nivel de energía más alto. La capa intermedia es mejorada por una segunda serie de apisonamientos, los impactos son localizados entre los impactos de la serie anterior y la altura de caída y las repeticiones son menores. La capa superficial es mejorada con apisonamientos con una altura de caída y una separación pequeña e incluso se utiliza una masa menos pesada y más plana, con mayor superficie de contacto.

La principal limitación de este método es el daño potencial para estructuras vecinas debido a vibraciones, ruido y la posible voladura de escombros. Es limitante también el tamaño de las grúas disponibles, ya que si bien las masas por lo general no rebasan las 20 toneladas, la mayor carga no la percibe la grúa al momento de levantar el peso, sino al momento de dejarlo caer, debido al efecto de latigazo que se produce en la pluma. Debido a esto, se deben usar grúas sobredimensionadas.

En materiales granulares saturados, una gran parte de los impulsos dinámicos son transferidos al agua intersticial. Después de un número determinado de impactos se incrementa la presión de poro lo suficiente para generar licuación (Menard, 1974). La granulometría y la compacidad del suelo son dos factores que influyen en la velocidad a la cual se alcanza la licuación. El incremento de la compacidad, debido a la disipación de presión de poro, se obtiene en un tiempo relativamente corto: en arenas y gravas bien graduadas es de aproximadamente de 1 a 2 días, en limos con arena puede variar de 1 a 2 semanas.

Hay otra teoría contraria a la de Menard, la cual trata de evitar la licuación. Por esta razón, el tratamiento se diseña para que no se genere un exceso de presión de poro significativo, lo cual se logra con niveles más bajos de energía (Slocombe, 1993).

En resumen, este método es excelente para mejorar materiales granulares, ya sea arriba o debajo del nivel freático. Sin embargo, se debe de tener especial cuidado al quererlo aplicar en arenas con un alto contenido de finos, especialmente cuando el suelo está saturado, ya que la generación de presión de poro dificulta la compactación.

4.3 Vibrocompactación

4.3.1 Mejoramiento profundo

Método de mejoramiento profundo de suelos granulares que efectúa la densificación por el movimiento vertical y horizontal de un tubo vibrador hincado en el suelo. El vibrador es un tubo hueco de acero con masas excéntricas sostenido por una grúa; la forma de densificar consiste en hincar el tubo en arreglos granulares, provocando la licuación del suelo, para posteriormente reacomodar la estructura hasta alcanzar el grado de densificación deseado. Se han desarrollado varias técnicas y equipos para su ejecución; en algunas se utiliza un martillo hincador vibratorio y un tubo o perfil de acero y desde la superficie se introduce y se retira continuamente el tubo; esta técnica resulta poco eficiente ya que hay que cerrar el espacio de los hincados para lograr la densificación deseada, (Munfakh *et al*, 1987). En el puerto de Alvarado se desarrollo un tratamiento con esta técnica, (Tamez, 1979).

La vibrocompactación en la actualidad constituye un método geotécnico clásico para resolver problemas ligados con la baja compacidad de terrenos granulares. Con esta técnica generalmente se alcanza una compacidad relativa de 70 % a 85 %. En cuanto al nivel freático, la compactación se logra, tanto por encima, como por debajo de este nivel.

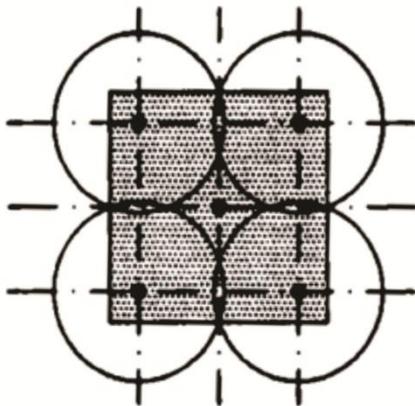
El método consiste en la inserción de un vibrador de fondo, similar al mostrado en la figura 4.6; una vez densificado el suelo, se rellena el vacío generado con arena, retirando el vibrador simultáneamente. La compactación se debe a la acción del vibrador, que usualmente es acompañado con agua a presión, la cual reduce temporalmente las fuerzas intergranulares entre las partículas; Báez y Martín (1992), puntualizan que las vibraciones generan exceso de presión de poro hasta que se licúa el suelo; entonces, la disipación de presión de poro conduce a un arreglo más compacto del suelo.

Según Thorburn (1975), la licuación del suelo es total hasta distancias de 30 a 55 cm del vibrador, haciéndose nulo el efecto a una distancia aproximada de 2.5 m, debido al amortiguamiento del propio terreno.

La eficiencia del mejoramiento depende del tipo de suelo, espaciamiento de los puntos de vibrado y el tiempo de vibrado en cada punto. Generalmente, el espaciamiento está entre 1.80 y 3.50 m, con arreglos triangulares o en cuadrícula. Una vez que el vibrador alcanza la profundidad de diseño, el tratamiento se realiza por intervalos de profundidad. Durante la compactación, se rellena con una arena limpia desde la superficie para compensar la reducción del volumen del suelo debido al proceso de densificación; con esto se mantiene la elevación original. Sin embargo, en sitios donde el desnivel final es menor que el desnivel original, la reducción de la elevación se puede desprestigiar; en estos casos se permite el hundimiento de la superficie durante la compactación. Los asentamientos de suelos granulares alcanzan de un 5 % a un 15 % de la profundidad tratada.

La vibrocompactación permite el uso de zapatas superficiales. Los asentamientos y el potencial de licuación son reducidos.

BAJO ZAPATA AISLADA



BAJO ZAPATA CORRIDA

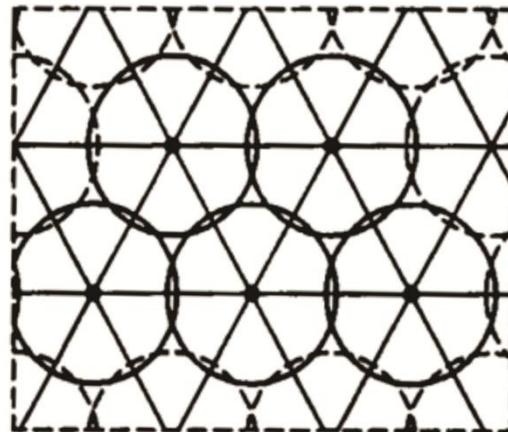


Figura 4.3 Zapata superficiales cilindros de suelo vibrocompactado.

La profundidad de mejoramiento es generalmente de 4.5 m a 15 m, sin embargo, se han alcanzado profundidades hasta de 35 m.

Esta técnica permite el uso de cimentaciones más económicas, diseñadas para una capacidad de carga de hasta 1000 kPa en arenas limpias. El ángulo de fricción interna aumenta entre 5 y 8 grados. El módulo de deformación puede aumentar hasta los 100 MPa, en algunos casos a valores mayores, con lo que los asentamientos totales y diferenciales se reducen en la misma proporción hasta ser compatibles con los límites de diseño.

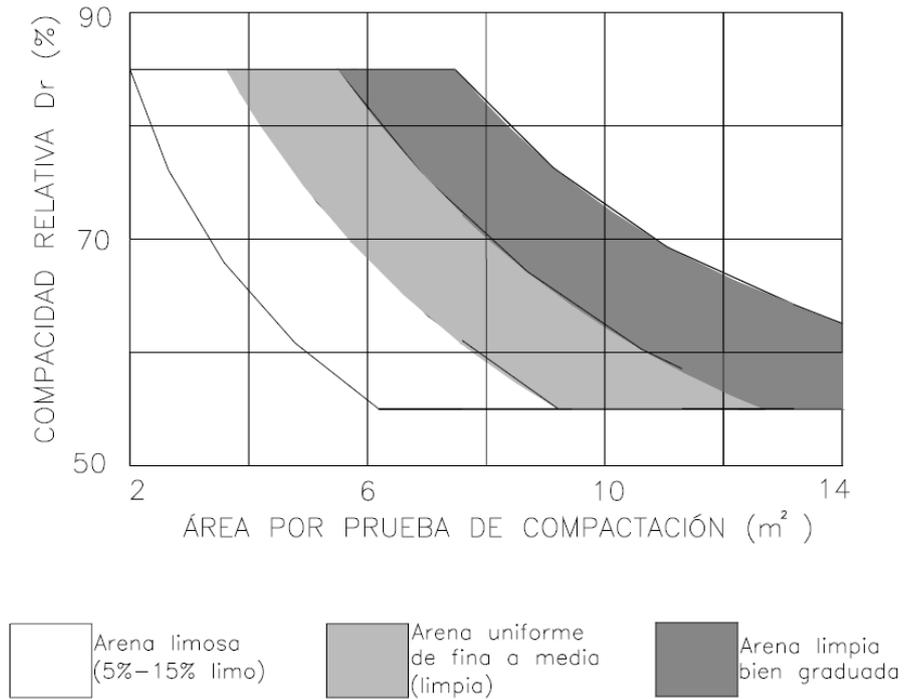


Figura 4.4 Envoltura de espaciamiento vs compactación relativa promedio, para suelos granulares según Barksdale y Baches (1983).

4.3.2 Ensayos

En general es aplicable únicamente en arenas con un contenido de finos entre el 10 y el 15 %. En la figura 4.5 se muestra una serie de mallas de ensayo distintas siguiendo una distribución triangular, por ser la más eficaz, donde los puntos vacíos son los puntos de tratamiento y los puntos llenos son los puntos de ensayo.

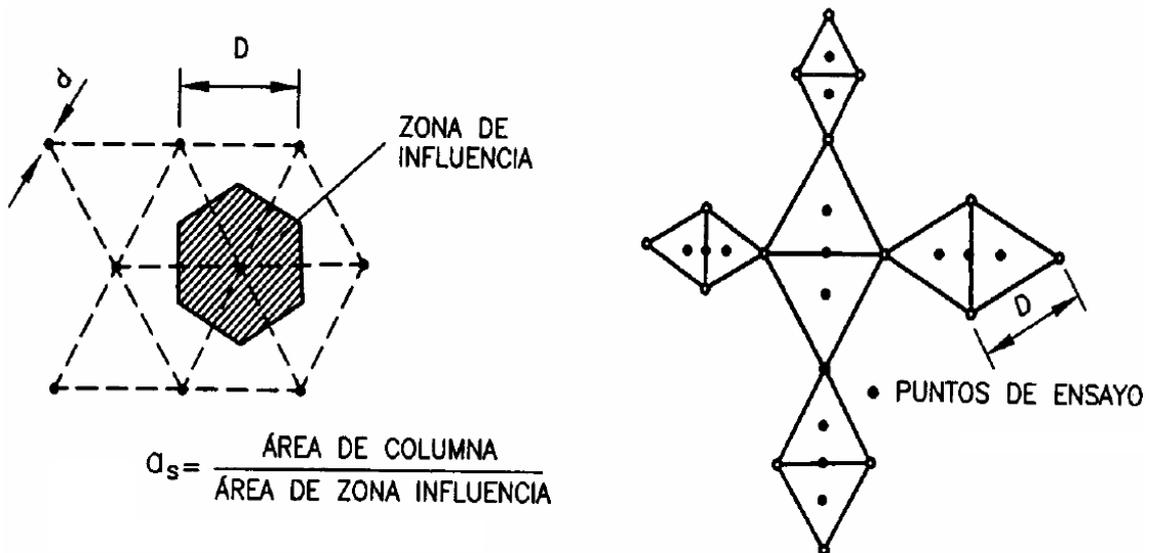


Figura 4.5 Diseño de malla triangular y posición de ensayos.

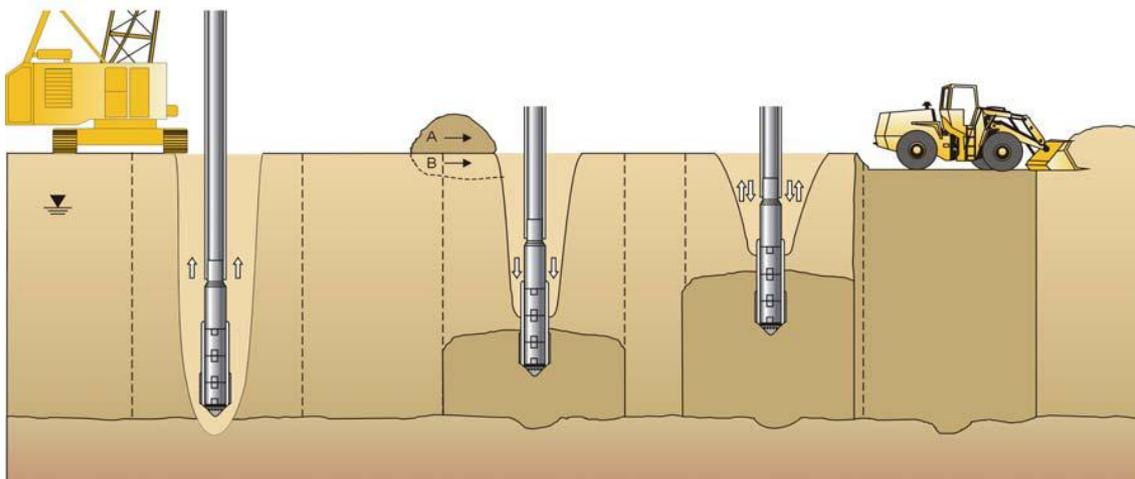
Se elegirá el mayor espaciado que cumpla las condiciones de densificación especificadas, normalmente dadas como una resistencia mínima a la penetración de SPT o CPT tanto estáticos como dinámicos. Este tipo de pruebas son las más indicadas para estos tratamientos, pudiéndose estimar a partir de los datos obtenidos los asentamientos esperados en las áreas compactadas.

Una de las ventajas de la vibrocompactación con vibrador de fondo con respecto a otros métodos de densificación es que, el motor y las masas excéntricas se encuentran dentro del vibrador, por lo que la energía se aplica directamente al suelo a profundidad. Caso contrario ocurre en la compactación dinámica o con probetas vibratorias, donde la energía se aplica desde la superficie y por ende se disipa con la profundidad.

Es por esto que teóricamente la vibrocompactación con vibradores de fondo se puede aplicar a cualquier profundidad deseada. Sin embargo, en la práctica la limitante la marcan los tamaños comerciales de las grúas, por lo que la mayoría de proyectos de vibrocompactación no exceden los 30 m de profundidad.

4.3.3 Proceso de vibrocompactación

En la figura 4.6 se ilustran las etapas del proceso de vibrocompactación, las cuales se describen a continuación:



1) penetración 2) compactación 3) relleno 4) terminado
Figura 4.6 Proceso de vibrocompactación (cortesía de Keller).

a) Penetración

El vibrador penetra con la ayuda de agua a presión hasta la profundidad de diseño, y con movimientos ascendentes y descendentes se agita la arena, formando así un espacio anular alrededor del vibrador, figura 4.7. Cuando se alcanza la profundidad de diseño el flujo de agua se puede reducir. Con el flujo de agua se reduce temporalmente la fricción entre partículas permitiendo que éstas se depositen en un arreglo más compacto. La velocidad de penetración del vibrador es de 1 a 2 m/min, la presión de agua 0.8 MPa y flujo de agua hasta 1500 l/min.



Figura 4.7 Espacio anular alrededor del vibrador creado durante la penetración.

b) Compactación

Debido a la acción de las fuerzas horizontales del vibrador, las partículas que se encuentran alrededor y en la parte inferior del vibrador son reacomodadas en un estado más compacto. El vibrador se va sacando conforme sea alcanzada la compactación. El radio de compactación se extiende de 1.5 a 4 m, dependiendo del tipo de suelo y de la potencia del vibrador.

c) Relleno

Como consecuencia de la inserción del vibrador y de la reducción del volumen en el punto de aplicación del vibrador, se crea un hueco de forma anular. En este punto, es necesario alzar el vibrador entre 1 y 2 m, introduciendo material de banco o del lugar (arena limpia). La velocidad de compactación y retiro es de 30 cm/min aproximadamente, hasta alcanzar la superficie.

d) Terminado

La superficie del área mejorada es entonces renivelada y puede ser densificada con un compactador de superficie. Con un esquema económico de compactación, se puede llegar a un mejoramiento óptimo. El resultado es la formación de un área de terreno compactado de forma cilíndrica.

4.3.4 Limitaciones

El parámetro más determinante para la viabilidad de la vibrocompactación es el contenido de finos, ya que influye enormemente en los resultados del tratamiento. El límite es a partir de 10 a 15% de contenido de finos, donde el método pierde eficiencia. A partir de este valor empieza a ser necesario un aporte de grava como material de relleno, debido a que los suelos con finos no responden al efecto de las vibraciones, procediendo a una sustitución del terreno.

4.3.5 Trabajos de vibrocompactación

Un ejemplo de este método es el puerto pesquero en Alvarado, Veracruz, (1963). Para el proyecto del puerto pesquero a orillas de la Laguna de Alvarado, se estudió detalladamente el subsuelo del área de interés.

Los suelos de la región son, en parte depósitos fluviales del río Papaloapan, constituidos por arenas finas limosas y limos arenosos, por otra parte, sedimentos marinos de arenas finas limpias y de arcillas blandas, además hay arenas limpias de duna, figura 4.8, (Vieitez, 1978).

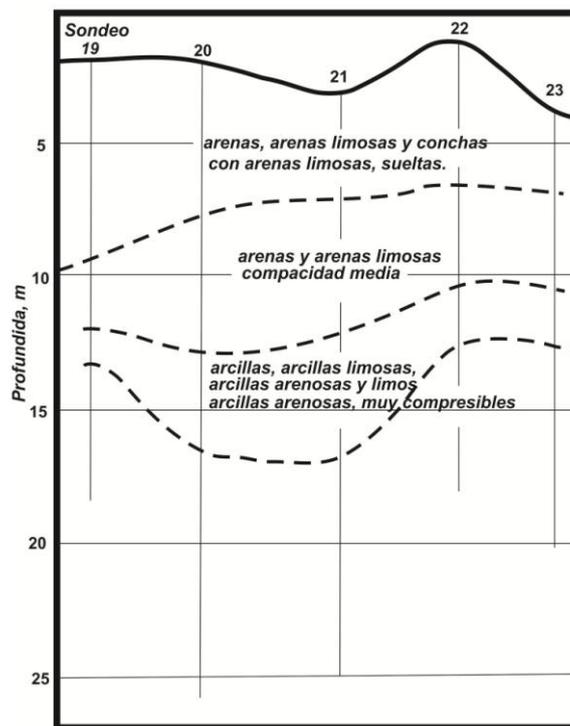


Figura 4.8 Suelos de la región de Alvarado (Vieitez, 1978).

4.3.6 Estratigrafía de la zona.

Se realizaron pruebas tipo penetración estándar y pruebas con penetrómetro holandés, encontrándose que hasta una profundidad de 8 m hay depósitos de arenas finas uniformes, sueltas con una resistencia a la penetración $N < 10$, y con un contenido de limo menor que 15%, al cual le subyacen arenas limosas de compacidad media, con un espesor de 3 m, y debajo de éstas una capa de arcilla muy blanda y de alta compresibilidad de espesor variable entre 0 y 3 m. Bajo la arcilla aparecen de nuevo arenas finas, pero de alta compacidad ($N > 30$), figura 4.9.

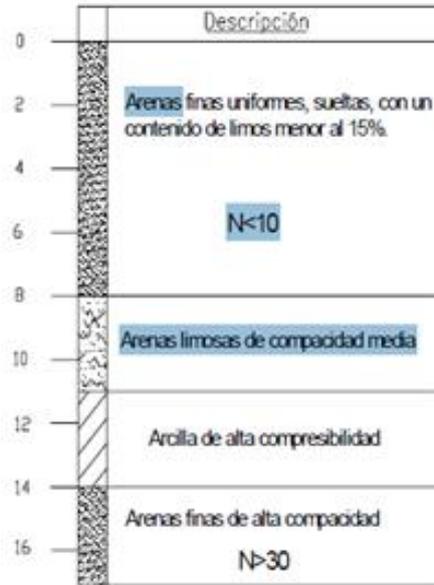


Figura 4.9 Estratigrafía del área de Alvarado, (Vieitez, 1978).



Figura 4.10 Vibrador de fondo y colocación de relleno, Alvarado, Veracruz, 1963 (cortesía Ing. Rolando Ugalde).

4.4 Vibrosustitución o vibrodesplazamiento

4.4.1 Método de mejora de terreno

Para mejorar arenas limosas o limos licuables, o depósitos de arena con capas de arcilla intercaladas, se utiliza grava como material de relleno y se forman columnas de grava por el método de vibrosustitución o columnas de grava.

La vibrosustitución constituye un método de mejora de terreno, mediante la rigidización que produce la introducción de columnas de grava en los orificios creados por el vibrador.

La grava proporciona una mejor transmisión de la fuerza vibratoria al suelo circundante, y por lo tanto incrementa el efecto de densificación. Otros beneficios son el control de la presión de poro por medio de la columna de grava, que actúa como dren, y la reducción de esfuerzos cortantes cíclicos en el suelo, debido a una concentración de esfuerzos en la columna, ya que posee mayor rigidez que el suelo que la rodea, además de tener un efecto de deformación limitada (*Priebe 1989, 1991*). Todo esto reduce la tendencia al incremento de la presión de poro, por lo que se obtiene una relación de presión de poro baja.

4.4.2 Fundamento teórico

Este tratamiento se basa en la introducción de un relleno granular en el terreno para formar columnas densas de grava, que con el terreno natural crean un sistema integrado de cimentación, figura 4.11. En este sistema, la diferencia de rigidez entre las columnas y el suelo original provoca una redistribución de los esfuerzos aplicados y una concentración de éstos sobre las columnas. Así, se aumenta la resistencia del conjunto disminuyendo los asentamientos y haciéndose más uniformes. Las columnas al no ser totalmente rígidas, tienden a tener una cierta deformación lateral cuando se aplican cargas, transmitiendo presiones laterales al suelo que las envuelve, que resiste movilizando su resistencia al corte. Además de la reducción de asentamientos, las columnas de grava constituyen excelentes drenes verticales que aceleran la consolidación del suelo bajo la sobrecarga, al favorecer la disipación del exceso de presión intersticial creado en el terreno cohesivo tratado.

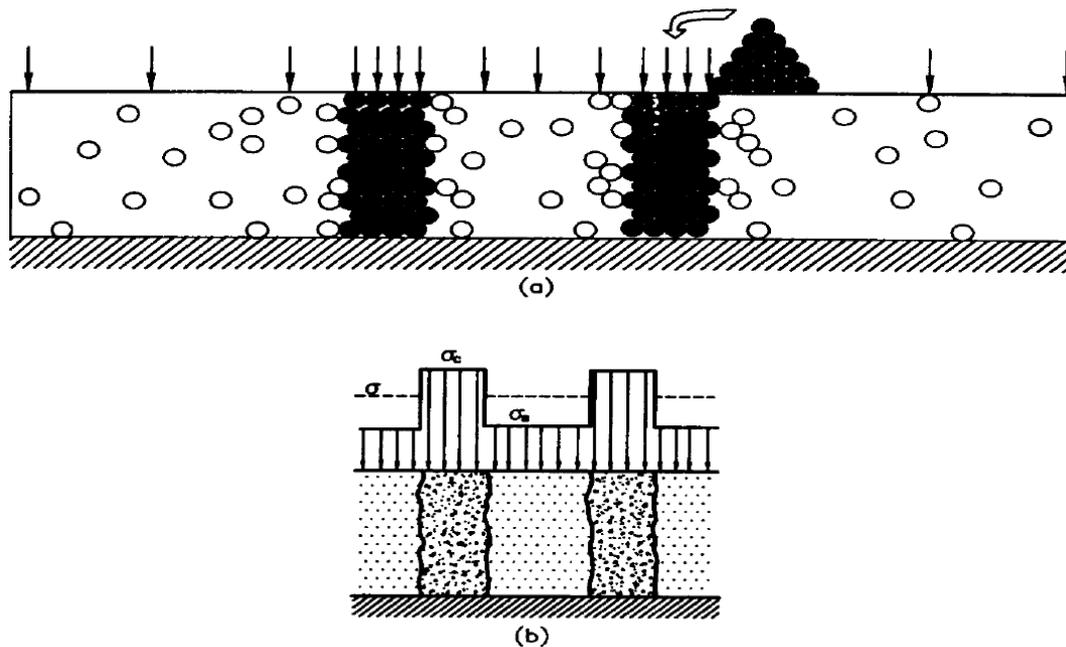


Figura 4.11 Redistribución de los esfuerzos aplicados sobre las columnas de grava por la diferencia de rigidez entre las columnas y el suelo original.

4.4.3 Proceso de vibrosustitución

Los dos métodos de instalación más comunes son: vibrosustitución por vía húmeda y vibrosustitución por vía seca. A éste último también se le llama vibrodesplazamiento.

El método de vibrosustitución por vía seca, se utiliza para mejorar suelos finos blandos, creando perforaciones mediante el desplazamiento del terreno producido por las fuerzas horizontales impartidas por el vibrador, ayudado por aire comprimido en cada punto del tratamiento.

Los procesos de vibrosustitución vía húmeda y vibrodesplazamiento implican la realización de la perforación por medio de agua y aire a presión, respectivamente, hasta una profundidad específica, alimentando la perforación con grava, a partir de esta profundidad se empieza a introducir y extraer el vibrador con una vibración de 30 Hz, por lo que la grava se empieza a densificar y adherir en el suelo circundante.

4.4.4 Vibrosustitución por vía húmeda

a) Penetración

Asistido por la inyección de agua, el vibrador oscilante penetra por peso propio hasta la profundidad deseada, según las características del terreno. El agua provoca un flujo hacia el exterior, removiendo y arrastrando las partículas de arcilla y creando un espacio anular alrededor del vibrador y del tubo de suspensión.

b) Sustitución

Una vez alcanzada la profundidad a mejorar, se procede al relleno de grava por tramos de unos 50 cm, siendo compactada y penetrada, por la vibración, en las paredes del terreno natural.

El movimiento del vibrador en ascenso y descenso, aunado a las fuerzas horizontales de la propia vibración y el flujo de agua a presión por las boquillas superiores, no permiten que se desarrolle el efecto de arqueado entre las paredes de la perforación, el relleno y el vibrador, este efecto aumentaría la resistencia a la penetración del vibrador.

c) Terminado

El fin de cada escalón de ascenso y relleno, es indicado por la resistencia al bajar el vibrador, ésta es medida por el consumo de corriente eléctrica (amperes).

Este proceso de ascenso y relleno se repite hasta alcanzar la superficie del terreno, obteniéndose una columna de grava compactada, figura 4.12.

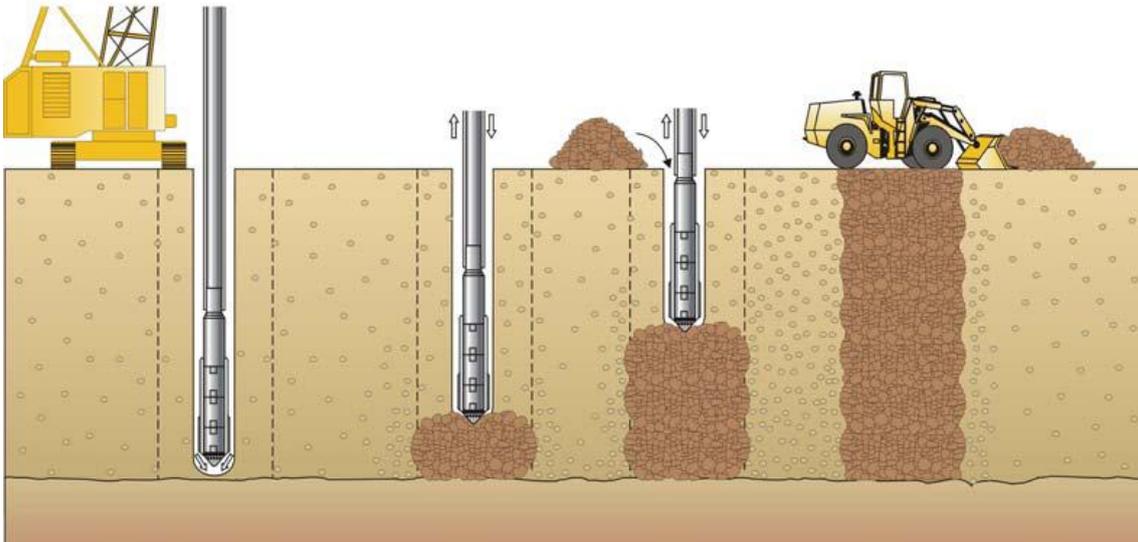


Figura 4.12 Proceso de construcción de las columnas de grava.

Si las paredes del suelo son inestables, el flujo de agua y el movimiento de la grava remueven el material fino y permiten a la grava expandirse hasta alcanzar el equilibrio. Es por ello que el diámetro de las columnas varía en su altura, coincidiendo en los estratos más blandos con los diámetros mayores. Los diámetros normales de las columnas de grava obtenidas mediante esta técnica son de 0.8 a 1.1 m.

4.4.5 Vibrosustitución por vía seca o vibrodesplazamiento

a) Penetración

En esta técnica el vibrador penetra en el terreno por el efecto de la vibración y del peso propio del vibrador así como de los tubos de extensión, figura 4.13. El terreno es desplazado lateralmente y se va creando una perforación de paredes estables, necesario para la extracción del vibrador, ayudado por la inyección de aire comprimido por la punta del vibrador.

El aire comprimido sirve para mantener las paredes de la perforación estables y ayuda a la penetración, si el caudal y presión de aire son considerables pueden causar daños a la estructura de las arcillas normalmente consolidadas.

b) Relleno

Cuando se alcanza la profundidad requerida, se extrae el vibrador y se realiza el primer relleno de grava, siendo de unos 50 cm cuando se compacta. Para compactar el relleno el vibrador es introducido de nuevo, como si se tratara de una masa vibratoria, desplazándose la grava hacia abajo y lateralmente, figura 4.14.

Durante la extracción del vibrador, la succión creada por el peso del aparato en sus ascensos puede crear inestabilidades en las paredes de los tramos inferiores de la perforación. El aire comprimido compensa la succión y ayuda al izado del vibrador.

c) Terminado

El proceso de relleno se repite hasta completar la columna. El diámetro común de columna de grava obtenido con el método seco es de 60 a 75 cm. Así, con un mismo vibrador el diámetro de la columna resultante es menor en esta técnica que por la vía húmeda.

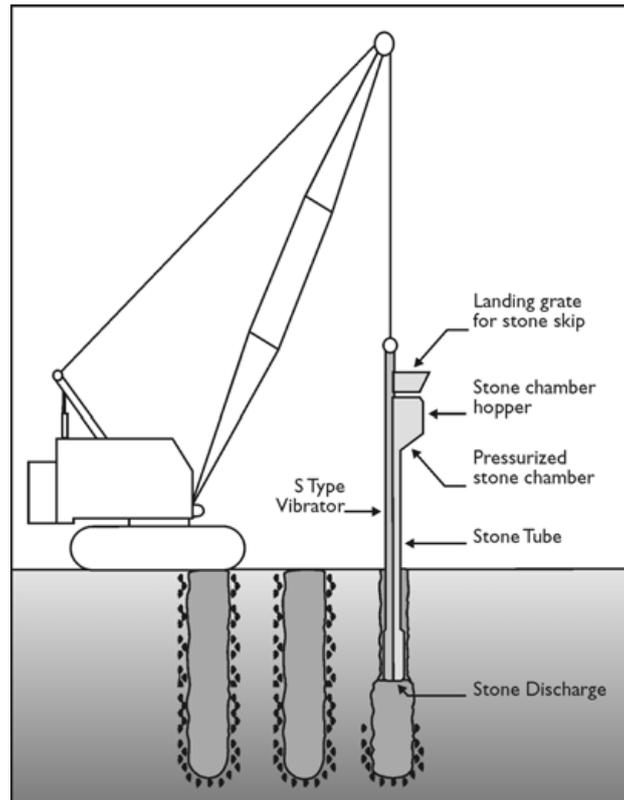


Figura 4.13 Esquema del equipo y proceso de vibrosustitución por vía seca (Hayward Baker, Inc.)



Figura 4.14 Alimentación y salida de grava, con la técnica de vibrodesplazamiento.

4.4.6 Técnica por vía húmeda (vibrosustitución)

Ya que el relleno se deja caer desde la superficie, se puede utilizar tamaños de grava desde ¾" hasta 4", tanto canto rodado como grava triturada. Es mejor utilizar una grava bien graduada en lugar de una uniforme, para lograr una columna con menos vacíos y por lo tanto más rígida.

4.4.7 Técnica por vía seca (vibrodesplazamiento)

Debe de ser grava bien graduada, con tamaños entre ¼" y ¾". La grava puede ser de origen natural o procedente de trituración, debe ser dura y limpia (sin arenas ni finos). Al igual que en el caso anterior, se logra un íntimo contacto entre la grava compactada y el suelo natural que la rodea, debido al desplazamiento.

4.4.8 Comparación entre vibrocompactación y vibrosustitución

Ambos métodos se basan en el vibrador de fondo descrito en el método de vibrocompactación. La diferencia radica en el material de relleno y en los efectos debido a éste. Los beneficios de cada método se muestran en la siguiente tabla.

Vibrocompactación	Vibrosustitución
Densificación (vibración)	Densificación (vibración y desplazamiento)
	Drenaje
	Refuerzo

Tabla 4.1 Beneficios de los métodos vibro.

Para que el drenaje de las columnas de grava sea eficiente, estas deben de tener un espaciamiento tal que las presiones de poro generadas en un sismo se disipen de manera casi instantánea. De esta manera es posible controlar la presión de poro y consecuentemente minimizar los posibles asentamientos.

4.4.9 Trabajos de vibrosustitución

El mejoramiento del suelo se realizó en toda el área de ampliación de la Terminal de Contenedores, Manzanillo, Colima (1998). En total se construyeron 4,400 columnas de grava a 10 m de profundidad, con un diámetro promedio de 90 cm cada una, figura. 4.15. El vibrador de fondo que se utilizó fue tipo "S", figura 4.16.



Figura 4.15 Columnas de grava.



Figura 4.16 Vibrador de fondo tipo "S" en Terminal de Contenedores, Manzanillo, 1998.

El volumen de grava utilizado para formar las columnas fue del orden de 29,000 m³ con granulometría de 1 a 3" de diámetro.

Los trabajos de vibrosustitución duraron aproximadamente seis meses y se fueron aplicando conforme estaban disponibles los frentes de trabajo, ya que algunas áreas estaban ocupadas por contenedores vacíos; además, se diseñó un programa especial para no interferir con las maniobras propias de los patios (Martínez et al., 2000).

La separación entre cada columna de grava fue de 3 x 3 m en el área de tierra firme y de 2.7 x 2.7 m en la superficie ganada al mar, ya que se tenía una compacidad menor. En el área ganada al mar se observaron asentamientos del orden de 50 cm al estar construyendo las columnas de grava, lo cual es una medición de la compactación del terreno.

El agua que se utilizó para la vibrosustitución fue tomada del mar. Para ello se utilizaron bombas con 10 kg/cm² de presión. Asimismo, se construyeron canales para desalojar el agua de los patios hacia el mar.