



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE LA CONSTRUCCIÓN A.C.

CAMARA MEXICANA DE LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION

“MODIFICACIÓN DE SUELOS POR EL MÉTODO DE VIBROSUSTITUCIÓN O VIBROCOMPACTACIÓN APLICADO EN PUERTOS MARÍTIMOS”

Tesis que presenta:

Mauricio Santos Coy Arechavaleta

Para obtener el título de:

Ingeniero en Construcción

Asesor:

Ing. Celso Barrera Chávez

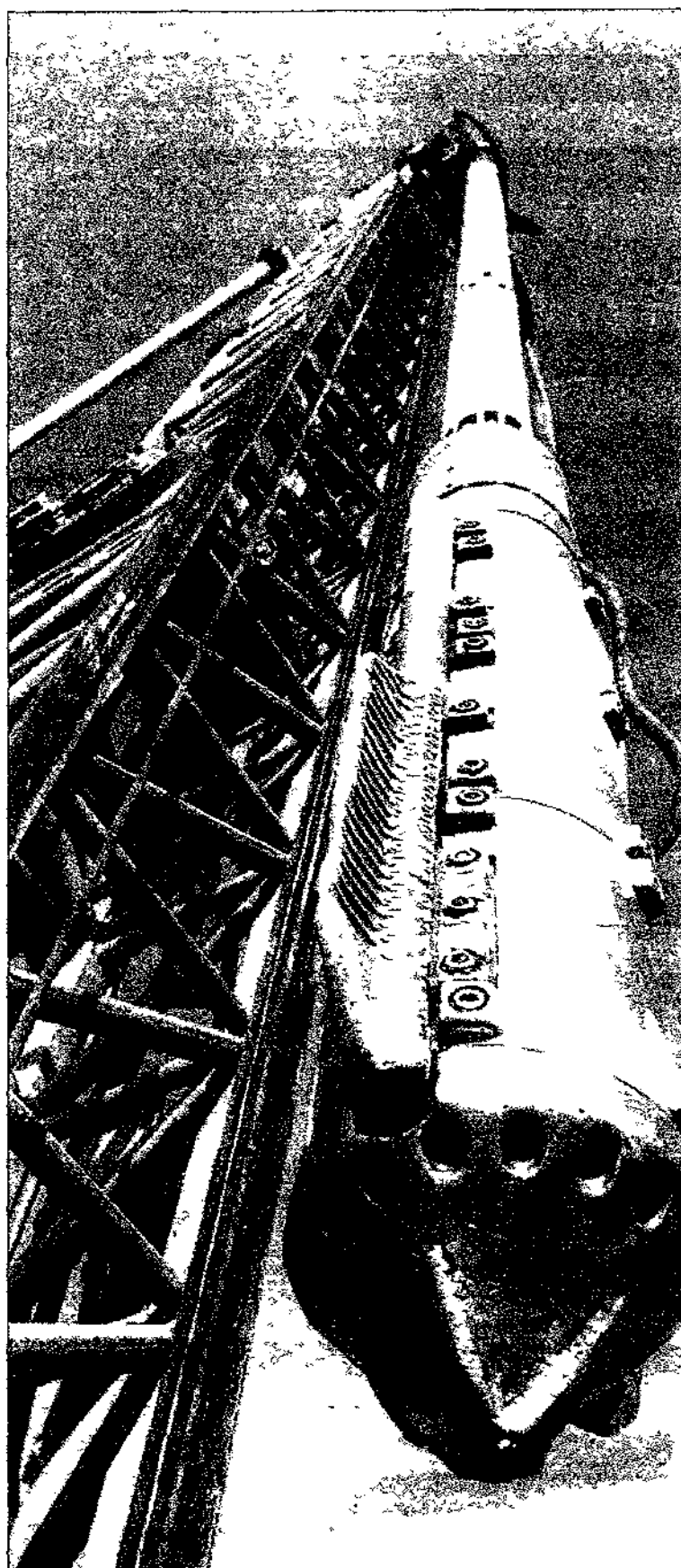
ESTUDIOS CON RECONOCIMIENTO DE VALIDEZ OFICIAL, POR LA SECRETARIA DE EDUCACIÓN PÚBLICA,
CONFORME AL ACUERDO No. 952359, DE FECHA 13 JULIO DE 1995

CIUDAD DE MÉXICO; MARZO 2005



INSTITUTO BIBLIOTECA

MODIFICACION DE SITIOS POR EL METODO DE VIBROREEMPLAZO O VIBROCOMPACTACION APLICADO EN PUERTOS MARITIMOS





ÍNDICE

	pag
I. AGRADECIMIENTOS	5
II. OBJETIVO	6
III. JUSTIFICACION	6
IV. METODOLOGIA	7
V. ORIGEN Y FORMACIÓN DE LOS SUELOS	
1. Introducción-----	8
2. Suelos -----	8
3. Agentes generadores o formadores de suelos-----	8
4. Fases de la composición del suelo -----	8
5. Suelos residuales y transportados -----	9
6. Depósitos naturales del suelo -----	9
7. Minerales constituidos de los suelos gruesos -----	11
8. Minerales constituidos de las arcillas -----	11
9. Clasificación -----	12
VI. SUELOS GRUESOS COMPRESIBLES, COMPACIDAD Y COMPACTACIÓN	
1. Introducción-----	16
2. Suelos gruesos-----	16
3. Compresión y compactad-----	16
4. Compactación-----	17
5. Métodos de compactación-----	17
6. Compactación de materiales-----	21
7. Método de inyección-----	22
8. Método para la colocación de la compactación-----	23
9. Mejora de condiciones-----	23
10. Control de calidad-----	24
11. Descripción de casos-----	24
VII. MÉTODOS PARA CONTRARRESTAR LA LICUACIÓN Y HACER MEJORAMIENTO DE SUELOS GRUESOS	
1. Introducción-----	31
2. Licuación-----	31
3. Métodos para contrarrestar la licuación-----	31
VIII. MÉTODO DE VIBRO-COMPACTACIÓN Y VIBRO- SUSTITUCIÓN	
1. Introducción.....	34
2. Métodos de vibro-compactación y vibro-sustitución-----	34
3. Vibro-compactación.....	38
4. Vibro-sustitución.....	39
5. Descripción de casos históricos de los vibro-sistemas.....	39

IX. MÉTODOS DE MEJORAMIENTO DE SUELOS	
1. Introducción-----	43
2. Micropilotes-----	43
3. Soluciones con materiales no resistentes-----	44
4. Descripción de casos-----	46
5. Inyección de Materiales-----	49
6. El procedimiento de la inyección de materiales-----	50
7. Diseño y control de calidad de la inyección de los materiales	51
8. Descripción de casos-----	53
9. Columnas de concreto vibradas-----	56
10. Vibro-compactación y vibro reemplazo-----	57
11. El diseño y sus consideraciones-----	61
12. Control de calidad y garantía de calidad-----	64
13. Descripción de casos-----	65
X. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE VIBRO-COMPACTACIÓN Y VIBRO-SUSTITUCIÓN.	
1. Introducción-----	69
a. Planta de Tratamiento de Aguas Negras en Puerto Vallarta	
2. Instalación de las columnas de grava de vibro-reemplazo----	71
3. Perfil del suelo-----	71
4. Diseño del asentamiento-----	71
5. Consideraciones de diseño de licuefacción-----	73
6. Mediciones de asentamiento-----	74
7. Resistencia a la penetración observada-----	75
b. Terminal de Granos en el Puerto de Manzanillo	
1. Análisis de cimentación bajo carga estática-----	78
2. Análisis de una sola columna-----	78
3. Análisis simétrico bidimensional axial del medio domo-----	80
4. Análisis sísmico-----	81
5. Pilotes vibrados en sitio-----	82
6. Vibro-compactación-----	83
XI. PRUEBAS DE CONTROL DE CALIDAD	
1. Pruebas de exploración-----	85
2. Prueba de la penetración Standard (SPT) y prueba de penetración de cono (CPT)-----	95
XII. CONCLUSIONES	99
XIII. BIBLIOGRAFIA	101

Agradecimientos

Yolanda y José Juan por todo el apoyo, cariño, consejos, comprensión que me han mostrado en todo lo que he hecho.

Andrea y Alejandro por estar en las buenas y en las malas, que siempre que es necesario están para apoyarme.

A mi abuela y mis tíos, por estar siempre pendientes de lo que nos pasa, dando consejos, alegrías, motivando a hacer las cosas.

A mis mejores amigos, por compartir momentos buenos y malos y siempre estar para recibir a su amigo, y en especial por estar en este momento compartiéndolo, los que están presentes y lo que no pudieron venir pero que siempre están en contacto con su apoyo.

A mis amigos(as), y excompañeros de trabajo por pasarla muy bien, pasar gratos momentos, y sobreponerse a las dificultades y siempre salir de ellas. Pase lo que pase.

A mi asesor por tenerme tanta paciencia y todo lo que implica para elaborar esta tesis, y disponer de su tiempo para poder concluir esta etapa de estudios tan importante en mi vida.

A mis profesores, por darnos la confianza y aportar sus conocimientos, dentro y fuera de clases, estar siempre dispuestos a ayudar sin ningún interés de por medio.

A todas las personas que tuvieron contacto directo con esta tesis que fue de gran ayuda para poder concluirla como debe de ser.

A la empresa Baker por dar apoyo bibliográfico para la elaboración de la Tesis.



Objetivo:

- 1) Contribuir a optimizar la aplicación de los métodos de vibro-compactación y vibro-sustitución para el mejoramiento de suelos en puertos marítimos en México.
- 2) Describir casos de mejoramiento de suelos en puertos mexicanos.
- 3) Describir la maquinaria y los métodos de vibro-compactación y vibro-sustitución.
- 4) Describir casos prácticos de aplicación de los métodos antes mencionados.
- 5) Concluir el potencial de aplicación de éstos métodos a los puertos marítimos.
- 6) Revisar las características de los suelos, desde el punto de vista geológico.
- 7) Revisar la clasificación de suelos, de acuerdo a su constitución mineral.
- 8) Revisar los métodos de mejoramiento de suelos cuando hay fallas del mismo.

Justificación:

El conocimiento de los procedimientos correctivos para resolver problemas de suelos en estructuras ya construidas, reviste particular importancia, debido a que se trata de situaciones críticas que pueden generar incremento del costo de construcción y serios problemas de tipo operativo, cuya gravedad está en relación con el uso que se dé a la construcción.

La modificación de los suelos puede deberse a fenómenos naturales impredecibles como temblores o inundaciones, otra causa de modificación de suelos puede ser secundaria a la ampliación de la construcción preexistente por un crecimiento o cambio en el uso específico que tenga o a los efectos que construcciones contiguas tengan sobre las previas.

Sabemos que las modificaciones del suelo son mas frecuentes y serias en los litorales, sobre todo cuando la costa está cerca de fallas geológicas que todavía no se consolidan, como sucede en México.

El sistema portuario mexicano, con 76 puertos marítimos de los cuales, 31 tienen actividad comercial nacional e internacional, contaban en 1994, con mas de 75 Km de muelles, 2.3 millones de metros cuadrados de almacenamiento en patios, 341 metros cuadrados de bodegas y 7.5 millones de metros cuadrados de oficinas fiscales. En éstas áreas transitan millones de toneladas anuales de carga. Se trata de una infraestructura vital para el país, que requiere del uso de las tecnologías más modernas para su desarrollo, conservación y mantenimiento.

Los métodos de mejoramiento de suelos que se revisan en esta tesis, son económicos, y hacen que las estructuras no se tengan que demoler ni dejen de funcionar cuando se requiere su aplicación.



Metodología:

Esta tesis se hizo en base a una investigación documental

En los criterios para la selección de los casos presentados fueron:

Que han surgido de la realidad, de casos documentados por especialistas en el ramo. Los ejemplos que se presentan contienen la aplicación que se realizó, antecedentes a estos y la compañía que se dedica a hacer este tipo de maquinaria.

Sirvieron de referencia otras fuentes bibliográficas para los temas de tipos y características de los suelos con relación a la construcción.

Se comenzó la tesis con los métodos y maquinaria que se necesitan para poder realizar la modificación de los suelos, y poco a poco se fueron buscando los antecedentes y al mismo tiempo se buscaron aplicaciones y métodos de control de calidad.

En la tesis se siguió una metodología teórica, los ejemplos que se muestran son reales y las aplicaciones.

Lo primero que se busco fue el tema, después nos basamos en ver los antecedentes del mismo (todo este material fue recolectado por la empresa baker).

Lo segundo que se busco es la tierra es lo indispensable para nuestro tema. Las capas en que se dividen, y donde se apoya y construyen las estructuras.

Lo tercero es sobre que es el suelo sus características, como se conforma clasifica,

Lo cuarto los efectos del suelo, y que ocasionan.

El quinto el control de calidad.



ORIGEN Y FORMACIÓN DE SUELOS

1. *Introducción*

Este capítulo trata en lo esencial del mejoramiento de los suelos. Primero se define que es el suelo, qué lo forma, los agentes que lo afectan, como se constituye y su clasificación para mejorarlo de manera adecuada, sin dejar de mencionar las capas que conforman la tierra y estas son; el núcleo, manto interno, manto externo y corteza terrestre, esta última es donde se desarrolla la vida y en ella se construyen las diferentes estructuras que sirven al hombre en sus beneficios.

Se hace referencia a los métodos de SUCS, casagrande y granulometría, que debe de tener el suelo, debido a que es indispensable para conocer los efectos y así poder actuar para contrarrestarlos. Más adelante se muestran algunos métodos para poder controlar los efectos del suelo.

2. *Suelo*

El término suelo se usa en más de un sentido, es el resultado de la descomposición y desintegración de las rocas y de los organismos. Cuando son producto de la desintegración de las rocas sus partículas son minerales y cuando provienen de organismos son materia vegetal. El agua contenida en el suelo juega un papel fundamental en el comportamiento mecánico del suelo, debe considerarse como parte integral del mismo. Se clasifican en suelos gruesos o finos.

3. *Agentes generadores o formadores de suelos*

Se identifican dos grupos:

- Desintegración mecánica. Es la intemperización de las rocas por agentes físicos. (temperatura, congelación del agua en juntas y grietas de rocas), plantas, etc.
- Descomposición química.- Son agentes que se encargan de modificar su constitución mineralógica.

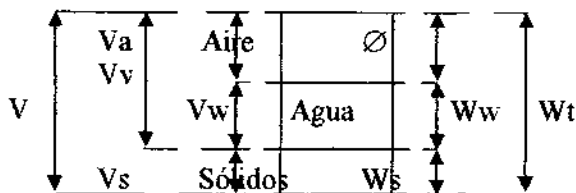
El principal agente es el agua, y sus mecanismos de ataque son la oxidación, hidratación y carbonatación.

4. *Fases de la composición del suelo*

El suelo se compone básicamente por materias sin consolidar y estas se encuentran formando fases que son:

- Sólidos
- Líquidos
- Gaseosos.

En el siguiente cuadro se muestran los factores de composición del suelo.



Nomenclatura

V_s = volumen de sólidos
 V_w = volumen agua
 V_a = volumen aire
 V = volumen total de la masa del suelo

\emptyset = vacíos
 W_w = peso del agua
 W_a = peso de sólidos
 W_t = peso total del suelo

5. Suelos residuales y transportados

Los suelos residuales que se someten al intemperismo y son producto de la descomposición química de la roca y se encuentran depositados cerca de la roca que le da origen dependen genéricamente de la roca madre. Normalmente en los depósitos se tiene una capa de material arcilloso o de arcilla limosa, debajo se encuentra roca parcialmente intemperizada y roca sana. Son de color gris, de tipo uniforme, la profundidad de la intemperización puede variar considerablemente. Los que se encuentran debajo del lecho rocoso normalmente están consolidados.

Los suelos transportados son depositados en otras zonas por agentes como el agua, glaciares, viento, ríos, mares, gravedad y son productos del intemperismo mecánico como el agua, viento, cambio de temperatura.

6. Depósitos naturales de los suelos

Existen diferentes tipos de depósitos:

- Aluviales. Son generados por la acción de corrientes de agua y ríos, se dividen en dos categorías:
 - a) De corrientes interconectadas. Son depósitos de alto flujo y gradiente, erosivas y arrastran grandes cantidades de sedimentos. Si se llega a tener un cambio de ritmo en el flujo, se crean bancos e islotes de arena. Estos llegan a tener diferentes tamaños de granos. Las características más comunes son:
 - Tamaño varía entre los limos y las gravas.
 - Aunque los tamaños varían siguen siendo uniformes.
 - La relación de vacíos y de peso unitario varía considerablemente en pocos metros.



b) El serpenteo meándrico de corrientes. Estos depósitos se encuentran en ríos maduros, los cuales tienen gran cantidad de curvas cuando el río abandona un meandro y sigue una trayectoria más corta. Cuando el meandro abandonado, se llena de agua, se llama lago de brazo muerto.

Las partículas que quedan en las orillas del río son arenas, limos y arcillas, forman líneas conocidas como bordos naturales.

- Glaciares. En el Pleistoceno, los glaciares cubrieron grandes extensiones de la tierra y durante su avance cubrieron enormes áreas de arena, limo, arcilla, grava y boleos. Pueden ser:
 - a) Derrubio.- Son los depósitos dejados atrás por los glaciares.
 - b) Tilita.- Es un depósito no estratificado que yace debajo de los glaciares al derretirse.
 - c) Morrea Terminal.- Es la cresta que marca el límite máximo de avance de un glaciar.
 - d) Morrea Recesional.- Son las crestas desarrolladas con distancias variables que se encuentran detrás de la Morrea Terminal.
 - e) Morrea de fondo.- Es el material que se encuentra entre las morreas.
 - f) Materiales de función.- Son los limos, arenas y gravas arrastrados por agua derretida frente al glaciar.
 - g) Depósitos glacio-fluviales (llanuras de aluvión).- Son corrientes de aguas interconectadas que depositan el material de fusión.
 - h) Lagos.- Depósito de limos y arena que arrastra el agua del glaciar. Los limos tienden a asentarse en el fondo del lago cuando el agua está en reposo.
 - i) Arcilla laminada.- Es cuando los depósitos tienen capas alternas de arcillas y limos, generalmente las laminas tienen un espesor de unos cuantos milímetros, pero se han llegado a encontrar hasta de 50 y 100mm. Su capacidad de carga es muy baja.
- Suelos eólicos. Estos depósitos se forman cuando el viento se lleva una porción de tierra de un lugar a otro y se les denomina dunas.

Las propiedades de las dunas son:

- a) La granulometría de la arena es uniforme.
- b) El tamaño general del grano decrece conforme a la distancia.



- c) La compacidad relativa de la arena depositada sobre el lado expuesto al viento de las dunas es de entre 50 y 65 % y decrece entre valores de 0 y 15 % sobre el lado contrario del viento.
- Médanos. Son aglomeraciones de arena suelta que fueron arrastradas por el viento, detenidas por algún obstáculo natural de la superficie del terreno.

7. *Minerales constitutivos de los suelos gruesos*

Mineral. Es una sustancia inorgánica y natural, que tiene una estructura interna, de composición química y propiedades físicas variables dentro de límites definidos. Sus propiedades físicas son:

- Color.
- Lustre.
- Tonalidad de raspaduras.
- Forma de cristalización.
- Dureza.
- Forma de fractura.

Los minerales que normalmente se encuentran en los suelos son:

- Silicatos, (potasio, sodio o calcio) micas, olivino, serpentina, etc.
- Óxidos: cuarzo, limonita, magnetita y corindón.
- Carbonatos: calita y dolomita.
- Sulfatos: yeso y anhidrita.

8. *Minerales constitutivos de las arcillas*

Las arcillas están compuestas principalmente por silicatos de aluminio hidratados que presentan en algunas ocasiones, silicatos de magnesio, hierro u otros metales, también hidratados. Normalmente tienen estructuras cristalinas bien definidas, cuyos átomos se disponen en láminas.

- Láminas:
 - Silícica. Está formado por silicio, rodeado de cuatro de oxígeno, disponiéndose el conjunto en forma de tetraedro.
 - Aluminicas. Están formadas por octaedros, es un átomo de aluminio central y seis oxígenos alrededor. El oxígeno es el nexo entre cada dos octaedros formando una redícula.

• **Retículas:**

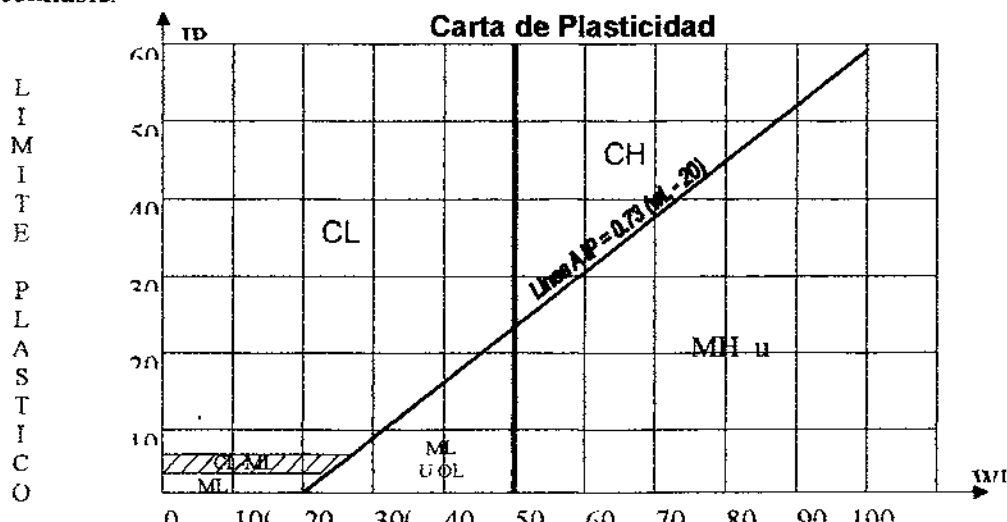
- **Caolinitas** ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Están formadas por una lámina aluminica y otra sílica. Nos permiten la penetración de moléculas de agua y esto hace que esas arcillas sean estables en presencia del agua.
- **Montmorillonitas**. ($\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}] \cdot n\text{H}_2\text{O}$). Están formadas de una lámina aluminica entre dos sílicas, la unión de estas retículas provoca que las moléculas de agua penetren en la estructura con relativa facilidad. Las arcillas presentan fuerte tendencia a la inestabilidad en presencia del agua.
- **Illitas**. ($\text{K}_x\text{Al}_2(\text{Si}_{4-x}\text{Al}_x)\text{O}_{10}(\text{OH})_2$). Están estructuradas análogamente que las montmorillonitas; forman grumos de materia, reducen el área expuesta al agua por unidad de volumen, su expansión es menor que las montmorillonitas. a favor del ingeniero.

9. Clasificación

Las primeras clasificaciones de los suelos se realizaron a partir de la observación directa (olor, color, textura), después se empezó a utilizar la granulometría basada en los diferentes tamaños de las partículas, con este método se clasifican en grava, arena, limos y arcilla.

Existe otro método que se denomina Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) que fue propuesto por A. Casagrande. Este método antes se utilizaba nada más para finos menores que la malla 200 y después se implementó para arenas y gravas. Ahora lo utilizan en la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).

Este sistema clasifica los suelos por medio de la granulometría y la carta de plasticidad, cuya correlación con las propiedades mecánicas básicas es consistente y confiable.



El Límite Líquido se encuentra en el eje de las abscisas, la Plasticidad en el eje de las ordenadas y el Índice Plástico es la recta que corta el plano.

El SUCS, utilizado por los ingenieros distingue suelos gruesos y finos por medio del cribado. Los finos son los que pasan la malla 200 y los gruesos se retienen en esta malla.

La nomenclatura que utiliza el SUCS es la siguiente:

- G. Grava (proviene del vocablo inglés gravel)
- S. Arena (proviene del vocablo inglés sand)
- C. Arcilla (proviene del vocablo inglés clay)
- M. Limo (proviene del latín limus. (De las aguas del Nilo, significa la máxima fecundidad. Se relaciona con chem, el limo creador).
- O. Suelos orgánicos (proviene del vocablo inglés organic)
- W. Bien graduado (proviene del término inglés well graded)
- P. Mal graduado (proviene del término inglés poorly graded)
- L. Baja a mediana plasticidad (proviene del vocablo inglés low)
- H. Alta plasticidad (proviene del vocablo inglés high)
- Pt. Suelos altamente orgánicos (proviene del vocablo inglés peat, turba)

Suelos gruesos. El símbolo que tiene cada grupo de suelo se representa con dos letras mayúsculas. Estas son las iniciales de los nombres ingleses de los suelos. Los más típicos de este grupo son:

- Grupos GW y SW gravas y arenas bien graduadas. Son bien graduados y poco finos. La presencia de los finos como máximo debe de ser del 5% y esto hace que no se altere la capacidad de drenaje, ni con la resistencia de la fracción gruesa.
- Grupos GP y SP gravas y arenas mal graduadas. Son mal graduados; es decir son de apariencia uniforme, o predominio de un tamaño o de un rango de tamaños, faltando algunos intermedios. En el laboratorio deben cumplir los requisitos de los dos grupos anteriores en lo referente a su contenido de partículas finas, pero no lo cumplen en lo referente a los requisitos de graduación.
- Grupos GM y SM gravas y arenas limosas. Los finos afectan las características de resistencia y esfuerzo-deformación y la capacidad de drenaje libre de la fracción gruesa. El porcentaje de finos debe de ser mayor al 12%, y los límites deben estar entre nula y media.
- Grupos GC y SC gravas y arenas arcillosas. Igual que el grupo anterior el porcentaje de finos debe ser mayor al 12%, sin embargo los finos son de media a alta plasticidad.



- Los grupos que tienen doble signo. Son los que tienen el 5 y 12% de finos.

Suelos finos. El símbolo que tiene cada grupo de suelo se representa con dos letras mayúsculas. Estas son las iniciales de los nombres ingleses los suelos más típicos de este grupo son:

- Grupos CL y CH arcilla de baja plasticidad y arcilla de alta plasticidad. En estos se encuentran las arcillas inorgánicas.

El grupo CL comprende a la zona sobre la línea A, definida por $LL < 50\%$ e $Ip > 6\%$.

El grupo CH corresponde a la zona arriba de la línea A, su $LL > 50\%$ y se ha encontrado hasta 500%.

- Grupos ML y MH limos de baja plasticidad y limos de alta plasticidad. En estos quedan comprendidos los limos típicos inorgánicos y limos arcillosos.

El grupo ML se encuentra debajo de la línea A su $LL < 50\%$ y la porción sobre la línea A con $Ip < 6\%$. Los limos tienen $LL < 30\%$.

El grupo MH se encuentra debajo de la zona A su $LL > 50\%$.

Grupos OL y OH las zonas correspondientes son las mismas que las de los grupos ML y MH, respectivamente; los orgánicos se encuentran en lugares próximos a la línea A.

- Grupo PT el LL se encuentra entre el 300 y 500% quedando notablemente debajo de la línea A y en Ip varía entre 100 y 200%.
- Cuando un suelo grueso no cae claramente en uno de los grupos se utilizará doble símbolo.

Una primera clasificación divide a los suelos en dos grandes fracciones basadas en la cantidad de material que pasa por la malla número 200. Si retiene más de la mitad del material en esta malla, se trata de un suelo de partículas gruesas, y si pasa más de la mitad del material, lo clasificaremos como suelo de partículas finas.

La clasificación de un suelo grueso, en arena o grava, depende de la cantidad de material que pasa por la malla número 4, si más de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla número 4, se trata de una arena; en caso contrario, será una grava.

Si el porcentaje de finos que pasa por la malla número 200 es menor del 5%, los suelos gruesos vendrán designados por su buena o mala graduación. Se considera que un suelo está bien graduado cuando los espacios dejados por los granos grandes son ocupados por los más finos.

Si el porcentaje de finos que pasa por la malla número 200 en los suelos gruesos fuera mayor del 12%, éstos se clasifican de acuerdo con el contenido y naturaleza del material fino que los acompaña, ya sea limo o arcilla.

Cuando la fracción que pasa por la malla número 200 esté comprendida en el intervalo de 5-12%, se trata de un caso de frontera que requiere la utilización de símbolos dobles.

La clasificación de los suelos de partículas finas se hace en base a la carta de plasticidad. El descubrimiento principal que reveló la investigación de A. Casagrande fue que, en la representación de los suelos en una carta como función solamente del Límite Líquido y del Índice Plástico, los suelos de partículas finas se agrupan en determinada forma, de manera que en cada zona de la carta se sitúan suelos con características similares.

Los suelos finos se refirieron en función de la dureza, así tenemos suelos:

- Muy blandos.
- Blandos.
- Duros.
- Muy duros.

También atendiendo a sus características de deformación en suelos de alta compresibilidad (H) y de baja compresibilidad (L).

La compacidad de los suelos gruesos puede ser de tres formas:

0-33% suelto.

33 – 66% medianamente compacto.

66 – 100% compacto.

Existen materiales altamente orgánicos cuya clasificación se hace aparte de las anteriores. Tal es el caso de las turbas.



SUELOS GRUESOS COMPRESIBLES, COMPACIDAD Y COMPACTACIÓN

1. *Introducción.*

Como en los puertos normalmente existen suelos gruesos, el enfoque del presente trabajo, se dirige a buscar la manera de mejorarlos, ya que la estructura simple en las arenas y gravas en estado muy suelto o suelto tienen grandes vacíos por lo que hacen que presenten baja resistencia y sean muy deformables. En los próximos casos se muestra los métodos utilizados para su mejoramiento.

El *mejoramiento del suelo* es un método que se utiliza para dar resistencia, plasticidad, disminuir la deformabilidad a un suelo y hacer mas durable la estructura del mismo, mejorarla con el propósito aportar mayor solidez a las estructuras. Una de las técnicas de mejoramiento se logra agregando diferentes materiales.

Se definen con precisión los conceptos de compresión, compacidad, compactación para decidir como dar un mejoramiento adecuado al suelo.

2. *Suelos gruesos*

Gravas. Son partículas que abarcan desde los 4.76mm (malla No.4) hasta los 7.6cm (3"). Se encuentran dentro de los suelos gruesos. Su peso volumétrico se encuentra entre 1.7 – 1.9t/m³. Se clasifican en:

GP	grava pobre
GW	grava bien graduada
GM	grava limosa
GC	grava arcillosa

Arenas. Son partículas que abarcan desde los 0.074mm (malla 200) hasta 4.76mm (malla 4). Su peso volumétrico se encuentra entre 1.6 – 1.8t/m³. Se consolidan normalmente por la reorientación y fractura de los granos acompañada por alguna distorsión elástica de los mismos. El índice por lo general es menor a 0.1 y la curva es parecida a la de las arcillas. Se clasifican en:

SP	arena pobre
SW	arena bien graduada
SM	arena limosa
SC	arena arcillosa

3. *Compresión y compacidad*

El termino *compresión* se utiliza cuando se aplica una presión al suelo y este sufre una deformación, afectando su módulo de elasticidad.



La **compacidad** es la degradación del suelo, está dada por la relación de el volumen ocupado por cierta cantidad de materia entre la misma pulverizada, es decir, nos indica la porosidad que tiene.

Partiendo de la base de que un poliedro será tanto más compacto cuanto más volumen encierre con una misma superficie, se ha considerado que lo más adecuado para medir compacidad, es comparar superficie y volumen.

4. *Compactación*

Es otro método de mejoramiento de suelos que reduce la porosidad y el volumen de un material, en el que el suelo tiene un aumento de peso específico, derivado de la expulsión del aire y agua. Este proceso tiene que ver directamente con el tipo de suelo y el contenido de agua, a través de pasadas de acuerdo al espesor y la energía de compactación.

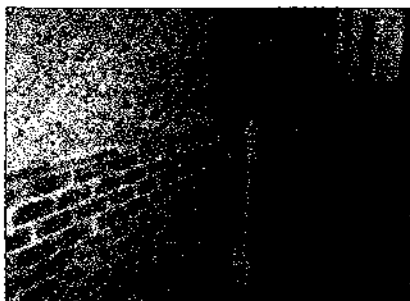
5. *Métodos de compactación*

Existen varios tipos de compactación que tienen sus propias técnicas de aplicación.

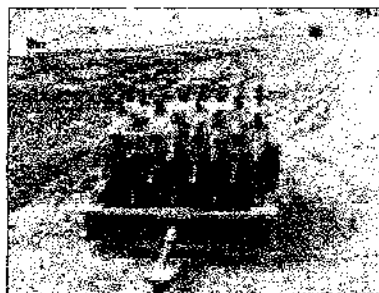
- Vibración
- Impacto
- Amasado
- Presión.

Se utilizan diferentes equipos o maquinarias como pisón, bailarina, pata de cabra, rejilla o malla, vibratorio, tambor de acero liso, de neumáticos, de pisones remolcados, de pisones de alta velocidad y combinados (tambor vibratorio de acero liso, neumáticos y tambor de acero liso).

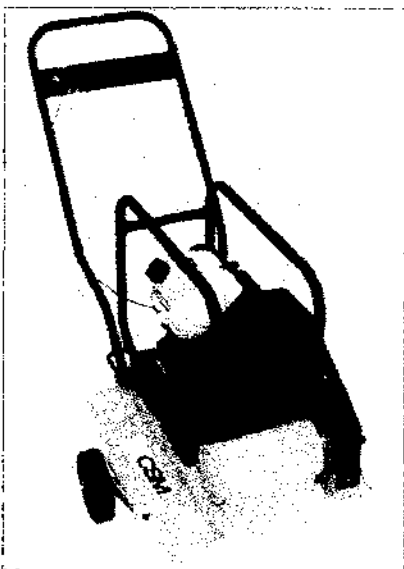
RELACION ENTRE TIPO DE SUELO Y MAQUINARIA PARA COMPACTACIÓN	
Tipo de suelo	Equipo y maquinaria
100% arenosos	Pata de cabra, pata de cabra de pisones
arcillosos y arenosos	Pisón remolcado, pisones de alta velocidad
100% arena	Vibratorio, tambores de acero liso, varios neumáticos, neumático pesado
entre arenosos y rocosos	Pison para roca y la reja



Pisón



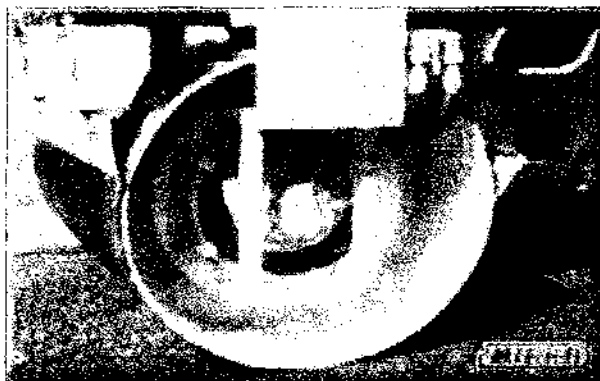
Compactador pata de cabra



Compactador SCM



Bailarina



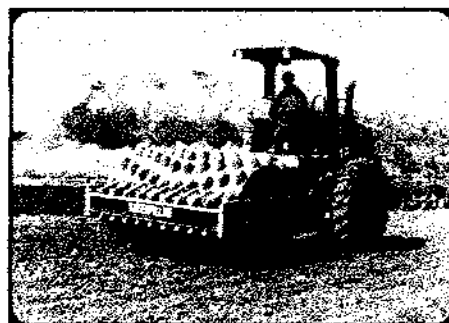
Rolo compactador RV-200 ALMEIDA



Compactador monociclico modelo VM3 de Lebrero



Vibrocompactador TANDEM



Pata de cabra CATERPILLAR CS 533D

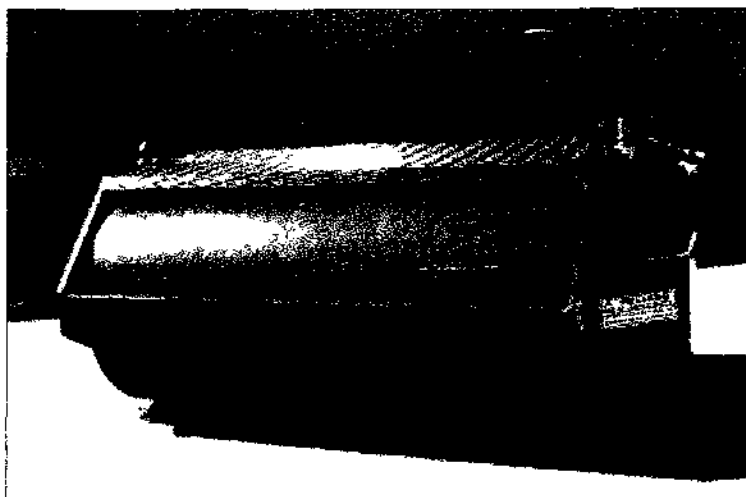


Placa vibratoria



Rodillo compactador

Equipo y maquinaria de compactación



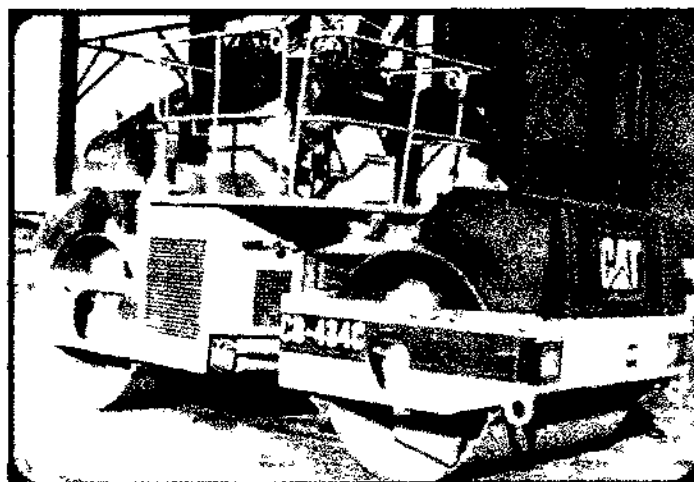
Rulo compactador



Rodillo compactador BW 120 BOMAG



Rodillo compactador BW60 BOMAG



Compactador de asfalto CATERPILLAR CB-434C

Equipo y maquinaria de compactacion

6. Compactación de materiales



La compactación de los suelos es muy antigua, los chinos compactaban sus bordos haciendo pasar rebaños de cabras o personas con varas, los mayas usaban grandes rodillos de piedra para compactar los caminos, la técnica de compactación de materiales se desarrolló en 1950, como medida del control del proceso de compactación de campo en la cimentación de la construcción, durante muchos años, se utilizó exclusivamente con ese propósito. En los últimos 20 años la tecnología de la compactación se ha involucrado en el tratamiento de un amplio rango de problemas de la superficie de las construcciones, como rellenos de mampuestos, cascajo, tierra contaminada, fallas, suelos colapsados, suelos licuables y sitios hundidos.

Estos métodos se han desarrollado por que resuelven las complicaciones que tienen los suelos y el acceso a las fallas; son eficientes por que son estructuras independientes que se pueden conectar y colocar en todo tipo de terrenos. Actualmente se suma a sus ventajas, los más de 25 años de experiencia.

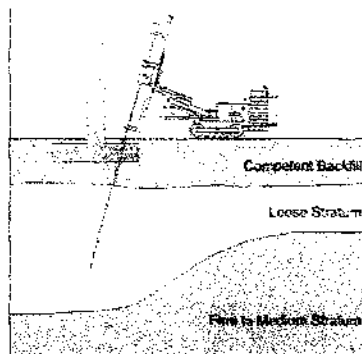
7. Método de inyección

Para la utilización de este método se requiere una investigación geotécnica previa del estado del suelo, para conocer el tipo y la permeabilidad de cada estrato, así como las estructuras vecinas.

Consideraciones geotécnicas.

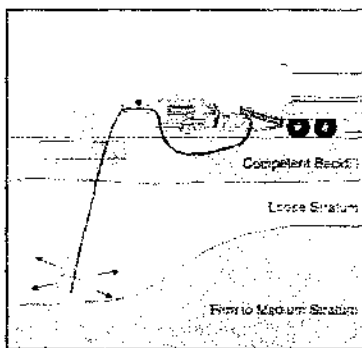
- El material debe de tener la capacidad de expansión horizontal, a pesar de ser colocado de manera vertical.
- Cuando el material de compactación se inyecta en suelos saturados la presión se incrementa, por lo que es importante contemplar que haya poros que la disminuyan.
- Si el suelo no está muy saturado, el material de compactación es muy eficaz, sobre todo si se utiliza arena y arcilla.
- Deben de evadirse los suelos que pierden fuerza mientras los reconstruyen (saturados, finos y arcillas sensibles).
- El mayor desplazamiento ocurre en los estratos de tierra débil. La extracción de muestras confirma que es necesario mejorar la compactación del material.
- Los suelos colapsables se pueden tratar con eficacia, con adición de agua mientras se taladra o se compacta por inyección.
- Los suelos estratificados muy delgados pueden ser difíciles y tener una menor capacidad de mejora.

8. Método para la colocación de la compactación



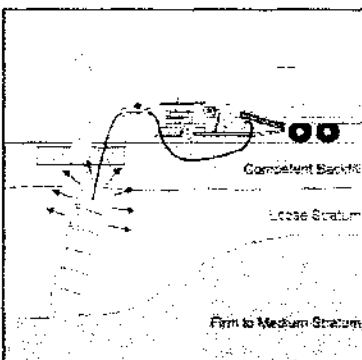
Instalación de la tubería

Taladrar y dirigir hasta llegar al punto.
La localización es muy importante.
Registrar información del suelo, desde la pared donde se compactara.



Iniciación de la mejora.

Hacer los bulbos desde el fondo.
Utilizar un límite de material.
Que sea despacio y uniforme la inyección.



Continuación de la mejora.

En el sitio debe poder ayudarse del control.
El mejoramiento debe ser considerable.
Se tiene que cuantificar e identificar la mejora.
La secuencia o plan de inyección es un punto muy importante.

9. Mejora de condiciones

Para maximizar la densificación se requiere una carga de 1,500libras/pie². Esto se hace con la fuerza de la bomba o con el mismo peso del suelo. Al primer intento de densificación se debe de tomar en cuenta el tamaño del hueco (radio) y la presión del material del suelo. El radio se calcula dividiendo el volumen del material entre la densidad del mismo.

$$\text{Radio del reemplazo (RR)} = \frac{\text{Volumen de material}}{\text{Densidad del material} \sim 5-15\% \text{ (típico).}}$$

La experiencia muestra que los intervalos del tratamiento no deben exceder de 6-10pies. Desde aquí el volumen de compactación se puede calcular. El criterio de máxima presión de prevención de fracturas críticas y de mejoramiento compensa las zonas duras en el área de tratamiento. Normalmente se coloca un bulbo con intervalos de 2-3pies para obtener mejores resultados.

10. *Control de calidad.*

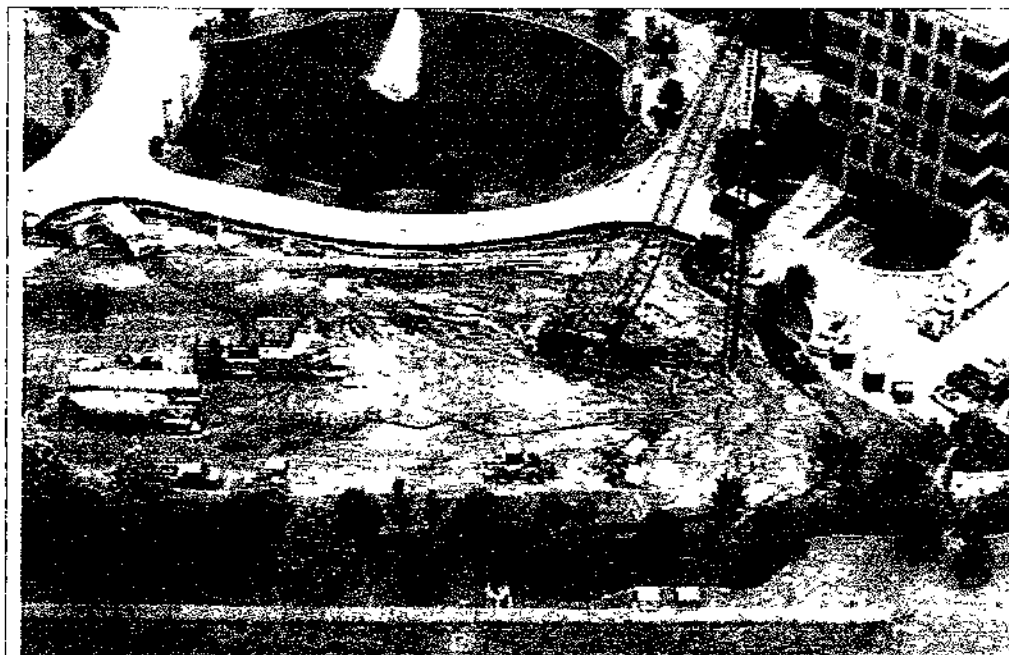
Incluye procedimientos de documentación e inspección del trabajo, para asegurarse que la mezcla sea apropiada para el diseño e inyección, y la verificación de la mejoría del terreno cuando es aplicable. La mejoría del terreno se puede basar en varias pruebas Penetración estándar, Cono penetrometro y otros métodos semejantes. El registro de los datos de parámetros importantes de materiales se ha utilizado en proyectos muy sensibles.

11. *Descripción de casos*

Aplicación de regiones calizas

Es común el tratamiento para prevención de hundimientos potenciales. Usualmente se taladra sobre la piedra caliza para poder localizar y llenar cualquier cavidad, para lograr la mejoría del suelo que se encuentra sobre la superficie rocosa. Se recomienda que se compacten las bóvedas para prevenir probables hundimientos.

Edificio de oficinas Summit (Fase II), Maitland Florida



Es un área que constantemente tiene hundimientos y se quiere hacer un centro comercial. El desarrollo de este proyecto tiene un alto riesgo de daños estructurales por los hundimientos. Para reducir este riesgo en el edificio de oficinas de Summit se usó la compactación de materiales para mejorar el suelo donde se colocaron los pilotes. Se inyectaron un total de 14,350 yardas³ de material de compactación en los 340 puntos de localización a una profundidad de 80-120 pies. Se colocaron trabes entre las columnas para darle mayor soporte. Después de completar el programa hicieron tres pozos para abastecerse de agua.

Aplicación de hundimientos activos

Donde existen hundimientos se tuvo que inyectar en todo el perímetro de la depresión, para fortalecer el hueco de piedra caliza. El programa para el mejoramiento por compactación incluía primero llenar desde la profundidad a la superficie, y se llevó a cabo un tratamiento de densificación del suelo suelto, después se compacto para llegar a la nivelación requerida.

Desarrollo del lago Dalesford en Berwyn Pennsylvania



Una lujosa estructura de cuatro casas, cimentada sobre pilotes de madera mostró peligro estructural en relación con actividades de hundimiento. La investigación del subsuelo reveló que se rellenó 5-30 pies de cascajo sobre el suelo arcilloso. La piedra caliza se encontraba a 30 pies de la superficie. Para realizar la compactación se instalaron 68 tuberías en el interior y debajo de los cajones de cimentación y 90 en el exterior con un promedio de profundidad de 16-21 pies, el material sirvió para estabilizar las pilas que lo sostenía y para llegar a suelo firme, se detuvo con el sistema de tuberías el hundimiento. Gracias a este método se evitó el hundimiento con las casas habitadas.

Aplicacion para nivelación de rellenos

Con frecuencia los rellenos de escombros y otros similares son colocados sin control, lo que da como resultado una matriz porosa que puede deformar y asentar el terreno debido a la migración del suelo en los huecos. La compactacion de materiales aplicada con un patrón regular para cerrar los huecos minimiza este impacto de asentamiento.

Una plaza en Woodway, Houston Texas



A lo largo de los años un edificio de 4 niveles construido en los años 70 ha tenido asentamientos serios en toda la cimentacion. La estructura se construyo sobre un relleno de escombros de 30 pies. Una parte significativa de la rehabilitacion de los suelos fue compactar 33 pies de material de relleno, para elevar la cimentación a su nivel original. Se trabajo en la noche con una bomba, se inyectaron 3,600 yardas³ de material a través de 467 huecos. Los cajones de cimentacion quedaron 8 pulgadas arriba del nivel previo. Además se anclaron los micropilotes en los muros para estabilizar la cimentacion.

Aplicacion a rellenos deficientes

Un programa apropiado de compactación de materiales es necesario y debe de utilizarse para que el suelo soporte a la estructura que fue cimentada donde el relleno fue deficiente. Se nota cuando la estructura sufre deformaciones fuertes por los asentamientos.

Plataformas de la Estación de WMATA (Washington Metro Area Transportation Authority) en Rockville y Landover, Maryland

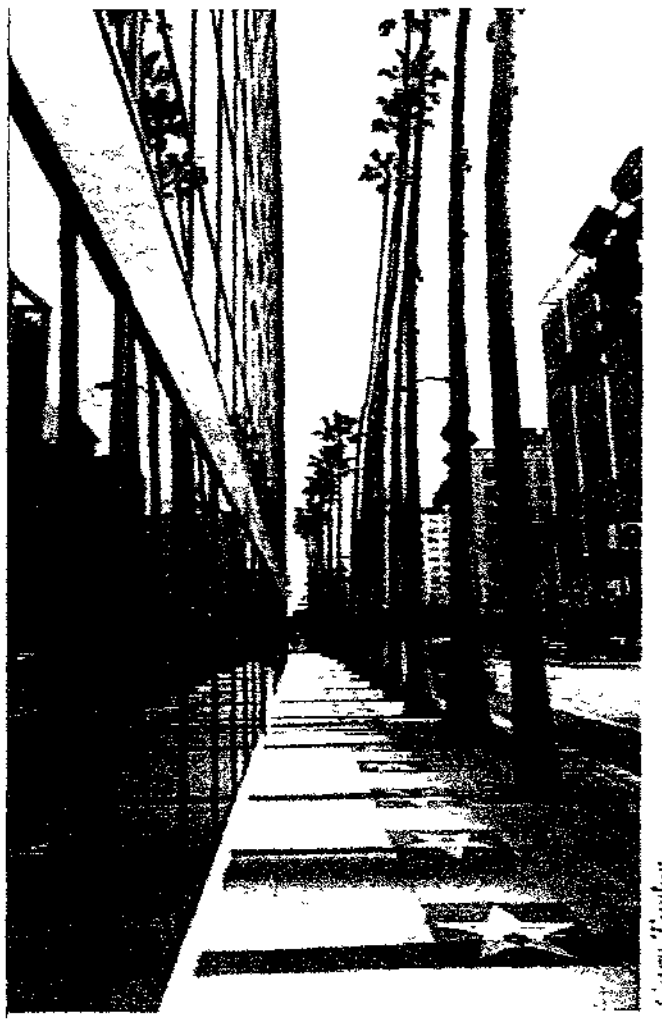


WMATA encontraron un asentamiento de 3 pulgadas en las plataformas de 2 estaciones del metro, debido a que el material de relleno mal graduado fue insuficiente. La consolidación del terreno se hizo bajo las normas del sistema Denver. Se establecieron 150 puntos de lechada en 2 estaciones. Se utilizó un martillo neumático de 2 pulgadas de diámetro y 3 pies de profundidad, a través de las plataformas de concreto, con intervalos de 9-17 pies en las secciones dañadas. Se inyectó un material con bajo revenimiento, fue puesto por una unidad que sigue las normas de calidad, todo esto se hizo en horarios de trabajo del metro y se cerraban las plataformas de 1-4 am.

Aplicación como pre-tratamiento de un suelo suelto

El restablecer rápidamente las condiciones del suelo circundante al terreno de la obra, que ha sido alterado por la propia construcción es muy importante. Esto se logra con el método de compactación de materiales.

Edificio la Reina, Hollywood, California



El edificio es un complejo de oficinas de 6 niveles de cristal y acero, a 80-90 pies de profundidad se hicieron dos túneles gemelos del metro. Para evitar el asentamiento por la perdida del suelo durante perforación del túnel se utilizo la compactación. Mientras la maquina perforaba al túnel se le aplico una lechada para proteger y evitar que se expandiera el suelo y se fueron colocando las 150 tuberías a 90grados y a 5 pies de la corona del túnel, para inyectar el material de compactación. El trazo de los túneles se utilizó con base a planos y fue auxiliado con giroscopios colocados en las tuberías.

Aplicación post-tratamiento de un suelo flojo

La estabilización de las excavaciones de túneles inestables es un resultado frecuente de la alteración de los suelos durante la construcción. Para resolver el problema lo fundamental es conocer el mecanismo que lo generó.

Planta industrial Northwestern, Georgia

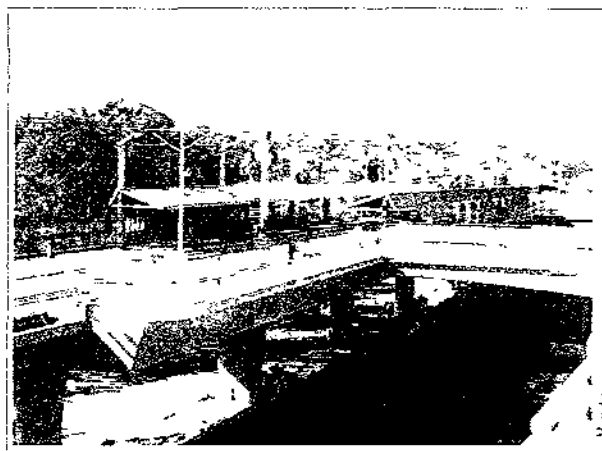


300 pies de la estructura lateral de las vías del tren de una planta industrial sufrieron asentamientos provocados por la combinación de fuertes corrientes, filtraciones de agua y suelo flojo. Con el paso del tiempo los asentamientos se agravaron por el peso y actividad constante del tren, que indujo la fractura de los durmientes. Se utilizó la compactación de los materiales con intervalos de 2-4 pies y profundidad de 18 pies para reforzar y densificar el suelo. Esta operación se sujetó a un cronograma cuidadoso que permitiera el funcionamiento de la planta.

Aplicación a la licuefacción en suelos

Para resolver la licuefacción de los suelos el mejoramiento del suelo consiste en aumentar la densidad y la contención segmentada y el reforzamiento del suelo. Un parámetro importante, en todos los casos, es la permeabilidad del suelo para determinar la tasa de compactación.

Reparación de un segmento del Puente para Trenes Ligeros en Morena, San Diego, California



En el Valle Misión en San Diego California, hay 3 puentes para trenes ligeros soportados por columnas de 9pies de diámetro y 130pies de profundidad. cimentadas sobre arena y grava, que son suelos potencialmente licuables. A pesar de que están contruidos en este tipo de suelo, poseen estabilidad debido a que antes de la construcción se utilizó la compactación del material, alrededor de los 68 cajones de cimentación se colocaron 6 bulbos a una profundidad de 45-115pies para evitar riesgo sísmico.

Aplicación a suelos colapsables

Existen regiones específicas donde el viento y la acumulación del vapor, dan como resultado que el suelo se colapse. El tratamiento de este tipo de suelos es posible por el reforzamiento de la estructura con el compactamiento de granos finos. La cantidad de compactación debe de ser con un volumen mayor que lo normal.

Hampton Inn Albuquerque, Nuevo México



Cinco años después de la construcción, este edificio sufrió un asentamiento de casi 2 5 pulgadas. Los indicadores mostraron el incremento de la humedad en más de 20 pies del suelo. Pruebas de simulación indicaron un posible colapso de 5-7 pulgadas.

La compactación de materiales se llevo a cabo en 150 lugares con profundidades variables en donde el contenido de humedad era más alto, realizando el trabajo con el edificio habitado. El total del material para el proyecto fue del 14 5% del volumen total del suelo de la zona tratada. Las pruebas finales indicaron que la reducción de los asentamientos son menores de 0.0625 pulgadas por año



MÉTODOS PARA CONTRARRESTAR LA LICUACIÓN Y HACER MEJORAMIENTO DE SUELOS GRUESOS

1. Introducción

La licuación es un fenómeno que siempre está presente en los suelos, por eso es importante mencionarlo junto con los métodos que se utilizan y las mejoras logradas.

Una de las cosas más importantes de estos métodos es el mejorar las estructuras existentes sin afectar las cimentaciones.

2. Licuación

Es un fenómeno "hidromecánico", se caracteriza por la pérdida de resistencia del suelo, debida al aumento de la saturación y la presión en el agua de poro. Se presentan dos clases:

- Hidrodinámica por flujo de agua subterránea. Los suelos son sometidos a un aumento de humedad y presión hidráulica. Suele pasar en suelos arenosos como en el fondo marino ó en pantanos con arenas movedizas.
- Sismo-GEO-dinámica por presión sísmica en el agua de poro. Se debe a ondas sísmicas que ocasionan en la superficie del suelo extrusión por compresión y dilatación por tensión.

Los investigadores geotécnicos hicieron pruebas y analizaron los mecanismos que contribuyen al fenómeno de licuación para mejorar el comportamiento de los suelos durante un sismo. Los tipos de falla que ocurren como resultado de la licuación son pérdida de capacidad de carga, asentamientos, propagamiento lateral y fallas de flujo que causan desplazamientos significativos de grandes masas de suelo.

Después de utilizar estos métodos no han sufrido daño alguno las construcciones donde ocurrieron los terremotos de Loma Prieta 1989 (San Francisco), Northridge 1994 (Los Ángeles), Hyogoken-nambu 1995 (Kobe, Japón), Manzanillo 1995 (México).

3. Métodos para contrarrestar la licuación

1. Pilotes de desplazamiento
2. Estabilización por inyecciones
3. Micropilotes
4. Muro de micropilotes en forma de retícula
5. Compactación dinámica
6. Vibratorio



Pilotes de desplazamiento. Se utilizan para lograr la densificación por medio del desplazamiento lateral durante la instalación; se han utilizado de madera, concreto y acero. Otro tipo de desplazamientos es hincar un ademe con punta perdida y rellenarlo de arena.

Estabilización por inyecciones. Se utiliza cemento micro-fino o silicato de sodio y se penetra en los poros del suelo. En general el D_{15} del suelo debe de ser mayor al D_{85} de la mezcla. Es difícil penetrar suelos que tengan de un 15–20 % de finos.

El método consiste en hincar tubería de 5 cm. de diámetro hasta la profundidad deseada y en cuanto se llega al punto óptimo se retrae el ademe 30 cm. y se forma un bulbo de mortero sucesivamente hasta formar un columna. Los puntos se pueden instalar en una cuadrícula de 1.5–2.75 m; cuando los suelos están muy sueltos se puede hacer puntos secundarios y terciarios. Se puede llegar a tener volúmenes de inyección que oscilan entre 5 y 15 % del volumen total del suelo tratado.

- Productos químicos. Esta se hace bajo presión de lechadas de baja viscosidad en suelos granulares, se produce una masa cementada de suelo, con resistencia similar a las areniscas. Se pueden utilizar activamente para prevenir pérdida de soporte en excavaciones y túneles; o para minimizar asentamientos de estructuras y tuberías cercanas a la construcción de excavaciones o túneles.
- Compactación. Utiliza un mortero de cemento y arena de bajo revenimiento, formando bulbos de mortero que desplazan y densifican el suelo. Dada la existencia de equipo compacto, esta técnica es ideal para corregir asentamientos de estructuras existentes causados por suelos o rellenos granulares sueltos o terrenos cársticos.
- Encapsulamiento. ("soilfrac Groutings"). La misma lechada de cemento induce fracturas en la masa del suelo de manera controlada. Se requiere de un monitoreo constante de las presiones y volúmenes inyectados para asegurar que las fracturas inducidas sean locales y que queden totalmente llenas de lechada. El proceso se repite varias veces para lograr reforzar arcillas blandas. Se utiliza un barreno helicoidal hueco para bombear lechadas de cemento y agua, y mezclarlas con el suelo logrando resistencias de aproximadamente 15Kg/cm^2 . Los barrenos tienen 1m de diámetro y alcanzan una profundidad de 35m.
- Para suelos expansivos. Los métodos con cal o potasio son efectivos para contrarrestar hinchamientos en arcillas expansivas. Dichas técnicas son utilizadas para estabilizar cimentaciones, terraplenes y carreteras.
- Materiales. Bajo esta técnica se forman cilindros o paneles de suelo-cemento de baja permeabilidad y geometrías diversas; para remplazar los suelos licuables, problemas de asentamientos o flujo de aguas subterráneas. Se utiliza chorro de agua a presión (500 kg/cm^2) para cortar el suelo y mezclarlo con cemento, con una resistencia de hasta 175 kg/cm^2 . Este método se utiliza en estructuras existentes de difícil acceso.



Micropilotes. Se utilizan en estructuras ya construidas, como en puentes y edificios que han sido modificadas sus estructuras o han sufrido daños por sismos o asentamientos, llegan a tener diámetros de 8-25 cm. y pueden ser instalados en lugares de acceso restringido y en el interior de estructuras. Las cargas se transmiten por fricción y por punta, los valores máximos en las pruebas son de hasta 350 Tm.

Muro de micropilotes en forma de retícula. Sirven para evitar la inclinación de suelos y rocas se empotran en los muros, resisten cargas, trabajan a tensión y a compresión, también en combinación con anclas en los suelos, y sirven para reforzar construcciones como si fueran vigas y quedan enterrados.

Compactación dinámica. Se utiliza para densificar suelos licuables en áreas con accesos libres dejando caer pesos de 10-30 Tm, desde una altura de 15-35 m usando grúas modificadas. La profundidad máxima puede oscilar entre 10-15 m. Para poder obtener valores del 70-80 % aplicando fuerzas de 200-700 Tm/m².

Para calcular la energía total de impacto se utilizan los siguientes parámetros: peso, altura de caída, número de caídas en cada punto y espaciamiento entre puntos de compactación.

Vibratorio. Son los que más se utilizan para prevenir la licuación y mejorar el comportamiento sísmico de los suelos. Los vibradores tienen de 30-45 cm. de diámetro y de 3-5 m de longitud.

Las vibraciones son generadas cerca de la punta del vibrador y son producidas mediante la rotación de pesos excéntricos alrededor de un eje, alimentados por un motor eléctrico o hidráulico. Los vibradores alcanzan los 165 Hp, más de 20 Tm. de fuerza centrífuga y operan con frecuencias de 20-50 Hertz. Para alcanzar mayores longitudes, se le añaden tubos de extensión y han llegado hasta 40 m. Los métodos vibratorios se dividen en:

- Vibro-compactación. Se lleva a cabo en arenas limpias que contienen menos de 10 % de finos. Se hace con el fin de incrementar la densidad del suelo en sitio y se logra por medio de espaciamientos de 2.3-3.5 m. Para la densificación se puede utilizar arena de relleno u otro material. El suelo vibro-compactado presenta asentamientos menores, incremento en la capacidad de carga y disminución del riesgo de licuefacción en áreas sísmicas.
- Vibro-dotación. Es cuando se utiliza en los primeros 10-15 m.
- Vibro-sustitución. Se utiliza en arenas limosas, limos licuables o depósitos de arenas con capas de arcilla intercaladas. Se utiliza grava como material de relleno y se forman columnas que compactan y refuerzan el suelo. Además las columnas actúan como drenes verticales que disipan las presiones de poros causadas por daños estructurales o sísmicos.



MÉTODO DE VIBROCOMPACTACIÓN Y VIBROSUSTITUCIÓN

1. Introducción

A lo largo de este capítulo se hace énfasis en los métodos de vibro-compactación y vibro-sustitución, por que con ellos se han mejorado suelos sin tener que reemplazarlos, se presentan algunos casos de su aplicación.

2. Métodos de vibro-compactación y vibro-sustitución

Se han mejorado constantemente terrenos que presentaron problemas de licuefacción provocados por sismos que afectan extensas fallas geotécnicas en sitios inestables. La forma como se ha solucionado es optimizando los suelos granulares del subsuelo por medio de la densificación. Los beneficios se dividen en 3 categorías: mejoramiento, drenaje y refuerzo.

Mejoramiento de los materiales. La sonda vibratoria aumenta la densidad relativa, la resistencia al cizallamiento o de cortante y la rigidez a una menor compresibilidad en los suelos sueltos y granulares, esto se refleja aumentando el ángulo de fricción interna y una mayor resistencia a la licuefacción. Cuando un suelo tiende a generar presiones excesivas de poro durante la carga no drenada, los suelos sueltos tienden a contraerse en el momento de la cortante; y si la carga es rápida para que ocurra el drenaje, genera presiones de poro excesivas, esta puede llevar a una condición de esfuerzo efectivo cero (cuando $\sigma = u + \delta u$), y resulta pérdida de resistencia y comportamiento tipo fluido, con solamente resistencia residual a la deformación.

Cuando la presión del poro es excesiva en materiales densos recupera su resistencia, en el momento del esfuerzo cortante de los suelos densos, tiende a dilatarse bajo las presiones de agua y detiene deformaciones ulteriores. La extensión del daño debido a licuefacción se relaciona directamente con la contracción o dilatación del suelo, y no se cuantifica solo por la densidad relativa. El comportamiento de los suelos densos durante la carga cíclica no drenada se ha determinado como;

- Licuefacción con potencial de deformación limitado (Seed 1979)
- Movilidad cíclica (Casagrande 1976)
- Ductibilidad (Yoshimi 1990).

Mitchell et al, 1976. Determino que los suelos preparados con la misma densidad relativa, no muestran un comportamiento cíclico similar no drenado, los suelos densificados que se deforman sólo de manera moderada cuando se cizallan, no se licuan ni siquiera cuando el temblor excede al valor diseñado.

Drenaje. Se ha estudiado la acumulación y disipación de la presión poro del agua durante los sismos. Estos son algunos de los investigadores:

- En Seed et al. 1976, mostraron que las arenas y las gravas gruesas disipan las presiones de poro con cierta velocidad, para que no se acumule la presión de poro nociva y no se desarrolle ninguna condición de licuefacción.
- Seed y Booker, 1977, continuaron investigando y desarrollaron curvas de diseño para el espacio de los drenajes de grava en diferentes condiciones de carga sísmica. Para que una columna de grava proporcione drenaje efectivo, la presión del poro excesiva debe ser casi tan rápido como se van generando, solamente así el flujo de agua minimiza y limita el asentamiento de la superficie. Siguiendo el procedimiento:

El potencial de licuefacción de un sitio se evalúa primero sin drenajes.

1. Obteniendo la relación N_{eq}/N_1 .

N_{eq} es el número equivalente de ciclos aplicados por medio del sismo del diseño.

N_1 es el número de ciclos que se necesitan para iniciar la licuefacción.

2. Para un "X" radio de columna de grava, se podrá computar el factor T_{ad} , relacionando la duración del sismo con las propiedades de consolidación de la arena:

$$T_{ad} = (K/\gamma_w) * (t_d/m_{v3} * a^2) \quad (1)$$

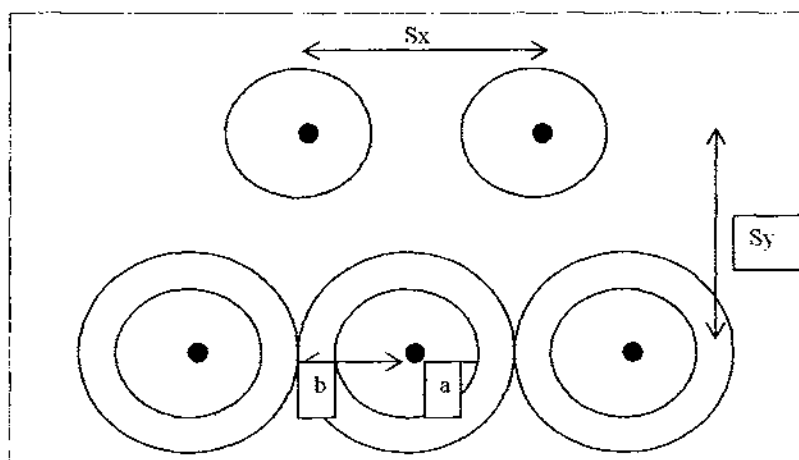
K es la permeabilidad del suelo en dirección horizontal.

γ_w es el peso del agua por unidad.

t_d es la duración del sacudimiento.

m_{v3} es el coeficiente de compresibilidad del suelo.

Espaciamiento efectivo entre las columnas de grava



A= radio de la columna

H= radio de influencia de la columna de grava = $(A/\pi)^{1/2}$

S_x= espaciamiento entre columnas en dirección "x"

S_y= espaciamientos entre columnas en dirección "y"

A_c= área del corte transversal de la columna d grava = πa^2

A= área de influencia de la columna de grava = $(S_x)(S_y)$

Parámetros que necesitan definirse son:

Radio de presión de poro $r_g = u/\sigma'$

u; presión poro

σ' esfuerzo efectivo

Son el esfuerzo efectivo

2b, espacio efectivo entre las columnas de grava.

Cuando el flujo puramente radial, la relación de la presión de poro en toda la arena y el drenaje su función es la siguiente:

Radio a/b, Radio N_{eq}/N_1 , y T_{ad} .

Se necesita una tabla de Relación entre el Máximo Radio de Presión de Poro y los Parámetros del sistema de Drenaje para:

$N_{eq}/N_1=1$, $N_{eq}/N_1=2$, $N_{eq}/N_1=3$

La clave para diseñar descansa en: Especificar el Máximo Radio de Presión de Poro permitido durante el sismo, debe esta por debajo de 0.6 para prevenir grandes asentamientos, después para un temblor y las condiciones de suelo determinadas, se conocerán T_{ad} y N_{eq}/N_1 , y se podrá seleccionar a/b.

Los drenajes pueden actuar de manera satisfactoria siempre y cuando la permeabilidad sea 200 veces mayor que la del suelo circundante. En relación con el material de drenaje, se debe cumplir con dos restricciones:

1. La diferencia en permeabilidad entre el material de drenaje y el suelo circundante debe ser grande, para permitir un gradiente hidráulico.
2. El tamaño de la partícula del material de drenaje debe ser pequeña, para prevenir el taponamiento.

Los requerimientos de graduación de grava que se utilizan con mayor frecuencia se encuentran en Terzaghi y Peck 1967, y Navy Design Manual 7 1974.



Las pruebas de laboratorio hechas por la Konoike Construction Company de Japón, indica que para una carga dinámica se necesitaba un material de drenaje más grueso para que haya permeabilidad efectiva, y un límite inferior restrictivo menor para el taponamiento. Sus lineamientos se resumen como sigue:

$$20D_{s15} < D_{G15} < 9D_{s15} \quad (2)$$

D_s y D_G son el diámetro efectivo del suelo y del relleno respectivamente.

La grava bien graduada y durable con una graduación entre $\frac{3}{8}$ y 2 pulgadas (9.5 y 51 mm.) se recomienda para columnas de piedra, se han utilizado tamaños de hasta 4 pulgadas (100 mm).

Refuerzo. El refuerzo por columnas de grava es posible debido a la mayor rigidez material de la columna. Con 2 materiales en condiciones uniformes de carga y deformación, los esfuerzos se concentran alrededor del material que menos cede, se puede demostrar por consideraciones de equilibrio. La carga llevada por las columnas de grava depende de las características de la misma:

- Rigidez relativa del suelo
- Columna
- Diámetro
- Espaciamiento entre columnas.

La solución que se utiliza para estimar la concentración de carga la elaboro Priebe, 1976. A partir de las consideraciones estáticas, el método se presentó como un medio para la reducción del asentamiento que resulta de la densificación y de la concentración de cargas, por consecuencia la reducción del asentamiento se expresa en términos de una relación de reemplazo de área, o la cantidad relativa de suelo reemplazada por grava:

$$\text{Relación de Reemplazo de Arena} = ac = A/A_c \quad (3)$$

A_c es el área de corte transversal de cada columna de grava.

A es el área de influencia de cada columna.

En este método la columna de grava se divide en elementos discretos y elásticos, cada uno tiene una deformación incremental en el asentamiento. Para una relación de reemplazo del área y de ángulo de fricción de relleno, se obtiene una relación de mejora del asentamiento S_c/S , y esta se relaciona con el asentamiento de la matriz suelo/columna sufra en relación con el asentamiento que el sitio experimente sin tratamiento. Cuando mejora el asentamiento su flexibilidad y simplicidad a las curvas mejora por que éstas no se restringen por el tipo del suelo ni por la magnitud de la carga aplicada, se pueden relacionar con condiciones de suelos y de los asentamientos investigados antes de la mejora del suelo.

En 1989, se presentó un procedimiento para analizar los efectos del refuerzo durante un evento sísmico. Durante el sismo, las columnas de piedra no se licuan debido a su alta permeabilidad, densidad y el suelo no se licua por su densificación y por la capacidad de drenar hacia las columnas. Para que llegara a ocurrir alguna licuefacción, se desarrollaría a partir de los centros del área de la rejilla del tratamiento. El esfuerzo de cortante cíclico que se aplica a estos bolsillos aislados aunque no es el esfuerzo de cortante cíclico total, se aplica al sitio sin procesar.

Cuando una porción de la carga es captada por las columnas de grava debido a su mayor rigidez. (Priebe) sugiere multiplicar la relación de esfuerzo cíclico originalmente estimada para el sitio por el factor de reducción de la razón del esfuerzo cíclico (CSR), así se obtiene un valor aproximado para la reducción de los esfuerzos cíclicos sin obtener de este método una distribución de la carga real durante un sismo. El análisis de licuefacción se lleva a cabo utilizando estas propiedades CSR reducidas y propiedades del suelo post-tratamiento.

Más Casos. Dobson 1987, mostró una lista de proyectos en donde se usaron vibro-sistemas para el diseño sísmico.

- En Yoshimi, 1990 dos casos donde la vibro-compactación tuvo éxito para evitar daños por licuefacción en un tanque petrolero
- En un edificio de concreto reforzado de cuatro niveles durante el sismo de Nigata de 1964 ($M=7.3$ a max local = 0.16g).
- Con el método de vibro-reemplazo las columnas de grava desempeñaron con éxito su trabajo en el sismo de Santa Bárbara de 1978 ($M=5.1$, a max local 0.3g).
- Una planta de tratamiento de aguas negras se diseñaron columnas de grava con una carga de 30Tm por columna para prevenir licuefacción y deformaciones inducidas por sismos (Mitchell y Huber, 1985).

3. Vibro-compactación

Se desarrollo en Alemania en 1930, incluye el uso de vibradores pozo abajo con un rango desde 12-18 pulgadas (30-40 cm) de diámetro y 10-16 pies (3-5 m) de largo. Se monta un juego de pesos rotatorios excéntricos metidos dentro del tubo sobre un eje vertical. Impulsados por un motor eléctrico, la acción rotatoria genera vibraciones que se propagan y logran densidades relativas de 64-85 % en los depósitos granulares. El vibrador se adhiere a tubos de extensión hasta llegar a la profundidad requerida de uso. Este se coloca en una grúa estándar o hidráulica. La grúa se ubica en un lugar escogido previamente para la densificación. La acción vibratoria es acompañada por chorros de agua que sirven para romper los contactos de fricción en los suelos granulares y los distribuye en configuraciones más densas. Se hace un relleno con arena dentro de la cavidad y se compacta de 1-4 pies (0.3-1 m.) y conforme se compacta se va sacando. El diámetro de influencia del vibrador es de 14 pies (4.25 m.), se ha logrado la densificación en profundidades de hasta 115 pies (35 m). Los espaciamientos típicamente varían desde 6-9 pies (1.8-2.7 m) en patrones cuadrados o triangulares.

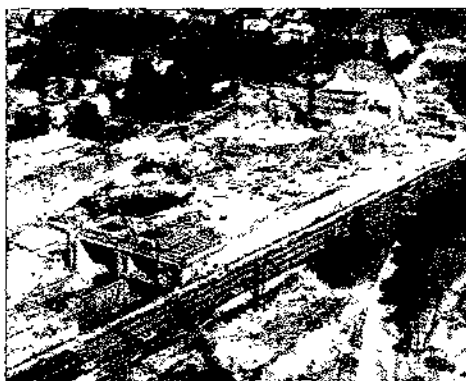
Se ha utilizado con éxito en sitios de arenas sueltas y limpias, que tienen menos de 10-20 % de finos. El proceso se ha utilizado en Estados Unidos, Alemania y el Medio Oriente.

4. *Vibro-sustitución*

La sustitución de grava o piedra triturada como material de relleno en los años 1960 llevó a la formación de columnas de grava y al proceso que se conoce ahora como vibro-reemplazo. Permite el tratamiento de una variedad más amplia de suelos, incluyendo los limos y las arcillas, y forma un elemento de refuerzo de baja compresibilidad y mayor fuerza de cortante o cizallamiento.

5. *Descripción de casos de los vibro-sistemas*

Estructura de la carpeta del corredor de la carretera I-90
(Montaña Baker en Seattle, WA)



En el corredor interestatal I-90 que soporta el paso de 5000 vehículos diarios, se hizo un programa de mejoramiento y expansión cuidando a la comunidad residente que lo rodea. Para construirlo sobre el talud de la cima, se requirió una sólida estructura de pilotes que soporta un muro que retiene a un terraplén. En las unidad 9 y 10 (de 2600 pies), se hizo un túnel de 300 pies de largo por 30 de ancho se construyó en un terraplén existente.

En esta obra se necesitaba tener un soporte de 6 KSF con un relleno de tierra, pero las observaciones Geotécnicas que realizaron los Ingenieros del Departamento de Transportación de Washington mostraron que había pérdida de densidad. El problema se resolvió agregando grava, cuando se vibro-compacto, se compactaron 540 puntos con un vibrador de sólidos de 165 Hp, considerando que es una zona glacial en el perímetro se compactaron puntos de 15-20 pies, el intervalo se hizo con una malla de 6 pies por las limitaciones que eran de 0.75 pulgadas. Para las prueba de coloco 1 plancha de 6 x 6 pies sobre 2 puntos incrementando la carga a 216 Kips. La prueba indicó que le promedio total de cimentación, debajo de la carga aplicada, fue de 0.5 pulgadas aprox. Con una deformación plástica permanente de 0.25 pulgadas. Establecimiento de control y prevención de la licuefacción.

Complejo Teatro de United Artist



Se construyó un Teatro con 10 auditorios en Emeryville, California sobre un terreno pantanoso que fue rellenado de barro con arena en 1900 para quedar sobre el nivel del agua, el material de relleno tenía un espesor de 14-17 pies asentando en suelo firme. Geomatrix Consultants San Francisco, CA. realizó un estudio geotécnico y demostró que el material de relleno tenía una fuerza y densidad variable para dar el soporte. Se propuso colocar una zapata corrida a una profundidad de 27 pies soportando un muro de contención para dar uniformidad al suelo.

La alternativa que se utilizó fue fortalecer el suelo vibro-compactando con columnas de grava, con 2 equipos par cumplir con los tiempos del programa y se colocaron 334 columnas con una separación de 7 pies para soportar la zapata corrida que tenía una profundidad de 17 pies. Durante las primeras etapas de programa de mejoramiento, una columna de grava se probó con una carga del 200 % de lo calculado y tuvo un asentamiento de menos de 0.125 pulgadas que estaba dentro de lo diseñado.

Escuela de monte Río (Monte Río, CA)



El 2 de febrero de 1986, día de San Valentín una tormenta desbordó el río Ruso y la Escuela de Monte Río, CA tuvo daños severos. Después de este incidente se planteó reubicar la escuela en un lugar más alto, Herart Sciences Rohnert, CA realizó estudios Geotécnicos del terreno y demostró que tenía altas probabilidades de deslizamientos, en el caso de temblores, ya que la falla de San Andrés se encontraba a 7.4 millas y tenía una licuefacción de 25 pies. Por otra parte en 1906, en San Francisco se registró un temblor de 8.3 grados Richter y tuvo movimientos telúricos de 0.6° y trepidatorios de 0.4° durante 10 segundos.

El método que se usó para controlar la licuefacción potencial, fue el de vibro-reemplazo, se colocaron columnas de grava en seco, en forma ascendente. GKN hayward Baker instaló un total de 447 columnas, de 25 pies cubriendo el cimiento del edificio. Para permitir la disipación del exceso de presión de un evento sísmico mayor, el sistema densificó la pérdida de arena y del sedimento, haciendo un drenaje que mejorara la cohesión entre arena y barro.

Proyecto del Río San Diego.



En la primera fase del proyecto Mejoramiento de la rivera en Ciudad de San Diego CA, Se utilizó el vibro-reemplazo para densificar, reforzar suelos sueltos y soportar una coladera sanitaria de 78 pulgadas de diámetro. Las pruebas mostraban que se necesitaba una sección de 1200 pies x 50 pies de ancho, se necesitaba aumentar la densidad para alcanzar un 90 % que era lo que pedía el proyecto modificado. El constructor eligió reemplazar el suelo suelto por un relleno de arena fina, cuando se colocó la arena, se hizo la prueba de cono de penetrabilidad y se detectó que en zonas debajo del nivel de agua no se llegaba a la densidad requerida



Se requería de una coladera nueva y tomar medidas necesarias para el personal, equipo y maquinaria por el talud existente el proyecto geotécnico de Woodward Clyde Consultants WWC recomendaba contratar a GKN HAYWARD BAKER para utilizar el método de vibro-compactación, se utilizaron vibradores profundos para compactar la arena, los 100 tsf es el mínimo de resistencia del cono del penetrómetro en los criterios establecidos por la WWC, llamados de después del tratamiento deben de alcanzar las densidades equivalentes al 90 %.

El método de vibro-compactación no fue suficiente así que se tomaron muestras, y se advirtió que el suelo era salado y lodoso, se tenía que mejorar el ángulo interno de fricción a 34° (arena). Se colocaron columnas de grava a lo largo de líneas de 20 pies de profundidad con un diámetro variable a la fuerza inicial del suelo.

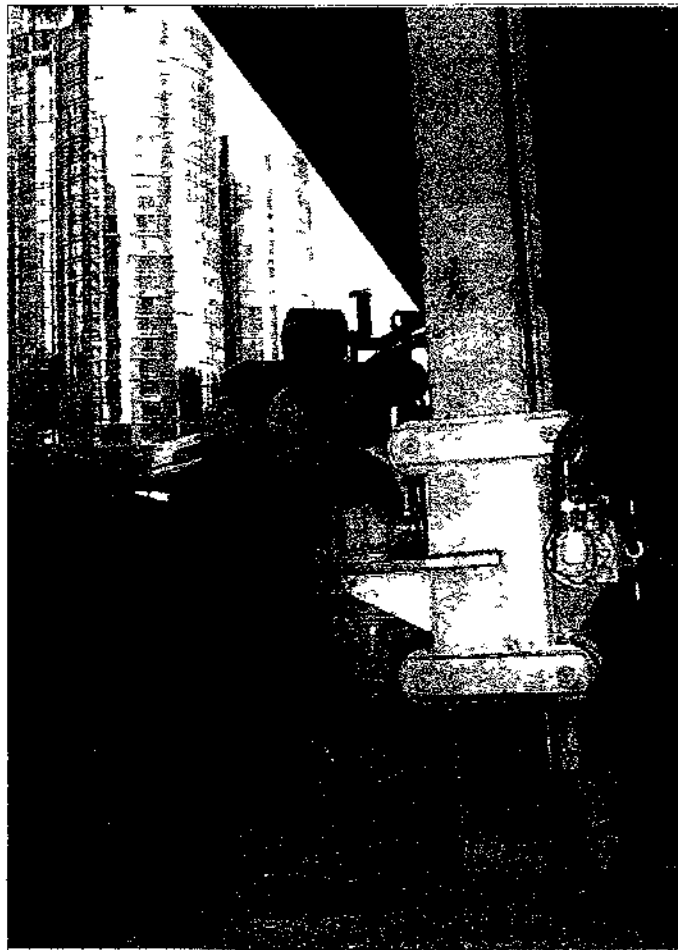
La prueba del penetrómetro de cono mostró que la mínima resistencia es de 100 tsf y fue alcanzada con el uso de columnas de piedra, con excepción de las zonas que tenían radio de fricción mayores a 1.00. Los resultados muestran que la estabilidad y la cimentación del talud son equivalentes al diseño de la arena compactada.

MÉTODOS DE MEJORAMIENTO DE SUELOS

1. Introducción

En este capítulo se habla de diferentes métodos, como micropilotes, inyección de materiales, columnas de concreto vibradas y vibro-sistemas. Se mencionan la manera en la que se pueden utilizar, en que lugares son recomendables, los tipos de carga que se pueden diseñar, y los diferentes tipos dentro de cada método, además de algunos casos que lo muestran.

2. Micropilotes




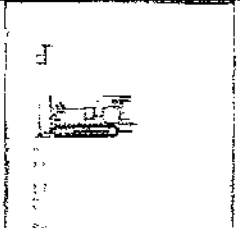
Proyecto de soporte desde el subsuelo. Pueden instalarse en casi cualquier tipo de suelo sus diseños van de 3-200TM se pueden utilizar en varias ocasiones, sobre todo en poco espacio para maniobrar. También se les nombran

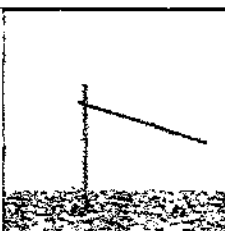
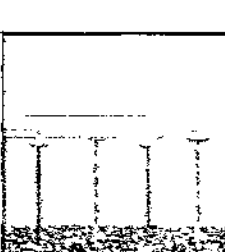
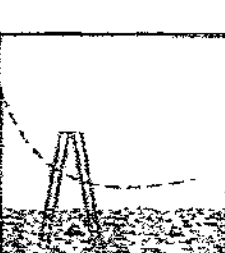
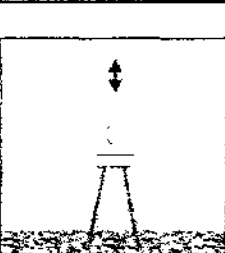
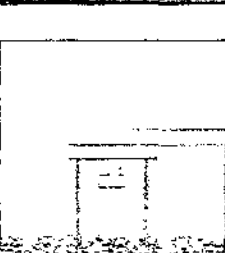
- Mini pilotes
- Alfiler
- Aguja o de raíz

Se utilizan para modificar suelos, en terrenos poco accesibles; en espacios residenciales, estructuras de carácter histórico, mejoramiento de plantas manufactureras y uso en zonas sísmica. Existen diferentes tipos de micropilotes para los diferentes proyectos:

- **Fricción.** Se usan en materiales sueltos que requieren un soporte de 3-10Tm.
- **Compactación.** Llegan a soportar cargas de 15-75Tm con poca profundidad, normalmente en suelos arenosos y sueltos. La base geométrica expandida y densificación del suelo proveen una mejora en la capacidad de carga.
- **Inyección.** Es ideal para todo tipo de suelos donde el mejoramiento del suelo no se puede obtener usando simple presión. Soporta cargas de entre 50-150Tm.
- **Poste.** Se usa en todo tipo de suelos y mejora la capacidad de fricción del pilote.
- **Presión.** Soporta grandes cargas (25-70Tm), se usa en varios tipo (arenosos, arcillosos, o rocosos), la capacidad de fricción del pilote se ve mejorada gracias a la densificación y permeabilidad del suelo que le rodea o de las rocas que lo consoliden.
- **Taladrado en el suelo.** Es de diámetro pequeño, se recomienda en suelos rocosos o no estratificados. Soporta cargas de entre 50 y más de 200Tm.

3. Soluciones con materiales no resistentes

		Uso en áreas reducidas. Pueden usarse en lugares reducidos donde hay poco espacio de maniobra sin alterar considerablemente las operaciones normales del lugar.
		Hundimiento estructural. Se usan sin mayor problema aun cuando el suelo presenta características que nos llevaria a pensar en un eventual hundimiento de la estructura.

		Excavación. Son usados como muro de contención para excavaciones sobre todo en sótanos o áreas confinadas.
		Resistencia al alzamiento dinámico de las cargas. Soportan cargas cuando incrementan las fricciones y proporciona la resistencia requerida a las cargas por tensión
		Estabilizaciones inclinadas Se usan como anclas en taludes en donde haya riesgo de deslave.
		Apuntalamiento. Pueden apuntalarse para estabilizar los cimientos en futuras excavaciones.
		Retrospección sísmica. Transfieren cargas a través de suelos licuables hasta suelos más sólidos para alcanzar diseños óptimos.

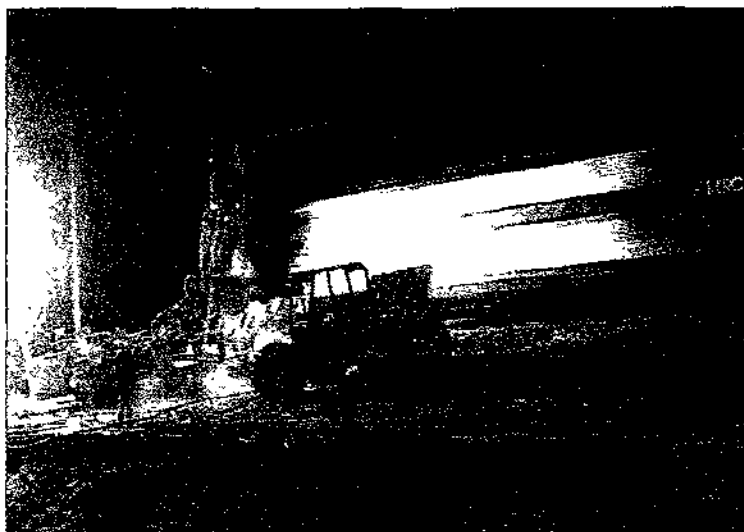
4. Descripción de casos

Parque Dorney Rollercoaster Allentown, Pennsylvania



Como parte del mantenimiento al parque en una parte se llevo a cabo el mantenimiento al parque, en la sección de la montaña rusa, que pasa por un lago, se colocaron, con el sistema de micropilote 14 columnas de diámetro pequeño para soportar 15 Tm. para incrementar su seguridad y estabilidad. Se terminó el proyecto en una semana lo que permitió una apertura a tiempo del complejo.

Estación de Tren Odenton. Odenton, Maryland.



Se construyó una plataforma en Odenton y se colocaron micropilotes con un soporte de 35 Tm. Los problemas que tenían son espacio reducido de maniobra, cables de alta tensión a pocos metros de la obra, y la cercanía con vías en operación. La mayoría de la obra se llevo a cabo en las noches, en algunas ocasiones se trabajo con las vías en uso. Esto necesitaba movimiento de personal y maquinaria casi inmediato.

Hotel 5 estrellas en las islas hawaianas



El hotel sufrió un daño en varias estructuras, terrazas y entradas por un desnivel de 3 pulgadas. Haward Baker diseñó un proyecto en donde durante la obra el hotel no tuvo que suspender sus actividades, contaba en instalar 935 micropilotes (galvanizados) tenían profundidades de 15-35 pies en rocas, se probaron para soportar 24 Tm. Entre piso y piso y 40 Tm. para los cimientos.

Aeropuerto Internacional de Orlando. Orlando, Florida.



El aeropuerto estando en proceso de construcción de la estructura se instalaron micropilotes de 6 pulgadas de diámetro y 26 pies de profundidad y un muro para soportarla, mientras se construyeron túneles peatonales entre los estacionamientos y las oficinas de renta.

Viaducto de la calle 4 de Los Angeles, California



Como medida de seguridad ante un sismo en los Angeles se mejoraron algunas estructuras, dentro del programa se encontraba el viaducto. Se instalaron 160 micropilotes de 7 pulgadas de diámetro con una carga máxima de 225 Tm a una profundidad de 60 pies, tenían que soportar movimientos de compresión y tensión. Después de hacer una prueba exigencias sísmicas se utilizaron. Y se unieron a los pilotes existentes.

ITT Rayonier Fábrica de Papel. Playa Fernandina, Florida



Al paso del tiempo, la estructura que soportaba la maquinaria en Rayonier comenzó a hundirse. Hayward Baker elaboró un proyecto que consistía en construir túneles por debajo de la estructura para que posteriormente se instalaran 36 micropilotes a presión y fueran conectados a los que ya existían.

5. Inyección de materiales



Se usa para crear formaciones cementadas de suelo como medio alternativo a los métodos tradicionales de vaciado, trincheras, micropilotes y/o el uso de aire a presión en la perforación de túneles. Esta técnica tiene la característica de poder usarse en lugares de difícil acceso y maniobra, es uno de los métodos más rápidos, seguros y pueden usarse sin que dejen de trabajar los lugares en reparación. Las aplicaciones de este sistema caen dentro de tres categorías:

- Soporte para excavación.
- Estabilización temporal o permanente de suelo blando.
- Para controlar contaminación de mantos acuíferos subterráneos.

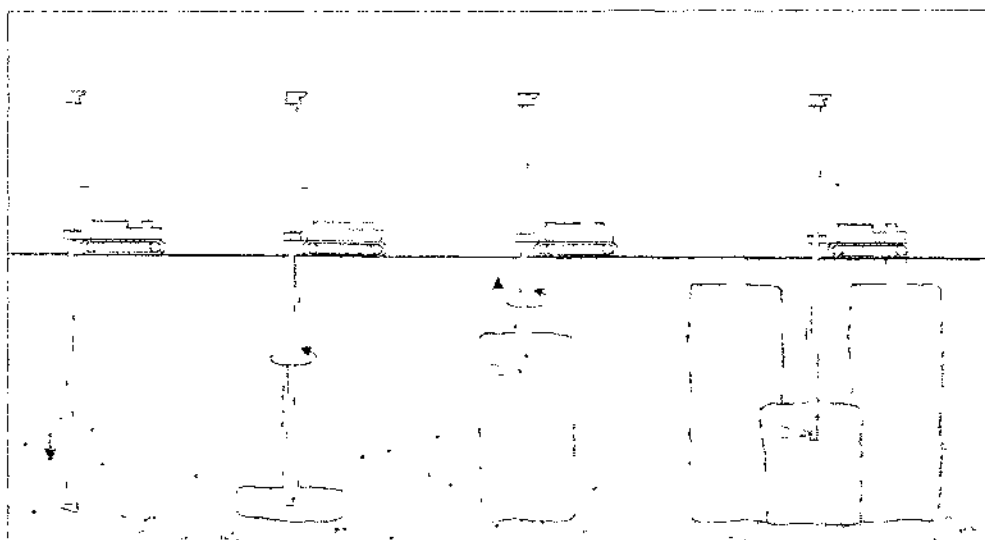
Sistemas y aplicaciones:

La selección del método más apropiado para el suelo depende de la aplicación, las características físicas y lo que requiera. Existen tres métodos tradicionales.

- A una varilla (S). La mezcla se inyecta a una velocidad de 650 pies/s, la presión erosiona el suelo y permite la salida de la mezcla. Se recomienda usarse en:
 - Suelos arenosos el diámetro de las columnas varia de 2-4 pies.
 - Suelos blandos un diámetro mayor puede ser utilizado.
 - Es menos eficiente en suelos cohesivos.
- Doble varilla (D). Permite la inyección de la mezcla y al mismo tiempo de aire. El aire incrementa la erosión del suelo y la mezcla puede introducirse satisfactoriamente. Se recomienda usarse en:
 - Se usan diámetros de 3 pies en suelos densos
 - De 5 pies en suelos blandos
 - Es más efectivo que el primero en suelos cohesivos.
- Triple varilla (T).- Se inyecta la mezcla con aire y además se inyecta agua, el agua y aire se inyectan en la misma salida y la mezcla en otra. La mezcla se inyecta con una velocidad menor esto permite que la erosión se mejore y el llenado sea mayor. Los diámetros varían de 3-4.5 pies. Es el más eficiente en suelos cohesivos.

6. El procedimiento de la inyección de materiales

El equipo se diseño para ser altamente maniobrable y capaz de lograr resultados desde la superficie, puede utilizarse para hacer perforaciones con un diámetro de 6 pulgadas. Este procedimiento es ascendente, el diseño se basa en la profundidad y en la velocidad de inyección (El material se inyecta con una velocidad constante, rotatoria y uniforme para cortar y reemplazar los fluidos haciendo columnas geométricas de suelo cemento) Así se simplifican los requerimientos de seguridad, mantenimiento, y se logra una integración estructural.

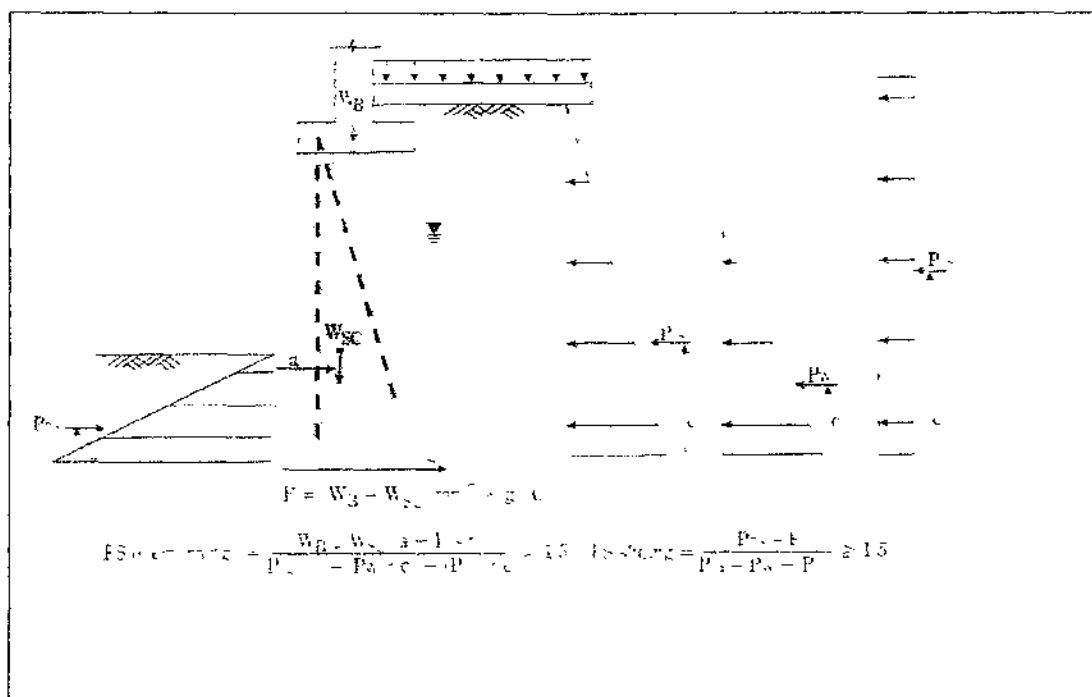


Consideraciones geotécnicas, estructurales de la inyección de materiales

Es efectivo en un amplio rango de tipos de suelo, como limos y arcillas. Como está basado en erosionar los suelos, la cohesión de los mismos es fundamental, además se debe considerar el tipo y relación de material que se utilizara.




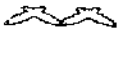


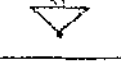
7. Diseño y control de calidad de la inyección de los materiales

El diseño de este sistema se puede usar en suelos mixtos, consiste en desarrollar una masa de suelo-cemento que resista los deslaves y las sobrecargas sin que la estructura se dañe. Se debe tomar en cuenta que el suelo soporte las cargas diseñadas donde se le aplica al suelo-cemento un factor de seguridad de 3.



Diseño y parámetros de operación del suelo-cemento. El tratamiento se puede realizar a cualquier profundidad o estrato y la masa del suelo-cemento se determina de acuerdo a la aplicación y variedad de columnas, aire, agua, flujo de inyección y presión junto con el monitoreo de rotación y velocidad se controlan automáticamente durante la construcción. La reducción del flujo y el decremento de la velocidad producen menor tamaño de la masa de suelo-cemento. El diámetro se determina por la durabilidad y tipo de suelo de cada estrato (es necesario tener datos muy específicos).

Geometría de los suelos-cementos

	      		<p>Columna completa</p> <p>Media columna</p> <p>Columna parcial</p> <p>Muro simple</p> <p>Muro doble</p> <p>Sistema de lamina para sellar</p>
--	---	--	---

Evaluación de Calidad. El control de calidad y la supervisión son componentes críticos para el éxito de un programa. Es necesario tener las características del suelo, suelo cemento y del diseño y deben controlar del material de inyección; volumen, material de desecho y aplicado.

Control de calidad. Son muestras de laboratorio para probar la fuerza de compresión y un control de calidad durante la producción del material, además de un monitoreo estructural y de permeabilidad. La inyección de material controlada genera material de desecho y se puede calcular por el volumen de inyección, el desecho contiene cemento y se puede endurecer con el tiempo. Tiene 12 horas para fraguar.

Fases de inspección del control de calidad	
Perforación	Localización, ángulo, profundidad y métodos de repetición
Preparación	De propiedades físicas y químicas del material a inyectar
Inyección	<p>Parámetros de perforación (Presión, velocidad y tasa de rotación)</p> <p>Parámetros de inyección (presión y el flujo de los componentes)</p>
Documentación	<p>Cada elemento construido.</p> <p>Los tiempos</p> <p>La correlación del comportamiento de las muestras.</p>
Muestreo y pruebas	Obtener muestras representativas para pruebas externas.

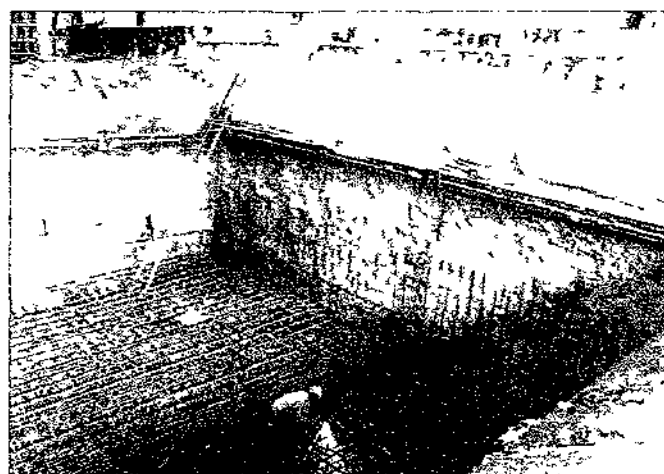
8. Descripción de casos

Respiradero del drenaje en Nimitz, Honolulu, Hawai



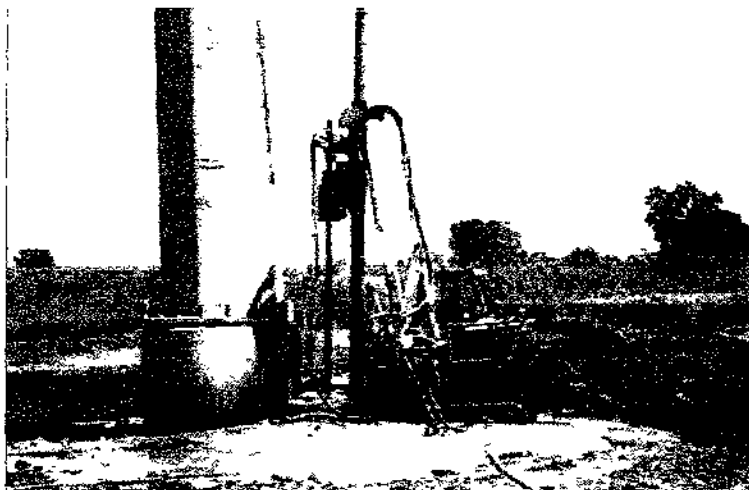
Se utilizó la inyección para poder hacer un respiradero y minimizar los asentamientos post-construcción en un suelo blando, se hicieron dos filas de columnas de 4 pies sobre roca a lo largo de 2800 pies de un estrecho túnel para encapsularlo, la masa del suelo-cemento se adicionó para dar estabilidad al micro-túnel cuando se abriera

Comida Kraft en Dover, Delaware



Se construyó un túnel a 20 pies de profundidad por donde pasa un vagón de descarga, al mismo nivel de la cimentación, se inyectó para dar soporte a la cimentación, apuntalamiento y filtraciones de agua. Se construyó un muro perimetral de 20 pies de profundidad, se inyectaron columnas de 6 pies y las columnas colocadas en el muro soportan el túnel y las columnas de las esquinas apuntalaban los cimientos adyacentes

Torres de transmisión en Dallas, Texas



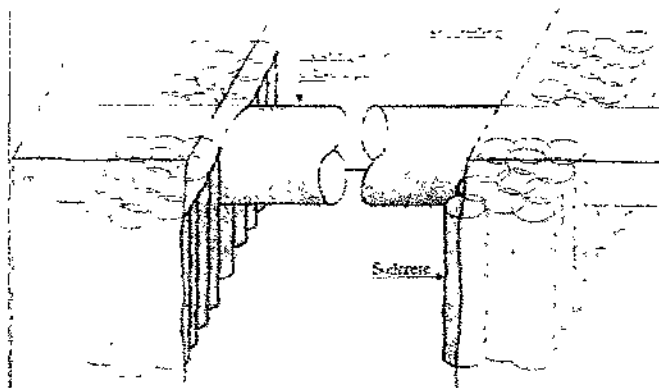
En cuatro torres de alta tensión de 180 pies se comenzó a hundir una de las esquinas de cada torre, ya que la cimentación no era lo suficientemente fuerte para sostenerlas, para contrarrestar el daño se inyectó el material. Se hicieron 12 columnas de 4 pies en cada una de las torres para fortalecer el suelo limoso.

Hospital general en El centro de Passaic, Passaic Nueva Jersey.



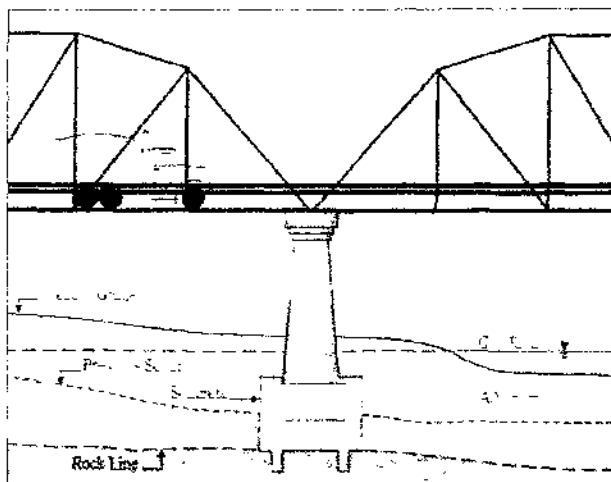
Se hizo una sobre-excavación con un sistema de cajones de cimentación en una estructura de 5 niveles, para construir un anexo de 3 niveles se inyectó para fortalecer la cimentación. Se realizó una excavación en la parte más alta de la cimentación y se colocaron columnas y muros de cimentación de 3.5 pies de diámetro interconectadas con muro de suelo-cemento, se alzó para dar soporte a las excavaciones profundas en suelo arenoso, el cimientto existente era insignificante.

Planta de tratamiento de aguas negras en Virginia Key, Florida.



Se inyectaron materiales para apuntalar la excavación de apoyo y el control del nivel freático en la tubería de una planta de tratamiento de aguas negras, para incorporar un sistema de alivio del incremento de la corriente provocada por tormentas. Al final de cada área de excavación, se inyectó el material en columnas de 8.5 pies de diámetro, por debajo y a los lados de la tubería. Se perforó de manera diagonal para la colocación del material, sirvió como sello para encapsular la tubería e impedir la filtración, apuntalando a lo ancho de la excavación y conectando a los lados con las zonas de inyección de material. La seguridad de la operación se mantuvo a lo largo de todo el desarrollo de la obra.

El puente de la autopista 80 en Maricopa, Arizona.



Durante las lluvias de invierno en el desierto de Arizona, falló la compuerta de la presa Gillespie, derramando 150,000 pies³/segundo sobre el río Gila, 100 yardas río abajo la corriente ocasiono daños en la parte Este de la estructura. Se recomendó la inyección para proteger y apuntalar la cimentación de las columnas del puente llegando a suelo firme. Se inyectaron columnas de suelo-cemento de suficiente profundidad interconectadas en las pilas del puente para proteger de daños posteriores.



9. Columnas de concreto vibradas

Este sistema se utilizó en Alemania e Inglaterra, en 1976. Es un avance tecnológico, ya que es una construcción de columnas secas de concreto en suelos acuosos, orgánicos y poco cohesivos en los que las técnicas convencionales no son apropiadas. Puede sustituir a las pilas y aparte mejorar el suelo por el sistema de vibración.

Funcionamiento. Se necesita un alimentador eléctrico diseñado para que penetre hasta la profundidad que se va a compactar y mejorar el suelo. Las lecturas de amperes informan la calidad y el tipo de subsuelo. Estas son las etapas:

1. El vibrador penetra y desplaza el subsuelo orgánico y poco cohesivo, mientras densifica las capas granulares.
2. Se procede a introducir concreto de alta calidad:
 - El proceso de construcción comienza con la formación de tipo bulboide en la base de la columna.
 - Posteriormente se retira el vibrador, y se vacía el concreto de manera continua hasta llegar a la superficie, sin descuidar la presión de compactación. La vibración hace que este proceso tenga una excelente penetración del concreto en los poros del subsuelo
3. En la superficie la columna termina esparciendo el concreto.

En el proceso se utiliza una fuerza de 3000-4000 psi. La máxima carga que soporta cada columna es de 150 Tm. Y cargas extras de 40-75 Tm. de equipo y maquinaria durante la construcción. Alcanza profundidades de 60 pies, el proceso es muy silencioso, y con una mínima vibración en la superficie, esto permite que se pueda trabajar alrededor de manera segura.

Estas columnas pueden soportar estructuras de poca altura y de peso considerable, reemplaza sistemas convencionales de pilas. Otras aplicaciones pueden ser en carreteras, vías férreas, bordes de presas y en general en cualquier construcción en donde se presente un subsuelo blando y sin cohesión y en donde un análisis indique que el mejoramiento es necesario.

Monitoreo. Puede llevarse a cabo desde una cabina en la que se instale un aparato que indique la secuencia de la construcción, así como la relación entre el volumen de concreto, la presión de vaciado y la fuerza del vibrador, y el tiempo y profundidad. Una impresión con todos estos detalles proporciona un récord de las diferentes fases de la construcción.

Reforzamiento. Casi nunca se refuerzan las columnas; sin embargo, se pueden instalar barras o con algún marco para mejorarla.

10. Vibro-compactación y Vibro-reemplazo

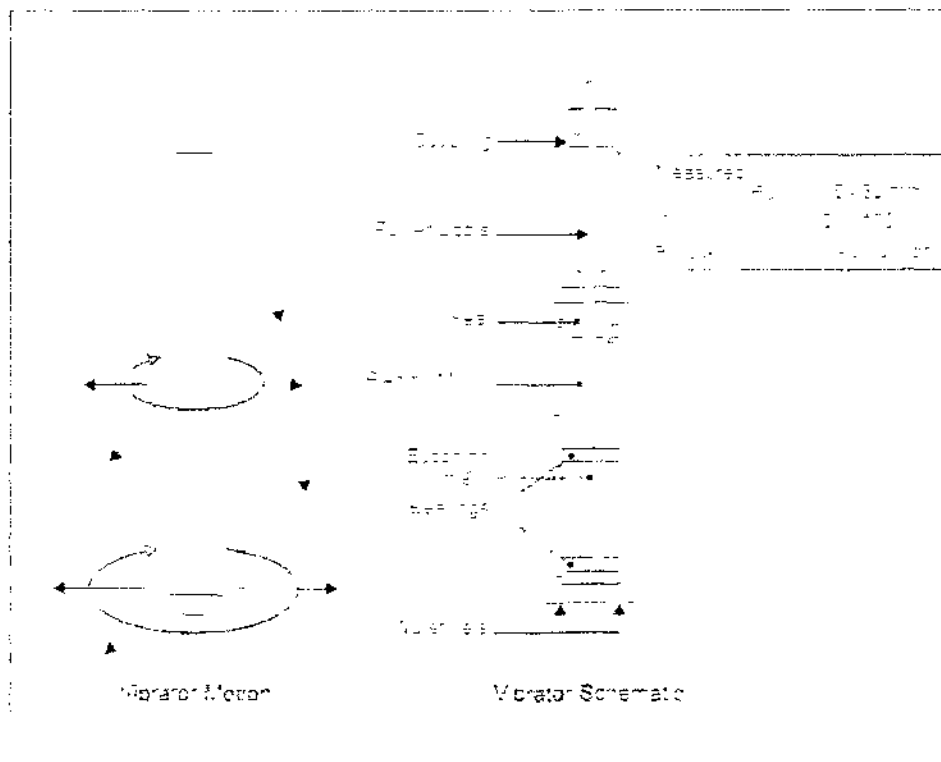
Los sistemas de vibración se usan para resolver problemas, estos pueden ser; estáticos, dinámicos y sísmicos. Existen dos técnicas principales de vibro compactación:

1. Vibro-compactación. Se usa para densificar suelos arenosos.
2. Vibro-reemplazo. En aquellos suelos en donde además es necesario reemplazar el suelo arenoso por columnas de piedra.

Estas técnicas se usan generalmente para estructuras que van desde oficinas, escuelas y hospitales, hasta puentes, presas y plantas de tratamiento de agua.

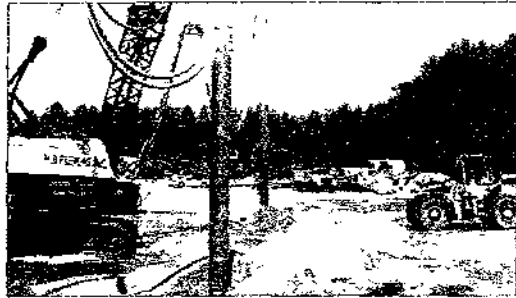
El vibrador. Penetra el subsuelo por medio de movimientos giratorios que en ocasiones son acompañados por inyección de aire o agua.

- Vibraciones horizontales son generadas mediante un motor rotatorio con una fuerza de 200 hp.
- Movimiento del vibrador es radial en el plano horizontal, creando una fuerza dinámica en dirección hacia donde el suelo es menos denso.
- Control de frecuencia, lo que permite emplear la energía de vibración de manera más efectiva logrando la mayor compactación posible.

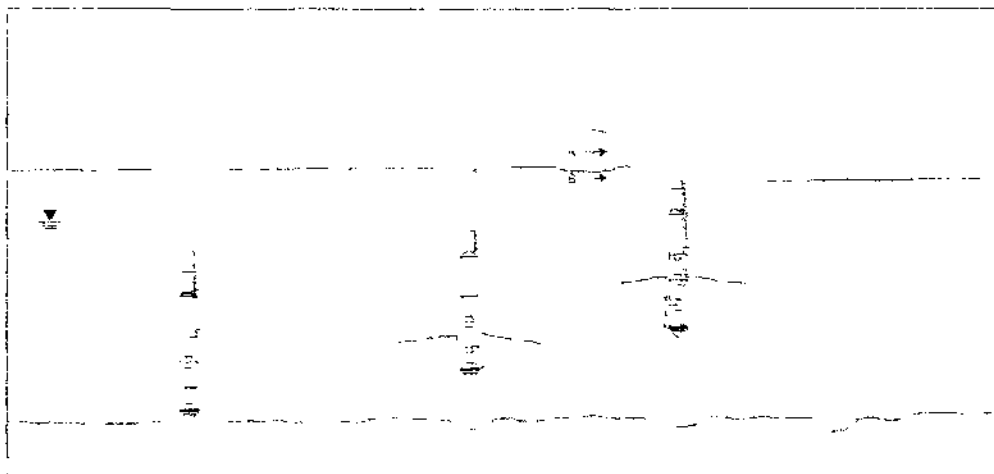


Vibro Compactación. Se usa para densificar suelos que carecen de cohesión. La acción del vibrador permite que las partículas de suelo se muevan y adquieran una configuración mucho más densa, alcanzando una densificación de 70-85 %

Cuando el vibrador penetra a la distancia adecuada se añade un poco de arena extra para compensar la reducción en volumen, así se mantiene a la misma altura. Sin embargo, puede ser que el reducir la altura en general resulta una buena alternativa. Normalmente se alcanzan profundidades de 15-50 pies, y han llegado hasta los 120 pies.



- **Penetración.** El vibrador penetra y es manipulado de arriba abajo agitando el suelo. Generalmente se usa agua y a medida que se va alcanzando la profundidad deseada se va disminuyendo el suministro de esta misma.
- **Compactación.** Bajo la acción de fuerzas horizontales inducidas, las partículas de subsuelo son reordenadas, hasta que alcanzan una configuración más densa. Conforme se va compactando, se vibrador se va subiendo.
- **Relleno.** Durante la compactación se usa relleno ya sea del mismo lugar o externo
- **Acabado** Una vez acabado este proceso, la superficie ha quedado compactada de manera óptima, lo último que queda por hacer es nivelar la superficie y listo.



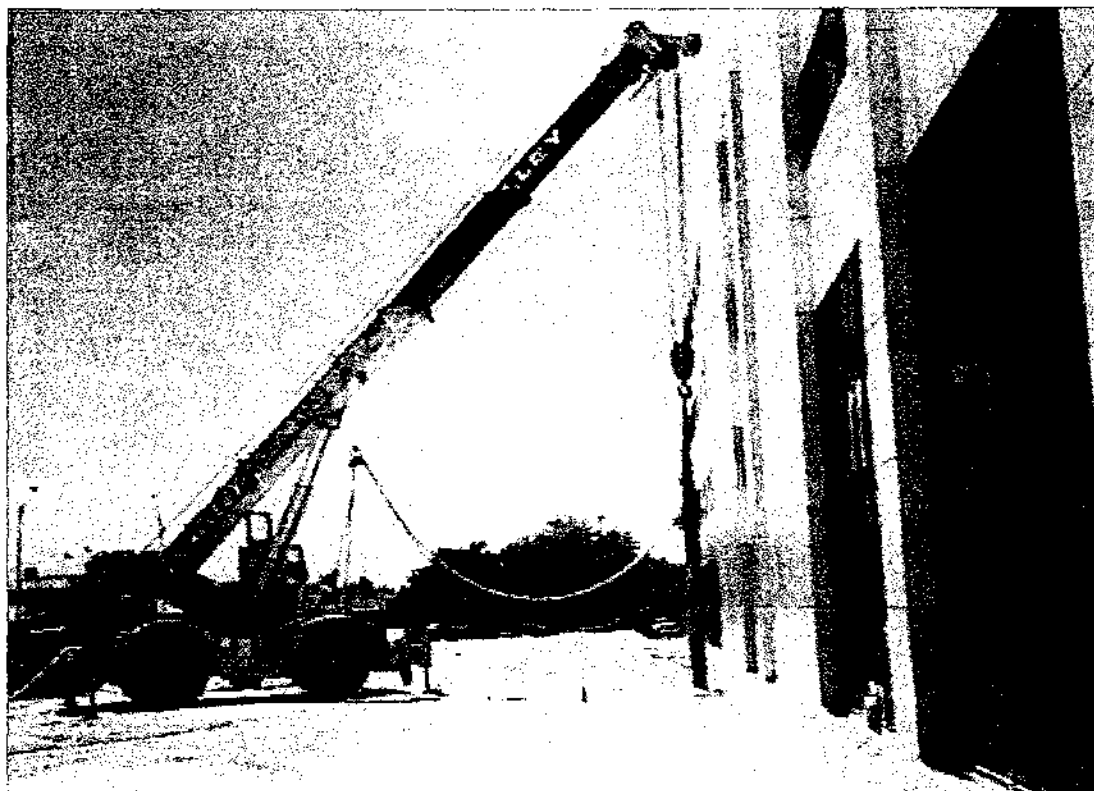
Vibro Reemplazo. Cuando el tipo de suelo es mixto, y tiene diferentes capas, el sistema de vibración no es suficiente para compactar el suelo. Es aquí en donde entra la técnica de vibro-reemplazo, que fue específicamente diseñada para este tipo de suelos. Este sistema crea columnas de piedra triturada compactadas en contra del suelo que las rodea y se diseñan

- Para incrementar la capacidad de carga.
- Ayudar la densificación.
- Mitigar el potencial para licuefacción.

Estas columnas soportan diferentes tipos de carga, de suelo y requerimientos de rendimiento. El espacio entre columnas varía de 6-10 pies. Las cargas permitidas varían de acuerdo al tipo de suelo, así en suelos densos el rango es de 1-5 ksf, sin embargo se pueden llegar a alcanzar rangos de 2-10 ksf.

Los dos métodos de construcción de las vibro-columnas son:

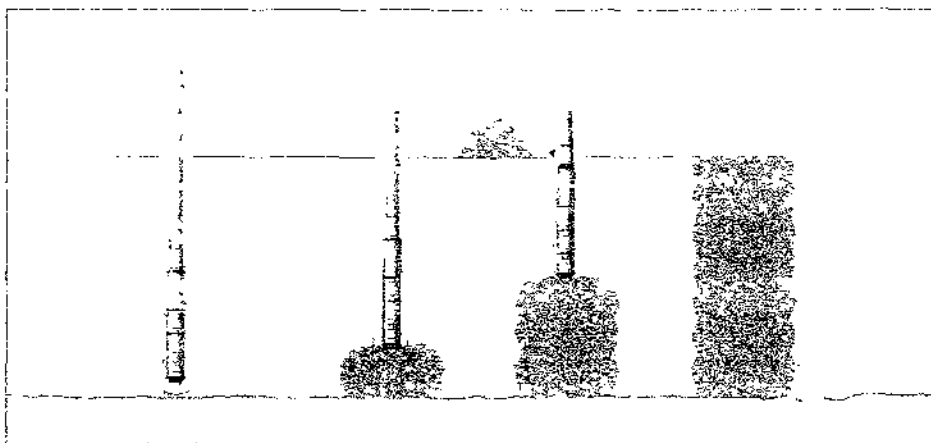
- Método mojado de alimentación superior. Se usa agua para remover material suave, estabilizar el hoyo y asegurar que la piedra triturada alcance la punta del vibrador. No es recomendable su uso en áreas confinadas o sensibles a cambios en el medio ambiente.



Penetración El vibrador penetra hasta alcanzar la profundidad deseada y los alimentadores de agua se ajustan de manera que quede un espacio alrededor del vibrador cuando este metido

Reemplazo Ahora es cuando se añade la piedra triturada desde la superficie, poco a poco el vibrador compacta la piedra.

Terminación El proceso anterior se realiza varias veces hasta que la piedra llegue a la superficie, formando una columna compacta y sólida rodeada de un subsuelo mejorado



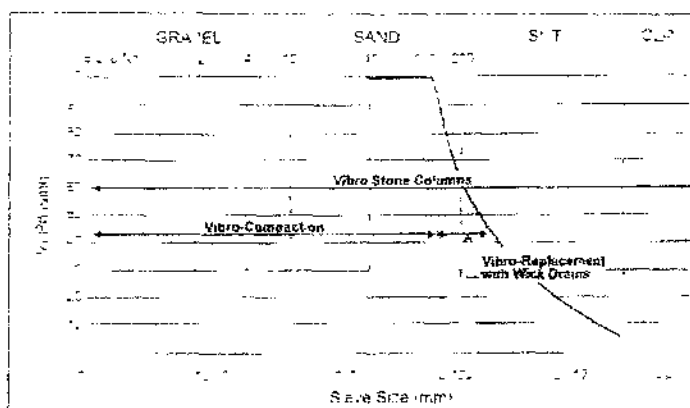
- **Método seco de alimentación inferior** Usa el mismo tipo de vibrador, sin embargo el llenado con piedra se hace desde la punta del vibrador. Es una operación en seco completamente. La presencia de agua en la superficie no es problema para la implementación de esta técnica



11. El diseño y sus consideraciones

Requerimientos previos:

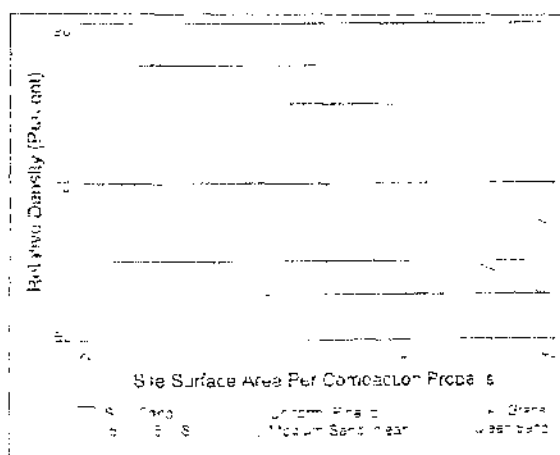
- Carga total (estructura, viento y sismos).
- Tipo de suelo (variación, estratigrafía, locación)
- Tipo de losa.
- Tolerancia estructural
- Limitaciones y restricciones del sitio



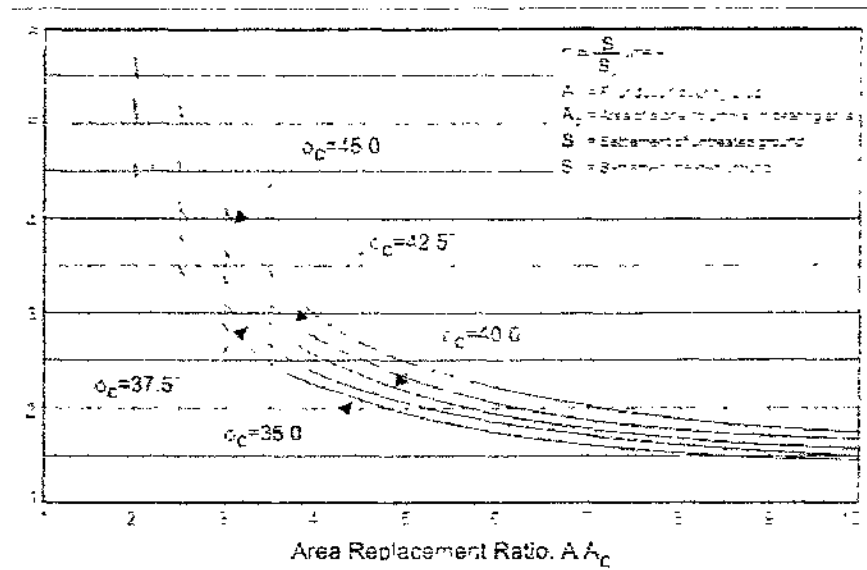
Incremento en la capacidad de carga. Está en función del ángulo interno de fricción y/o cohesión del suelo. Si la vibración incrementa la capacidad de carga el ángulo incrementa.

La vibro-compactación. Densifica el suelo, incrementa el ángulo de fricción interna. La capacidad de carga se calcula con métodos convencionales usando el ángulo mejorado.

El vibro-reemplazo. Construye columnas densas en la zona requerida. La capacidad de carga permitida se puede calcular usando el método desarrollado por Priebe en "El diseño del Vibro-reemplazo" en 1995.



Reducción de asentamiento.



La vibro-compactación densifica el subsuelo, de manera que incrementa el valor modular del subsuelo. El asentamiento se calcula usando procedimientos convencionales solo que con el valor modular mejorado.



El vibro reemplazo lo que hace es construir columnas con un valor modular alto. El asentamiento puede ser calculado con anterioridad al proceso usando el método de Priebe. Este método usa el valor de fricción interno angular de la columna y el porcentaje de tierra usado para compensar en volumen el área compactada.



Prevención de licuefacción. Debido a movimientos sísmicos, el suelo puede llegar a fracturarse e incluso a deformarse vertical y horizontalmente. La densificación por medio de vibración ha resultado ser el método más eficiente para combatir este fenómeno. Las columnas instaladas por medio de vibración ofrecen la mejor protección ante este mal, ya que densifican y refuerzan el suelo, además de ofrecer un sistema de drenaje a través de la columna. Sin embargo el mejoramiento en el drenaje no es suficiente, la densificación es un requerimiento necesario para evitar "aftershocks".



Mejoramiento de diques/terraplenes. El uso de columnas mejora la estabilidad de la cuesta a través del mejoramiento de la resistencia de corte, esta depende del suelo no tratado, de la resistencia transversal de las columnas, del área de reemplazo y de las condiciones de carga. Los valores numéricos de estabilidad se pueden calcular usando el método de Bishop o de Janbu.



12. Control de Calidad y garantía de calidad

Esta es una parte esencial el éxito de un programa Vibro

El programa de proyecto de ejecución posee las especificaciones para que el procedimiento se lleve a cabo. El programa de control de calidad monitorea que estos procedimientos se lleven a cabo de manera óptima. El monitoreo se lleva a cabo en tiempo real y toma en cuenta parámetros esenciales. El programa de garantía de calidad define que aspectos se volverán a revisar y probar.

Monitoreo de Producción

Para ambas técnicas, la calidad del trabajo se evalúa monitoreando los siguientes parámetros.

- Calidad y cantidad de material usado para rellenar.
- Amperaje usado en el vibrador (es un reflejo del mejoramiento logrado ya que a medida que se compacta, disminuye la frecuencia del vibrador. Esta medida está disponible en tiempo real para el operador lo que garantiza un funcionamiento óptimo)
- Profundidad

Prueba Pos-construcción

Dependiendo del mejoramiento estimado, la efectividad del proceso se puede medir usando diferentes métodos tales como

- SPT (Standard penetration testing) Prueba de Penetración Estándar.
- CPT (cone penetrometer testing) Prueba del cono-penetró metro



- DMT (dilatometer testing) Prueba de dilatación.
- Load testing Prueba de carga.

Para el caso del uso de columnas la prueba de carga estática puede ser la mejor manera de asegurar la calidad del mejoramiento. El tamaño de la prueba varía dependiendo del tipo de columna, de la profundidad, del tipo de carga y de estructura, de los requerimientos de seguridad.

El tiempo está involucrado en la elaboración de las pruebas, especialmente en sitios donde se requieran pruebas múltiples. Sin embargo las pruebas de Statnamic solucionan este problema. Este método usa combustible para simular peso sobre el área deseada. Este método ha probado ser un sustituto de métodos tradicionales.

13. Descripción de casos

Cruce entre la estatal 201 y I-15, Utah.

El subsuelo de este cruce contenía capas de arcilla, arena y agua. Se usó el Vibro-reemplazo para solucionar este problema y el mejoramiento se basó en la capacidad para resistir un sismo de 7.5. Se instalaron columnas para densificar y reforzar una capa de arena que estaba en riesgo de licuefacción.

La Interestatal 44, Tulsa, Oklahoma.

En Oklahoma se planeaba añadir dos nuevos carriles a lo largo de 2 millas en una carretera construida en un terraplén. Debido a la consistencia arenosa del suelo se construyeron columnas usando el método de alimentación inferior.

Amgen Manufacturing, Longmont, Colorado.

Una nueva instalación de manufactura se planeaba construir sobre pozos taladrados, el diseño contemplaba cargas de hasta 5 kfs. Una alternativa fue usar el método de alimentación inferior para la construcción de columnas, lo que densificaría los cimientos a base de arcilla.

Wantagh Park way, NY, NY

Para mejorar el tráfico se planeó reemplazar el ya existente puente de dos carriles que pasaba sobre Goose Creek con uno de 4 carriles. Se instalaron columnas debajo del puente para soportar las nuevas cargas lo que resultó en un promedio de 200 tfs CPT de resistencia, mucho más de lo que el proyecto requería.

USF Centro de Bio-ciencias, Florida

El subsuelo del Centro de bio-ciencias es uno típico de Florida, con capas de arena de 30-50 pies. Se usó Vibro-reemplazo en las capas superiores, se rellenó para compensar la pérdida en volumen y se volvió a usar el Vibro-reemplazo.



Auditorio en la escuela Pioneer Porterville, California

Un nuevo auditorio se construiría tomando en cuenta una aceleración máxima de 0.22 g durante un sismo. Columnas de alimentación superior se construyeron a una profundidad de 30 pies para mitigar el potencial de licuefacción.

Lago Waterstone, Oxford, Michigan.

El lago Waterstone se construyó sobre lo que anteriormente era una presa con una profundidad de 30 pies. El problema eran las orillas, ya que se tenía pensado construir residencias y éstas eran demasiado inestables. Se llevó a cabo la Vibro-compactación, para permitir ese tipo de construcción, su éxito fue grandioso.

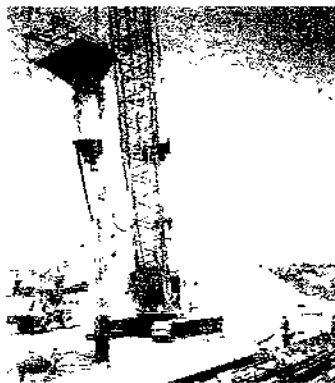
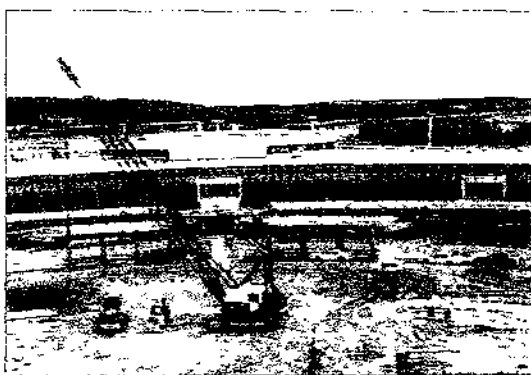
IMSS hospital, Manzanillo, México

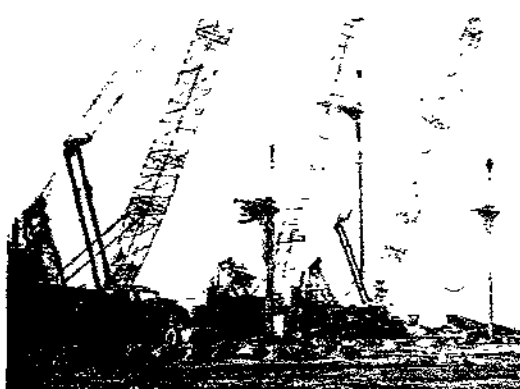
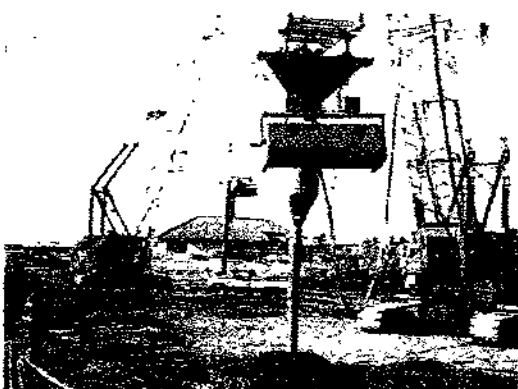
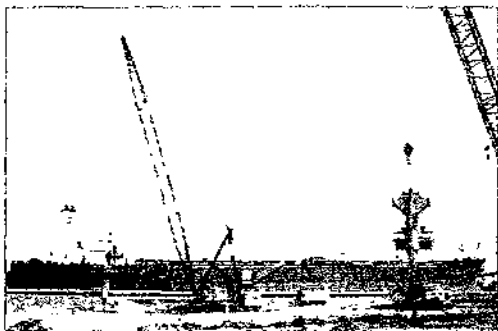
En 1995 un terremoto de 7.6" azotó Manzanillo lo que causó gran daño a muchas estructuras, entre ellas el IMSS, lo que llevó a la construcción de un nuevo hospital. Para prevenir la licuefacción más de 1500 columnas fueron instaladas a una profundidad promedio de 21 pies, usando el método de alimentación superior para densificar el suelo más allá de su umbral de licuefacción. De esta manera se alcanzó una capacidad de carga mayor.

Boca Raton Community Hospital, Boca Raton, Florida

Se querían construir dos edificios de 4 pisos, un estacionamiento de 4 pisos y una farmacia. Se usó el método de Vibro-compactación para densificar la arena que soportaba un edificio de 21,275 sf., a una profundidad de 35 pies, para alcanzar una carga mínima de 6000 psf.

Ejemplos de tratamiento de suelos con ambos métodos





Puente en el Cabo Este de Girardeau

Las consecuencias de la actividad sísmica en la costa del pacífico de EUA están bien documentadas. Sin embargo, hay otras áreas del país que son vulnerables a los sismos. Las agencias estatales exigen cada vez mayores medidas de seguridad para mitigar el problema de licuefacción debido a la actividad sísmica. Cabo Girardeau en Illinois es una de esas áreas.

Evaluación del lugar. La mayoría del terreno a lo largo del Mississippi consistía en depósitos pluviales, lo cual implicaba alrededor de 30 pies de arena suelta y otros 25 pies de arcilla. Análisis de la posible licuefacción arrojó los siguientes resultados: para la capa superior de arcilla, el factor de seguridad en contra de licuefacción era de 0.4 mientras que para la siguiente capa de arena era de 0.7. Para el caso de las pendientes, resultó un factor de seguridad de 0.65 para el caso de un terremoto de 8.5 con una aceleración de 0.36 g.

Mejoramiento del suelo. El Departamento de Transporte de Illinois consideró un sinnúmero de opciones para mejorar la calidad del subsuelo, dentro de las cuales se incluía compactación dinámica, removimiento y reemplazo, además de técnicas de vibración. De todas estas opciones, solamente las que usaban la técnica de vibración se acomodaban de manera satisfactoria al presupuesto y al tiempo planeado para el proyecto. El DTI entonces escogió que se usara la técnica de Vibro-compactación para densificar la primera capa de 30 pies de arcilla y alcanzar un mejoramiento del 85 % y usar el Vibro-reemplazo para la segunda capa de 25 pies.

Construcción. Para alcanzar estos criterios, Hayward Baker utilizó la técnica de alimentación superior para la construcción de las columnas con piedras molidas de alrededor de 1 pulg. De diámetro. De esta manera fue posible alcanzar el objetivo dual de densificar y llevar acabo la construcción de las columnas. Se realizaron los dos procesos de manera simultánea, y se instalaron 925 columnas en los 38,500 pies².

Calidad. Durante todo el proceso se llevó acabo el SPT (Standard penetration testing), prueba de penetración estándar una vez cada 30 puntos de compactación para asegurar que los valores SPT fueran los óptimos. Para el caso del vibro-reemplazo se midió cada uno de los diámetros de las columnas para seguir una misma medida. Después de la construcción se verificaron los factores de seguridad de licuefacción para asegurar que habían llegado al mínimo requerido de 1.3.

A pesar de la dificultad de trabajar en condiciones de clima extremo (invierno) lo que causaba grandes fluctuaciones en los niveles del río, el trabajo se completó en menos tiempo del programado.



Aplicación del método de vibro-compactación y vibro-sustitución

1. Introducción

En este capítulo se describen 2 casos en los que se utilizaron el método de vibro-compactación ó el de vibro-reemplazo.

1. Se construyó una planta de tratamiento de aguas negras en Puerto Vallarta, Jalisco, México usando el sistema de vibro-reemplazo, con estudios se encontró que el suelo estaba conformado de arcillas compresibles y arenas sueltas, se redujeron asentamientos totales, diferenciales y licuefacción.

La planta se constituye de:

- 2 tanques de aeración de 100 x 40 m.
- 4 tanques de sedimentación final de 46 m. de diámetro cada uno.
- Una variedad de estructuras pequeñas para los trabajos de entrada.
- 1 tanque de contacto con cloro.
- 3 digestores aeróbicos.

Se iban a utilizar pilotes, pero se le dio el contrato a Hayward Baker para usar el sistema de mejoramiento, (rápido y efectivo) el diseño consta de la instalación de columnas de grava.

Se instalaron aproximadamente 3800 columnas de grava de 8 m. de profundidad en 6 meses aproximadamente, mientras se construyeron las columnas, estas tuvieron una sobre carga durante 45-100 días.

2. La Terminal de Importación y Almacenamiento de granos en Manzanillo, Colima, México se construyo con el sistema de vibro-compactación, tenía problemas geotécnicos y constructivos. El suelo presentaba 5 m de relleno hidráulico en arena suelta, (se colocó durante la construcción de los domos de granos) arriba de esta, arcillas orgánicas muy suaves y por debajo de esta arcillas arenosas y gravas arcillosas de diversa rigidez. El lecho rocoso tiene una profundidad variable de 30 m.

Cada domo tiene un diámetro de 52 m. Y una capacidad de almacenamiento de 25,000 Tm. Después de varias alternativas de cimentación se seleccionó un sistema de reforzamiento compuesto de pilotes vibrados y colados en sitio, una cubierta de grava y arena gruesa de 2.20 m. De espesor.

El 9 de octubre de 1995, el terremoto de Manzanillo, de magnitud 7.5 y 0.39g de aceleración horizontal máxima, sirvió para diseñar este sitio con un sistema de cimentación contra las deformaciones por licuefacción masiva y diseminación lateral del relleno de arena suelta. Para aminorar la licuefacción, se compactaron los pilotes dentro y alrededor del perímetro de las estructuras.



Cada pilote tiene una cabeza expandida de 1 m de diámetro en forma de hongo. Por encima se añadieron 1m de arena de grava compactada y 1.20 m de roca limpia triturada. Esto sirve de puente y transfiere todo lo estructural, el piso, el grano y la carga de relleno a los pilotes. Esto se confirmó por medio de análisis de diferencias finitas, bidimensionales, detallados, tipo FLAC, (se utilizó anteriormente para optimizar el espaciamiento de los pilotes, la profundidad de penetración, y la geometría de la cabeza de los pilotes) el cual proporcionó un diseño final de 425 pilotes por domo, espaciados en una rejilla de 2.50 m².

Planta de tratamiento de aguas negras en Puerto Vallarta

2. Instalación de las columnas de grava de vibro-reemplazo

Se necesitaron varios vibradores eléctricos para hacer el pozo y densificar el suelo que lo rodea. El vibrador tiene 40 cm. de diámetro y 3 m de largo, y produce pesos excéntricos rotatorios montados en un eje. El vibrador va descendiendo mientras la grava se añade al relleno y al suelo que le rodea.

Los parámetros para apoyo estructural y aplicaciones de licuefacción han sido revisados a profundidad por:

- Barksdale y Bachus (1983)
- Munfak (1987)
- Báez y Martín (1993), entre otros, dijo en 1992, que los mecanismos de densificación incluyen una licuefacción localizada controlada seguida por la redistribución de las partículas del suelo, un efecto de expansión proveniente de la colocación de la grava y el confinamiento de columnas de grava adyacentes.

3. Perfil del suelo

El sitio en donde se encuentra es en una llanura aluvial a aproximadamente 1 km al oriente del río Ameca. La investigación del suelo la hizo PEEI, S. A. de C. V. y consistió de siete excavaciones, con datos de la prueba SPT y datos de consolidación. Además SHB Agra, Inc de México, D. F. llevó a cabo excavaciones adicionales para pre-construcción y post-construcción.

En la parte oriental se pensaban ubicar los tanques de aireación esta tenía 10 m mas que la occidental, el material era arcilloso compresible, presentaba problemas de asentamientos. En la parte occidental se iban a colocar en los tanques para el asentamiento final el suelo era arenoso, presentaba problemas de licuefacción y las perforaciones intermedias registraron que disminuía gradualmente de arcilla a arena.

4. Diseño del asentamiento

Se determino el asentamiento proyectado en las cargas estáticas y las dinámicas de diseño. Las pruebas de consolidación de los suelos arcillosos se hicieron en México, los asentamientos estáticos en las arenas con el método de Meyerhof. Usaron los parámetros de asentamiento específicos, pero mientras llegaban se usaron los siguientes valores promedio para las pruebas de laboratorio:

- Clasificación: CL
- Límite líquido: 42
- Cv: 10 m. 2/año
- Cc: 0.091 (por encima de la mesa de agua).
0.155 (por debajo de la mesa de agua).
- E inicial: 0.783 (por encima de la mesa de agua).
0.774 (por debajo de la mesa de agua).

TABLA I Asentamiento bajo carga son mejora de la tierra.

Número del pozo	Asentamiento total (cm.)
S-1	25.4
S-2	24.6
S-3	22.00
S-4	16.9
S-5	12.4
S-6	8.30
S-7	18.50

En esta tabla se ven los resultados del asentamiento esperado sin mejora de la tierra correspondiente a cada uno de los pozos.

Se calculo la instalación de las columnas de grava con el procedimiento de Preibe (1976), tomando en cuenta la reducción de los asentamientos. Este método distribuye la carga en las columnas que son más rígidas que el suelo circundante, que hace que se liberen de carga algunas arcillas. Los cálculos indican un espaciamiento de 1.60 m. entre los centros de las columnas, además 1 m. de diámetro para reducir los asentamientos que sufra después de la instalación de las columnas. Se diseño con una sobre carga de 50 KPa, equivalente a las estructuras. Se determinó el momento de la consolidación debido a la sobrecarga al final del periodo el asentamiento quedara por debajo de la tolerancia (5 cm.) debido a la presencia de las columnas de grava, con la teoría de Barrón (1948) se predijo el tiempo que tardara en consolidar, esto fue por la rápida disipación de las presiones de los poros excesivas de agua hacia las columnas que sirven de drenes, estos cálculos indicaron que el 67% de la consolidación seria en 2 meses. Hay que tomar en cuenta que el cálculo no determina la disipación vertical de las presiones de poro excesivas de agua hacia las capas de arena adyacentes. Como se muestra en la tabla II.

TABLA II Asentamientos pronosticados después de las columnas de grava y de dos meses de sobrecarga.

Número del pozo	Asentamiento pronóstico restante en el momento de la instalación de las columnas de grava (mm.)	Asentamiento pronóstico restante después de 2 meses de sobrecarga (mm.)
S-1	14.50	49.00
S-2	14.10	48.00
S-3	12.60	43.00
S-4	9.70	33.00
S-5	7.10	40.00
S-6	4.70	27.00
S-7	10.60	36.00

5. Consideraciones de diseño de licuefacción

El suelo se conforma de varios tipos: sueltos, saturados y granulares. Están expuestos a fuertes movimientos que tienden a compactarlos, cuando se presenta el agua tiene una transferencia de esfuerzos efectivos; si los esfuerzos efectivos son igual a cero la carga puede hundirse, deslizarse o voltearse y caer. En el sitio por el fenómeno de licuefacción sufrieron asentamientos tales que la planta no pudo estar en operación.

El diseño se divide en tres partes:

1. La determinación de las aceleraciones pico del terreno en el sitio junto con el terremoto de la magnitud esperada en un periodo determinado de retorno; Los consultores de Hayward Baker de la Universidad del Sur de California escogieron una aceleración pico del terreno de 0.37g proveniente de un terreno de magnitud 7.5. Este nivel de aceleración incluía factores de compensación para las condiciones locales del sitio y correspondientes a la simplicidad histórica de la región de Puerto Vallarta.
2. La evaluación de la resistencia a la licuefacción del suelo contra los esfuerzos de cortante esperados; se siguió un procedimiento de análisis simplificado de la licuefacción Seed and Idriss (1971). Que compara las Relaciones de Esfuerzo Cíclico esperadas (CSR) en el sitio, con las CSR que el suelo puede tolerar sin licuarse. La resistencia a la licuefacción no es solamente una función de la resistencia a la penetración, sino también el contenido de finos y la profundidad, entre otros.
3. En donde se exceda el umbral de licuefacción, diseñar el programa de mejora del suelo para mitigar el riesgo; Los cálculos de licuefacción indicaron que el riesgo de licuefacción en la parte oriental del sitio era moderado, mientras que la parte occidental del sitio si era importante.

El programa de los movimientos del terreno se diseñó para densificar los suelos de densidad granular media hasta llegar a las cuentas de golpes SPT de más de 20 golpes por pie, con lo cual se mitigaría el riesgo de licuefacción en este sitio.

6. Mediciones de asentamiento

Después de instalar el total de las columna de grava, se colocaron 3m de relleno para ejercer una sobrecarga en el terreno con una presión de 50KPa de tubería de acero de aproximadamente 6m de longitud. La cuadrilla de inspección leía la elevación de las placas de asentamiento por cada área.

Tabla III. Resumen de observaciones del asentamiento. Los asentamientos previstos indican que la teoría y los parámetros utilizados en los estimados fueron conservadores. Un factor que hubiera reducido esta diferencia ligeramente es la preconsolidación proveniente de áreas adyacentes. Por ejemplo, las placas 13 y 14, cerca del límite se sobrecargan 30 días antes y experimentaron menos asentamiento que las placas restantes en el área 3, lo cual indica preconsolidación.

Lugar	Área de trabajo	Estructura	Placa	Asentamiento pronosticado			Asentamiento observado		
				s/cg	c/cg	f/red	c/cg cm.	c/cg cm.	f/red
Oriente	Área 1-A	Trabajos en punto de entrada	3				3.1		
Oriente	Área 1-A		4				6		
Oriente	Área 1-A		5				9.8		
Oriente	Área 1-A		6	25	14.3	1.75	6.5	6.4	3.9
Oriente	Área 2	Tanques de aereación	7				8.2		
Oriente	Área 2		8				8.6		
Oriente	Área 2		9				8.2		
Oriente	Área 2		10				8.4		
Oriente	Área 2		11				9.8		
Oriente	Área 2	Digestores aeróbicos	12	21.7	12.4	1.75	9.8	8.8	2.5
Oriente	Área 3	Tanques de aereación	13				5.7		
Oriente	Área 3		14				6.3		
Oriente	Área 3		15				8.2		
Oriente	Área 3		16				11.2		
Oriente	Área 3	Digestores aeróbicos	17				9.3		
Oriente	Área 3		18	24	13.7	1.75	6.2	7.8	3.1
Occidente	Área 4	Tanques de asentamiento final	19				10		
Occidente	Área 4		20				10.3		
Occidente	Área 4		21				9.2		
Occidente	Área 4		22				9.8		
Occidente	Área 4		23	19.2	12.0	1.6	8.6	9.6	2.0
Occidente	Área 5	Tanques de asentamiento final	24				6.6		
Occidente	Área 5		25				10.8		
Occidente	Área 5		26	10.4	6.5	1.6	12.1	9.8	1.1
Occidente	Área 1-B	Tanque clorado	1				0.6		
Occidente	Área 1-B		2	NA	NA	1.75	0.6	0.6	NA

Las columnas de grava en las arcillas aceleraron la consolidación, actuaron como drenajes verticales, refuerzo del terreno y redujeron los asentamientos totales. Los factores de reducción de asentamiento de la teoría desarrollada por Friebe, (1976), mostró ser menor que aquellos que se lograron en realidad.

7. Resistencia a la penetración observada

Tabla IV. Nos da resultados antes y después del tratamiento. Para propósitos de comparación entre las perforaciones HB (pre-tratamiento) y las P (post-tratamiento) se han utilizado en estas 2 series con el mismo equipo de perforación CME-55 y la misma cuadrilla de trabajadores de SHB agra, Inc., de la CD. de México. Todos los pozos P se hicieron después que terminaron las operaciones de vibro-reemplazo, antes de colocar cualquier sobrecarga. Los resultados de la prueba SPT presentan promedios de las capas representativas del suelo para comparar y establecer la efectividad de la mejora en diferentes tipos de suelo. Los pozos se dividieron en "orientales" y "occidentales" debido a la presencia de una gruesa capa de arena de 1.20-5.50m.

Los valores corregidos de SPT, N_{160} , presentados en la TABLA II se calcularon utilizando el factor de corrección C_n presentando por Seed y De Alba, 1986. Se calcularon las densidades relativas de las arenas utilizando los valores promedio $N_{1.60}$, y las relaciones en Tokimatsu y Seed, 1987. Utilizando valores promedio $N_{1.60}$, para cada capa, se pudo establecer una Relación de Mejora, definida como $(1.60\text{después}/(N_{1.60}))$ antes, para cada capa individual.

1. La tierra compactada se rompió y se desmoronó por las repetidas penetraciones del vibrador y no estuvo sometida a cambios en la densidad en la parte occidental y se aflojo en la parte oriental. Los valores de post-tratamiento en esta capa siguen indicando suelos de superficie dura.

Con excepción de la capa de la superficie y de la capa 5 en el occidente, las otras capas de arcilla casi no sufrieron cambios con la resistencia y la penetración, se puede argüir que las arcillas siguen compactadas por que la piedra ha desplazado al suelo en un volumen más pequeño, en la mayor parte de los casos parece ser que este efecto no se manifiesta en la forma de mayores conteos de golpes. El verdadero beneficio de las columnas se puede representar por la concentración de esfuerzo y los cálculos para reducir el asentamiento.

En la capa 5 se mostraba algún aumento en la $N_{1.60}$ con una relación de mejora de 1.8. Algunos suelos finos han mostrado aumento en la resistencia a la penetración (López y Hayden 1992, Sobol et al 1993). Cuando las columnas de grava tienen grandes diámetros y el espaciamiento es muy tenso, la grava del relleno puede emigrar hacia las zonas profundas en la capa de arcilla y afectar la resistencia a la penetración, aún si se hace la prueba SPT a la mitad del patrón. También la capa 5 se encuentra entre dos capas de arena muy rígidas, lo cual pudo haber contribuido a un elevado reemplazo de la grava en la arcilla, o a un aumento en la resistencia a la penetración debida a un mayor confinamiento. Debido a su potencial de licuefacción, fue de importancia primaria densificar la capa suelta SP/SW que se encuentra en la mitad occidental del sitio,

2. Se detuvo un post-tratamiento N 1,60 de 35, muy por encima del umbral de licuefacción de una arena limpia y que representa una relación de mejora de 2.4 en términos de N1.60.
3. La capa 3 en el lado oriental y la 4 en el lado occidental estaban densas antes del vibro-reemplazo. La densidad era relativa (84%-90%). Se sujetó a vibro-reemplazo únicamente porque se encontraba encima de una capa de arcilla suave que necesitaba los pilares de la piedra. Aun así, esta capa de arena logró un promedio de valores N1.60 por arriba de 50, lo cual indicaba una densidad relativa de 95%. Estos resultados en las capas de arena fueron extremadamente positivos, lo cual indica la efectividad del sistema al densificar los suelos que no tienen cohesión.

Oriental. Tanques de aereación: perforaciones o pozos HB1, HB2, HB3, PI y P2

Capa	T suelo	Grosor de la capa m	Prof del fondo m	N Promedio		N 1.6		Relajación de la mejora	Dr.	
				antes	después	antes	después		Antes	Después
1	Cl (corteza)	3-4.5	3-4.5	19.3	10.6	30.9	17	0.6		
2	Cl (sumergida)	2-10	7.6-12.8	7.2	8.4	7.4	8.2	1.1		
3	SP/SM	4-5.5	13.7-16.8	41	57	41	53	1.3	90%	95+%
4	CL/CH	3.5-5.5	17.3-17.4	6.5	6.3	4.6	1.0			
5	SM/ML	Final del pozo		Rechazo						

Occidental. Tanques de almacenamiento Final: Pozos HB4, HB5, HB6, P6, P7, P8, P9 y P10

Capa	T suelo	Grosor de la capa m	Prof del fondo m	N Promedio		N 1.6		Relajación de la mejora	Dr.	
				antes	después	antes	después		Antes	Después
1	CI (corteza)	2-4.9	3-4.5	8	7.9	12.8	12.6	1.0		
2	SP/SW	1.2-5.5	6-7.3	12.9	30.8	14.6	34.8	2.4	57%	85%
3	CL/CH	1-3	7.6-9.1	9.3	8.3	8.7	8.1	0.9		
4	SP	3.7-6.4	12.2-15.2	41.5	66	34	57.4	1.7	84%	95+%
5	CL/CH	1-5	17.4-18.3	5.8	10	4.2	7.7	1.8		
6	SP/SM	Final del pozo		Rechazo						



Terminal de Granos en el Puerto de Manzanillo

1. *Análisis de cimentación bajo carga estática*

Se investigó la transferencia de carga entre el domo y los pilotes utilizando el programa de diferencias finitas FLAC, este hizo posible la optimización del sistema de cimentación y la investigación de los efectos; como la profundidad del pilote, el cojín y la resistencia de la cubierta de grava.

Itasca Consulting Group, Inc desarrollo El FLAC (Análisis Rápido Lagrangiano de Continua) para las diferencias finitas, bidimensional, también para las computaciones de mecánica de ingeniería, este programa simula el comportamiento de las estructuras construidas de suelo, roca u otros materiales y pueden someterse a un flujo plástico cuando se alcanzan sus límites de cedencia. Es utilizado actualmente en la ingeniería geotécnica.

Se utilizaron dos modelos FLAC en el diseño de esta cimentación.

1. Consistió en un análisis bidimensional axial-simétrico de un solo pilote con la columna de suelo tributaria, resulta una distribución detallada del esfuerzo e información del desplazamiento del pilote y el suelo circundante. El objetivo fue optimizar el espaciamiento, profundidad de penetración, forma y tamaño de la cabeza del pilote, el grosor y resistencia de la cubierta de grava. En particular, se utilizó para investigar el mecanismo de transferencia de carga entre la cubierta de grava y la cabeza del pilote.
2. Es un modelo bidimensional, axial-simétrico de medio domo bajo carga total de grano para observar la distribución y el desplazamiento del esfuerzo global del sistema de cimentación. Se analizaron los asentamientos totales, diferenciales, también la estabilidad global del sistema de cimentación a través del piso del domo.

2. *Análisis de una sola columna*

Se atribuyó al pilote su columna de suelo circundante.

- **Re** radio de influencia. Distancia del centro del pilote al borde de la columna del suelo.
- **Re** = $S/\pi 0.5$.
- **S** es el espaciamiento entre pilotes colocados en una rejilla cuadrada.

La capa SP/SW superior fue vibro-compactada y podrá soportar mayor resistencia y rigidez para el análisis, el post-tratamiento SPT de 28 y un ángulo de fricción de 36° para esta capa. Se utilizaron pesos flotantes por unidad por debajo de la mesa de agua que se encontró a una profundidad de 2.80m. (Elevación +0.90m.).

El C_c de la capa OH se determinó con muestras de consolidación con tubo shelby, que eran de 1.44. Usaron la relación Mesri y Godlewski de 1977 para C_a/C_c , se derivó una C combinada de 1.58 para explicar la consolidación primaria y la secundaria.

Se hicieron pruebas triaxiales (UU) no drenadas en esta arcilla suave, se tomaron en cuenta los bajos valores de N y los datos de laboratorio, se usó una resistencia de cortante de 7.2KPa (150psf).

Los pozos rindieron velocidades de onda de cortante de 306m/sec-350m/sec. Y al módulo pico computado se le aplicó a una reducción del 70% para obtener el módulo de cortante de deformación. También tomando en cuenta las altas cuentas de golpes y la distribución de arcilla, arena y contenido de grava, se asignó a esta capa un ángulo de fricción de 30° y una cohesión de 72KPa (1500psf).

Se uso el FLAC varias ocasiones variando el tamaño de la cabeza, la longitud y el espaciamiento entre los pilote. La conclusión fue que los pilotes de 40cm de diámetro espaciados en una rejilla cuadrada de 2.50m con cabezas de pilote expandidas de 1m de diámetro, se utilizarían para la capacidad de sustentación y deformaciones.

Los resultados están en la Tabla I. Indica el asentamiento computado por medio de análisis FLAC de una sola columna bajo carga máxima de grano (centro del domo).

Ubicación	Asentamiento del pilote en el sitio	Asentamiento a medio-punto entre pilotes
Losa	3.69cm.	3.74cm.
La cabeza de pilote	2.50cm.	3.87cm.
La punta de pilote	1.35cm.	1.04cm.

El modelo está constituido por 6255 elementos divididos en 12 diferentes regiones con diferentes materiales. El desplazamiento vertical es cero en el contacto con el lecho de roca y los límites laterales entre "columnas de suelo" podían moverse libremente en dirección vertical.

El sistema de cimentación funciona bajo las cargas máximas propuestas, la cubierta de grava de 2.20m y la cabeza del pilote de 1m de diámetro transfieren las cargas a los pilotes, El asentamiento diferencial en la losa entre áreas justo encima de los pilotes y el punto medio entre los pilotes es mínimo.

Usando el doble de la carga máxima el sistema de cimentación siguió estable, lo cual indica el factor apropiado de seguridad contra falla en la capacidad de sustentación. El asentamiento máximo a largo plazo fue de 7.60cm (3plg) en la cabeza del pilote para el doble de la carga diseñada.



Es necesario notificar que el sistema de (Bell et al. 1993; Hussin 1994) consideró una de tres mallas de alambre de refuerzo o geo-membrana embebidas en la cubierta de grava de 2.20m para impartirle mayor rigidez, la deformación horizontal en la capa de grava fue de sólo 0.6%, de tal manera que la capacidad de la malla de alambre no se desarrollara mucho. Los reportes dicen que se requiere una deformación horizontal del 5% para movilizar la capacidad de la geo-membrana (Borden, 1998, comunicación personal). Por lo tanto se decidió eliminar cualquier refuerzo de la capa de grava.

El FLAC proporciona un asentamiento adicional de 0.14cm en la elevación de la losa, un aumento de menos del 4% del asentamiento total. Los análisis posteriores demostraron que la cabeza del pilote expandida debería transferir la carga al pilote. Sin una cabeza expandida, el asentamiento en la elevación de la losa aumentó en 3cm, o sea un aumento del 80%.

El efecto de arrastre se puede observar en la capa de arcilla y en superiores. La fuerza axial máxima aplicada al pilote, incluyendo el arrastre descendente y las cargas estructurales es de 156.7Tm y ocurre a una elevación de -8m en la OH. La fuerza total en el perfil del suelo se calcula multiplicando el esfuerzo vertical del suelo multiplicado por el área del corte transversal de la columna de suelo. La mayor parte de la carga de grano se transfiere con éxito al pilote por medio de las capas de grava y de arena, y se añaden solo 2.60Tm de carga a la capa OH.

3. Análisis simétrico bidimensional axial del medio domo

Este utiliza 147 regiones para simular 213 pilotes, todos penetraron 1m en la capa dura SC, se representaron en 2 dimensiones por medio de 12 pilotes equivalentes alrededor del medio domo. Las propiedades de los materiales son las mismas que en las de un solo pilote. Cada pilote contiene 4 líneas de rejilla para simular la flexión de los pilotes. Las cargas del domo se transfieren de manera efectiva a la capa de sustentación final por medio de los pilotes. El esfuerzo vertical en los pilotes aumenta a partir de la capa de grava y de arena vibro-tratada, esta alcanza valores pico en la capa suave OH. A partir de aquí, el esfuerzo vertical se va reduciendo gradualmente a medida que se transfiere la carga hacia la capa de sustentación final. Los pilotes que están cerca del centro del domo tienen mayores esfuerzos verticales que los pilotes cerca del borde del domo.

La losa de concreto transfiere la presión de grano a la capa de grava por encima de las cabezas de los pilotes. El esfuerzo vertical aumenta poco a poco a través de la capa de grava entre la losa y las cabezas de los pilotes. En el caso del suelo entre las cabezas de los pilotes, el esfuerzo vertical se encuentra a su máximo en la losa, y gradualmente se reduce con profundidad a medida que se transfiere la carga a los pilotes por medio de arcos. El relleno de grava que está por encima y por debajo de las cabezas de los pilotes minimiza los asentamientos diferenciales entre los pilotes y el suelo. El asentamiento máximo de la losa del domo es de 2.86cm en el centro del domo. El asentamiento mínimo es de 1.74cm a un radio de 23m lo cual proporciona un asentamiento diferencial máximo del piso del domo de 1.12cm.

4. *Análisis sísmico*

Se hizo un análisis de respuesta del sitio basándose en un evento que ocurre cada 100 años recomendado para el Puerto de Manzanillo y el registro real de los terremotos de 1995. Se utilizó el programa SHAKE (Schnabel et al. 1972) para obtener la aceleración de profundidad con variados campos libres y las historias de tiempo del desplazamiento.

El programa DYNAFLOW tridimensional de elementos finitos desarrollo curvas "p-y" que reflejaban los efectos del grupo de pilotes. Se conjuntaron las curvas "p-y" y los resultados de SHAKE para hacer historia de la respuesta dinámica para evaluar la demanda sísmica de la deflexión máxima de la cimentación de los pilotes, de los momentos de cortante y flexión.

Se colocaron 425 pilotes por domo con intervalo de 2.50m, los métodos de diseño convencionales para los pilotes con base en carga lateral sobre una trabe apoyados en cimentaciones de resorte generalmente no explican los efectos de grupo y muy probablemente no proporcionan amplitudes de deflexión realistas en el escenario de masas masivas de suelo reforzado.

Los pilotes espaciados con intervalos regulares que cubren una gran área tienen límites entre los pilotes que se repiten para satisfacer la condición de simetría entre cada una de las áreas tributarias. El modelo de elementos finitos, DYNAFLOW, modela la masa del suelo y el pilote dentro del campo de un periodo en espaciamiento y después impone la condición adyacente periódica. Las siguientes son algunas características del análisis:

1. Elemento viga-columna con 6° de libertad para representar al pilote, con un enlace rígido con la masa del suelo modelada por medio de elementos de ladrillo de 3° de libertad que reflejan el diámetro del pilote. Se estudiaron varias opciones en la interfase pilote-suelo (por ejemplo muro de pilote liso o áspero). Los elementos de la interfase han sido incluidos también para permitir que haya huecos entre el pilote y el suelo en dirección de carga tensil.
2. Comportamiento no-lineal esfuerzo-deformación del suelo que también se modeló.

Los resultados de los análisis de carga-deformación desarrollaron las curvas "p-y" apropiadas para reflejar el efecto de grupo de pilotes y la capa de arcilla suave aplastada entre dos capas de suelos competentes.

Las curvas "p-y" se utilizaron en un modelo de interacción subsecuente dinámico entre el suelo y el pilote. El modelo usa un solo equivalente con sus masas tributarias y su rigidez. La parte superior del pilote incluye varios nódulos de elemento de trabe para capturar las características de respuesta dinámica del domo de grano. Las curvas "p-y" anteriormente discutidas se sujetaron después al pilote en nódulos de suelos móviles a lo largo de la longitud del pilote. Se obtuvieron historias de tiempo desplazamiento con variación de profundidad a partir del análisis de respuesta del sitio en campo libre (SHAKE) que se prescribieron a los nódulos del terreno del modelo suelo-pilote.

Tabla II, se encontró que la demanda de desplazamiento máxima de los pilotes era de 15.70cm (6.20plg). Es importante recalcar que el momento máximo del pilote (curvatura) ocurre dentro de la capa OH, cerca del límite con la arena rígida vibrocompactada. La mayor parte de la deformación ocurre en esta capa debido a su relativamente baja resistencia de cortante y rigidez cuando se la compara con las capas que están por encima y por debajo de ella.

Tabla II Resultados del análisis sísmico del sistema de domo de grano-cimentación.

Caso	Cantidad de grano en el domo	Periodo natural (sec)	Desplazamiento máximo del domo	Deflexión máxima de la pinta del pilote relativa a la punta del pilote	Cortante máximo (ubicación)	Momento máximo de flexión (ubicación)
A	Vacío	3.25	15.20cm.	15.20cm	4087Kg (@ El.-0.30m.)	9952Kg*m. (@ El.-2.70m.)
B	Lleno	4.39	15.70cm.	15.70cm.	3570Kg (@ El.-0.30ft)	8.79x10 ⁶ Kg.*m. (@ El.-4m.)

5. Pilotes vibrados en sitio

Se vibró un ademe de acero temporal de 41cm (16plg) de diámetro y se fincó dentro de la tierra con un vibrador hidráulico de 56julios (500 pulgadas-libra).

Se fincó el ademe con una zapata de acero de 43cm (17plg), esto fue crítico dada la naturaleza inestable de la sobrecarga, relleno granular suelto y arcillas orgánicas suaves. El pozo con ademe facilitó la colocación de la jaula de refuerzo por el pilote.

Cuando llegó a la profundidad de rechazo, se colocó la jaula dentro del pozo con ademe utilizando centralizaciones para garantizar verticalidad y cubierta de concreto. Se bombeó después concreto de revenimiento de 18cm (7plg). Se monitoreó el volumen y la presión para detectar anomalías. En el momento de rellenar el ademe temporal, se extrajo con el martillo vibratorio y se inició un nuevo pilote. Se utilizaron cables de grúa fijos para mantener la verticalidad durante todo el proceso.

En este proyecto, cuando se completa cada pilote se añade una cabeza "el hongo" de 1m de diámetro. Sobre la cabeza se colocó 1m de arena tipo grava compactada y 1.20m de roca limpia triturada. El relleno que se añadió y la cabeza expandida así como la arena vibro-compactada entre los pilotes, forman puente y transfieren virtualmente todas las cargas estructurales, piso, cargas de grano y de relleno a los pilotes.

Esto se confirmó por medio de dos análisis de diferencia de elementos finitos utilizando el programa FLAC. El modelo optimizó el espaciamiento de los pilotes, la profundidad de penetración y la geometría de la cabeza del pilote, lo cual proporciona un diseño final de 425 pilotes por domo, espaciados en una rejilla de 2.50m².



Con base en las investigaciones geotécnicas se previó la profundidad hasta encontrar suelos competentes y/o lecho de roca, la proximidad del sitio (menos de 2Km) hasta las montañas locales agravaron el problema. Para los más de 900 pilotes instalados en los domos y las diversas estructuras de apoyo, la longitud promedio del pilote fue de 15.60m. tenían una variación de 12.20-25.90m, es una diferencia de 13.70m. Estas variaciones fueron causadas por un "cañón" de suelos más suaves que atraviesan el sitio diagonalmente de noreste a suroeste.

Los pilotes tipo VCIP hacen que se pueda variar la longitud de cada pilote con relativa facilidad. Se prepararon las jaulas de reforzamiento con anticipación previendo varias longitudes de los pilotes. La falta de elementos prefabricados eliminó la costosa demolición de las cabezas de los pilotes (en el caso de rechazo profundo).

Se utilizó un excitador vibratorio para instalar los pilotes y fue necesario definir el rechazo (menos de 30cm de penetración durante un minuto) en términos de falta de penetración durante un determinado intervalo de tiempo. El rechazo se midió en cada pilote instalado debido a la importancia de alcanzar la capa de apoyo final para prevenir deformaciones excesivas.

Se hicieron pruebas de carga en 3 pilotes separados distribuidos en toda la obra. Se usaron las pruebas de carga para evaluar la capacidad, las características de deformación de los pilotes y para corroborar los criterios de rechazo.

Se hizo la primera prueba de carga directamente en el ademe de acero debido al tamaño de la placa de fincamiento (43cm) en relación con el ademe (41cm), casi toda la carga se transfirió al fondo del ademe lo cual prueba de manera efectiva que la capa de soporte tiene poca o ninguna fricción lateral. La carga de diseño es de 157Tm la deflexión medida fue de 1.30m (0.50plg). Al corregir la deflexión elástica de la tubería, el asentamiento real del pilote fue de 0.65cm (0.25plg).

Se hizo la segunda prueba de carga en un pilote de concreto completado con una carga de diseño y una deflexión medida de 1cm (0.40plg).

Los resultados de la tercera prueba son; a carga de prueba aplicada máxima de 235Tm (150% de carga diseñada), la deflexión medida fue un poco más de 1cm (0.40plg).

6. *Vibro-compactación*

El 9 de octubre de 1995 hubo un sismo de magnitud 7.5. Un acelerómetro cercano midió 0.39g de aceleración horizontal, por la falta de capacidad de soporte de una ligera estructura de metal adyacente al sitio se observaron erupciones o borbollones de arena y asentamiento de la superficie. Muy importante fue la diseminación lateral de la capa de arena hacia el puerto.



Se optó por hacer vibro-compactación entre los pilotes y alrededor del perímetro de las estructuras para densificar el relleno suelto y mitigar el potencial de la licuefacción.

Se logró la vibro-compactación con un vibrador de profundidad montado en una grúa, de tipo poker. El vibrador genera vibraciones horizontales con el uso de pesos excéntricos rotados por motores eléctricos, la acción del vibrador acompañado por chorros de agua reduce las fuerzas inter-granulares entre las partículas de suelo, esto les permite moverse para entrar en una configuración más densa.

El vibrador penetra hasta la profundidad de diseño con su propia potencia, después se añade el relleno de arena y se eleva el vibrador a una distancia determinada y se repite el proceso en toda la profundidad. Ocurre la compactación sin iniciar esfuerzos internos en el suelo, con lo cual se asegura una densificación permanente. Se otorga la compactación por encima y debajo del manto freático, dado que el nivel del agua subterránea no afecta adversamente la estabilización del suelo.

Para este proyecto se utilizó un vibro-compactador eléctrico de 160Kp Keller de tipo S. La sonda aloja un peso excéntrico oscilante que causa vibraciones a una frecuencia de 30Hz, ideal para la compactación de suelos granulares. Es la sonda que se usa más ampliamente para la vibro-compactación en el mundo.

El relleno hidráulico de arena mostró valores N en el rango de 8-15 antes del tratamiento. Las perforaciones tomadas después del tratamiento revelaron valores N promedio de más de 40 para la mayor parte de las arenas, y en ningún caso mostraron valores menores de 30, lo cual indica una densificación más que satisfactoria y una compactación de las arenas mucho más allá de su umbral de licuefacción.



PRUEBAS DE CONTROL DE CALIDAD

1. Métodos de exploración

Muestras alteradas y muestras inalteradas. Las muestras de suelo han de ser representativas, esto es, que los especímenes reflejen, las cualidades de la gran masa de suelo de procedencia. De acuerdo al tipo de muestra, podemos clasificarlas en dos grandes grupos:

1. Los especímenes o muestras inalteradas. La muestra inalterada será aquella que prácticamente no ha sufrido modificaciones ni cambios en su naturaleza. Los especímenes o muestras alteradas.
2. Los especímenes o muestras alteradas serán aquellas que encierran perturbaciones notorias. Los especímenes de toma muestras partidos y las muestras de zapapico y pala pertenecen a esta clasificación.

El término inalterado es relativo, ya que ninguna muestra puede considerarse como enteramente libre de perturbación. En la mecánica de suelos se aplica el término a muestras que han sido obtenidas en una forma tal que su estructura física y sus propiedades permanecen inalteradas con relación a su estado en la masa de suelo de procedencia. Por esta razón no es aceptable la distorsión o contaminación de la muestra. La estructura del suelo, su contenido de humedad, y la configuración han de ser preservados. Hasta ahora no se han desarrollado métodos que permitan la extracción de especímenes sin alteración alguna. Son ejemplo de muestras inalteradas las muestras cúbicas y las de toma muestras de pared fina. A diferencia de las anteriores

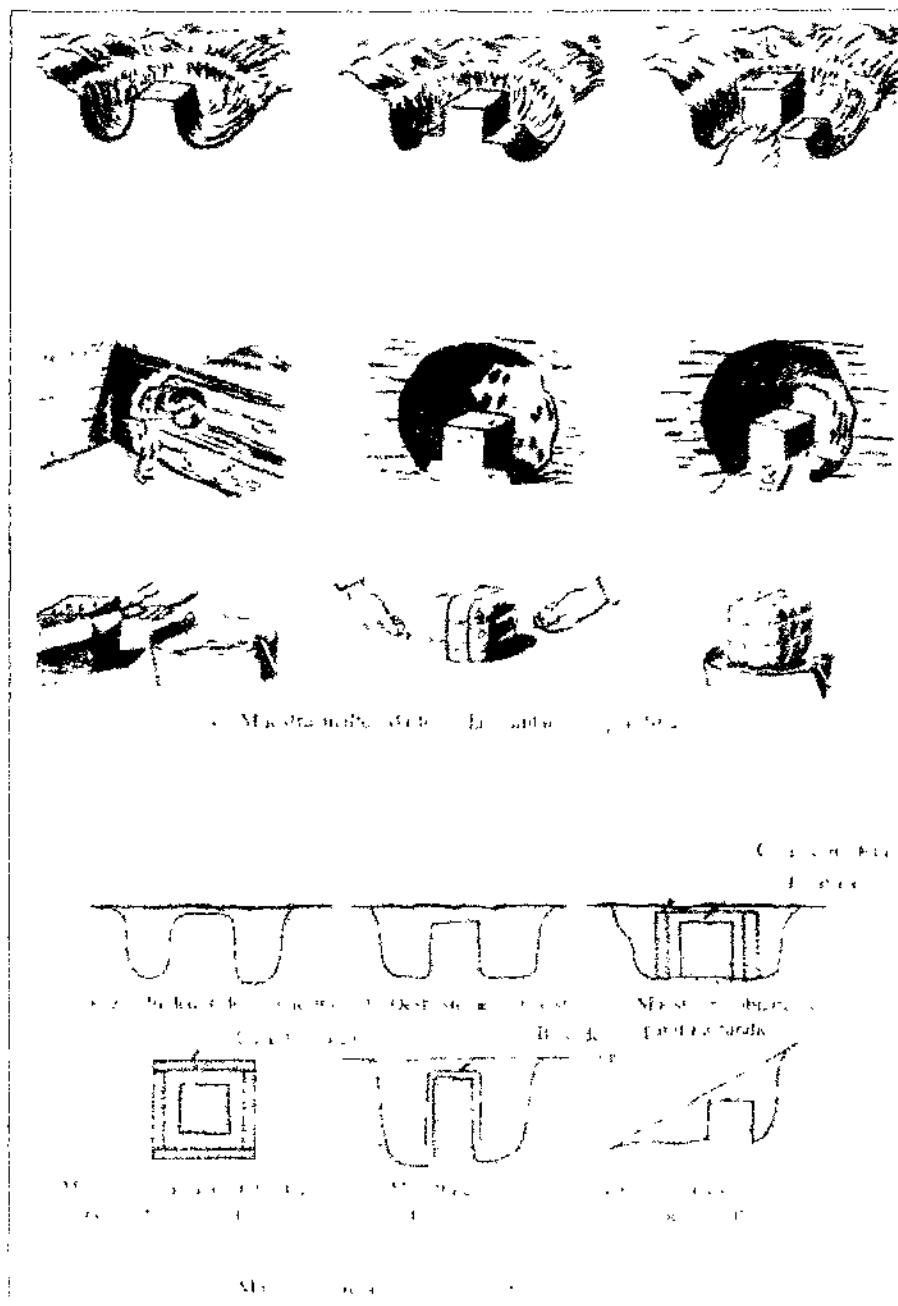
Excavaciones a cielo abierto. Se realiza este proceso con el fin de obtener muestras cúbicas con un mínimo de alteración. No se requieren equipos especializados para esta labor, bastando un pico y una pala. Estudiado el proyecto para el que se realiza el estudio geotécnico, se determinan los puntos (críticos) que soportarán la mayor carga y se localizan sobre el terreno, refiriéndolos topográficamente.

La excavación se efectuará en estos puntos críticos en un rectángulo de 1.50x2.00m, dimensiones para que un técnico pueda trabajar con relativa holgura. Mediante el pico y la pala se van extrayendo material uniformemente del área del rectángulo de trabajo, hasta haber rebasado la capa vegetal o mantillo a los 60 o 90cm de profundidad.

La primera muestra. Se marca sobre el piso un cuadro de 20 ó 30cm donde se hará la excavación y con precaución se van rebajando los alrededores, tallando el cuadro hasta lograr de él un cubo de suelo. Para que no se pierda la orientación relativa del cubo se coloca un rótulo en la parte superior, la muestra no debe de perder humedad y se logra revistiendo con un material sellador compuesto de partes iguales de parafina, cera de abejas y brea, unidos por calentamiento. Con una brocha se procede a aplicar capas sucesivas del aislador resultante hasta lograr un grosor aceptable. Ya estamos en condiciones de extraer el cubo de la excavación, para lo cual nos resta suelo en forma de cono. Luego, la cara inferior se alisa y se reviste para evitar pérdidas de humedad. Las muestras se transportarán al laboratorio con cuidado para evitar alteraciones por golpes

y movimientos bruscos. Por esta razón, se transportan en cajones de madera con un elemento amortiguador como es el aserrín de madera, el papel o las hojas de plátano.

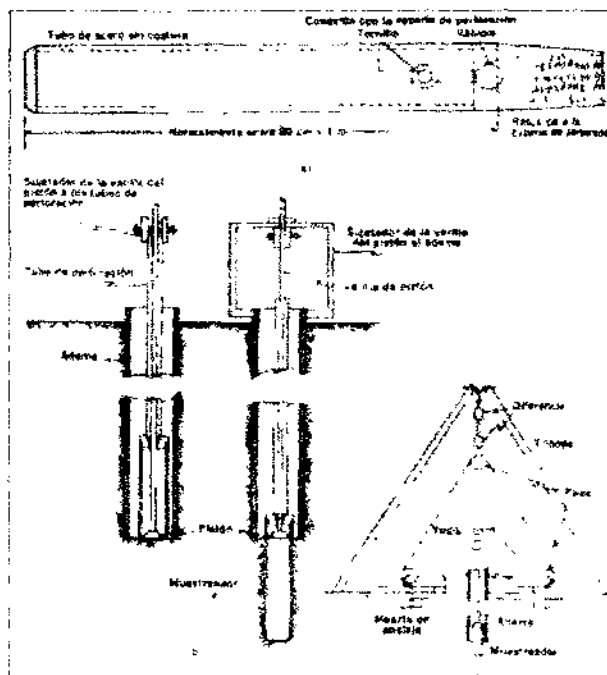
Pudiera pensarse que con todas estas precauciones no ocurre perturbación alguna, pero el cambio proviene del hecho de que al quitar el suelo suprayacente de la muestra, ésta pierde su confinamiento disminuyendo la presión. Con estos efectos el material se expande lo que provoca una alteración. Este proceso de excavación sólo es posible en materiales arcillosos, se pueden tomar muestras sucesivas hasta 4 ó 5m de profundidad.



- Tubos muestreadores de pared fina y partido.
- Otro sistema de extracción de muestras se basa en tubos muestreadores los cuales pueden ser de dos tipos:
 - a. Toma muestra de pared fina, también llamado tubo "Shelby".
 - b. Toma muestra partido. Su elección dependerá de la naturaleza del suelo.

a. Toma muestra de pared fina (tubo "Shelby"). El término "Shelby" se usa para indicar que un tubo no tiene costuras o soldadura a lo largo. La toma muestras de pared delgada, poseen un diámetro exterior de 2-5 pulgadas (50.8-127mm) y se construyen en materiales anticorrosivos de resistencia adecuada, con un espesor en sus paredes igual a 1/16". La longitud del tubo es de 5-10 veces el diámetro para penetración en materiales arenosos, y de 10-15 veces en el caso de materiales arcillosos. El tubo deberá permanecer circular y suave, sin abolladuras, mellas o rayados, limpio y libre de óxidos y suelo. La punta se hace biselada, formando un borde cortante para facilitar la penetración. La cabeza del toma muestra de pared delgada es un dispositivo que permite su unión a una barra o hasta de perforación. La cabeza tiene dos orificios para escape de agua de 9.1mm de diámetro mínimo y una válvula de retención que cumple un doble propósito: Permitir el ascenso del agua freática o de lavado por tubería de perforación, cuando el toma muestra baja, e impedir su paso en caso contrario para obviar la expulsión del espécimen.

El tubo se hince en el terreno a presión estática, de forma rápida y velocidad constante. Para esto se hincan unas anclas (enormes sacacorchos o tirabuzones), dándoles vueltas en el lugar de la perforación; sobre ellas se monta un cruceta en la que se apoya el gato hidráulico que produce la presión necesaria para la hince.





Retenedores de muestras. Antes de continuar con los procedimientos y técnicas de hincar el toma muestra, resulta informativo discutir tres tipos de retenedores de muestras que pueden resultar de utilidad en materiales no cohesivos. Estos retenedores pueden ser utilizados en cualquiera de los toma muestras explicados anteriormente. Se insertan dentro del toma muestra, entre la zapata y el tubo, para facilitar la recuperación de materiales sueltos o que fluyen. El retenedor "Lad" puede utilizarse incluso en arenas en ebullición.

1. **Equipo manual de perforación.** La perforación se realiza con el fin de recabar información del subsuelo. Se logra hincando, de manera adecuada, un toma muestra en el terreno. El equipo requerido es portátil y la acción que causa la inserción del toma muestra en el suelo se debe únicamente a esfuerzo muscular. Utilizaremos el toma muestra enroscado a una barra o asta de perforación que contiene en su extremo opuesto una guía y un sufridor. Un martillo, cuyo peso de 16kg resulta ser la cuarta parte del peso del martillo usado en el ensayo normal de penetración que se explicará posteriormente, se coloca en la guía y será el elemento generador de la energía controlada necesaria para la hincada del toma muestra. Sobre la guía se marcará, de forma visible, una indicación a 75cm del sufridor que señalará la altura de caída del martillo. Sobre la barra de perforación se marcan tramos de 15cm a partir de la punta del toma muestra, necesarios para el registro de la perforación.

Sosteniendo el conjunto en forma vertical, se inicia la perforación levantando la masa manualmente hasta la señal, permitiendo luego su caída libre, cuidando de que no haya pérdida de energía por rozamiento con la guía. El proceso de levantar y soltar el martinete se continúa en forma sistemática, registrándose mentalmente el número de golpes inferidos contra el sufridor.

Se observará con cada golpe del martillo la penetración del toma muestra en el terreno y se anotará en un formulario el número de golpes necesarios para hacer penetrar los primeros 15cm del toma muestra (indicados visiblemente). Este proceso continúa hasta lograr una penetración de 30cm, registrándose también el número de golpes para lograr la inserción de los segundos 15cm.

Nos preparamos para extraer nuestra primera muestra. El primer paso será separar el espécimen de la perforación produciendo un movimiento de giro en la barra con ayuda de llaves inglesas. Entonces procedemos a sacar el asta con el toma muestra. El tubo estará adherido a las paredes del barreno por lo que su extracción suele dificultarse, sobre todo a profundidades grandes. La manera más expedita se logra mediante la aplicación de una palanca con una llave inglesa unida al asta, haciendo apoyo sobre un trozo de madera. La toma muestra se desenrosca de la barra de perforación y sacamos la muestra de suelo del tubo, valiéndonos de un aparato que se acciona de forma manual.

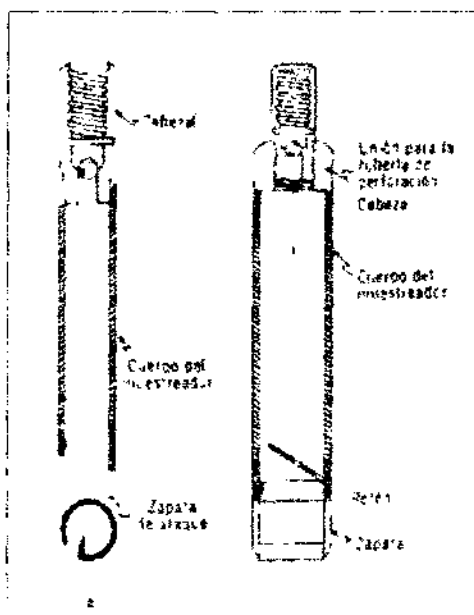
Consiste principalmente en un gato que acciona un émbolo, que se introduce en el tubo forzando la muestra de suelo a salir. Esta muestra, de apariencia cilíndrica, se coloca en un frasco de cristal cerrado herméticamente para evitar pérdidas de humedad. El frasco se identifica correctamente con rótulo que se

adhiera a su exterior. Los frascos contenedores de muestras se van colocando en cajones de madera para su posterior transporte al laboratorio.

Para tomar la muestra siguiente será necesario limpiar de escombros la perforación hasta la profundidad donde se dejó la muestra anterior. Para ello se usa un aparato llamado cuchara de postear, cuyo nombre no es propio de la mecánica de suelos, que se utiliza en algunos países de diferente manera. La cuchara de postear consta de dos aspas en posición vertical, con una ligera curvatura en su parte inferior. Las aspas se unen a una barra en cuyo extremo contrario se encuentra una cruceta de madera que servirá para que dos operarios puedan imprimir un movimiento giratorio a la cuchara provocando así la limpieza del orificio.

Este proceso se repite sucesivamente, añadiendo secciones de barra de perforación si fuera necesario, obteniendo muestras tras muestras hasta alcanzar una profundidad de 7.00m, a partir de la cual se dificulta el proceso. El resultado de este procedimiento es una serie de muestras del subsuelo cuya alteración, aunque mayor que la que se produciría hincando la toma muestra a presión estática, es de poca consideración relativamente

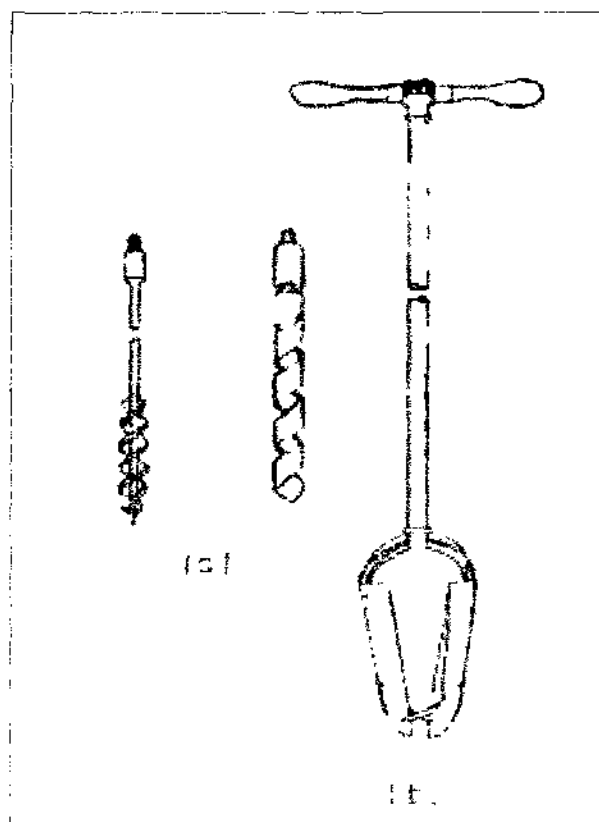
- 2 **Máquina perforadora de percusión y rotación.** La máquina perforadora es un equipo ampliamente utilizado en la extracción de muestras del subsuelo, ya sea de estratos de roca o suelo. Un equipo de perforación es similar a otro en su diseño, pero sus diferencias generalmente van acordes con las ideas de cada fabricante en particular. Para tener un símil sobre su tamaño, puede pensarse en un "jeep". El desplazamiento de estas máquinas se realiza en remolques o se montan sobre camiones y se mueven con grúas.



3. **Cuchara de postear.** El tipo de base que se utilice dependerá principalmente de la clase de terreno donde la perforación se esté realizando y de la lógica envuelta en el transporte de la perforadora al lugar donde trabajará y su movilidad una vez en ese lugar. Esta base deberá ser sólida en su construcción para prevenir que se pierda la alineación de la perforación y siempre deberá nivelarse antes de dar inicio a la labor de horadación. Esto se logra accionando unos gatos, indicados en la figura, hasta levantar la perforadora y dejarla horizontal.

Sobre la base de la perforadora, como elemento principal, encontramos un motor Otto o Diesel generador de la potencia necesaria para accionar las diversas partes del equipo. El mandril es un elemento que transforma la potencia suministrada por el motor en un movimiento de rotación que se transmitirá a un asta y a un toma muestra para la extracción de especímenes de roca. El montacargas o "winche" será el responsable de proveer la fuerza necesaria para izar el martinete, 75cm sobre el sufridor, por medio de una gruesa sogá que pasa por una polea al extremo del tripié. El montacargas se utiliza en los casos de perforación a percusión para la extracción de muestras de suelo.

Dependiendo de la perforación, se usarán diversos tipos de astas o barras de perforación: tipo EW, a utilizarse en equipo portátil, y los tipos AW., BW y NW para equipo mecánico. En el apéndice de esta unidad se muestra una tabla de tamaños comerciales de barras de perforación.



Camisas o tubos de revestimiento para entibar el agujero. A medida que se avanza en profundidad con la perforación, llegará un momento en que las paredes no soportarán el empuje del suelo y se procede además a entibar la perforación con tubos de revestimientos de acero de alta resistencia para encamisar el agujero. El tubo de revestimiento se hincará a percusión en el terreno, con la precaución de solamente recubrir lo que ya fue perforado, y nunca más, so pena de alterar las muestras sucesivas en su estructura.

- Representación de una perforadora de rotación-percusión en plena labor de horadación del subsuelo.

El revestimiento irá descendiendo al terreno poco a poco, uniéndose longitudes de tuberías unas a otras, hasta alcanzar la profundidad deseada.

- Tipos de uniones de tubos de revestimiento.

Para facilitar la penetración del revestimiento suele adaptársele una cofia con un bisel en su parte inferior. Los tubos de revestimiento deben hincarse vigorosamente al terreno utilizando un martillo de 300 a 400 libras de peso.

- Adecuado Entibamiento del barreno.

Lavado del barreno. Una vez llevado el revestimiento hasta la profundidad debida, pasamos a la extracción del material suelto que ha quedado dentro de la camisa. Este proceso se logrará inyectando chorros de agua al barreno para que la presión del agua disuelva el suelo y fuerce el material a salir a la superficie. Una bomba impulsa el agua a través de un tubo de goma que se conecta a las barras de perforación, construidas huecas para este fin. La barra termina en su extremo inferior en un pico de lavado, productor de los chorros de limpieza, apropiado para las labores de corte.

A medida que la presión de agua remueve el material, se va girando el asta de perforación para desprender el suelo con mayor facilidad, el cual sale al exterior por la camisa.

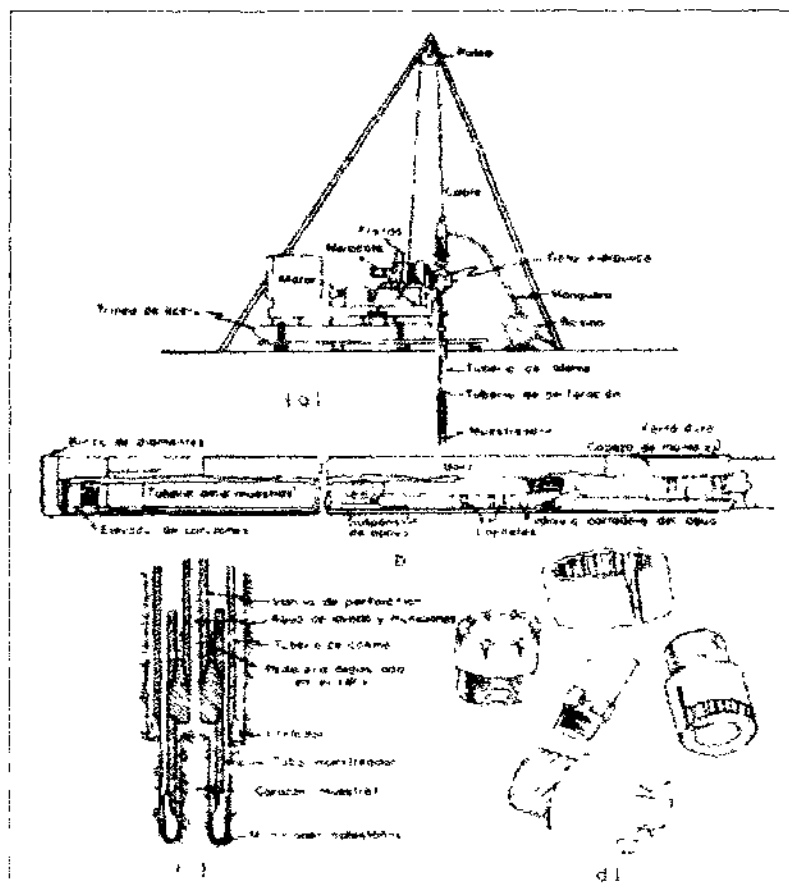
Debe aprovecharse el lavado para obtener información sobre un cambio de material ya que esto se refleja en la variación de color del agua.

Finalizado el lavado del barreno se reinicia el proceso de perforación. El tubo de revestimiento habrá quedado lleno de agua, la cual pasará a través de la válvula de el toma-muestra sin ofrecerle resistencia. Deben rechazarse los primeros 15cm de suelo obtenidos ya que estarán afectados por el lavado. Aún así siempre se producirá una alteración en las muestras sucesivas por lo que debe evitarse el lavado al máximo. Es por esta razón que en pequeñas profundidades se prefiere el equipo de perforación manual, explicado anteriormente, pues no introduce agua en ninguna etapa de la extracción del espécimen, dando como resultado una muestra de menor alteración.

• Perforación en roca

Si al perforar con el toma-muestra partido advirtiésemos que se requiere de 50 golpes del martinete para producir una penetración de 15 o menos centímetros, estamos ante la presencia de roca o material duro o compacto en el subsuelo. Algunos autores varían en este sentido, prescribiendo números diversos de golpes, pero la práctica local es no rebasar los 50 golpes con el toma-muestra partido en el ensayo normal de penetración. Otras veces, al alcanzar un estrato determinado, el perforista notará el "rebote" o rechazo del martillo sobre el sufridor, lo cual señala un estrato de roca o material muy resistente que el operario puede reconocer de inmediato.

El sistema de perforación cambiará de percusión a rotación, empleándose el mandril para imprimir el movimiento giratorio necesario. El mandril se desliza hidráulicamente sobre el agujero de la perforación hasta coincidir exactamente. El corte en la roca se logra mediante una broca al final del toma-muestra, con brocas tricónicas o con incrustaciones en diamante o carburo de tungsteno. La fricción que generan estos materiales contra la roca produce una temperatura capaz de ablandar el metal de la broca por lo que será imprescindible el uso de agua como sistema de enfriamiento de la broca.



- Toma-muestra de rotación.

El proceso de recuperar una muestra de roca con broca con incrustaciones de diamante fue introducido por el ingeniero suizo Leschot en 1863. Como se ha visto, el método se fundamenta principalmente en el corte de un anillo con una broca incrustada de un material duro (diamante o carburo de tungsteno) en sus bordes, lubricándola y enfriándola con agua inyectada a través de la barra de perforación por acción de una bomba, y recuperando la muestra en un tubo hueco. Se rotan los instrumentos bajo una presión controlada, subiendo y bajándolos mediante el montacargas del equipo de perforación. Estas brocas se clasifican en el mercado de acuerdo a tamaños tales como BWG y NWG. Una tabla conteniendo los tamaños comerciales de broca se presenta en el apéndice de esta unidad.

Los toma-muestras que se utilizan en este proceso pueden ser de dos tipos principalmente: de pared sencilla y de pared doble. El toma-muestra de pared sencilla es el más simple de los tubos muestreadores en roca y además el menos costoso. Será la mejor elección cuando se trate de formaciones de roca sólida, donde una buena recuperación es relativamente simple. También es de utilidad al penetrar mantos de roca por encima del estrato de interés o donde un alto porcentaje de recuperación no es necesario. El agua fluye por la cabeza del toma-muestra, pasa alrededor de la muestra y hacia afuera por la broca. Como puede haberse intuido, el gran inconveniente del toma-muestra de pared simple es que al entrar la muestra en contacto directo con el agua, ésta puede provocar la caída del espécimen cuando se iza el conjunto. Por esta razón fue que se desarrollaron los toma-muestras de doble pared.

Aparece el toma-muestra de doble pared. Puede observarse que este tubo muestreador está equipado con un tubo interno rigidamente unido a la cabeza del toma-muestra y hacia abajo entre el espacio dejado por los dos tubos. Nunca hay contacto entre la muestra y el fluido, excepto en el área de la broca. Este toma-muestra es de una gran utilidad en el caso de materiales que tienden a deslavarse o disolverse con facilidad.

Para mejorar la recuperación de las muestras de roca puede emplearse un dispositivo llamado entrampador. Esta pieza de forma tronco-cónica tiene el papel de dificultar la salida de la muestra una vez ha entrado en el tubo muestreador. Otro recurso para mejorar la recuperación de las muestras de roca consiste en apagar la bomba de agua por unos instantes antes de izar el conjunto. De esta forma se origina un "tapón" de roca que impide la salida del espécimen. Dados los problemas que se han planteado se recomienda que los especímenes no excedan de 30 ó 60cm de longitud.

- **Recuperación (R).**

Ya se ha utilizado en repetidas ocasiones el término recuperación sin que lo hayamos presentado formalmente. La recuperación no es más que la relación por cociente entre la longitud de la muestra recuperada y la longitud total perforada, expresada como un porcentaje.

- Toma-muestra de rotación de pared sencilla.
- Toma-muestra de rotación de doble pared.
- $(\text{Longitud de muestra recuperada} / \text{longitud perforada}) * 100$.

Nunca se logra el 100% de recuperación. De una longitud perforada de 50cm por ejemplo, no es extraño recuperar tan sólo 20cm. En la preocupación de lograr un alto valor de recuperación entran muchos conceptos tales como: el estado de la broca, la presión a la que se perfora, el tipo de toma-muestra que se utiliza, etc. Como regla general, debe tenerse presente que la mejor recuperación indicará una muestra más representativa y por lo tanto más confiable.

2. Prueba de penetración Standard (SPT) y prueba de penetración de cono (CPT).

Consiste en identificar el potencial de licuación.

Ensayo normal de penetración. Este método, presentado por Terzaghi y Peck, describe un procedimiento para el empleo del toma-muestra partido en la obtención de especímenes alterados de suelo para su identificación y demás ensayos de laboratorio, así como para obtener una medida de la resistencia del suelo a la penetración del tubo muestreador.

La prueba consiste en hacer penetrar el toma-muestra partido unido a una barra de perforación, a golpes producidos por un martillo de 64Kg (140libras) de peso, cayendo desde una altura de 75cm (2.5pies), computando el número de golpes (N) necesarios para hacer penetrar el toma-muestra 30cm. Deberá tenerse especial cuidado para asegurar que la energía del martillo al caer no sea reducida por fricción entre éste y la guía. En cada avance de 30cm se extrae el toma-muestra, obteniéndose la muestra correspondiente a la profundidad a la que se horadaba.

Es el procedimiento que rinde los mejores resultados en la práctica y proporciona más información útil en torno al subsuelo. Además de que permite conocer el comportamiento mecánico de los mantos, nos proporciona muestras alteradas representativas del suelo en estudio.

A diferencia del ensayo normal con equipo portátil ya explicado, la elevación del martinete se logrará mecánicamente mediante un cable sostenido por una polea y accionado por un "winche". En el acápite anterior vimos el uso de las máquinas perforadoras a percusión. Para comparar los resultados obtenidos del equipo manual con los del ensayo normal de penetración, el número de golpes obtenidos con el primero se divide por cuatro, pues el martillo pesa cuatro veces menos que en el caso del ensayo normal.

Exploración con cono. Este es un método de exploración del subsuelo cuyo propósito no es la recuperación de especímenes, sino la obtención de información referente a la resistencia de un suelo al esfuerzo cortante. Se utiliza generalmente para exploración de estratos del subsuelo con una estructura errática. El método consiste en la introducción a percusión de una punta cónica al suelo unida a una barra maciza, bajo el golpeo controlado de un martillo. Registrándose el número de golpes para lograr la penetración de una longitud dada (15 ó 30cm) puede determinarse, a un costo moderado, la variación de la resistencia a la penetración que ofrece el subsuelo.

Las herramientas de auscultación son muchas, entre las cuales la más conocida es el cono holandés que consta de 60° de alta resistencia unido a la parte inferior de una barra maciza de perforación. La extracción de los instrumentos se dificulta por la forma en sí del cono, por lo que suelen utilizarse diversos tipos de gatos. Debe preferirse la penetración estática.

- Auscultaciones. El cono holandés.
- Nivel freático.

La medición del nivel freático o altura de las aguas subterráneas es de gran importancia en la mecánica de suelos. La posición de la capa freática o acuífero en un momento dado rige el comportamiento de los suelos en forma decisiva. Terzaghi define el nivel de la capa freática como el lugar geométrico de los niveles que alcanza la superficie del agua en pozos de observación en libre comunicación con los vacíos del suelo "in situ".

El suelo se halla completamente saturado por debajo del nivel de la napa freática y también lo estará a cierta distancia sobre ella por el conocido fenómeno de la capilaridad, en caso de arcillas.

Terminada una exploración geotécnica, los orificios dejados por las perforaciones pueden ser utilizados como pozos de observación en la determinación del nivel freático con la precaución de retirar el revestimiento si lo hubiera, y de esperar un tiempo razonable para que el nivel de las aguas tome su posición natural. Si el barrenado se efectuó con equipo manual ocho horas de espera son suficientes, mientras que para perforaciones con equipo mecánico se prescriben 24 horas. La medición se efectúa de forma directa: con un hilo y una plomada puede medirse la separación entre la napa y la superficie del terreno. También suele utilizarse una barra seca para este fin. Existen métodos más sofisticados basados en el cierre de un circuito eléctrico al entrar en contacto con el agua de la napa, aunque no han probado ser tan efectivos como los sencillos métodos de medición directa; radicando su desventaja en el hecho de que el cierre del circuito puede producirse en contacto con materiales saturados y dar así una información falsa sobre la posición de la napa freática.



- Secciones estratigráficas.

Al hacer un estudio geotécnico para algún proyecto específico las perforaciones se localizan en los puntos en que su información sea de mayor utilidad. Suelen situarse los barrenos sobre el terreno en los lugares correspondientes a los muros y columnas que soportarán la mayor carga de la construcción, elegidos de modo a reproducir las características inherentes a toda la zona de edificación. Estas perforaciones, dispuestas generalmente de forma alineada, nos servirán para construir un perfil o sección de los estratos del subsuelo, para su empleo en el diseño racional de los cimientos, y en las modalidades constructivas que requiere el conjunto suelo-proyecto.

Se prepara un formulario para cada perforación donde se colocan, en función de la profundidad, y todas las propiedades de los suelos determinadas por los ensayos que se realizan en el campo y en el laboratorio.

Relacionando las muestras con características similares se obtienen mantos o estratos del subsuelo que se pueden representar gráficamente. Así se define estrato como toda capa de suelo de características y propiedades físicas definidas o bien, toda capa de suelo en que sus puntos poseen propiedades homólogas. En cierto modo la sección estratigráfica del subsuelo es un resumen gráfico del estudio geotécnico realizado. Para el diseño de la supraestructura del proyecto se tomarán los valores promedios de las propiedades encontradas para cada estrato.

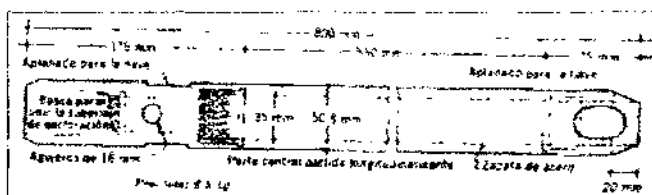
El especialista en suelo también acostumbra trazar gráficas con los valores significativos del terreno en función de la profundidad. Con estas curvas puede observarse mucho mejor el cambio en las características de los distintos estratos que configuran el subsuelo de cimentación.

En la práctica actual el potencial de licuefacción de los sitios mecánicamente mejorados se evalúan generalmente por medio del uso de pruebas en sitios como la SPT y la CPT.

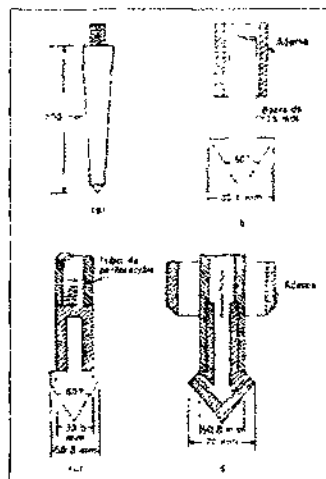
H.B. Seed e Idris 1971. Tiene un procedimiento simplificado para evaluar la licuefacción donde utiliza los datos de SPT, Seed y De Alba, 1986. En este método se utilizan los CPT, los datos se pueden convertir en valores SPT equivalentes o se usan directamente para evaluar la licuefacción.

En Campanella et al 1982. Los resultados SPT y CPT no predijeron adecuadamente los resultados de la licuefacción de los suelos mejorados mecánicamente. Se trató por los métodos de vibro-compactación y compactación profunda dinámica para reducir el potencial de licuefacción. Lo que sucedió fue que las capas que tenían más limo mostraron pocos cambios y los números seguían cayendo en los rangos considerados "licuificable". Las pruebas de compresión monotónicas no drenadas y las pruebas auxiliares cíclicas revelaron una respuesta dilatativa, un aumento de cinco veces la resistencia de cortante no drenada y una duplicación de la relación de esfuerzo cíclico crítica. Las relaciones de presión de poro con un piezo-cono mostraron que los suelos no tratados generaban alta presión de poro, excesiva durante el fincamiento. Los suelos

tratados mostraban presiones menores o negativas de la hidrostática, eso indica que el suelo tiende a dilatarse durante el corte.



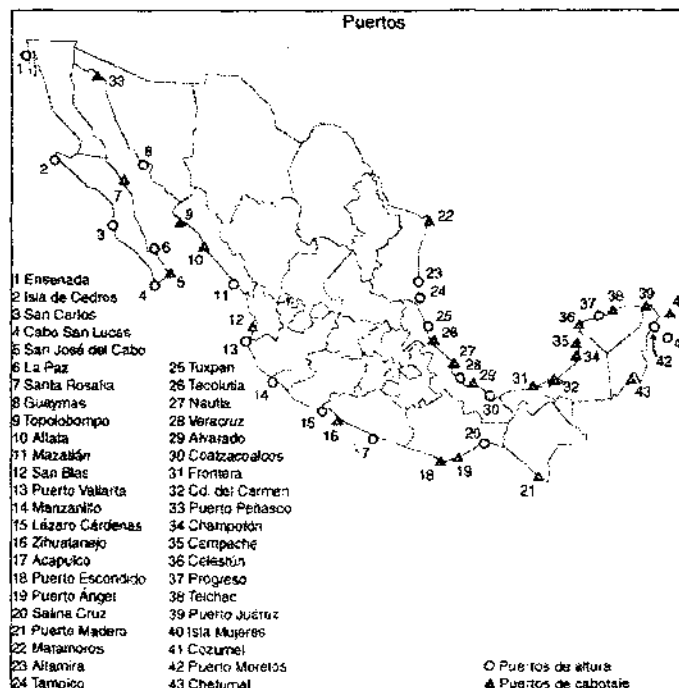
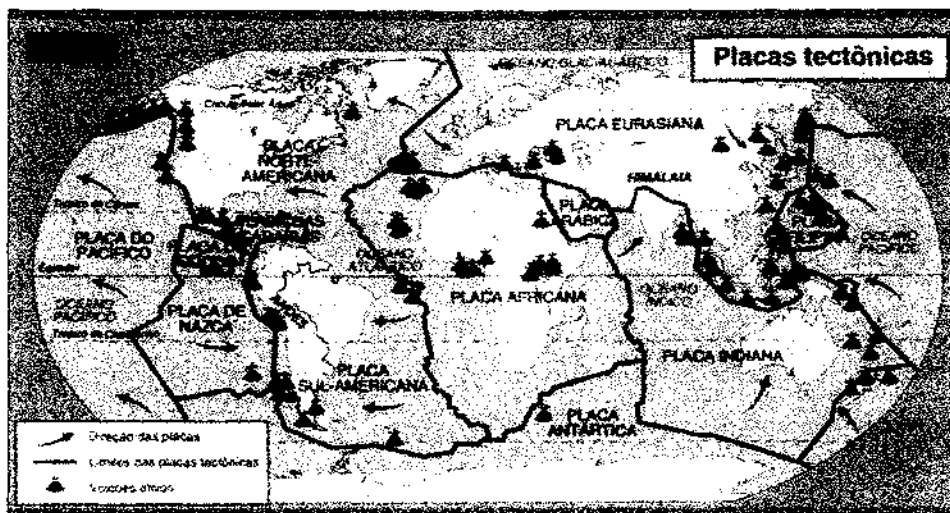
Prueba de penetración estándar



prueba de cono

CONCLUSIONES:

- Las características geológicas y geográficas de la República Mexicana, como son la gran extensión de costas así como la vulnerabilidad que tiene de enfrentar fenómenos naturales, efectos por el tipo de suelo, lo que aunado a problemas económicos, justifican los intentos de optimizar los recursos y disminuir los costos, y explican la motivación de hacer esta revisión de los métodos correctivos de cimentación que podrían aplicarse en caso necesario.
- Para complementar éste punto, anexo datos sobre los puertos y sus características, así como información sobre el suelo de México.



- Los métodos descritos que se utilizan para modificar y/o mejorar los suelos en construcciones, que presentan problemas o fallas por efectos del mismo debido a diferentes razones como adiciones a los proyectos que no se tenían contempladas y sobre pasan los factores de seguridad, los errores en la interpretación de los estudios, así como por los efectos de fenómenos naturales impredecibles.
- El suelo es un medio que puede afectar o apoyar a la estructura que se hará, la cimentación hace que la estructura quede estable. Uno de los problemas que mas frecuentes son los efectos de las fallas tectónicas, y el tipo de suelo. La mayoría de los puertos tiene suelos gruesos, que son arenas y gravas.
- Cada método tiene diferentes características y se utilizan para corregir los problemas de suelos, adecuando el método al tipo de suelo y al problema específico que presente. Es importante conocer a detalle cada uno de estos, para obtener el mejor resultado.
- Otro aspecto relevante es el conocimiento de los procedimientos para obtener las muestras de suelo, ya que se necesitan para saber la composición y el tipo de suelo. Este procedimiento se aplica no solo al diagnóstico previo, también se utiliza para otras pruebas de calidad durante el mejoramiento de los mimos, para saber que efectos van presentando la cimentación y el resto de la estructura.
- En la descripción de casos, en donde se ha utilizado el mejoramiento de los suelos, con diferentes procesos correctivos, como en una carretera en la que fue necesario mejorar el suelo, para que los muros de contención sostuvieran a la autopista sin demoler la estructura, o en alguna laguna por donde pasan los juegos mecánicos, se requirió reforzar el apoyo de las columnas para que la corriente de agua no lo afecte, colocar y sostener una tubería abajo de una fábrica y que a la fábrica, no le pasara nada durante el proceso y después de el. No afectar el paisaje. Ayudar a los puertos para que aumenten la capacidad para almacenar, sin demoler las estructuras, mejorar el suelo, reforzar el soporte de cimentación; son alternativas que deben contemplarse en casos necesario.
- Como corolario se describen dos aplicaciones de cada uno de los métodos que se revisan en la tesis, utilizados en puertos marítimos:

En el puerto de manzanillo como parte extraordinaria del proyecto, se aplicaron éstos métodos de mejoramiento de suelos, con el propósito de aumentar la capacidad de almacenamiento, sin tener que demoler la estructura preexistente.

En puerto Vallarta, como parte extraordinaria del proyecto, se requirió una planta de tratamiento de aguas negras y el mejoramiento de los suelos, para lograr mayor apoyo sobre la estructura, con un monitoreo constante sobre el cabezal del vibrador aparte de el material que se llevaba, para cumplir con las especificaciones requeridas.



Bibliografía:

Juárez Badillo, E y Rico Rodríguez, A., *Mecánica de suelos*. Tomo I. Fundamentos de la Mecánica de Suelos. 3ª ed. LIMUSA. 11ª Reimpresión. 1986. 34 – 39.

Sowers B. George y Sowers F. George., *Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones*. LIMUSA. 4ª reimpresión. 1983. 26-30, 67-70, 137-152, 295-311.

Alfonso Rico y Hermilo del Castillo., *La ingeniería de suelos en las vías terrestres*. Volumen I. LIMUSA. 5ª reimpresión. 1984. 96-97.

Braja M.Das., *Principios de ingeniería en cimentaciones*. 4ª ed. International Thomson Editores. 79-86.

Mayo 1994, Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña, Santo Domingo, República Dominicana., *Manual de Cátedras de Mecánica de Suelos I*

Juan I. Báez Satizábal, Roberto A. López Zaldaña, Robert F. Hayden., *Métodos utilizados para mitigar la licuación y mejorar el comportamiento sísmico de los suelos*. Revista Asociación Salvadoreña de Ingenieros y Arquitectos, ASIA, Enero 1998.

Roberto A. López. Robert F. Hayden., *Soil Improvement, and Geosynthetics*, ASCE Geotechnical Division Speciality Conference Grouting, New Orleans, February 1992.

Roberto A. López. Roberto F. Hayden. *Uso de sistemas vibro en el diseño sísmico* ASCE Geotechnical Division Speciality Conference Grouting, Soil Improvement, and Geosynthetics New Orleans, February 1992.

R. A. López. J. I. Báez., *Mejoras del suelo promedio de columnas de grava en la planta de tratamiento para aguas negras de Puerto Vallarta*, Memorias de la X conferencia panamericana sobre mecánica de suelos e ingeniería de cimentación. Guadalajara, México. 29 de Octubre - 3 de noviembre de 1995.



Vibro-compaction & Vibro-Remplacement Bridge Structure East Cape Girardeau, Illinois Hayward Baker

Vibro Concrete Column (VCC) System Hayward Baker

Vibro Systems Hayward Baker

Soluciones Para Modificación de Suelos Keller Cimentaciones

Vibro Systems Case Histories GKN Hayward Baker

Jet Grouting Hayward Baker

Compaction Grouting Hayward Baker

Minipiles Hayward Baker

Lisheng Shao, Roberto López Z, Ignatius Po Lam, Francis Guiarte., *Sistema de Cimentación a base de Reforzamiento del Suelo para Terminal de Granos: Parte I*, XI Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. Foz do, Brasil. 08 - 12 de Agosto de 1999.

Roberto López Z, Francis Guiarte, Ignatius Po Lam, Lisheng Shao., *Sistema de Cimentación a base de Reforzamiento del Suelo para Terminal de Granos: Parte II*, XI Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. Foz do, Brasil. 08 - 12 de Agosto de 1999.

Zárate Rocha, Luis. *Los retos de la infraestructura en México*. Conferencia presentada en Agosto de 1996, en la Academia Mexicana de Ingeniería.