

Mejoramiento de suelos a base de pilas de agregado compactado para la cimentación del Centro de Distribución Herdez, en el Estado de México



Pánfilo Pérez, Héctor M. Valverde
Cimentec S.A. de C.V., México.
Aurelio M. Gutiérrez
Geopier Foundation Company, E.U.A.

ABSTRACT

The use of Rammed Aggregate Piers (soil improvement) to support the foundations of a Distribution Center Herdez (CDH) was to improve bearing capacity and to provide settlement control of the foundations and floor slabs that covers large areas with different design pressures. This system has proved to be an innovative geotechnical solution worldwide. This paper presents the evaluation of monitored behavior of such piers in an industrial building foundation in Mexico during the last eight months. It has been measured the curves stress vs deflection in the piers (top and toe) to determine its stiffness modulus. Comparisons between design stiffness modulus for piers and measured stiffness modulus from stress-strain curves are included. Results support the concept that under loading conditions, Rammed Aggregate Piers mainly work by side friction, implying that it is not necessary to have a firm stratum at the toe of piers for their proper support. General description of construction process, design parameters for foundation support, instrumentation procedure, obtained results, and conclusions for this history case are also included.

RESUMEN

El empleo de Pilas de Agregado Compactado (mejoramiento del subsuelo) para apoyar las cimentaciones de un Centro de Distribución Herdez (CDH) fue para aumentar la capacidad de carga y proveer control de asentamientos de las cimentaciones y losas de piso que cubren grandes superficies con distintas presiones de diseño. Este sistema ha probado ser una solución geotécnica innovadora en todo el mundo. Este trabajo presenta la evaluación del comportamiento monitoreado de estas pilas en un edificio industrial en México durante los últimos ocho meses. Se han medido las curvas esfuerzo vs deformación en las pilas (cabeza y punta) para determinar su módulo de rigidez. Se incluyen comparaciones entre los módulos de rigidez de diseño y los módulos de rigidez medidos de las curvas esfuerzo vs deformación. Los resultados refuerzan el concepto que bajo las cargas aplicadas, las Pilas de Agregado Compactado trabajan predominantemente por fricción, por lo que no necesariamente estas pilas deberán de apoyarse en un estrato resistente para trabajar adecuadamente. Se incluye una descripción del procedimiento constructivo, los parámetros de diseño para apoyo de la cimentación, procedimiento de ensayo, resultados obtenidos, así como las conclusiones para esta aplicación.

1 INTRODUCCIÓN

Debido a la necesidad de crecimiento y desarrollo la empresa Herdez S. A. de C. V. construye el Centro de Distribución Herdez (CDH), dentro del Parque Industrial México, ubicado sobre la carretera federal México – Zumpango, en el Mpo. de Zumpango, Edo. de México.

El área donde se proyecta el CDH, ocupa un área aproximada de 75,000 m², con una geometría en planta de forma trapecial (Fig. 1) y, presenta una topografía sensiblemente plana.

El CDH está conformado por un Almacén Automatizado y naves convencionales, desarrollado por una superficie de 15,500 m², y dos naves convencionales. Las descargas de éstas varían de 49, 98 y 147 kPa (5, 10 y 15 t/m²), las dos primeras corresponden a las naves convencionales y la última a la zona automatizada con altura de hasta 35 m.

Las alternativas de cimentación evaluadas para el CDH fueron:

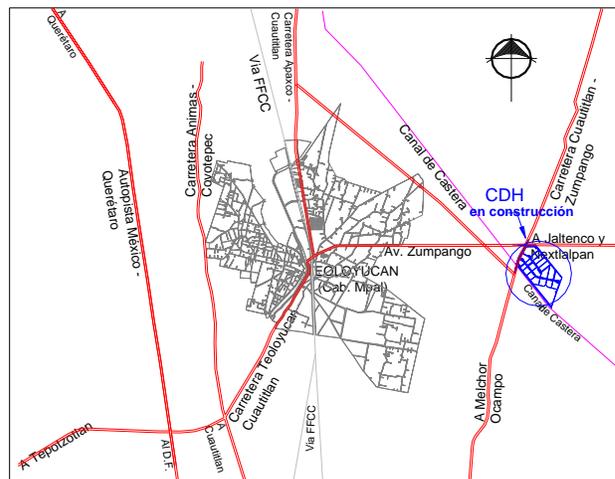


Figura 1. Croquis de localización del CDH

- a) **Cimentación a base losa de cimentación:** En principio, se propuso apoyar el CDH sobre una losa de cimentación, en la que la presión mínima ejercida de 49 kPa, producía asentamientos mayores a 20 cm, por la consolidación inducida de la arcilla lacustre, el cual no se consideró aceptable, además de presentar asentamientos diferenciales de 10 cm respecto a las áreas restantes del almacén. Además de que la arcilla lacustre podría generar una falla por extrusión (flujo plástico de la arcilla).
- b) **Cimentación parcialmente compensada a base de un cajón de cimentación,** con dimensiones en planta de 45 x 140 m, con profundidad de desplante de 8.0 m. De los análisis de expansión en el fondo de la excavación se determinó que ésta sería del orden de 4.8 cm, y el asentamiento inmediato en el centro del cajón sería de 4 cm, mientras que a largo plazo se incrementaría hasta 5.3cm. Debido a las características del proyecto no se consideró factible el empleo de un cajón de cimentación, decidiéndose por una losa superficial, a la que se le tendría que dar el apoyo para garantizar que las deformaciones estuvieran en el rango de lo permisible.
- c) **Cimentación profunda mediante pilas coladas "in situ",** de sección circular, para las áreas de 49 y 98 kPa las pilas debieron desplantarse a 10 y 15 m respecto al nivel de terreno natural, y para el área de 147 kPa (Nave Automatizada) se recomendó desplantar éstas hasta una profundidad de 25 m.
- d) **Cimentación a base de pilas de agregado compactado:** este tipo de solución de mejoramiento de suelos tuvo como objeto aumentar la capacidad de carga del subsuelo y disminuir o controlar los

asentamientos. Debido al desempeño geotécnico común de esta solución, cabe mencionar que no es necesariamente extender la longitud de las Pilas de Agregado hasta un "estrato resistente".

Tomando en consideración el costo de esta cimentación y tiempos de construcción, el cliente seleccionó el sistema de mejoramiento de suelo usando Pilas de Agregado Compactado, y sobre éstos una losa de cimentación (para nave automatizada) como la mejor opción técnica y económica.

Como parte de las pruebas de control de calidad y verificación del comportamiento de las pilas de agregado compactado, se llevaron a cabo pruebas de módulo de rigidez, para medir las deformaciones de la pila en respuesta a los esfuerzos aplicados, así como la rigidez de éstas.

2 ESTRATIGRAFÍA Y PROPIEDADES DEL SUBSUELO

De acuerdo con la exploración geotécnica (Valverde, 2007), el subsuelo está conformado por la interestratificación de depósitos arcillosos y arenosos. En resumen se presentan las siguientes unidades estratigráficas (ver Fig. 2):

Estrato 1. Capa vegetal (0.0 a 0.60 m)

Constituido por una arcilla arenosa, de color café oscuro, de consistencia media (5 a 7 golpes en la prueba de penetración estándar), con raíces. El contenido de agua del suelo natural se obtuvo entre 24.5 % y 36.5%.

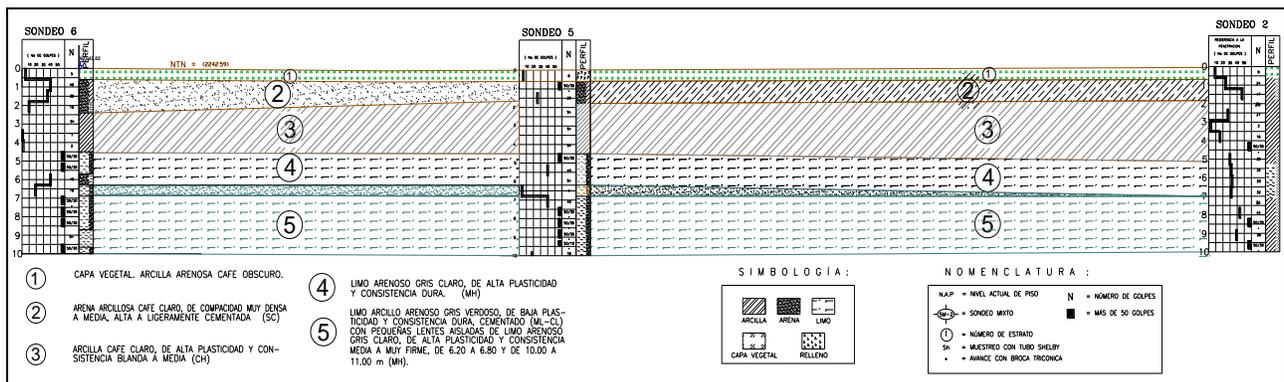


Figura 2. Perfil estratigráfico

Estrato 2. Toba arcillo arenosa (0.60 a 2.40 m)

Subyaciendo, hasta una profundidad entre 1.10 y 2.40 m, se encuentra una toba arcillo arenosa o areno arcillosa café claro, con finos de baja plasticidad (CL, SC y CL-SC conforme el SUCS), de consistencia muy firme a dura o compactidad media a muy densa (21 a 39 golpes), ligera a altamente cementada. El contenido de agua se determinó variable en el amplio rango de 8.6 a 48.5%, con un porcentaje de finos entre 34 y 76%; el límite líquido resultó en el rango de 30 % a 49 %, con un índice de plasticidad entre 8 % y 15%.

Estrato 3. Arcilla (2.40 a 5.20 m)

Subyace al estrato anterior con espesor de 2.00 a 2.80 m, una arcilla lacustre, de alta plasticidad (CH) y consistencia blanda (1 a 2 golpes), café claro, con grumos aislados gris claro y café rojizo; ocasionalmente se presentan fracciones de consistencia media (6 golpes). El contenido de agua del suelo natural se obtuvo variable de 244 % a 349 %, con un porcentaje de finos promedio entre 89 % y 100 %; el límite líquido resultó variable de 267 % a 375%, con un índice de plasticidad entre 202 % y 316 %, con una densidad natural entre 1120 y 1190

kg/m³. La resistencia al esfuerzo cortante, en ensayos de compresión simple la resistencia última, q_u , se determinó de 14.7 a 91.2 kPa (1.5 a 9.3 ton/m²), mientras que en ensayos de compresión triaxial rápida (UU) se obtuvieron valores de la cohesión aparente, c_u , de 9.8 kPa a 39.2 kPa (1.0 a 4.0 ton/m²) con un ángulo de fricción interna, ϕ , entre 0 y 14.0°; finalmente, en ensayos de consolidación unidimensional se determinó, para el esfuerzo efectivo medio de las muestras ensayadas, un módulo de deformación volumétrica, m_v , de 0.0750 a 0.3572 cm²/kg, con una presión de consolidación, P_c , entre 49.0 y 107.8 kPa (0.5 y 1.1 t/m²)

Estrato 4. Limo arcillo arenoso (5.20 a 12.20 m)

Bajo el estrato 3, con un espesor de 7.0 a 10.20 m, un limo arcillo arenoso, gris verdoso de baja plasticidad (ML-CL) y consistencia dura (40 a más de 50 golpes), altamente cementado. El contenido de agua se determinó variable de 19.4 % a 49.8%, con un porcentaje de finos entre 58 % y 83%; el límite líquido resultó en el rango de 35 a 45%, con un índice de plasticidad entre 10 y 17%.

Cabe resaltar que dentro de este estrato se detectaron aisladamente lentes de limo arenoso, de alta plasticidad (MH) y consistencia media a muy firme (4 a 25 golpes). La resistencia al esfuerzo cortante de acuerdo con la prueba de compresión simple q_u de 52 kPa (5.3 ton/m²), mientras que en ensayos de compresión triaxial rápida se obtuvieron valores de c_u , de 19.6 a 29.4 kPa (2.0 a 3.0 ton/m²) con un valor de ϕ entre 11 y 31.0°; finalmente, en ensayos de consolidación unidimensional se determinó, para el esfuerzo efectivo medio de las muestras ensayadas, un m_v de 0.0090 a 0.0139 cm²/kg, con una P_c entre 88.3 y 108 kPa (0.9 y 1.1 kg/cm²).

Estrato 5. Limo arenoso (12.20 a 16.60 m)

Entre 12.2 y 16.6 m de profundidad, con espesor variable de 1.2 a 4.2 m, se encuentra un limo arenoso de alta plasticidad (MH) y consistencia muy firme a dura (27 a más de 50 golpes) café claro y gris claro. El contenido de agua se determinó variable de 39.2 % a 70.9%, con un porcentaje de finos entre 56 % y 91%; el límite líquido se obtuvo de 55 % a 58 %, con un índice de plasticidad entre 19 y 24%.

Estrato 6. Limo arenoso (16.60 a 23.10 m)

Bajo el estrato anterior hasta una profundidad que varía de 19.7 a 23.1 m, un estrato limo arenoso, gris verdoso y gris oscuro, de alta plasticidad (MH) y consistencia muy a dura (22 a más de 50 golpes). El contenido de agua del suelo natural se obtuvo entre 30.3 % y 54.6%, con un porcentaje de finos variable de 76 % a 88%; el límite líquido se determinó entre 69 % y 72%, con un índice de plasticidad de 31 % a 35%.

Cabe destacar que a una profundidad entre 16.3 y 18.2 m, con un espesor de 1.0 a 2.1 m, se detectó una lente de arena fina a media, poco limosa (SM) gris verdoso, de compacidad muy densa (más de 50 golpes).

2.1 Clasificación sísmica del terreno.

Con base en la carta de Regionalización Sísmica de la República Mexicana, el CDH se ubica dentro de la Zona B, donde las velocidades características de las ondas de cortante, β_c , del terreno son de 400 m/s y el período característico dominante de vibración, T_c , es igual a 5.3 s.

El coeficiente sísmico básico es de 0.30, y el terreno tipo II. El CDH se clasificó como estructura del Grupo A, por lo que se recomienda incrementar éste valor hasta 0.45 (Valverde, 2007).

3 DISEÑO GEOTÉCNICO

La metodología para el diseño de las Pilas de Agregado Compactado se dividió en tres pasos:

3.1 Paso 1.

Considerando que las distintas áreas del CDH transmitirán sus cargas a la cimentación bajo una losa, se analizó el empleo de un terraplén sobre Pilas de Agregado Compactado. Los parámetros de diseño para determinar la capacidad de carga de la Pila de Agregado Compactado y la masa de suelo, pueden ser estimados, conociendo el número de golpes de acuerdo a la prueba de penetración estándar (Fox y Cowell, 1998), la cual también se puede emplear para determinar el módulo de rigidez del suelo.

3.2 Paso 2. Cálculo de los asentamientos.

El asentamiento total bajo el terraplén se calcula mediante la suma del asentamiento en la zona del suelo reforzado (zona superior) y el asentamiento de la zona bajo el fondo de las Pilas de Agregado Compactado (zona inferior). Los procedimientos para calcular los asentamientos en la zona superior están basados en una analogía de resortes (Lawton y Fox 1994, Wissmann y Fox 2000).

El procedimiento utilizado incluye la hipótesis de que la losa es rígida en relación con el suelo de apoyo. De la ecuación 1 se deduce que el esfuerzo aplicado en el tope de las Pilas de Agregado Compactado (q_g), depende del esfuerzo de contacto promedio de la losa (q), la relación de rigidez entre las pilas de agregado y la rigidez del suelo (R_s), y la relación entre el área seccional de las pilas de grava y el área de la losa (R_a), ecuación 2:

$$q * A = q_g * A_g + q_s + A_s \quad [1]$$

$$q_g = \left(\frac{R_s}{R_a R_s - R_a + 1} \right) \quad [2]$$

La relación de rigidez R_s , se define como la relación entre el módulo de rigidez de Pilas de Agregado Compactado (k_g) y el módulo de rigidez del suelo (k_m), ecuación 3. El módulo de rigidez se define como el cociente del esfuerzo aplicado al tope de la pila de grava y la deformación vertical resultante. El asentamiento en la zona superior (δ_{uz}), se determina como la división del esfuerzo aplicado en el tope de la pila entre el módulo de rigidez de las pilas de agregado compactado, ver ecuación 4.

$$\delta_{uz} = \frac{q_s}{k_g} \quad [3]$$

$$R_s = \frac{K_g}{k_m} \quad [4]$$

Los asentamientos en la zona inferior bajo la zona reforzada se calcularon usando las teorías convencionales de elasticidad (Terzaghi y Peck, 1967), con valores de módulo de elasticidad interpretados de prueba de laboratorio o pruebas in situ, o bien, mediante ensayos de consolidación.

En el diseño de la cimentación CDH se consideraron las siguientes descargas:

- Área Automatizada: 147 kPa (15.0 t/m²)
- Área Convencional: 98 kPa (10.0 t/m²)
- Área Convencional: 49 kPa (5.0 t/m²)

El diseño de Pilas de Agregado Compactado consistió en colocar pilas abajo del terraplén, utilizando la relación de área de reemplazo, Ra de 7%, una relación de rigidez, Rs de 12 %, y una presión de contacto de 147.1 kPa (15 t/m²). Sustituyendo en las ecuaciones 1 y 2 y usando un módulo de rigidez (kg) de 3377 kg/cm³, se obtuvo un asentamiento en la zona superior de 3.0 cm, y en la zona inferior de 1.1 cm. El asentamiento total máximo calculado a largo plazo es de 4.1 cm [1.6 pulgadas].

3.3 Paso 3. Determinación del número y separación de las pilas de grava compactada.

Para la determinación del número de pilas de agregado (N_r) para disminuir a valores admisibles los asentamientos se empleó la siguiente expresión:

$$N_r = \frac{P}{Q_{cell}} \quad [5]$$

donde:

P = carga total; Q_{cell} = Capacidad de carga de la pilas de grava; w = Carga uniformemente repartida.

La separación de las pilas de agregado se determinó mediante la ecuación 6:

$$S_g = \frac{Q_{cell}}{w} \quad [6]$$

De acuerdo con estas expresiones se determinó la separación centro a centro y el número de Pilas de Agregado Compactado para cada una de las áreas del CDH (ver Tabla 1):

En la Figura 3, se muestra el sembrado de Pilas de Agregado Compactado en el CDH.

Tabla 1. Separación y longitud de Pilas de Agregado Compactado

| Área kPa (t/m ²) | Separación (m) | Longitud (m) | No. de Elementos |
|------------------------------|----------------|--------------|------------------|
| 147 (15) | 2.6 | 5.7 | 925 |
| 98 (10) | 2.0 | 5.9 | 969 |
| 49 (5) | 3.0 | 6.2 | 668 |

4 PROCESO CONSTRUCTIVO

Como se ilustra en la Figura 4, la construcción de una Pila de Agregado Compactado, consiste de tres pasos:

Hacer una perforación cuyo diámetro puede variar desde 0.61 m (24") hasta 0.91 m (36"), y profundidades típicamente desde los 2.1 m hasta 8 m.

- a) Colocar capas de agregado (calidad de base) en el interior de la perforación, de 0.3 m de espesor.
- b) La primera capa de agregado del fondo de la perforación generalmente consiste en grava limpia y se apisona lo suficiente para formar un bulbo bajo en nivel del fondo de la perforación.
- c) Compactar la primera y las capas consecutivas de grava, mediante el uso de un pisón biselado a 45°, el cual se adapta a un martillo hidráulico de alta energía.

Para aplicar el apisonamiento o compactación, se necesita una excavadora.

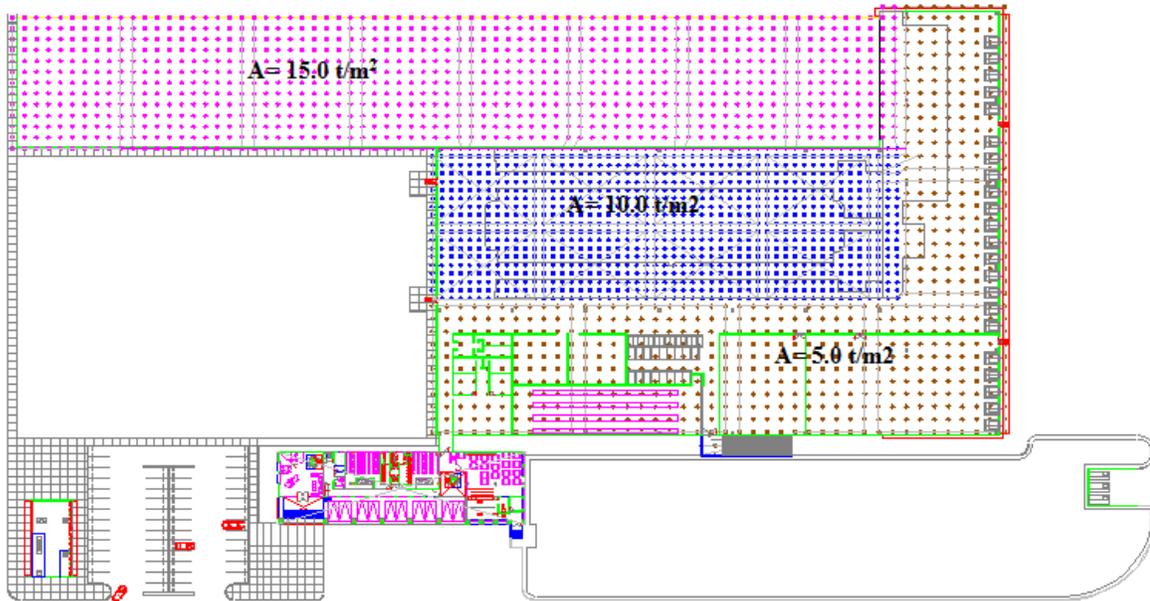


Figura 3. Sembrado de Geopier en el CDH

Durante el proceso de compactación de cada capa, el pisón biselado desplaza la grava no solo en sentido vertical, sino también lateralmente contra las paredes de la perforación. La acción de compactación aumenta los esfuerzos laterales en la masa del suelo alrededor de las pilas de grava, produciendo un aumento en la rigidez y resistencia al esfuerzo cortante del suelo adyacente. El instalar o construir Pilas de Agregado Compactado en suelos compresibles resulta en un incremento de la capacidad de carga y un mejor control de asentamientos, causados por la carga de la estructura (Handy, 2001).

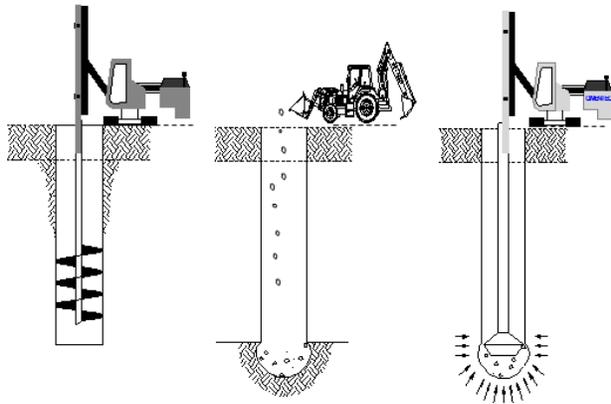


Figura 4. Procedimiento constructivo de las Pilas de Agregado Compactado.

5 ASENTAMIENTOS

Durante ocho meses de monitoreo, se han medido los asentamientos en bancos de nivel flotantes ubicados en el contorno e interior de la nave automatizada de 147 kPa (15 t/m²), mostrando asentamientos totales del orden de 2.2 cm (Fig. 5).

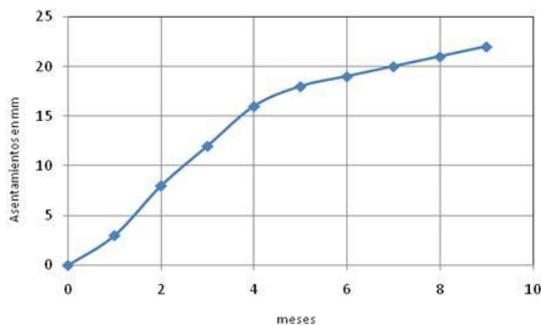


Figura 5. Curva tiempo vs deformación

6 PRUEBAS DE VERIFICACIÓN DE CALIDAD

6.1 Prueba de módulo

6.1.1 Sistema de reacción.

Se realizaron pruebas de módulo de rigidez, con el objeto de verificar el comportamiento y el valor de rigidez asumido en el diseño de las Pilas de Agregado Compactado.

Estas pruebas se efectuaron siguiendo las especificaciones de la norma ASTM 1143.

El sistema de reacción para la prueba de módulo de rigidez, consistió en un arreglo de una Pila de Agregado Compactado de 5.7 m de longitud, y una viga de reacción principal (Figs. 6 y 7). La unión de las barras helicoidales a la viga principal se realizó por medio de barras roscadas de alta resistencia, reaccionando contra las barras helicoidales

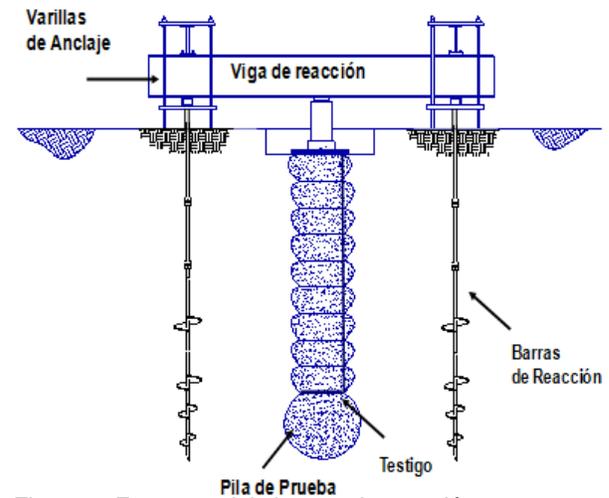


Figura 6. Esquema del sistema de reacción.



Figura 7. Ejecución de la prueba de módulo en la Pila de Agregado Compactado.

Las pruebas se hicieron cuatro días después de haber construido la Pila de Agregado Compactado. A base de mediciones de campo, se ha encontrado que una espera de cuatro días después ya se ha disipado significativamente la presión de poro generada durante la construcción de la pila.

Durante la construcción de las Pilas de Agregado de prueba se instala un testigo encima de la primera capa de prueba que forma el bulbo de fondo. Este testigo consiste en una placa de 1/2" de espesor, a la cual se

adaptan dos varillas de 0.5" de diámetro, aisladas del agregado alrededor por un tubo de PVC de 3/4", que se extiende desde el fondo de la pila hasta la superficie del terreno. En el tope de la pila de agregado se construye una base de concreto de 0.76 m de diámetro, desde el nivel de desplante de la zapata hasta la superficie.

Los desplazamientos verticales se midieron mediante dos micrómetros colocados sobre la cabeza de la pila, dispuestos a 120 grados entre sí, y dos micrómetros en el tope de los testigos para medir la deformación en el fondo del elemento. Los micrómetros son de una resolución de 0.01 de milímetros con una carrera del vástago máxima de 50 milímetros. Cada micrómetro se fijó al sistema de referencia por medio de bases magnéticas cuidando la verticalidad de vástago de medición; éstos se apoyaron sobre superficies lisas para evitar la fricción con la cabeza de la pila de grava durante los eventuales movimientos normales del vástago del micrómetro.

La carga se aplicó utilizando un gato hidráulico y una bomba manual. Cabe mencionar que el gato hidráulico y la bomba se calibraron en conjunto, así como los micrómetros.

6.1.2 Método de prueba

Para las pruebas de módulo se siguió de manera similar el método de carga estándar especificado en las normas ASTM D-1143, que establece que la carga debe incrementarse gradualmente entre diez y quince incrementos de 10 a 15% del esfuerzo de diseño calculado en el tope de las Pilas de Agregado Compactado. Las pruebas se realizaron hasta alcanzar un esfuerzo máximo en el tope de los elementos de prueba hasta 150% del esfuerzo de diseño (1033 a 1480 kPa).

6.1.3 Interpretación

Se evaluaron las curvas esfuerzo-deformación de dos pruebas estáticas, en donde se observó que las deformaciones para el 100% del esfuerzo de diseño variaron de 7 hasta 12 mm (0.5"). Por otro lado, los testigos instalados en la base de la pila indicaron deformaciones casi nulas, lo cual indica que las pilas trabajan predominantemente por fricción (Fig. 8).

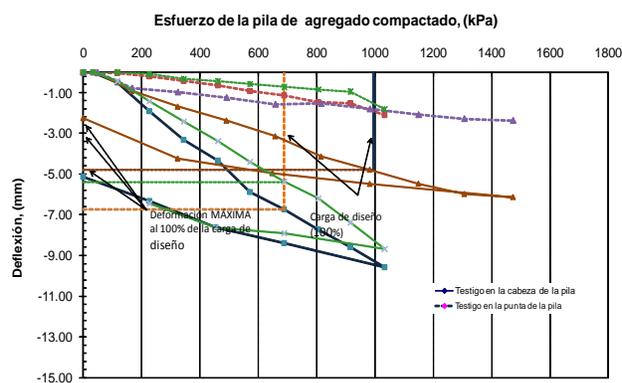


Figura 8. Resultados de la prueba de módulo a partir de la curva esfuerzo vs deformación.

6.2 Pruebas SPT

Con el objeto de evaluar el efecto de mejoramiento de suelos se realizaron pruebas SPT, de acuerdo con la norma ASTM D-1586, a una separación de 0.9, 1.4 y 1.9 m del centro de la Pila de Agregado Compactado. Los resultados de las pruebas SPT del suelo sin mejorar y mejorado se muestran en las Figuras 9.a y 9.b para las áreas de 49 kPa (5t/m²) y 98 kPa (10 t/m²), respectivamente.

6.1.4 Almacén convencional de 49 kPa (5 t/m²)

En la Figura 9a, se muestra en el perfil que hasta una profundidad entre 1.1 y 2.4 m (estrato 2), el número de golpes a una distancia de 0.9 m del centro de la Pila de Agregado Compactado se incrementó entre 6 y 10 golpes a la penetración estándar (es decir: de 6 golpes que se tenían originalmente paso ser 12 y de 21 aumentó hasta 31 golpes). Por otro lado, a una separación de 1.4 m del centro de la pila, la resistencia a la penetración SPT sólo se incrementó en 2 golpes promedio a la penetración estándar.

En los estratos 3 y 4 de 2.4 a 6.5 m, a una separación de 0.9 m del centro de la pila, el número de golpes a la penetración estándar se incrementó entre 6 a 8 golpes, es decir: de 4 golpes que se tenían de un suelo sin mejorar aumentó a 10 y de 20 se incrementó hasta 28 golpes. A una separación de 1.4 m, el aumento del número de golpes fue de hasta 5. Para una separación de 1.9 m no existió incremento al número de golpes a la penetración estándar.

6.1.5 Almacén convencional de 98 kPa (10 t/m²)

En la Figura 9b, se observa que hasta la profundidad de 2.4 m, a una distancia horizontal de 0.9 m (centro a centro de la pila) la resistencia a la penetración estándar aumentó en promedio 2 golpes (es decir: aumentó de 1 a 3 golpes a la penetración estándar).

De la profundidad de 2.4 a 6.5 m, el número de golpes se incrementó entre 1 a 8 golpes a la penetración estándar, es decir: No. de golpes del suelo sin mejorar era de 3 golpes, con el mejoramiento se alcanzó hasta 11 golpes y a una distancia horizontal de 1.4 m, la resistencia al número de golpes incrementó hasta 4 golpes máximo.

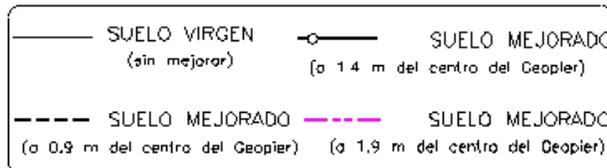
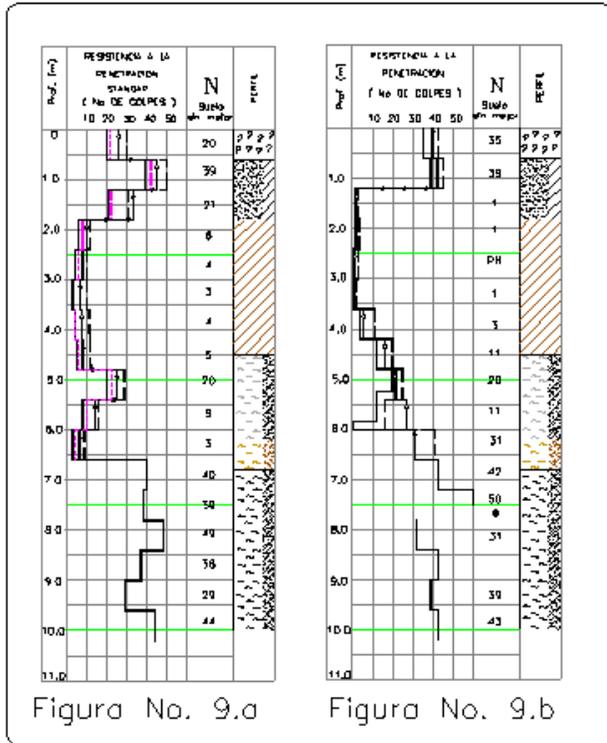
6.3 Pruebas de Cono

En la Figura 10 se muestran los perfiles de resistencia de punta, q_c, obtenidos con la prueba de cono eléctrico. Donde se observa incrementos que varían de 27 % hasta 300%. Los mayores incrementos en la resistencia se encontraron en aquellos estratos adyacentes a lentes de arena.

7 CONCLUSIONES

Ante la presencia de suelos blandos hasta 6.5 m de profundidad, la solución de cimentación más factible para la nave automatizada y las naves convencionales fue el

empleo de Pilas de Agregado Compactado de 5.7, 5.9 y 6.2 m de longitud, misma que resultó ser una alternativa económica, con respecto a las soluciones tradicionales (pilas coladas in situ o cajón de cimentación).



Figuras 9.a y 9.b. Perfiles estratigráficos del suelo sin mejorar vs suelo mejorado en las áreas de 49 kPa (izquierda) y 98 kPa (derecha).

La Pilas de Agregado Compactado se diseñaron para proveer apoyo a la losa de cimentación, y se construyeron hasta el estrato de arcilla compresible (estrato 4, hasta 6.2 m de profundidad).

El procedimiento constructivo de las Pilas de Agregado Compactado consistió en: hacer una perforación típica de pilas de 0.76 m de diámetro, colocar grava en capas de 0.3 m de espesor y compactar con un martillo hidráulico cada capa.

Los asentamientos después de ocho meses de su construcción fueron de 2.2 cm, lo que está acorde con el diseño (de proyecto 4.1 cm de deformación a largo plazo).

Los resultados de la prueba de módulo, verificaron el diseño de las pilas, cumpliendo satisfactoriamente el comportamiento esperado.

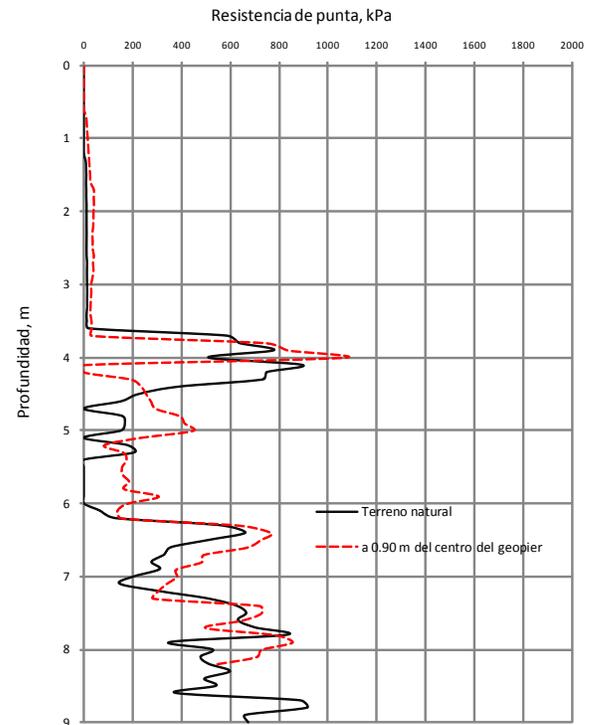


Figura 10. Perfiles de resistencia de punta vs profundidad



Avance constructivo de la nave automatizada hasta agosto de 2010

De acuerdo con las pruebas de módulo, se muestra que las Pilas de Agregado, trabajan exclusivamente por fricción debido a que las deformaciones en la base de la pila fueron mínimas o casi nulas, lo que está de acuerdo con las consideraciones teóricas.

Las pruebas SPT indican que el número de golpes en los estratos 2 (arcilla lacustre), 3 y 4 se incrementaron en un mínimo de 6 a 10 golpes a la penetración estándar; a una distancia de 0.90 m del centro de la pila de agregado, a medida que las pruebas de SPT se separan de la pila, el efecto de mejoramiento del suelo tiende a ser cada vez menor. Handy et al, 2002, and White et al, 2002, citan que el incremento del esfuerzo lateral en

suelos arcillosos es casi nulo, a diferencia de los suelos arenosos. Cabe mencionar que las descargas de las estructuras (losa o zapatas) caen directamente a las pilas de agregado compactado y no a la matriz del suelo. Las experiencias de Handy concuerdan con lo medido en este proyecto.

En los perfiles de resistencia de punta qc, los mayores incrementos en la resistencia se encontraron en aquellos estratos adyacentes a lentes de arena.

Esta solución es simple e innovadora, pudiéndose emplear para la cimentación de edificios, como para terraplenes, tanques de almacenamiento, losas de piso, muros de contención, etc. construidos sobre suelos blandos de alta compresibilidad, sin la necesidad de apoyarlos en una capa dura. El buen comportamiento observado de la nave automatizada, nos permite considerar esta técnica como un método de cimentación adecuado, rápido, seguro y económico.

8 REFERENCIAS

- ASTM (1999), *Standard test Method for Penetration test and Split , Barrel sampling of Soils, D-1586.*
- ASTM (2007), *Standard Test Method for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load, D-1143.*
- Fox, N.S. y M.J. Cowell (1998). *Geopier Foundation and Soil Reinforcement Manual*, Geopier Foundation Company, Inc., Scottsdale, AZ.

- Handy, R.L. (2001), *Does Lateral Stress Really Influence Settlement*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 127 (7) (623-626).
- Handy, R. L., White, D. J. and Wissmann, K. J. (2002), *Concentric Stress Zones near Rammed Aggregate Piers*. (Manuscript in preparation-draft to be provided upon request).
- Lawton, E. C., y N. S. Fox (1994), *Settlement of structures supported on marginal or inadequate soils stiffened with short aggregate piers*, Geotechnical Specialty Publication No. 40: Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments, ASCE, 2, 962-974.
- Valverde L. H. (2007), *Informe técnico de mecánica de suelos para el Grupo Herdez*, Ingenieros Especialistas en Cimentaciones S. C. julio y octubre de 2007.
- White, D. J., Suleiman, H. T Pham, and Bigelow, J. (2002), *Shear Strength Envelopes for Aggregate used in Geopier Foundation Construction*, Final Report. Iowa State University. September.
- Wissmann, K.J. y N.S. Fox (2000), *Design and Analysis of Short Aggregate Piers Used to Reinforce Soils for Foundation Support.*, Proceedings, Geotechnical Colloquium. Technical University Darmstadt. Darmstadt, Germany. March, 2000.
- Terzaghi, K., y R.B. Peck (1967), *Soil Mechanics in Engineering Practice*, John Wiley and Sons, New York, New York.