



1 ANTECEDENTES

1.1 Justificación del trabajo

La existencia de una amplia gama de metodologías para determinar el comportamiento estático de cimentaciones piloteadas en suelos granulares y arcillosos, ocasiona que el proceso de diseño involucre la selección de una de las metodologías del universo existente. Para llevar a cabo dicha selección es necesario tener en cuenta el grado de precisión y conservadurismo de cada metodología propuesta. Razón por la cual es fundamental realizar una comparación cuantitativa de resultados teóricos contra experimentales.

Por otro lado, en los últimos años la demanda creciente en la mejora de los servicios públicos en el Área Metropolitana del Valle de México ha llevado al desarrollo de importantes obras de infraestructura *i.e.* los Segundos pisos de periférico y el Viaducto Elevado Bicentenario, siendo parte fundamental de este tipo de proyectos el diseño de su cimentación.

El diseño de una cimentación debe cumplir dos objetivos fundamentales: aportar la capacidad de carga suficiente para comportarse favorablemente ante las sollicitaciones de la superestructura; y, garantizar que los asentamientos producidos por las mismas sean de una magnitud tal que no afecten las condiciones de servicio de la estructura.

El primer paso que se obtiene dentro del proceso de diseño de una cimentación es la definición del tipo que se empleará. En términos generales, las cimentaciones se clasifican en superficiales y profundas. Dentro de las cimentaciones superficiales existe la posibilidad de emplear zapatas, ya sea corridas o aisladas, así como losas de cimentación. Para el caso de cimentaciones profundas comúnmente se emplean pilas y pilotes.

Dentro del proceso de diseño de una cimentación profunda es recomendable llevar a cabo pruebas estáticas de carga axial y lateral en pilas coladas en sitio, a fin de cuantificar directamente en campo su respuesta ante las sollicitaciones que se impondrán a la



estructura a lo largo de su vida útil; es decir, los resultados desprendidos de pruebas de carga *in situ* deben de servir para corroborar y evaluar los parámetros que marcan el comportamiento estático de las cimentaciones.

Por otra parte, uno de los métodos de análisis de capacidad de carga en geotecnia que está cada vez más en boga es el numérico. Una prueba de carga es plausible de ser modelada mediante un algoritmo numérico. Modelar de esta manera una prueba de carga nos permite conocer de una mejor forma el comportamiento del suelo y su interacción con la cimentación, a la par que permite conocer resultados que no fueron medidos directamente en la prueba y con ello tener un aporte adicional encaminado a conocer el comportamiento del sistema suelo-pila.

En el presente trabajo se llevará a cabo la calibración de cuatro modelos numéricos para describir el comportamiento de dos pruebas de carga axial y dos pruebas de carga lateral llevadas a cabo en el marco del proceso de diseño para la cimentación del Distribuidor vial San Antonio. Una vez calibrados los modelos se procederá a emplearlos para conocer con mayor precisión el comportamiento de la interacción suelo-pila a través de la obtención de las curvas p-y, t-z, Q-z y esfuerzo deformación. De tal manera que la justificación del presente trabajo está dada porque aporta una descripción cuantitativa para la interacción suelo-pila a través de la calibración de un modelo numérico que describe el comportamiento de pruebas de carga llevadas a cabo en pilas coladas en sitio.

Planteamiento del problema

Con el propósito de conocer la capacidad última de pilas coladas en sitio diversos investigadores han propuesto diversas metodologías, destacándose las siguientes:

- O'Neill y Reese (1999)
- Reese y Wright (1977)
- Poulos y Davis (1980)
- Método de la FHWA88 Modificado (1999)
- Decourt (1995)

Estos métodos han sido aplicados en la práctica ingenieril sin tomar en cuenta su grado de conservadurismo. Por lo tanto, surge el interés por evaluarlos a través de pruebas de carga realizadas en pilas. Por otra parte, con el fin de conocer el comportamiento de manera más precisa que se da en la interacción suelo-pila, una de las metodologías más empleadas es la modelación numérica puesto que con su aplicación se obtienen una gran cantidad de resultados que pueden ser procesados para tal fin. El análisis de capacidad de carga por medio de modelos numéricos se lleva a cabo a través de su previa calibración con los resultados obtenidos en pruebas de carga.



1.2 Objetivos y alcances

Los objetivos del presente trabajo de tesis son:

- Desarrollar y calibrar modelos numéricos de elementos finitos que representen el comportamiento del sistema suelo-pila tomando como base los resultados que se determinaron a través de cinco pruebas de carga en pilas coladas en sitio, dos de carga axial y tres de carga lateral. Las pruebas de carga se llevaron a cabo en dos sitios diferentes, los cuales en lo sucesivo identificaremos como San Antonio y Periférico.
- Comparar cuantitativamente los resultados obtenidos por medio de pruebas de carga en pilas aisladas, contra aquellos que se obtienen a través de metodologías teóricas y semiempíricas.
- Evaluar el grado de precisión de las metodologías utilizadas para describir el comportamiento estático de cimentaciones piloteadas en materiales granulares y arcillosos.
- Obtener las curvas t-z, Q-z y p-y de los dos sitios en estudio empleando el modelo numérico de elementos finitos una vez calibrado.

Los alcances del presente trabajo son la obtención de las curvas carga – desplazamiento, curvas de transferencia de carga a lo largo del fuste de la pila, t-z, q-z y p-y a partir de un modelo numérico de las pruebas de carga en estudio.

A fin de cumplir con los objetivos establecidos se procederá a llevar a cabo la siguiente metodología:

- Presentar la caracterización geotécnica de los sitios en donde se llevaron a cabo las pruebas de carga.
- Hacer la presentación de los resultados obtenidos durante la ejecución de las pruebas de carga.
- Exponer los cinco criterios antes mencionados para llevar a cabo la evaluación de la capacidad de carga en pilas
- Exponer el criterio desarrollado por el API (American Petroleum Institute) para llevar a cabo el análisis de la capacidad de carga lateral del suelo.
- Elaborar cinco modelos de elemento finito que describan el comportamiento carga-desplazamiento obtenido durante la ejecución de las pruebas de carga.
- Mediante los modelos numéricos calibrados se obtienen las curvas carga – desplazamiento, curvas de transferencia de carga a lo largo del fuste de la pila, curvas t-z, Q-z y p-y.
- Se realiza la comparación de las curvas obtenidas, principalmente t-z, Q-z y p-y con curvas teóricas.



1.3 Condiciones del subsuelo

A continuación se describen algunas generalidades a través de las cuales se logra llevar a cabo la caracterización geotécnica del sitio en estudio, es por ello que aquí únicamente se presentan metodologías estándar – tanto de campo como de laboratorio – a fin de lograr tal cometido. Se pretende que al realizarse de esta manera, una vez que se presenten los resultados obtenidos en los sitios en particular quede justificado el por qué de tales pruebas.

Definir las condiciones del subsuelo significa conocer aquellos parámetros, tanto cuantitativos como cualitativos, a través de los cuales es posible conocer el comportamiento del suelo ante diversas sollicitaciones de trabajo.

Para el diseño de cimentaciones piloteadas en suelos arcillosos el principal parámetro que se ha de determinar es la cohesión; en tanto que, para suelos granulares es el ángulo de fricción interna. El determinar propiedades índice del suelo, tales como granulometría (o porcentaje de finos), contenidos de agua, índices de plasticidad, etc.; resulta parte de la información necesaria para llevar a cabo los análisis conducentes al diseño geotécnico.

Los parámetros por medio de los cuales se ha de caracterizar el suelo se obtienen a través de pruebas de campo y de laboratorio. A continuación se describen brevemente.

1.4 Pruebas de campo

El propósito de llevar a cabo la exploración, o pruebas de campo, es determinar la estratificación y las propiedades ingenieriles para el sitio en estudio (Bowles, 1996)

En el ámbito de la Ingeniería Geotécnica existen un gran número de pruebas de campo que nos ayudan a definir las propiedades ingenieriles para el sitio en estudio, una de las principales es la prueba de penetración estándar (Standard Penetration Test, SPT), aunque también son ampliamente utilizadas las pruebas de cono dinámico.

1.5 Prueba SPT

La norma ASTM D 1586-84 señala las especificaciones que debe cumplir la prueba de penetración estándar (SPT). A continuación se describe la metodología para llevar a cabo dicha prueba:

- El muestreador estándar, Figura 1.1, cuyos diámetros interno y externo son de 35 cm y 50 cm respectivamente, se coloca hasta el fondo de la perforación. El muestreador estándar es un tubo de media caña y está provisto en sus extremos

de dos piezas roscadas; la pieza inferior es una zapata afilada de acero endurecido y la superior es una cabeza que sirve para unir el muestreador con las barras huecas de acero.

- Una vez se ha colocado el muestreador en el fondo de la perforación, se hince mediante percusión haciendo uso de un martinete en caída libre, de 65 kg, con una altura de caída de 75 cm.
- El número de golpes necesario para penetrar 60 cm en el terreno al muestreador es registrado en intervalos de 15 cm, definiéndose como resistencia a la penetración estándar, al número N de golpes necesarios para hincar el penetrómetro los 30 cm intermedios.

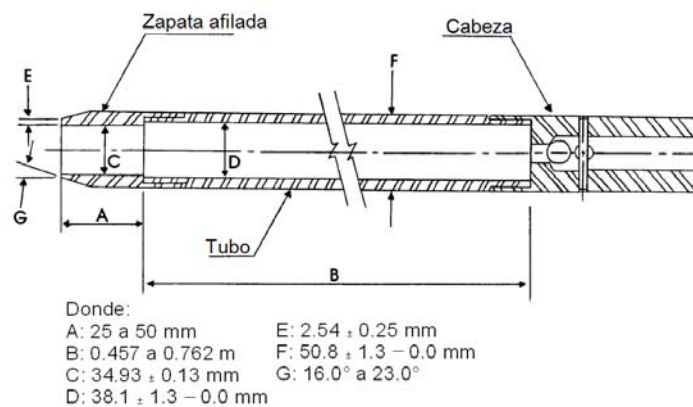


Figura 1.1. Tubo de pared gruesa partido longitudinalmente, (ASTM D1586-84)

En la figura 1.2 se muestra el tubo de media caña y la recuperación de material en campo, se aprecia la alteración de la muestra.



Figura 1.2. Recuperación de muestras alteradas por medio del tubo de pared gruesa partido longitudinalmente



1.6 Pruebas de carga en pilas, generalidades

Para finalizar el presente capítulo se realiza una breve descripción de la metodología que se sigue para llevar a cabo pruebas de carga en pilas.

Las pruebas de carga en pilas son llevadas a cabo en sitios que albergaran importantes obras de ingeniería y tienen como principales propósitos los siguientes:

- Determinar la carga última de trabajo para una sola pila, tanto axial como lateral.
- Determinar el asentamiento o desplazamiento de la pila ante la carga de diseño.
- Verificar la capacidad de carga estimada inicialmente.
- Obtener información acerca de la transferencia de carga a lo largo del fuste de la pila y en la punta.

Es importante enfatizar que los resultados de una prueba de carga no se pueden extrapolar directamente a fin de predecir el comportamiento de un grupo de pilas, puesto que el volumen de suelo que es influenciado por una pila es mucho menor que aquel que está involucrado en pilas que trabajen en grupo.

La filosofía básica de las pruebas de carga es transmitir una carga a la pila, ya sea lateral o axial, y medir el comportamiento de la pila mediante deformímetros y celdas de carga. Una gran variedad de metodologías han sido desarrolladas para llevarlas a cabo, los tres procedimientos dos comunes son los siguientes:

- Pruebas de carga controlada
- Pruebas de deformación controlada

1.6.1 Pruebas de carga en pilas aplicando el método de carga controlada

Es usual emplear el método de carga controlada para llevar a cabo pruebas de carga, especialmente cuando se requiere de la curva carga-desplazamiento. El procedimiento consiste en aplicar la carga por incrementos, la carga en cada incremento se mantiene constante hasta que se considera que las deformaciones, tanto en el fuste como en la punta, han cesado antes de que el siguiente incremento de carga sea aplicado. La norma ASTM - D1143 – 81 recomienda que los incrementos de carga sean del 25% de la carga de diseño y que se mantenga la carga hasta que la velocidad de asentamiento sea menor de 0.25 mm/h; el tiempo entre cada incremento de carga no debe de ser mayor a 2 horas,

esto para carga axial. Los incrementos de carga deberán de ser los suficientes para alcanzar el 200% de la capacidad de diseño de la pila.

El arreglo general para llevar a cabo la prueba de carga axial consiste de un sistema de reacción, constituido por una viga o armadura de acero y de un grupo de pilas que proveen la reacción a dicha viga; y, de un sistema de medición mediante el cual se registran los desplazamientos y deformaciones en la cabeza, en la punta y a lo largo del fuste de la pila instalando dispositivos de medición tales como celdas de carga, micrómetros y deformímetros eléctricos DCDT. En la figura 1.3 se muestran los arreglos típicos para llevar a cabo una prueba de carga axial y una de carga lateral.

La capacidad de última de la pila generalmente se define como aquella que ocasiona cierto desplazamiento en la punta de la pila; Terzaghi (1942) propuso el 10% de su diámetro, Reese and Wright (1977) así como Decourt (1995) y O'Neill and Reese (1999) proponen un 5% de su diámetro; en tanto que, Wysocky (1999) propone el 4% de su diámetro.

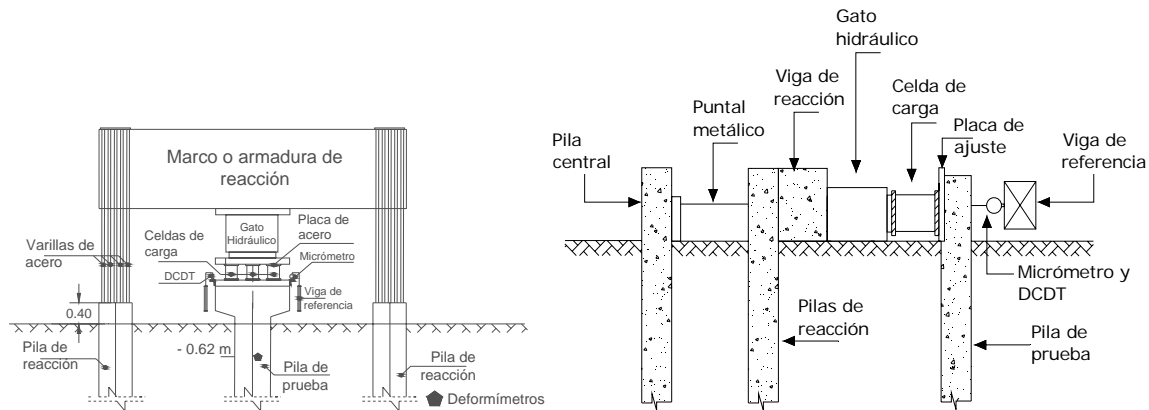


Fig. 1.3. Arreglos típicos para llevar a cabo una a) prueba de carga axial y b) una prueba de carga lateral

1.6.2 Pruebas de carga en pilas empleando el método de deformación controlada

Este tipo de pruebas se llevan a cabo produciendo una velocidad de asentamiento constante. La norma ASTM - D1143 – 81 recomienda que la velocidad de desplazamiento sea de 0.25 a 1.25 mm/min para suelos arcillosos y de 0.75 a 2.5 mm/min en suelos granulares. La prueba de carga se considera como finalizada una vez que se haya alcanzado una penetración del 15% del diámetro de la pila. En la figura 1.4 se muestra la imagen en campo de una prueba de carga.



Fig. 1.4. Configuración en campo de un arreglo de prueba de carga