



## Evolución de la capacidad de carga de pilotes hincados

### Evolution of load bearing capacity in driven piles

Walter I. PANIAGUA<sup>1</sup>, Enrique IBARRA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Pilotec, S.A. de C.V.

<sup>2</sup>inGeum, S.A. de C.V.

**RESUMEN:** Se presentan los resultados de dos pruebas de carga estática, de compresión axial, en pilotes de concreto hincados a golpes. Las pruebas se ejecutaron en la misma estructura, a una distancia relativamente cercana, y con características geotécnicas similares. Se describe en forma general el procedimiento de hincado de pilotes, así como la ejecución de la prueba de carga y los resultados obtenidos. El hincado de los pilotes correspondiente a la primera prueba, se realizó seis años después que los de la segunda prueba. Se observa un incremento importante en la capacidad de carga medida de la segunda prueba, respecto de la primera. Se presenta un análisis retroactivo de la capacidad de carga del pilote, así como las posibles causas de este fenómeno.

**ABSTRACT:** Results from two axial compression static load tests, for driven concrete piles, are presented. Tests were performed for the same structure, at a relatively close distance, with similar geotechnical characteristics. The driving procedure is overviewed, as well as the execution procedure for the load test and main results. The driving of the piles was made six years between pile 1 and pile 2. A significant increment in the load bearing capacity is observed. A retroactive analysis of the pile load capacity is presented, and the possible causes are commented.

## 1 INTRODUCCIÓN

En la ciudad de México, se encuentra un distribuidor vial, en la confluencia de las calles Francisco del Paso y Troncoso y Calzada Ignacio Zaragoza, fig 1. La construcción del puente contempló una cimentación con pilotes precolados de concreto, para el apoyo de las diferentes zapatas, fig 2. En particular, en este escrito se describen las prueba de carga realizada en un pilote de la zapata 14 y otro pilote de la zapata 44, el cual forma parte del ramal Norte-Sur del Distribuidor, sobre Francisco del Paso y Troncoso (eje 3 Oriente).

Geotécnicamente, el puente se encuentra ubicado en la llamada Zona del Lago Centro I, que está asociada al sector no colonial de la ciudad, que se desarrolló a partir de principios de este siglo y ha estado sujeto a las sobrecargas generadas por construcciones pequeñas y medianas.

La secuencia estratigráfica, de un sondeo selectivo y un sondeo de cono eléctrico, se resume como sigue:

Superficialmente y hasta 3 m de profundidad aproximadamente, se encuentra la Costra Superficial, constituida por depósitos arenos arcillosos o limosos, o bien rellenos artificiales.

Desde 3 m y hasta 34.5 m, se detectó la Formación Arcillosa Superior, que corresponde a una secuencia de arcillas intercaladas con estratos delgados de arena, vidrio volcánico y fósiles, y se caracteriza por su alta compresibilidad.

Entre 34.5 m y 39.0 m, se localiza la Capa Dura, consistente en un suelo limo arenoso, cementado con carbonato de calcio, de compacidad muy densa.

Posteriormente, y hasta 47.0 m, se encontró la Formación Arcillosa Inferior, consta del mismo material que el de la Formación Arcillosa Superior, pero con un mayor grado de consolidación, y en consecuencia una mayor resistencia.

Finalmente, desde 45.0 y hasta 50.0 m (máxima profundidad explorada) los llamados depósitos profundos, consistentes en limo con arcilla y arena fina, de consistencia muy dura.

El nivel de aguas freáticas se encontró a 1.8 m de profundidad. Se conoce que en la zona existe un hundimiento regional de alrededor de 9 cm/año.

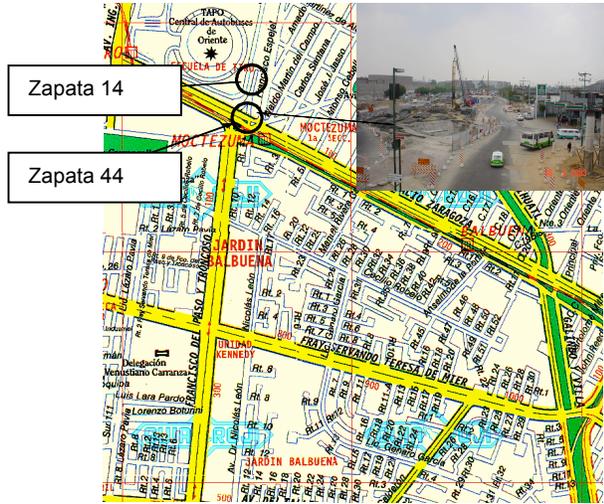


Figura 1. Localización del Distribuidor y fotografía durante el hincado de los pilotes.



Figura 2. Planta general del Distribuidor Vial.

2 DATOS DE LOS PILOTES

Las zapatas 14 y 44 constituyen parte de la cimentación de dos apoyos del ramal Norte-Sur del Distribuidor Vial, sobre el eje 3 Oriente. Están formadas por un cajón de concreto armado de forma rectangular en planta, con dimensiones aproximadas de 25 x 20 m y altura de 4.5 m. La losa base del cajón se apoya sobre un arreglo simétrico de 128 pilotes, con mayor densidad de éstos en el perímetro.

Los pilotes de prueba son pilotes definitivos: en la zapata 14 está identificado con el número 66, en el lado Sur del apoyo y en la zapata 44 se identifica como 19, en el lado Oriente del apoyo. Los pilotes son precolados de sección cuadrada, de concreto

reforzado, de 40 cm de lado y 28.3 m de longitud, dejando 1.70 m aproximadamente para descabece y unión con el armado del cajón.

Los pilotes fueron construidos en dos tramos de 14.15 m cada uno, unidos con soldadura a dos placas colocadas en los extremos de cada tramo; se instalaron en una perforación previa de 40 cm de diámetro, y 5 m de longitud.

Por diversos motivos, el hincado de los pilotes se realizó en diferentes épocas; los pilotes de la zapata 14 fueron hincados en 1997, y el de la zapata 44 en 2003, cuando fue terminada la construcción del puente.

En el caso de la zapata 14 se utilizó para la perforación previa una perforadora marca Sanwa Kisai, modelo D40, por lo que se intuye que la perforación fue con extracción total de material. Los pilotes se hincaron por impactos, utilizando un martillo diesel de acción sencilla marca Delmag, modelo D-30, de 54,250 lb-ft de energía máxima. De acuerdo con los registros de hincado, estos pilotes fueron hincados en Diciembre de 1997.

Para la zapata 44 se utilizó para la perforación previa una perforadora marca Watson, modelo 5000; se desconoce si la perforación se realizó con extracción total o parcial de material. Los pilotes se hincaron por impactos, utilizando un martillo diesel de acción sencilla marca Delmag, modelo D-30-13, de 66,100 lb-ft de energía máxima. De acuerdo con los registros de hincado, estos pilotes fueron hincados en Abril de 2003.

Al observar los registros de hincado de los pilotes de prueba y de los pilotes adyacentes, que se utilizaron como reacción, se observa que todos fueron instalados siguiendo un criterio para hincado de pilotes, que fundamentalmente trabajan por fricción lateral.

Para reaccionar a las cargas aplicadas durante las pruebas de carga, se utilizaron dos pilotes adyacentes, cuya separación es de 80 cm aproximadamente (dos veces el lado del pilote), Fig 3.

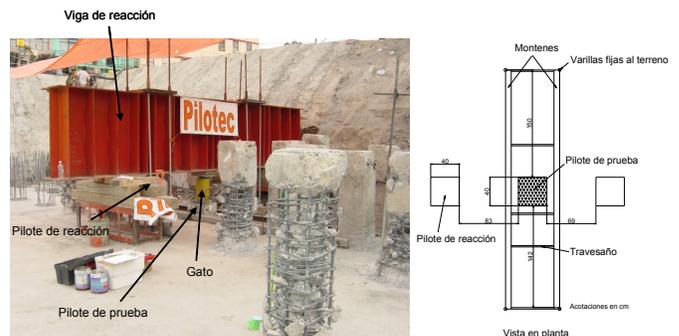


Figura 3. Sistemas de reacción y de referencia.

### 3 PRUEBAS DE CARGA

Las pruebas de carga, se llevaron a cabo para simular las condiciones de carga-tiempo bajo las cuales trabajarán los pilotes. En este caso, la carga máxima se programó hasta 150 t.

El procedimiento utilizado fue el de carga controlada; permite definir la carga última que soporta el pilote, aplicando la carga en incrementos pequeños, aplicando incrementos de carga iguales, cuando la velocidad de asentamiento se reduzca a un valor mínimo, de 250 micras/hora.

En la zapata 14 la carga fue aplicada en un ciclo, en la zapata 44 se aplicó en dos ciclos; el primero, hasta el 50% de la carga máxima, y el segundo hasta la carga total. Los incrementos de carga fueron del 12.5% de la carga máxima, y los de descarga del 25%. Al alcanzar la carga máxima, ésta se mantuvo 12 horas.

Durante el desarrollo de las pruebas, se elaboraron gráficas asentamiento-tiempo, para verificar la condición de velocidad de asentamiento.

La deformación fue medida con dos procedimientos diferentes:

a) Indicadores de carátula (micrómetros) -cinco; tres colocados a 120° alrededor del pilote, Fig 4. Cada micrómetro se fijó al sistema de referencia por medio de bases magnéticas y se ajustó con plomada para asegurar la verticalidad del vástago de medición; éstos se apoyaron sobre superficies de vidrio para evitar la fricción con la cabeza durante los eventuales movimientos laterales.

El sistema de referencia consistió en dos montenes metálicos paralelos a las caras Norte y Sur del pilote. Los montenes se fijaron a 1.5 m aproximadamente a cada lado del pilote. Debe decirse que uno de los extremos de los montenes fue fijo y el otro extremo móvil; éste último permitió la libre deformación del sistema de referencia por cambios de temperatura, sin afectar las lecturas de los instrumentos de medición.

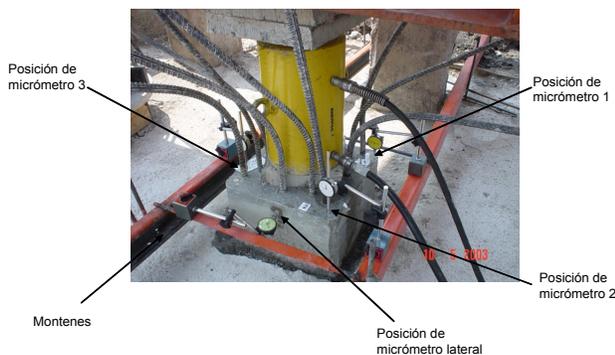


Figura 4. Instrumentación en la cabeza del pilote.

b) Escala graduada, con un alambre a tensión y un espejo.

Con la finalidad de conocer los desplazamientos laterales de la cabeza por la eventual excentricidad de carga, se colocó un micrómetro sobre el fuste en la cara de cada pilote.

La fuerza fue medida con el manómetro de la bomba del gato hidráulico. Tanto la bomba, el manómetro como el gato, fueron calibrados, para tener lecturas precisas de la carga aplicada.

### 4 RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

#### 4.1 Zapata 14 AB

En la figura 5 se presenta la gráfica carga-desplazamiento vertical de la cabeza del pilote. Los desplazamientos mostrados corresponden a los registrados al final de cada incremento de carga, excepto cuando se superó la resistencia total del pilote (después de 125 t). De la figura se deduce que el pilote falló antes de alcanzar la carga máxima prevista en el programa, igual a 150 t. Durante el proceso de falla se trató de mantener una carga constante mediante el sistema hidráulico, hasta que los desplazamientos excesivos en la cabeza imposibilitaron sostenerla. Entonces se decidió dejar el gato actuando por media hora, para posteriormente descargar el pilote en cuatro decrementos.

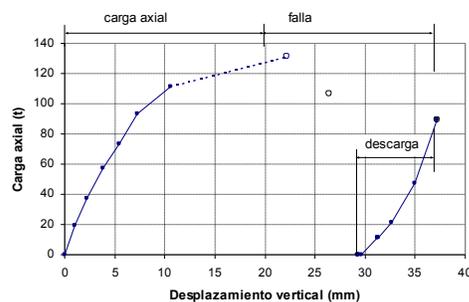


Figura 5. Gráfica carga-desplazamiento vertical, zapata 14.

La interpretación de los resultados se presenta en la Figura 6. La curva carga-desplazamiento puede dividirse en tres zonas: la inicial, donde el comportamiento es de naturaleza elástica (hasta una carga de 90 t), posteriormente un tramo elastoplástico ( $90 \text{ t} < \text{carga} < 125 \text{ t}$ ) y finalmente comportamiento plástico ( $>125 \text{ t}$ ).

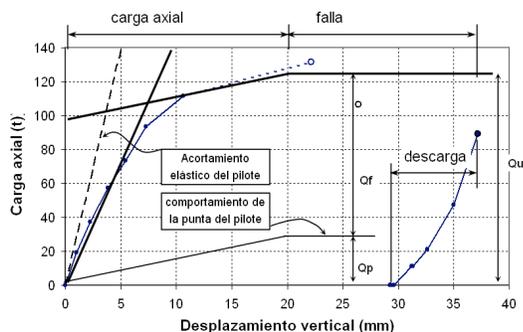


Figura 6. Interpretación de la prueba de carga, zapata 14.

El pilote en el tramo elástico trabaja principalmente por fricción, con una rigidez axial de  $K1=12,820$  t/m, mientras que en el intervalo elastoplástico el trabajo desarrollado es tanto por punta como por fricción, decreciendo la rigidez del sistema de manera importante a valores de  $K2=5,200$  t/m. Para el tramo plástico solamente la resistencia por punta del pilote se presenta.

Las componentes de resistencia del pilote y los correspondientes desplazamientos del cabezal del pilote obtenidos son:

Componente	Carga (t)	Desplazamiento máximo (mm)
Fricción	97	8
Punta	28	13
Total	125	21

Los anteriores resultados concuerdan con lo obtenidos en pruebas similares donde se observa que la capacidad total por fuste se desarrolla cuando el desplazamiento del pilote con respecto al suelo varía entre 6 y 10 mm (ref. 1) y que la capacidad total de la punta se alcanza cuando el desplazamiento se ubica entre el 10% y el 30% del diámetro del pilote (10 a 45 mm).

Una vez alcanzada la resistencia de punta, se observa como la carga decrece repentinamente y se mantiene una carga residual del sistema con grandes desplazamientos. La rigidez media en la descarga es de  $KD=11,371$  t/m, con una recuperación elástica de 7.86 mm.

#### 4.2 Zapata 44 C

En la Figura 7 se presenta la gráfica carga-desplazamiento vertical de la cabeza del pilote para las dos etapas de carga. Los desplazamientos mostrados corresponden a los registrados al final de cada incremento de carga, excepto cuando se superó la resistencia total del pilote (después de 80 t). De la figura se deduce que el pilote falló antes de alcanzar la carga máxima prevista en el programa (140 t). Durante el proceso de falla se trató de mantener una carga constante mediante el sistema

hidráulico, hasta que los desplazamientos excesivos en la cabeza imposibilitaron sostenerla. Entonces se decidió dejar el gato actuando por media hora, para posteriormente descargar el pilote en cuatro decrementos.

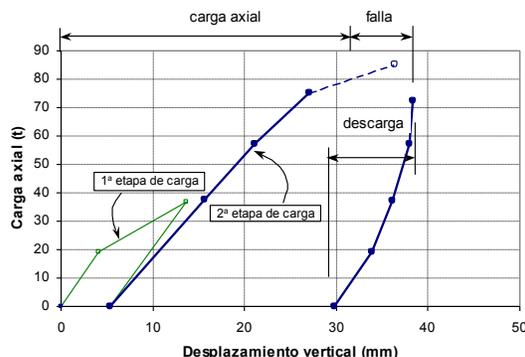


Figura 7. Gráfica carga-desplazamiento vertical, zapata 44.

La interpretación de los resultados se presenta en la Figura 8. La curva carga-desplazamiento puede dividirse en tres zonas: la inicial, donde el comportamiento es de naturaleza elástica (hasta una carga de 60 t), posteriormente un tramo elastoplástico ( $60 < \text{carga} < 80$  t) y finalmente plástico ( $> 80$  t).

El pilote en el tramo elástico trabaja principalmente por fricción, con una rigidez axial de  $K1=3,635$  t/m, mientras que en el intervalo elastoplástico el trabajo desarrollado es tanto por punta como por fricción, decreciendo la rigidez del sistema de manera importante a valores de  $K2=2,194$  t/m. Para el tramo plástico se desarrollan completamente las resistencias por punta y fuste del pilote.

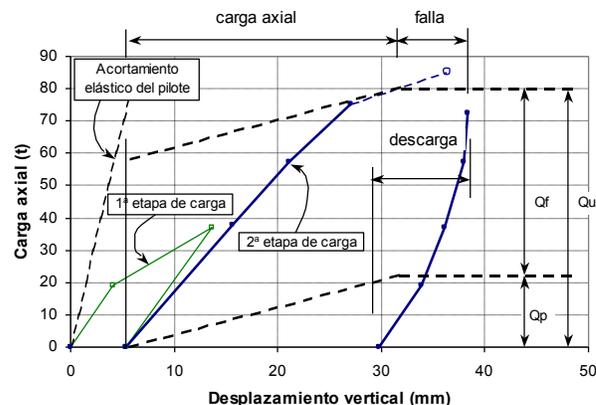


Figura 8. Interpretación de la prueba de carga, zapata 44.

Las componentes de resistencia del pilote y los correspondientes desplazamientos del cabezal del pilote obtenidos son:

Componente	Carga (t)	Desplazamiento máximo (mm)
Fricción	58	21
Punta	22	5
Total	80	26

Una vez alcanzada la resistencia de punta, se observa como la carga decrece repentinamente y se mantiene una carga residual del sistema con grandes desplazamientos. La rigidez media en la descarga es de  $KD=4,660$  t/m, con una recuperación elástica de 8.1 mm.

Es conveniente comentar que al comparar los resultados anteriores con los obtenidos para la zapata 14 (fig 6), la capacidad de carga del pilote en el caso primero es menor que la segunda en un 36% y consecuentemente los módulos de rigideces respectivos. Es decir, que el segundo pilote ensayado tuvo menor capacidad de carga y rigidez, a pesar de tener la misma geometría, constitución y procedimiento de hincado.

Para explicar parcialmente este aspecto es necesario indicar que la antigüedad de los pilotes de la zapata 14 es de 6 años, mientras que la de la zapata 44C de 1 mes; asimismo, en la zapata 14 se tiene una densidad de pilotes mayor que en la zapata 44C.

## 5 CONCLUSIONES

En la zapata 14, el pilote ensayado bajo carga axial falló antes de alcanzar la carga máxima prevista en el programa de carga igual a 150 t. La carga máxima del sistema pilote - suelo fue de 125 t, asociada a un desplazamiento de 21 mm.

Considerando la forma de la gráfica carga desplazamiento, se puede deducir que la capacidad por fricción del suelo al fuste del pilote fue de 97 t; hasta este punto, la rigidez del sistema fue de  $KA=12,820$  t/m. De manera análoga, se puede decir que la capacidad por punta del pilote fue de 28 t, presentando el trabajo de la punta una rigidez de  $KP=5,200$  t/m aproximadamente.

En la zapata 44, el pilote ensayado bajo carga axial falló antes de alcanzar la carga máxima prevista en el programa de carga igual a 150 t. La carga máxima del sistema pilote suelo fue de 80 t, asociada a un desplazamiento de 26 mm.

Considerando la forma de la gráfica carga desplazamiento, se puede deducir que la capacidad por adherencia del suelo al fuste del pilote fue de 58 t; hasta este punto la rigidez del sistema fue de  $KA=3,635$  t/m. De manera análoga, se puede decir que la capacidad por punta del pilote fue de 22 t,

presentando el trabajo de la punta una rigidez de  $KP=2,194$  t/m aproximadamente.

Se observa un comportamiento notoriamente distinto en las cargas por fricción entre ambos pilotes; se consideran las siguientes razones para esta diferencia:

i) El tiempo que ha transcurrido entre el hincado de los pilotes y las pruebas de carga; para la zapata 14 fueron casi tres años y para la zapata 44 poco más de 30 días. Si bien se considera que la re-consolidación de la arcilla adyacente al pilote ya se llevó a cabo después de 1 mes, no se cuenta con la certeza de que este proceso haya concluido, por lo que pudiera presentarse mayor resistencia al corte en la interfase suelo-pilote en un futuro.

ii) Diferencias en el diámetro y tipo de perforación previa; la influencia de la perforación previa en los pilotes de fricción es muy importante, y el hincado de los pilotes fue realizado por contratistas, supervisores y equipos de construcción diferentes, lo cual podría influir en la capacidad de carga por fricción.

iii) La zapata 14 tiene una mayor densidad de pilotes respecto de la zapata 44, lo cual provoca un mayor desplazamiento lateral del suelo, mejorando las características mecánicas del mismo. A este hecho se suma el que la perforación previa solo se realizó en una porción (5 m) de la longitud total del pilote (28.3 m), por lo que el desplazamiento lateral del suelo ocupa una porción significativa.

iv) Diferencias en las propiedades estratigráficas y mecánicas del suelo; aunque se encuentran a una distancia menor de 200 m, no se cuenta con información de detalle del suelo en ninguna de las dos zapatas, por lo que pudieran existir diferencias en este sentido; tomando en cuenta la dispersión de los resultados entre las dos pruebas, y el conocimiento geotécnico general del sitio, este punto se considera poco probable.