

Pruebas de carga estática a compresión. Caso historia Reforma 432 en la Ciudad de México

José GONZALEZ^{a,1}, Rogelio MONROY^a, Sergio VILLAR^a,
Guillermo CLAVELLINA^a y Juan PAULÍN^a
^a *Soletanche Bachy México (CIMESA)*

Resumen. La construcción de edificios sobre Av. Paseo de la Reforma de la CDMX es cada vez más ambiciosa, las descargas a cimentación cada vez más importantes demandan mayor conocimiento del comportamiento carga-asentamiento de elementos de cimentación profunda. La capacidad de carga de estos elementos de cimentación puede determinarse con base en teorías clásicas de mecánica de suelos, sin embargo, hoy día es práctica común confirmar los cálculos teóricos mediante pruebas de carga. En ese trabajo se exponen y discuten los resultados obtenidos en las pruebas de carga estática a compresión de tipo rápido (método “D” de la norma ASTM D1143/1143M-07) realizadas en pilas circulares de 1m de diámetro desplantadas a 55m de profundidad.

Palabras Clave. Anclaje, Inyecciones, tensión, fluencia, carga última, carga crítica.

1. Reforma 432

El proyecto consiste en una torre de oficinas de 264 m de altura (54 niveles) que se construirá sobre la Av. Paseo de la Reforma. Serán 7 sótanos de estacionamiento para una profundidad de excavación de 23.5 m dentro de un cajón formado por un muro diafragma estructural definitivo “llamado muro Milán” de 1.0 m de espesor. La cimentación, estará formada por 102 pilas tipo “barrette” desplantadas a una profundidad de 68 m por debajo del nivel calle.

1.1. Condiciones geotécnicas

El proyecto se ubica en el ex lago de Texcoco, razón por la cual el subsuelo está conformado por depósitos de tipo lacustre caracterizados por grandes espesores de arcilla de alta compresibilidad, con intercalaciones de capas arenosas, areno-limosas compactas con espesores que varían entre pocos cm y varios m. La Tabla 1 muestra la estratigrafía del sitio en forma resumida.

¹ Corresponding Author, José GONZALEZ, Departamento de Ingeniería, Soletanche-Bachy CIMESA, Paseo de la Reforma piso 13, Ciudad de Mexico, Mexico; E-mail: gonzalez.jose@cimesa.net.

Tabla 1. Estratigrafía.

De (m)	a (m)	Descripción
-0.10	-5.00	Costra Superficial
-5.00	-23.30	Serie Arcillosa Superior
-23.30	-26.00	Primera Capa Dura
-26.00	-31.20	Serie Arcillosa Inferior
-31.20	-55.00	Depósitos Profundos

2. Diseño de pruebas

2.1. Elección del método

Una barrette es un elemento de cimentación profunda que desarrolla gran capacidad de carga hacer pruebas de carga en estos elementos aplicando normas internacionales implica tener sistemas de reacción excesivamente pesados y robustos, en muchos de los casos inviables desde puntos de vista práctico y económico. Una variable también a tener en cuenta es la poca resistencia de las formaciones arcillosas como para pensar en pruebas de carga bidireccionales para eficientar los sistemas de reacción. Con base en lo anterior se decidió hacer las pruebas de carga en pilas de sección circular de 1 m de diámetro y extrapolar los resultados al diseño de las barrettes.

2.2. Pilas de prueba

Se construyeron dos pilas de prueba denominadas “Pila 802” y “Pila 902”, perforando las pilas a rotación bajo lodo bentonítico. Al llegar a la profundidad de desplante se realizó la limpieza del fondo con un bote especial y se sustituyó el lodo de perforación por lodo nuevo. En el caso de la Pila 902 se colocó un doble ademe metálico para representar a la zona que posteriormente ocuparán los sótanos, para esto se utilizaron dos tubos de acero concéntricos de 1,000 y 1,100 mm de diámetro interior respectivamente con el fin de eliminar la fricción que generaría el suelo en esa zona.

2.3. Post-inyección

Dos semanas después de la construcción de las pilas se llevó a cabo un mejoramiento del contacto pila–suelo por medio de inyección de una lechada a presión, con el fin de garantizar la existencia de un material sano, en caso de que existiese algo de contaminación. Lo anterior se realizó por medio de tubos de acero de 2 y 4 pulgadas de diámetro que se dejaron como reservación durante la construcción de los elementos. El material inyectado consistió en una lechada agua–cemento–bentonita, más un aditivo reductor de agua de alto rango con el fin de mantenerla fluida. La tabla 2 muestra los volúmenes y presiones alcanzadas en cada caso.

Tabla 2. Post-inyección.

Pila	Volumen (l)	Presión Final (bar)
802	380	30
902	310	30

2.4. Instrumentación

Con el fin de conocer el comportamiento de las pilas durante las pruebas se emplearon instrumentos para la medición de la carga, el asentamiento y las deformaciones unitarias. Para medir la carga se emplearon tres celdas del tipo “cuerda vibrante” con capacidad de 800 t (7850 kN) cada una. Los asentamientos se midieron de tres formas distintas, con topografía convencional (nivel automático), transductores de desplazamiento tipo “cuerda vibrante” y reglas metálicas e hilos en conjunto con reglas transparentes pegadas sobre espejos. Finalmente, la deformación unitaria se determinó por medio de deformímetros tipo “sister-bar” en pares a diferentes niveles dentro del cuerpo de la pila.

3. Ejecución de las pruebas

Se siguieron los criterios generales del procedimiento “D” de la norma ASTM D1143/1143M (2007) que consiste en aplicar incrementos de carga de igual magnitud en intervalos de tiempo constantes de 30 min para tratar de alcanzar el 200% de la carga admisible. Se definió “a priori” como criterio de falla la carga para la cual el asentamiento fuera igual a 15% del diámetro de la pila (15 cm).

Pila 802. Se llevaron a cabo dos ciclos de carga–descarga. En el primero se aplicaron 14 incrementos para llegar a una carga máxima de 1,225 t con un asentamiento de 81 mm. La carga máxima se sostuvo 1 hr, después de la cual se descargó en ocho decrementos y se tuvo un asentamiento residual de 67 mm. En el segundo ciclo, nuevamente se aplicaron 14 incrementos de carga alcanzando 1,520 t y un asentamiento acumulado de 172 mm. La carga se sostuvo 1 hr, después de la cual se descargó en siete decrementos al final de los cuales se tuvo un asentamiento residual de 158 mm. El criterio de falla se cumplió con una carga de 1,428 t.

Pila 902. A esta pila se le realizaron dos pruebas. En la primera solo se hizo un ciclo carga–descarga, por medio de 12 incrementos, para llegar a una carga máxima de 580 t con un asentamiento de 161 mm. La carga máxima se sostuvo 1 hr, al final de la cual se descargó en seis decrementos, teniendo un asentamiento residual de 151 mm. La segunda prueba se realizó un mes después, en esta se hicieron dos ciclos de carga–descarga. En el primero se aplicaron 15 incrementos para llegar a una carga máxima de 780 t con un asentamiento de 62 mm. La carga máxima se sostuvo 1 hr, después de la cual se descargó en 11 decrementos, teniendo un asentamiento residual de 71 mm. En el segundo ciclo se aplicaron ocho incrementos de carga hasta alcanzar 1,190 t y un asentamiento acumulado de 223 mm. La descarga se hizo en 11 decrementos al final de los cuales se tuvo un asentamiento residual de 207 mm. El criterio de falla se cumplió para una carga de 1,080 t. La realización de las dos pruebas con un espacio de tiempo de un mes muestra un claro incremento en la capacidad de carga.

4. Resultados (Curvas carga-asentamiento)

Pila 802. Tuvo un comportamiento lineal hasta una carga de 700 t; a partir de este punto la curva de carga-asentamiento mostró un cambio de pendiente abrupto, resultado de haber alcanzado el máximo de la capacidad por fricción. A partir de ese momento todo incremento de carga fue tomado por la punta y los asentamientos aumentaron rápidamente para incrementos de carga pequeños. Después de haber descargado la pila

en su totalidad quedó un asentamiento residual. Para el segundo ciclo la curva en un principio sigue la traza de la línea de descarga del ciclo anterior, solo que ahora el comportamiento lineal se prolonga hasta 1100 t aproximadamente, momento a partir del cual la pendiente se vuelve menos pronunciada, indicando que la carga está siendo tomada por la punta. La prueba se continuó hasta que se tuvo un hundimiento de 180 mm, el cual incluso excede el criterio establecido como falla. La Figura 1 muestra las curvas carga-asentamiento de la pila 802. Pila 902 (prueba 1). Se tuvo un comportamiento lineal solo hasta una carga de 214 t. Después la curva de carga-asentamiento mostró un cambio de pendiente pronunciado, resultado de haber alcanzado la máxima capacidad por fricción. A partir de ese momento todo incremento de carga fue tomado por la punta y los asentamientos aumentaron rápidamente para incrementos de carga pequeños. Posteriormente se realizó la descarga en su totalidad quedando un asentamiento residual. La Figura 2 muestra las curvas carga-asentamiento de la pila 902, prueba 1. Pila 902 (prueba 2). En el primer ciclo el comportamiento lineal se mantuvo hasta una carga de 725 t; momento en el que la curva de carga-asentamiento mostró un cambio de pendiente pronunciado, resultado de haber alcanzado el máximo de la capacidad por fricción. Nuevamente los incrementos de carga fueron tomados por la punta y los asentamientos aumentaron de manera rápida con incrementos de carga menores. Posteriormente se realizó la descarga en su totalidad quedando un asentamiento residual. En el segundo ciclo los incrementos de carga tuvieron una tendencia lineal que inicialmente siguen la traza de la curva de descarga del ciclo anterior y ahora se prolonga hasta una carga del orden de 900 t. A partir de este punto la pendiente comienza a ser menos pronunciada, lo que indica que la capacidad de carga fue tomada mayormente por punta, se continuó con el incremento de carga hasta alcanzar el criterio de falla. La Figura 3 muestra las curvas carga-asentamiento de la pila 902, prueba 2.

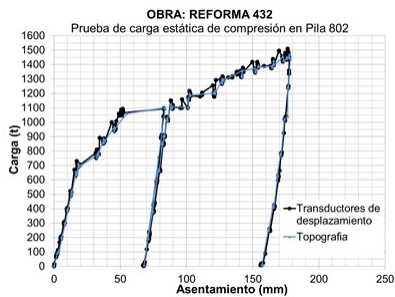


Figura 1. Resultados en pila 802.

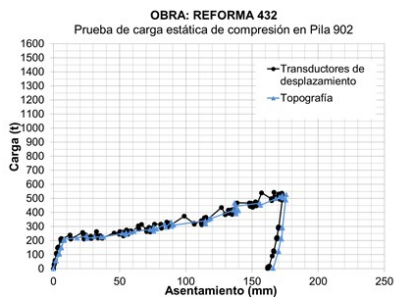


Figura2. Resultados en pila 902 – Prueba 1.

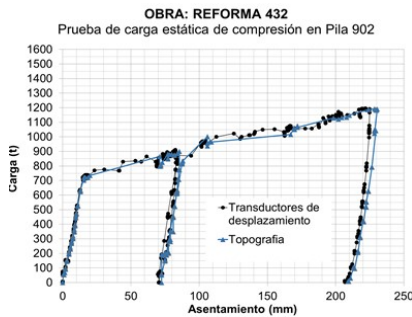


Figura 3. Resultados en pila 902.

4.1. Método de cálculo de la distribución de cargas

Para conocer la distribución de carga en distintas profundidades a lo largo de las pilas de prueba se emplearon deformímetros para concreto de cuerda vibrante del tipo “sister-bar” colocados en pares por nivel de instrumentación. Estos instrumentos envían constantemente una señal en forma de frecuencia sonora que por medio de un transductor se convierten a una señal eléctrica. El resultado es un valor adimensional denominado “dígito” que al ser multiplicado por un factor de calibración dado por el fabricante se traducen en deformaciones unitarias. Las deformaciones unitarias medidas a lo largo de la prueba asociadas a cada uno de los incrementos de carga se multiplican por el módulo de elasticidad del concreto para conocer el esfuerzo. A continuación, se determina la fuerza actuante en la sección multiplicando el esfuerzo por el área real de la sección. Al hacer diferencias entre dos niveles de instrumentos consecutivos, es posible conocer la fuerza actuante en un tramo de la pila. Finalmente, esta fuerza se divide entre el perímetro de la pila para conocer la fricción en el fuste. Para hacer el cálculo anterior se puede asumir que la pila tiene una sección cilíndrica en toda su longitud, lo cual se cumple en las zonas donde se tiene el ademe metálico. Sin embargo, en las zonas donde el concreto quedará en contacto con el suelo, no es rara la ocurrencia de sobre-volumenes que den como resultado una sección mayor a la teórica que puede influenciar en los resultados de los cálculos. Para asegurar el empleo de las secciones correctas en los cálculos se hicieron mediciones por medio de una sonda ecográfica (“KODEN”).

4.2. Curvas de distribución de carga

Pila 802. Se graficó una curva de distribución de carga para cada incremento. Se observa que hasta el quinto incremento que corresponde a una carga de 560 t, prácticamente la totalidad es tomada por fricción en el fuste. Es claro que en los primeros 24 m, donde se ubica la frontera entre la fase arcillosa superior (FAS) y la primera capa dura (CD) la transmisión de carga al suelo fue muy poca, siendo cada vez más evidente en los últimos incrementos de carga, donde la carga se transmitió íntegramente desde la cabeza hasta la frontera mencionada anteriormente. Por otra parte, por debajo de los 24 m existe una mayor capacidad por fricción que se manifiesta como una disminución paulatina de la fuerza conforme nos acercamos a la punta. En el último incremento de carga (1428 t), la pila toma una carga de punta de 730 t. La Figura 4 muestra la distribución de carga de la pila 802 en función de la profundidad.

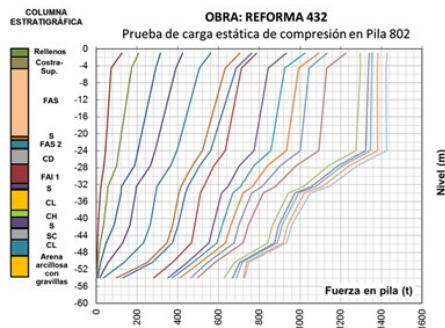


Figura 4. Curva de distribución de carga en pila 802.

Pila 902. Al igual que en el caso anterior se graficó una curva de distribución de carga para cada incremento. Ahora se observa que hasta el cuarto incremento que corresponde a una carga de 211 t, la totalidad es tomada por fricción en el fuste. Es aún más claro que en los primeros 24 m donde se ubica la frontera entre la fase arcillosa superior (FAS) y la primera capa dura (CD) la transmisión de carga al suelo fue prácticamente nula, debido al doble ademe colocado que impide el contacto con el suelo por lo que la carga se transmitió íntegramente desde la cabeza hasta la frontera mencionada anteriormente. Por debajo del doble ademe se nota la capacidad por fricción que se manifiesta como una disminución paulatina de la fuerza conforme nos acercamos a la punta. En el último incremento de carga (530 t), la pila toma una carga de punta de 311 t. La Figura 5 muestra la distribución de carga de la pila 902 en función de la profundidad de la prueba 1.

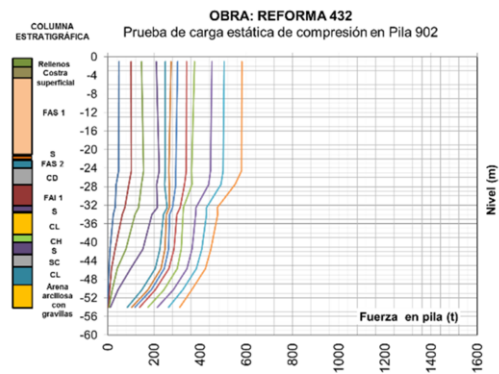


Figura 5. Curva de distribución de carga en Pila 902 –prueba 1.

Para la prueba 2 se dibujó también una curva de distribución de carga para cada incremento. Aquí no es hasta el cuarto incremento que corresponde a una carga de 724 t que comienza a tomarse carga por punta. Y no es sino por debajo del ademe metálico que se manifiesta la capacidad por fricción como una disminución paulatina de la fuerza conforme se acerca a la punta. En el último incremento de carga (1190 t), la pila toma una carga de punta de 450 t. La Figura 6 muestra la distribución de carga de la pila 902 en función de la profundidad de la prueba 2.

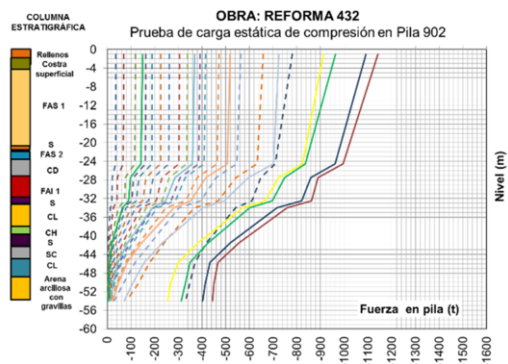


Figura 6. Curva de distribución de carga en Pila 902 –prueba 2.

4.3. Estimación de la capacidad ultima

Se emplearon dos metodologías para estimar la capacidad última de las pilas de prueba. La primera debida a Chin Fellenius 1980 [1], en la cual se asume que la curva carga-asentamiento tiene una forma hiperbólica cuando la carga aplicada está próxima a la de falla. La segunda, basada en el principio de proporcionalidad natural, en el cual se busca modelar el comportamiento carga-asentamiento de la pila por medio de ecuaciones basadas en las funciones de “sensibilidad” y “ductilidad” Juárez 2005 [2]. Pila 802. Las curvas de estimación de carga-asentamiento para los métodos propuestos dan resultados muy similares (Figura 7). Se tiene un ajuste aceptable de dichas curvas con relación a los datos de campo. En ambos casos la carga asintótica estaría alrededor de las 1450 t, sin embargo, este dato es de poca utilidad ya que el asentamiento en ese momento es de 250 mm; demasiado para fines de diseño. Pila 902 (prueba 1). Las curvas de estimación de carga-asentamiento para los métodos propuestos también dan resultados muy similares (Figura 8). No obstante, carece de un buen ajuste en la rama elástica, sobre-estimando los asentamientos y subestimando la carga. La carga asintótica estaría alrededor de las 380 t, para un asentamiento de 250 mm. Pila 902 (prueba 2). Las curvas de estimación de carga-asentamiento para los métodos propuestos también dan resultados muy similares (Figura 9). No obstante, también se carece de un buen ajuste en la rama elástica, sobre-estimando los asentamientos y sub-estimando la carga. Posteriormente en la rama plástica se sobre estima la carga salvo en la cercanía a la carga asintótica, la cual estaría alrededor de las 1180 t, para un asentamiento de 250 mm.

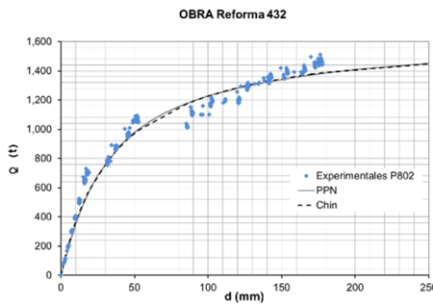


Figura 7. Estimación de Carga ult. en Pila 802.

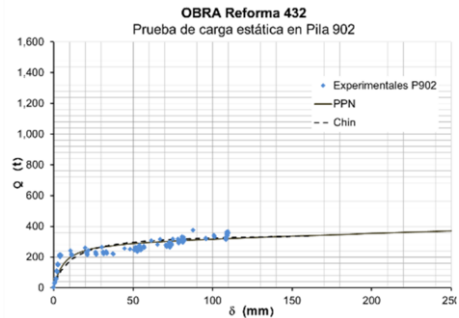


Figura 8. Estimación de Carga ult. en Pila 902 – prueba 1.

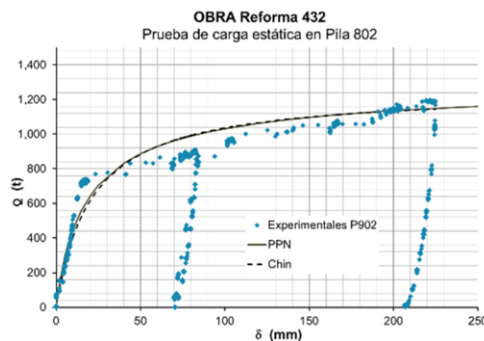


Figura 9. Curva de estimación de Carga Ultima en Pila 902 – prueba 2.

5. Conclusiones

Las pruebas de carga estática son un método confiable para determinar la capacidad de carga última y el comportamiento carga-asentamiento de elementos de cimentación profunda; nos ayudan a confirmar las hipótesis de diseño e inclusive optimizar los proyectos.

El empleo de un doble ademe metálico permite eliminar el aporte de capacidad de carga por fricción en una zona determinada del elemento sujeto a prueba para modelar la existencia de sótanos.

La realización de dos pruebas de carga en la pila 902 con un espacio de tiempo de un mes demuestra que los suelos recuperan sus propiedades mecánicas después de la alteración sufrida por los procesos constructivos acercándose a la capacidad y comportamiento que tendrán en etapa de servicio.

Es importante especificar la instrumentación adecuada para obtener los parámetros de interés (asentamiento, carga, esfuerzos) con el fin de poder caracterizar el comportamiento del elemento durante la etapa de prueba de forma confiable.

Es importante destacar la capacidad de carga a fricción que se conserva en las pilas de prueba después de la descarga ya que esta carga representa una “precarga” que tendrán las pilas al momento de alcanzar el nivel máximo de excavación (las pilas se construyen antes de iniciar la excavación del núcleo, preexisten a la excavación).

Con base en esto es fundamental no diseñar cimentaciones profundas como si fueran elementos aislados de los cuales pretendemos que trabajen por punta al buscar a profundidad un material competente, criterios simplificados de diseño no representan las condiciones de servicio a las que estará sujeta la cimentación, debemos tratar a la cimentación como un concepto global que no solo involucra las pilas, también involucra el gran cajón “sótanos” y su proceso constructivo, así como trabajar en equipo con la Ingeniería estructural ya que tan importante es la capacidad de carga como la rigidez de los elementos de cimentación profunda (comportamiento carga-asentamiento) y su impacto en el diseño de la superestructura.”

Referencias

- [1] Fellenius, B. H. (1980). “The analysis of results of routine pile load tests”, Ground Engineering, London, Vol. 13, No.6 pp.19-31. DIN 4125 (1990)=, « Ground anchorages design construction and testing », Deutsche norm
- [2] Juarez, E. (2005). “The Principle of Natural Proportionality applied to the behavior of piles”, 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Osaka, Japan FHWA-IF-99-015 (1999), « Geotechnical engineering circular 4. Ground anchors and anchored systems », U.S. Department of transportation, Federal highway administration
- [3] Methods for Deep Foundations Under Static Compressive Load”, American Society for Testing and Materials.