

# Evaluación del comportamiento en punta y fuste de un pilote tipo hélice continua basado en las relaciones de Cambefort

Paulo Jose Rocha de Albuquerque & David de Carvalho  
*State University of Campinas, Campinas, Sao Paulo, Brazil*  
Eduardo Beira Fontaine  
*University of Oriente, Santiago de Cuba, Cuba*



## RESUMEN

El trabajo presenta los resultados de dos pruebas de carga a compresión ejecutadas en un pilote tipo hélice continua de 0.4 m de diámetro y 12 m de longitud, instrumentado en profundidad con strain gages para así obtener la capacidad de carga a lo largo del fuste y en la punta. El subsuelo donde están instalados los pilotes está constituido por un primer estrato de suelo arcillo limo-arenoso, poroso y colapsable de 6 m de espesor, seguido de un estrato de suelo residual limo arcillo-arenoso hasta los 14 m de profundidad. El nivel freático permanece en la cota - 17 m. La primera prueba de carga fue del tipo lenta y luego de 5 días se realizó una prueba de carga rápida en el mismo pilote. Los ensayos se ejecutaron según la Norma Brasileña de pruebas de carga en pilotes (NBR12.131/92). La carga máxima aplicada fue aquella que consiguió producir un asentamiento que caracterizara la ruptura de la interacción suelo – pilote. A partir de los resultados obtenidos con la instrumentación realizada, fue posible determinar el valor de la carga lateral y de punta en cada uno de los ensayos realizados al pilote estudiado. Con estos resultados y aplicando las relaciones de Cambefort (1964) se pudo evaluar la evolución de la fricción por fuste y la carga de punta con relación a los asentamientos asociados, así como evaluar además la ocurrencia de carga residual. La carga última obtenida en los ensayos fue de 960 kN y 810 kN para el primer y segundo ensayo respectivamente. Los asentamientos máximos observados estuvieron en el orden del 15 % del diámetro del pilote. La capacidad de carga por punta fue de 853 kPa y 655 kPa para el primer y segundo ensayo respectivamente. Los asentamientos en punta fueron de 8,0 mm para el primer ensayo y de 2.5 mm para el segundo ensayo.

## ABSTRACT

The paper presents the results of two load tests executed in a pile type continuous auger of 0.4 m of diameter and 12 m of longitude, instrumented in depth with strain gages in order to obtain the load capacity along the shaft and the tip. The underground where the pile was installed is constituted by a first stratum of sandy silty clay, porous and colapsable of 6 m of thickness, followed by a stratum of residual soil of clayey sandy silt until the 14 m of depth. The water level remains at 17 m. The first load test was of the slow type and after 5 days it was carried out a quick load test in the same pile. The test were executed according to the Brazilian Standard for load tests in piles (NBR12131/92). The maximum load applied was considered as the load that produced a settlement that characterized the rupture of the interaction soil - pile. From the results obtained with the use of the instrumentation it was possible to determine the value of both lateral and tip load in each one of test carried out in the studied pile. With these results and applying the relationships of Cambefort (1964) it was possible to evaluate the evolution of the friction for shaft and the tip load with relationship to the associate settlements, as well as to also evaluate the occurrence of residual load. The ultimated load obtained in the test was of 960 kN and 810 kN for the first and second test respectively. The maximum settlements observed were in the order of 15% of the diameter of the pile. The load capacity for tip was respectively of 853 kPa and 655 kPa for the first and second test. The settlement in the tip were 8,0 mm for the first test and of 2.5 mm for the second one.

## 1 INTRODUCTION

Durante los últimos años ha habido un gran avance en el desarrollo de las cimentaciones profundas debido a las exigencias cada vez mayores de la productividad y aumento constante de la carga transmitida al suelo. Debido a esto, la ingeniería de cimentaciones ha tenido que seguir de cerca ese crecimiento con el desarrollo de nuevas tecnologías para ejecutar cimentaciones profundas, utilizando pilotes fundidos in situ. El pilote tipo hélice continua fue usado por primera vez en Estados Unidos en los años 50.

En Europa este tipo de pilote fue introducido en la década del 70. En Brasil el uso de este pilote se hizo habitual en trabajos de mediano y gran porte,

principalmente en obras localizadas en la región sureste, especialmente en los estados de Sao Paulo y Río de Janeiro, lugares donde se encuentran la mayoría de las empresas ejecutoras de este tipo de pilote. En la región de Campinas, Estado de Sao Paulo, donde hay un crecimiento económico en ascenso, se han generado obras de mediano y gran porte, principalmente en obras industriales, que requieren de cimentación de este tipo, pues el tiempo es esencial en la definición de la tecnología constructiva. Como su uso es frecuente, es coherente intentar entender su comportamiento mediante la realización de pruebas de carga instrumentadas.

## 2 PILOTES HÉLICE CONTINUA – UNA REVISIÓN HISTORICA.

Desde su introducción en EEUU hasta hoy, se ha invertido mucho dinero en pilotes tipo hélice continua a partir de la longitud de la broca, el torque de la máquina y su diámetro nominal. Este tipo de pilote fue introducido en Brasil en 1987 utilizando equipamientos de producción nacional basados en modelos extranjeros, permitiendo la construcción de pilotes de 275, 350 y 425mm de diámetro a una profundidad máxima de 15 m. En 1993 debido a la flexibilización en las leyes de importación, ya era posible construir pilotes de 1000mm de diámetro y longitudes de 25m.

En la década del 80 este pilote fue muy popular debido a sus ventajas técnicas combinado con un costo relativamente bajo (Brons & Kool, 1988).

Algunos autores se percataron de que el proceso de fabricación debía recibir atención especial principalmente con la continuidad del fuste del pilote, la extracción de la broca del subsuelo, la perturbación en este y su rotura en suelos débiles debido a las altas presiones que pueden ser aplicadas, además del alto consumo de hormigón y la dificultad en la colocación de la armadura. La sensibilidad del operario para controlar la ejecución del pilote es la limitación más grande que tiene este tipo de cimentación profunda (Bottiau, 1993). Este autor menciona que este tipo de pilote tuvo como objetivo eliminar una de las principales desventajas de los pilotes excavados – la descompresión del suelo. En estudio de campo realizados con dilatómetro Marchetti antes y después de la ejecución del pilote se observó que el proceso de construcción no causó descompresión. Bottiau (1993) enfatiza que otra ventaja importante del pilote hélice continua es la posibilidad de monitoreo constante, lo cual ofrece información sobre la construcción del pilote.

## 3 LOCAL DE LOS ENSAYOS.

Los ensayos fueron realizados en el campo experimental Unicamp, localizado en el municipio de Campinas, Estado de Sao Paulo, Brasil. En la región aparecen rocas intrusivas básicas de la formación Serra Geral (diabásico). En la parte norte de la región es grande la presencia de magmatitos básicos, los cuales afloran en tres áreas en 98 km<sup>2</sup> y ocupan el 14 % de toda la hoja del mapa de Campinas (Albuquerque, 2001).

El subsuelo local es caracterizado por dos tipos de suelos: la capa superficial con espesor de 6.5 m formada por arcilla limo arenosa, porosa, colapsable, laterítica, que subyace sobre un estrato de 12 m de limo arcillo arenoso. El nivel freático está a 17 m. En la figura 1 se presentan los valores de los parámetros geotécnicos medios del campo.

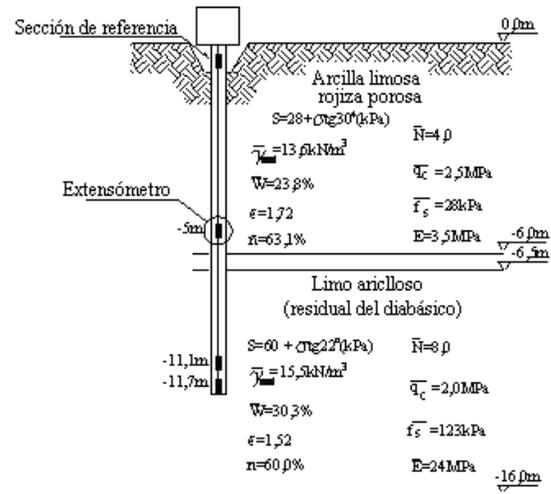


Figura 1 Parámetros geotécnicos del subsuelo.

Fueron realizados varios ensayos de campo: sondeo a percusión (SPT), como eléctrico (CPT), dilatómetro, presiometro, entre otros. La figura 1 muestra la posición de los extensómetros eléctricos: sección de referencia (-0,4m), cota 5m, cota 11.1m y cota 11.7 m. La figura 2 muestra la localización de los ensayos SPT y CPT conjuntamente con el pilote ensayado.

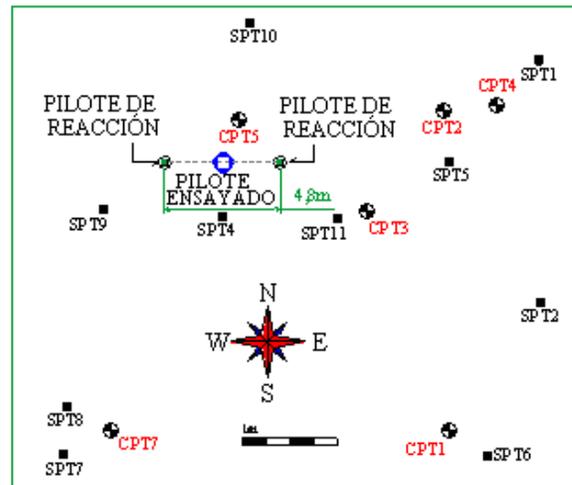


Figura 2. Localización de los pilotes y de los ensayos en el campo experimental.

## 4 PILOTE DE ENSAYO Y SISTEMA DE REACCIÓN.

### 4.1 Pilote de ensayo

El pilote hélice continua es un tipo de pilote construido in situ, caracterizado por la excavación del suelo a través de una broca con tubo central vacío. Para evitar que durante la colocación de la broca haya entrada del suelo o agua en la parte hueca de esta, se coloca en la parte inferior una tapa metálica, que es expulsada por el hormigón al inicio del proceso de hormigonado. Después de introducida en el suelo hasta la cota deseada, la broca es

extraída simultáneamente con la inyección del hormigón a través del vacío central de la broca. A medida que la broca va siendo retirada, se retira también el suelo que queda entre las aspás de la broca. El hormigón utilizado es caracterizado por la mezcla de agregados (áridos y arena). El consumo mínimo de cemento está en el orden de  $400 \text{ kg/m}^3$ , con asentamiento del orden de 240 mm.

Las ventajas de la utilización de este tipo de pilote son la reducción del tiempo de ejecución, su posibilidad de uso en varios tipos de terrenos excepto en rocas, ausencia de perturbación y vibración en el terreno (típicos de equipamientos a percusión), ausencia de descompresión en el terreno y fragmentos producto de la excavación. Las desventajas están en la necesidad del trabajar en terrenos llanos y de fácil acceso para los equipos, la necesidad de una planta de concreto cerca de la obra, la necesidad del disponer de un cargador para la limpieza del suelo extraído por la broca, la exigencia de una cantidad mínima de pilotes para amortizar los costos de movimiento de equipos y la limitación de la longitud del pilote y de la armadura. El proceso de ejecución debe recibir atención especial principalmente en el control de la continuidad del fuste, la perturbación del subsuelo debido a la extracción de la broca y la ruptura de suelos débiles debido a la presión de inyección, que puede aumentar excesivamente los consumos de hormigón.

Una importante ventaja de este tipo de pilote es la posibilidad de monitoreo electrónico continuo, además de ofrecer documentación sobre su ejecución. El sistema automático de monitoreo y registro ofrece los siguientes datos: fecha y hora, profundidad de excavación, velocidad de penetración, torque, volumen y presión del hormigón, diámetro del pilote y velocidad de extracción de la broca.

El pilote ensayado en este trabajo fue tipo hélice continua de 0,40 m de diámetro y 12 m de profundidad. La armadura longitudinal estaba formada por 4 barras de acero de 16mm de diámetro y cercos de 6.3 mm de diámetro colocados cada 20 cm ( $f_{yk_{acero}} = 500 \text{ MPa}$ ). Para su ejecución se utilizó la maquina perforadora MAIT HR-200. Antes del hormigonado, unido a la armadura, se insertó un tubo galvanizado de 42 mm de diámetro y 12 m de largo en el interior del fuste, con la finalidad de posteriormente instalar la instrumentación en su interior.

#### 4.2 Pilotes de reacción

Se construyeron dos pilotes de reacción alineados y espaciados a 2.40 m ( $6\phi$ ) del pilote de ensayo. Estos pilotes fueron del tipo hélice continua de 0.40 m de diámetro y 18 m de longitud. La armadura fue de 6 m de longitud constituidas de  $4\phi_b$  (longitudinal) y cercos de  $\phi_b 6.4 \text{ mm}$  colocados cada 20 cm ( $f_{yk_{acero}} = 500 \text{ MPa}$ ).

Uno de los aspectos que limitan la realización de pruebas de carga estáticas es la necesidad de un mecanismo de reacción compatible con la carga a aplicar al pilote ensayado. Esta limitación es impuesta por el alto costo del sistema y de la viga de reacción, sujeción atirantada y pilote de reacción (Figura 4 y 5) según se presenta a seguir.

- La viga de reacción con perfil doble I con ancho de 0.8 m, altura de 0.75 m, longitud de 5.30 m y masa total

en el orden de 3500 kg. Fue proyectada para soportar cargas aplicadas en su centro de hasta 2000 kN.

El sistema de tirantes fue hecho de barras especiales de acero (Dywidag - ST-85/105) con 32 mm de diámetro, tuercas, placas y uniones de acero igual al usado en la fabricación de los tirantes. En el interior de cada pilote de reacción fue colocada inmediatamente después de su ejecución, una barra de 18.6 m de longitud.

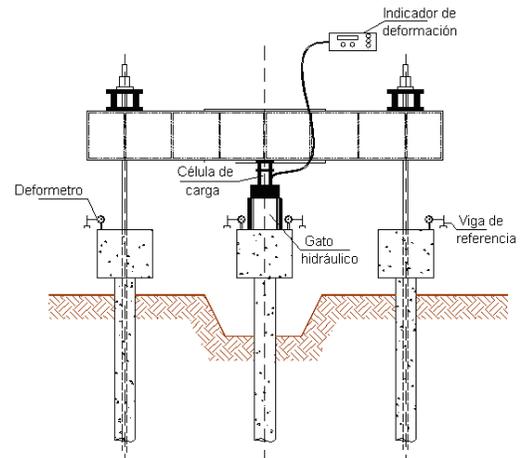


Figura 4. Esquema de montaje de la prueba de carga.



Figura 5. Vista del sistema montado.

#### 5 INSTRUMENTACIÓN

La instrumentación consistió en barras instrumentadas con extensómetros eléctricos utilizando el montaje en "puente completo" con cuatro extensómetros, que permite eliminar los efectos de la temperatura y de las deformaciones producto de la flexión, obteniéndose las deformaciones provenientes solamente del esfuerzo normal.

Para su confección se utilizaron barras de acero con 12.5 mm de diámetro y 0.6 m de longitud donde se pegaron los extensómetros eléctricos (strain gages). Los extensómetros eléctricos utilizados, especiales para acero (KFG - 2 - 120 - D16 - 11 - Kyowa Electronics Instruments) fueron protegidos contra la humedad y el choque mecánico utilizando resina especial. Después de realizada la instrumentación, las barras fueron calibradas en laboratorio verificando su perfecto funcionamiento.

Las barras instrumentadas fueron colocadas dentro del tubo galvanizado (Figura 5) en posición predefinida hasta formar una barra continua. El empate de las barras se hizo con anillas roscadas del mismo material.



Figura 5. Tubo de acero galvanizado insertado en el pilote.

La instrumentación fue instalada en la cabeza del pilote (sección de referencia) y en los niveles 5 m, 11.1 m y 11.7 m de profundidad a lo largo del fuste del pilote. Se presenta a seguir el proceso de instalación:

- Las barras instrumentadas fueron conectadas con las barras de unión a través de anillas,
- Las barras fueron introducidas dentro del tubo de acero conjuntamente con una manguera de plástico transparente, con diámetro aproximado de 6mm,
- Se utilizó un recipiente de acero en conjunto con una bomba de aire comprimido, que ofrecía una presión de 300 kPa para presionar la lechada hasta el fondo del tubo.

## 6 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS DE CARGA

Se presentan a seguir los resultados obtenidos con la aplicación de pruebas de carga lenta seguida de una rápida, intercaladas en 5 días. El segundo ensayo fue del tipo rápido solamente, pues que tenía la finalidad de evaluar el comportamiento de la fricción lateral y en la punta del pilote. Las pruebas fueron realizadas en las condiciones naturales de humedad. Basado en los ensayos, fueron obtenidos los siguientes parámetros:

- Las cargas y asentamiento en la cabeza del pilote.
- Las cargas en los niveles instrumentados a lo largo del fuste.
- La carga de punta a 12 m de profundidad, obtenidas por extrapolación de los valores de carga en los niveles más profundos (11.1 y 11.7m).
- Diagrama de transferencia de carga.

La finalidad de la segunda prueba de carga fue verificar el efecto de la primera carga en la curva carga asentamiento y el efecto de la segunda carga en el comportamiento de la fricción lateral y la reacción en punta.

Se presentan a continuación los resultados obtenidos en los ensayos realizados. Primeramente fue ejecutada la prueba de carga lenta con escalones mínimos de 30 minutos o hasta la estabilización de las deformaciones (NBR12.131/92). Después de cinco días de la primera carga se realizó un ensayo rápido, donde los escalones de carga se aplicaban cada 15 minutos sin necesidad de esperar por la estabilización de los asentamientos.

Los valores de carga máxima y asentamiento máximo para cada tipo de carga, se presentan en la tabla 1, así como las curvas carga asentamiento en la cabeza (Figura 6).

Tabla 1. Valores de carga y asentamiento máximo.

Ensayo	Carga (kN)	Asentamiento (mm)
Lento	960	80.24
Rápido	810	70.48

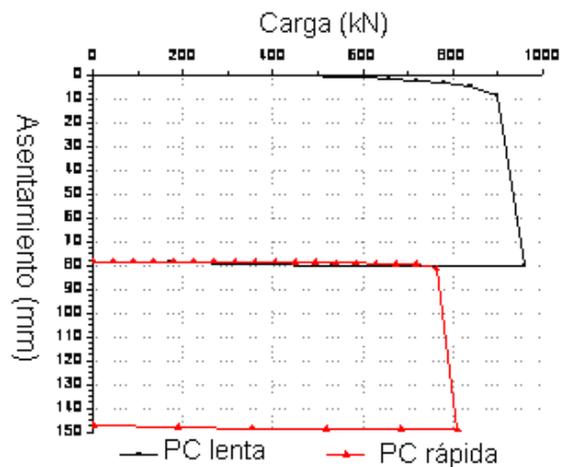


Figura 6. Curvas carga vs asentamiento.

Analizando la tabla 1 y la figura 6 se puede observar que las cargas máximas obtenidas en ambas pruebas mostraron pequeñas diferencias, siendo en el caso de prueba de carga rápida del orden del 15 % menor que la prueba lenta. A partir de los datos de la instrumentación, fue posible obtener las cargas en los niveles de fuste instrumentado en todos los escalones de carga, además de la fricción lateral. En la tabla 2, se presentan los valores de carga en cada nivel instrumentado para la carga máxima aplicada en cada tipo de ensayo.

Tabla 2. Valores de carga por nivel instrumentado.

Ensayo	Nivel				% punta
	5m	11,1m	11,7m	punta	
Lento	516	170	125	102	10.6
Rápido	434	128	88	67	8.3

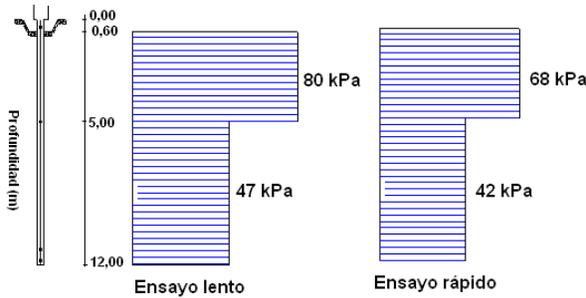


Figura 7. Fricción lateral para la carga máxima.

El pilote ofreció valores de fricción lateral unitaria máxima en el primer nivel instrumentado (0 a 5 m), superior al otro nivel (5 a 12 m). Este resultado no era esperado, pues a través de los ensayos de campo (CPT y SPT), se verifica que el estrato de suelo superior ofrece valores de resistencia más bajos, lo cual no es coherente con el resultado obtenido de la instrumentación. Después de extraído un pilote hélice continua en el mismo local de los ensayos y con las mismas características del pilote ensayado en este trabajo, se verificó que la superficie estaba cóncava en fuste, lo que pudiera explicar esta situación (Figura 8). El aumento del diámetro del pilote en el trecho superior está asociado a la presión del hormigón durante la ejecución, porque como el suelo es débil y la presión de hormigonado es alta, es probable que haya habido ruptura del suelo en esos puntos por expansión cilíndrica, produciendo una sección mayor en el pilote. Puede admitirse entonces que este fenómeno debe haberse repetido en el pilote ensayado.

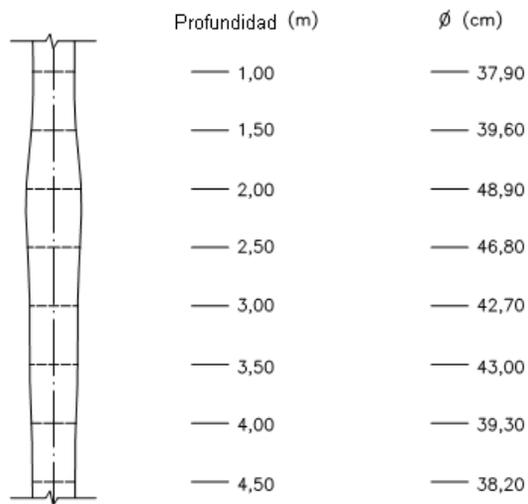


Figura 8. Geometría del pilote extraído en el lugar.

Con relación a la fricción lateral menor obtenida en el segundo ensayo, puede atribuirse al proceso de hormigonado a presión ya que puede imprimir características al suelo que rodea el pilote, de manera que lo convierte en menos susceptible a responder ante las cargas de un segundo ensayo de carga, pero para que ocurra una reducción en los resultados, es necesario que el primer ensayo sea llevado hasta la fricción lateral

máxima, aparejado a una gran deformación en el elemento de cimentación a lo largo de su fuste. Otro factor que puede haber influido en dicha reducción es la sección cóncava del pilote, pues fue verificado que puede suceder que después del primer ensayo de carga, una parte del fuste quede sin contacto con el suelo circundante (ver Figura 9) lo que reduciría el área de contacto pilote-suelo, disminuyendo la fricción lateral. La región entre las profundidades de 1 y 3 m (Figura 8) mostró poco contacto pilote-suelo. Esto implica una reducción del área lateral de  $1/12 \approx 9\%$ .

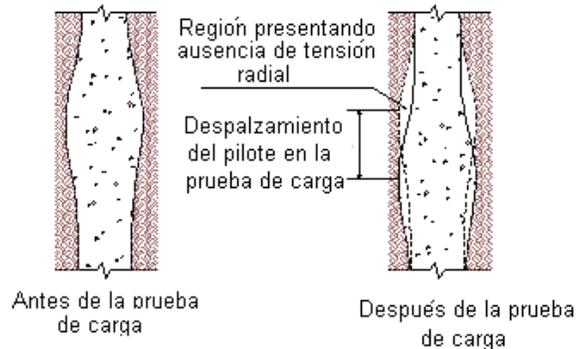


Figura 9. Representación gráfica del asentamiento del pilote hélice continua

En ambas pruebas de carga se verificó el momento último de la resistencia suelo-pilote en la parcela de fricción lateral. Al final de la prueba de carga rápida, se procuró llegar a un valor de asentamiento tal que sumado al obtenido en el primer ensayo, fuera del orden de 160mm (40 % del diámetro del pilote).

La finalidad de llevar la prueba de carga hasta un asentamiento superior al 30 % del diámetro del pilote fue para movilizar mayor porcentaje de carga en punta, ya que para este tipo de pilote, la movilización es pequeña para pequeños asentamientos. Además según Decourt (1996), este pilote se caracteriza porque la carga de punta no presenta pico, aun cuando se produzcan altos asentamientos.

Al final del primer ensayo y durante 5 días, fueron hechas varias lecturas en el extensómetro situado en la punta del pilote, lo cual permitió verificar la disipación de cargas en el tiempo, llegando a ser nulo el valor dos días antes de realizar el ensayo rápido.

La figura 10 presenta el comportamiento de la reacción de la punta del pilote de acuerdo con el tipo de ensayo. Obsérvese que en el ensayo lento la reacción en la punta estuvo en el orden de 853 kPa con asentamiento en la punta de 79mm. En el ensayo rápido, estos valores fueron 655 kPa y 70 mm respectivamente. Obsérvese que en ambos casos no hubo ruptura por punta, pues las rectas no tendieron a la horizontalidad.

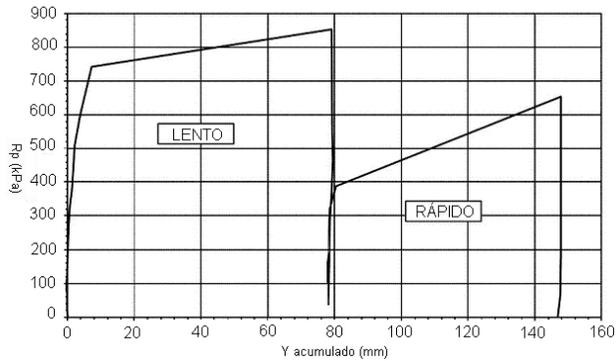


Figura 10. Gráfico de reacción de punta vs. asentamiento acumulado en la punta (Segunda Ley de Cambeftort)

En la figura 11 se puede verificar que los valores de asentamiento para la fricción lateral unitaria media obtenida en la prueba de carga lenta, fue del orden de los 8 mm, con valores de fricción de 58 kPa. En el ensayo rápido, el asentamiento fue de 2.5 mm y la fricción lateral de 49 kPa. Obsérvese además que con pequeños asentamientos se alcanzó la fricción lateral unitaria máxima en el ensayo rápido.

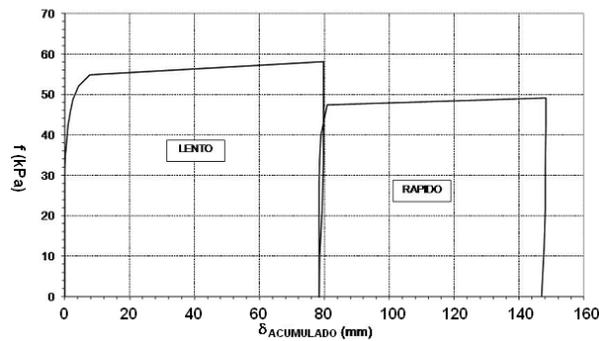


Figura 11. Fricción lateral unitaria en el tramo de 0 a 5 m en función del asiento medio del fuste (Primera ley de Cambeftort)

La figura 12 presenta las curvas de transferencia de carga para cada escalón de carga en las pruebas de carga lenta y rápida. Nótese que las rectas que representan los últimos escalones de carga en ambos ensayos, muestran un paralelismo, indicando que en ambos ensayos, el ensayo fue realizado hasta la rotura del sistema suelo-pilote. Se observa además que gran parte de la carga aplicada se asume por la fricción lateral.

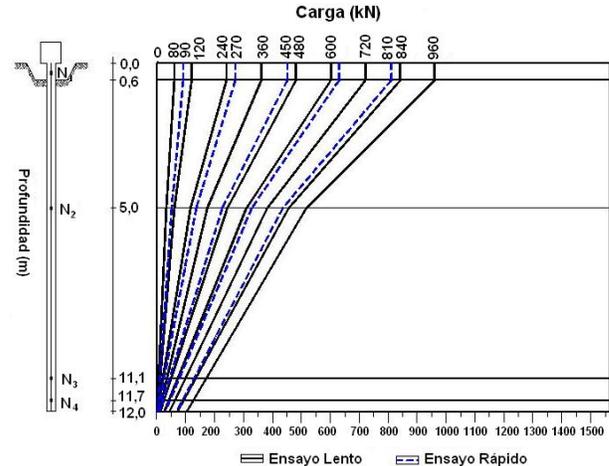


Figura 12 – Curvas de transferencia de carga

## 7 CONCLUSIONES

- En la segunda prueba de carga, la curva carga asentamiento muestra que prácticamente no hubo asentamiento hasta que se alcanzó la carga máxima en el primer ensayo,
- La carga de punta del segundo ensayo fue inferior al obtenido en el primero, pero si se comparan los valores de reacción en punta para el mismo nivel de asentamiento entre los dos ensayos, se verifica que los valores son aproximados mostrando de esta forma, que la punta mostró comportamiento similar en ambos tipos de ensayos,
- La instrumentación indicó que no hubo carga residual en la punta después de la primera prueba de carga, mostrando de esa forma su pequeña movilización,
- La fricción lateral en la segunda prueba de carga fue más pequeña que en la primera prueba de carga, puede ser explicado por la geometría del pilote que quedó después del asentamiento del primer ensayo, lo que produjo una reducción en el área lateral.
- La instrumentación brindó resultados coherentes sin pérdida de ninguno de los puntos instrumentados. Esto confirma que la utilización de barras de acero galvanizados insertados a lo largo del fuste de pilotes antes de ser hormigonados, se muestra como una buena técnica para la medida de la transferencia de carga en cimentaciones profundas fundidas in situ.
- El valor de la fricción lateral máxima para ambos ensayos no fue superior al 2% del diámetro del pilote, mostrando que para la condición local, pequeños desplazamientos son suficientes para la movilización plena de la fricción lateral.

## AGRADECIMIENTOS

A la Fapesp (Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo) por los recursos facilitados para la realización de esta investigación.

## REFERENCIAS

- Albuquerque, P. J. R. 2001. *Estacas escavadas, hélice contínua e ômega: estudo do comportamento à compressão em solo residual de diabásio, através de provas de carga instrumentadas em profundidade*. Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 375f.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1992. *Provas de Carga Estática: NBR 12.131/92*. Rio de Janeiro: A.B.N.T.
- Bottiau, M. (1993) *Pile walling with the PCS-method*. In: International Geotechnical Seminar On Deep Foundations On Bored And Auger Piles, 2<sup>nd</sup>, Ghent-Belgium. Proceedings... Rotterdam: A. A. Balkema, p.185-190.
- Brons, K. F. & Kool, A.F. (1988) *Methods to improve the quality of auger piles*. In: International Geotechnical Seminar On Deep Foundations On Bored And Auger Piles, 1<sup>nd</sup>, Ghent-Belgium. Proceedings... Rotterdam: A. A. Balkema, p.269-272.
- Cambefort, M. (1964) *Essai sur Le comportement em terrain homogène dès pieux isolés et dès groupes de pieux*. Annales – L'Institute du Batiment et des Travaux Public. n.204, p.1478-1518.
- Décourt, L. (1996) *A ruptura de fundações avaliadas com base no conceito de rigidez*. Anais SEFE III – Seminário de Engenharia de Fundações Especiais. ABMS/ABEF. São Paulo. v. 1, pp. 215-224.