

ANEXOS



A. ANEXO 1

RECOPIACIÓN DE REPORTES DE FRICCIÓN NEGATIVA EN ENSAYOS A ESCALA REAL

- Chelis (1951): Reporta una serie de casos de fallas de pilotes asociadas a cargas de arrastre. Los pilotes pertenecían a estructuras de molinos, tanques y un estadio de fútbol. El asentamiento de los estratos inferiores asociado a diversas causas, produjo cargas de arrastre en los pilotes, con magnitudes suficientes para causar asentamiento excesivo y falla de las estructuras.
- Locher (Suiza, 1965): Reportó resultados de ensayos en los que se usaron combinaciones de pilotes vaciados in situ y prefabricados con el fin de reducir las cargas de arrastre. Debido a que las cargas de arrastre estimadas en el proyecto eran muy altas, se ideó una cimentación en la que un pilote prefabricado de concreto era colocado sobre un pilote excavado y vaciado in situ cuya punta descansaba sobre el estrato portante. El diámetro del pilote superior era menor al del pilote vaciado in situ; así se garantizaban considerables fuerzas resistentes para el pilote vaciado in situ y menor área para la generación de cargas de arrastre en el pilote prefabricado.
- Johannessen and Bjerrum (1965): Los autores instrumentaron dos pilotes tubulares de acero hincados a través de cerca de 44 m de arcillas blandas, hasta el lecho rocoso. Un año después del hincado de los pilotes, fue dispuesto un relleno de 10 m de altura. Después de once meses de la colocación del relleno, se había medido un asentamiento total de 1.70 m y una carga de arrastre de cerca de 250 toneladas, localizándose el plano neutro en la parte alta del lecho rocoso. El nivel de fuerzas sobrepasaba la capacidad portante del estrato rocoso, produciéndose un asentamiento de 6 cm medido en la cabeza del pilote. Se concluyó que la fricción negativa producida podía estimarse por medio del método de los esfuerzos efectivos, usando un factor $\beta = 0.20$ para la máxima carga en el pilote.
- Endo (1969): Se ejecutaron estudios sobre cuatro pilotes metálicos de 609,6 mm de diámetro y paredes de 9.5 mm de espesor, con diferentes condiciones de punta, así: P1) punta cerrada, longitud 43 m, diseñado para trabajar por la punta; P2) punta cerrada y afilada a 8° , longitud 43 m, diseñado para trabajar por la punta; P3) punta abierta, longitud 43 m, diseñado para trabajar por la punta; P4) punta cerrada, longitud 31 m, diseñado para trabajar a fricción. Los pilotes fueron colocados en un suelo limo-arenoso que presentaba un asentamiento cercano a los 15 cm/año asociado a desecación. Los resultados mostraron diferencias claras en las cargas experimentadas por cada pilote, siendo muy notables entre pilotes abiertos y cerrados. Fueron calculados valores del parámetro $\beta = 0.20$ para el pilote de punta abierta (P3) y de $\beta = 0.35$ en el pilote de punta cerrada (P1). Se pudo demostrar que los resultados para cargas de arrastre podrían haber sido estimados con cierto grado de precisión usando el valor de la resistencia a la



compresión inconfiada ($q_u/2$), sin embargo, fue recomendado el uso del método de los esfuerzos efectivos.

- Bjerrum (1969): Reportó resultados de ensayos a escala real en cinco pilotes tubulares de acero hincados en arcillas blandas; cuatro de ellos fueron hincados hasta el estrato rocoso portante. Adicionalmente, fue colocado un relleno de cerca de 10 m de altura para inducir asentamiento. Dos pilotes fueron usados como pilotes de control, mientras que uno fue cubierto con una capa de 1 mm de betún y otro fue usado para probar una protección catódica usando una corriente de cuatro amperios a 0.60 voltios. La capa de betún redujo las cargas de arrastre llevándolas a un 10% de las obtenidas en el pilote de control, mientras que la protección catódica llevó las cargas de arrastre al 33% de las obtenidas en el pilote de control. Los resultados de la investigación permitieron ahorrar cerca de un 80% en los costos de un proyecto que se desarrollaba en aquellos tiempos.
- Bozozuk (1970): Se ejecutaron ensayos a escala real sobre pilotes de 39 pulgadas de diámetro y 270 pies de longitud, hincados en arcillas marinas, en un lugar en el que se estimaba posible un asentamiento de 10 pies causado por la construcción de un terraplén para un puente vehicular; el perfil de suelos consistía principalmente de una arcilla limosa a la que subyacían arenas y esquistos. Durante el período de observaciones, cargas de hasta 840 toneladas fueron atribuidas a cargas de arrastre; también se apreció que los mayores valores unitarios de fricción negativa tuvieron lugar en la parte superior del perfil de suelo donde las presiones de poro había disminuido, situación que fue tomada como un fuerte indicio de que magnitud de la fricción negativa es función de los esfuerzos efectivos.
- Walker y Darwall (1973): Fueron instrumentados dos pilotes tubulares de acero que fueron hincados en un perfil de suelo conformado por una capa superficial de arena fina, seguida de un estrato de 15,5 m de arcillas limosas, que superyacía a su vez a un estrato de 3.0 m de espesor de limos arenosos, seguido por 8.0 m de gravas y arenas densas. Uno de los pilotes recibió un recubrimiento con una capa de betún de 1.5 mm de espesor promedio; dicho pilote fue embebido dentro del estrato de limos arcillosos, pero no hasta el estrato portante. Por su parte, el pilote sin recubrimiento fue hincado 2 m dentro del estrato granular denso. Después de cuatro meses, las cargas en el pilote sin recubrimiento alcanzaban las 180 toneladas, mientras que las del pilote con betún solo llegaban a 3 toneladas.
- Bozozuk (1981): Se reporta un pilote hincado dentro de arcillas marinas y dejado en el terreno por diez años mientras se presentaba asentamiento en el suelo alrededor del elemento. A los diez años, la carga de arrastre había alcanzado cerca de 170 toneladas, mientras que el plano neutro había sido localizado a una profundidad cercana a los 20 m (ver Figura A-1). Justo a los 10 años, el pilote fue sometido a cargas que variaban entre un tercio y dos veces la máxima carga de arrastre; a continuación de estas cargas, el pilote fue sometido a cargas cíclicas a distintos rangos.

Se pudo apreciar que a medida que las cargas sobre el pilote se incrementaban, se disminuía la fricción negativa por encima del plano neutro, de modo que el aumento neto en las cargas en el plano neutro era despreciable. Eventualmente, mientras se incrementaba la carga aplicada, la fricción por encima del plano neutro original se hacía progresivamente más positiva. Finalmente, a una carga igual a dos veces la carga de arrastre original, la fricción por encima del plano neutro fue casi toda positiva aunque la carga por debajo del plano neutro no se incrementó de manera apreciable. El anterior resultado sugiere que es improbable que la presencia de fricción negativa cambie la capacidad última del pilote a medida que las cargas aplicadas se incrementan.

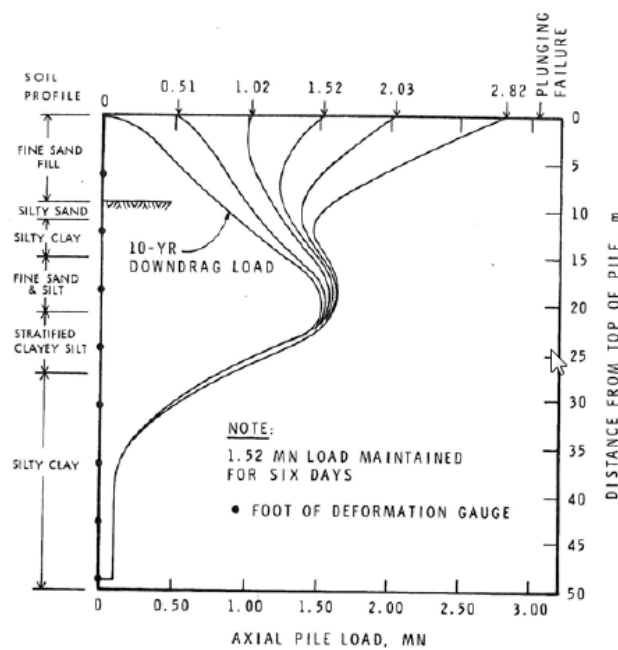


Figura A-1. Fuerzas de arrastre y localización del plano neutro en el pilote estudiado por Bozozuk (1981), citado por Sears (2008), después de 10 años de instalado.

Durante las pruebas fue registrado también el asentamiento del pilote; los resultados mostraron que el pilote era capaz de soportar cargas iguales a la máxima carga de arrastre sin que se presentaran asentamientos excesivos. Si las cargas superaban la de arrastre, el pilote solo permitiría cargas de corto plazo sin asentamientos adicionales. Se concluyó que la carga de arrastre producía un efecto de pre-esfuerzo en el pilote, similar al producido al pretensionar una viga de concreto; por lo anterior, la carga de arrastre podría preparar al pilote para soportar cargas transitorias sin asentamientos significativos.

- Mohan (1981): Se realizó el estudio de un pilote de 5.0 m de longitud hincado dentro de arcillas blandas. Un relleno fue colocado sobre el terreno, aumentándose paulatinamente su espesor, mientras que la corona del pilote fue anclada a un yugo en la superficie. Para obtener lecturas,

se colocó un equipo de lectura entre el yugo y una viga. Al final del ensayo, el pilote fue extraído para conocer la fricción última en el fuste. La carga total medida en 125 días fue de 4.10 toneladas; se calculó un valor del parámetro $\alpha = 0.43$ y del parámetro $\beta = 0.145$.

Adicionalmente, fue adelantada una prueba en campo sobre un pilote de concreto instrumentado, preexcavado y vaciado in situ, con un diámetro de 43 cm también de 5 m de longitud y anclado a un yugo en su corona. Se observó que el parámetro β osciló entre 0.10 y 0.15, aumentando con la magnitud de la sobrecarga aplicada por medio de relleno. Entre las causas que pudieron generar la existencia de valores tan bajos del parámetro β está el efecto de Poisson del pilote sometido a tensiones por causa del anclaje en la cabeza y la carga de arrastre del suelo alrededor de él, escenario que es claramente distinto al que presentan los pilotes en condiciones reales de fricción negativa, que generalmente están sometidos a compresión.

- Clemente (Hawai, 1982): Se instrumentaron cinco pilotes de concreto preesforzado para comprobar el efecto del betún en la reducción de las cargas de arrastre en clima cálido. Si bien se presentaron grandes dificultades durante el proceso de esparcimiento del betún sobre la superficie de los pilotes, finalmente se logró un espesor de betún adecuado. Se observaron reducciones en la carga de arrastre de entre el 60% y el 80 %, con relación a los pilotes que no recibieron recubrimiento con betún.
- Auvinet y Hanell (México, 1982): Se estudió el comportamiento de dos pilotes prefabricados de concreto, con longitudes de 30,5 m (diseñado para trabajo por fricción) y 32 m (para trabajo por la punta). A lo largo de un período de 2 años, se registró un asentamiento de 21 cm, causado por operaciones de extracción de aguas subterráneas. Después de dos años, el bombeo de aguas fue suspendido y el asentamiento prácticamente cesó, presentándose incluso áreas en las que hubo ascensión del terreno (recuperación). Se midieron fuerzas de arrastre máximas de 21 t para el pilote que trabajaba por fricción y de 32 t para el pilote que trabajaba por la punta. Sin embargo, de acuerdo con los análisis realizados este segundo pilote trabajó como pilote por fricción. De acuerdo con los investigadores, la expresión que estimó con mayor precisión el valor de la fricción en el fuste f_s , con relación a la profundidad z , es la siguiente:

$$f_s(z) = 1.5c_u \cdot \tan \phi$$

Ecuación A-1

Donde c_u es la resistencia al cortante no drenada, y ϕ es el ángulo de fricción del suelo. De acuerdo con los investigadores, se requirió un asentamiento de 2 cm para movilizar la totalidad de la fricción negativa.

- Bhandari et al. (1984) reportaron un ensayo de campo sobre un pilote de 66 cm de diámetro y 28.4 m de longitud, preexcavado y vaciado in situ, instalado a través de 3 m de relleno, 0.5 m de arena y 14.5 m de arcillas blandas; la punta del pilote fue embebida en arcilla rígida y roca

meteorizada subyacentes. La fricción negativa fue inducida en etapas mediante sobrecargas en la superficie; el asentamiento del terreno fue acelerado mediante drenajes verticales de arena. Se observó un valor del parámetro α entre 0.46 y 0.53 (promedio 0.50) mientras que el valor de β varió entre 0.20 y 0.24. El reporte no incluye información de los valores de la fuerza de arrastre ni de la localización del punto neutro.

- Bush y Briaud (USA, 1994): Se realizaron mediciones de carga de arrastre en ocho pilotes, de tres materiales distintos: acero, concreto preesforzado y madera. A algunos de los pilotes se aplicaron recubrimientos con betún y otros componentes, mientras que a los otros pilotes no, con el fin de para comparar cargas de arrastre para los diversos casos. Los pilotes fueron instalados en una antigua zona pantanosa desecada, con arcillas normalmente consolidadas intercaladas con estratos de arena y limos; las arcillas alcanzaban una rigidez media a los 16 m y una rigidez alta después de los 24 m. El estudio de los pilotes fue realizado a lo largo de dos años.

Se obtuvieron resultados dispares dado que en el caso de los pilotes de concreto, el pilote sin recubrimiento alcanzó una carga de arrastre de 340 kN, mientras que en los pilotes recubiertos se observaron cargas mayores, de 900 a 1000 kN. En el caso de los pilotes de acero, el pilote no recubierto tuvo una carga de 440 kN mientras que el pilote con recubrimiento alcanzó sólo 60 kN de carga de arrastre. Los datos de los pilotes de madera se perdieron a causa de un mal funcionamiento de la instrumentación instalada en los mismos. El asentamiento promedio del terreno fue cercano a los 220 mm.

- Little (Escocia, 1994): Se adelantaron ensayos a escala real en 23 pilotes con longitudes entre los 16 m y los 20.5 m, instalados en arcillas entre blandas y firmes, normalmente consolidadas, en una zona en la que los ensayos de laboratorio y campo habían demostrado previamente que el suelo era altamente compresible. El estudio se centró en el efecto de las cargas de arrastre sobre los grupos de pilotes y una comparación de los pilotes de fricción con relación a los pilotes de trabajo por la punta.

Se observó que dentro de los grupos, los pilotes esquineros desarrollaban mayores cargas de arrastre y que los pilotes que trabajaban por la punta desarrollaban mayores cargas de arrastre que los de fricción. En el caso de los pilote esquineros, se registraron cargas de arrastre de hasta 250 kN. Adicionalmente, se apreció que la localización del plano neutro de los pilotes de trabajo por la punta se hallaba apenas entre 2 m y 3 m por debajo de la localización del plano neutro para los pilotes de fricción. El asentamiento total del terreno fue estimado en 180 mm.

- Acar (USA, 1994): Se ejecutó un estudio en pilotes que soportaban un supermercado con posterioridad a la falla del sistema de cimentación. Se concluyó que los pilotes habían fallado a causa de las cargas de arrastre inducidas por una sobrecarga asociada a un relleno de 1.38 m

de espesor. Dado que el estudio fue realizado después de que ocurrió la falla, no pudo ser complementado con medidas reales de las fuerzas de arrastre.

- Fellenius (1998): Tras presentar un resumen de varias investigaciones realizadas en campo, concluye que el efecto de arrastre generado por la fricción negativa es un problema de asentamientos y que las cargas de arrastre pueden producir efectos de preesforzamiento en el pilote. De igual manera, destaca que las cargas vivas añadidas a la estructura reducen la carga de arrastre en la misma magnitud de las cargas aplicadas, y que dichas cargas de arrastre no deben ser incluidas en los cálculos para la capacidad última del pilote.

- Gue (Malasia, 1999): Fueron instrumentados dos pilotes pertenecientes a un terraplén a lo largo de un muro de tierra reforzada, con el fin de monitorear asentamientos, movimientos laterales y fuerzas de arrastre; uno de los pilotes fue colocado hacia el centro del terraplén, mientras que otro fue colocado en uno de sus bordes. Los pilotes fueron hincados en un terreno que consistía principalmente de limos arcillosos con algunas capas adicionales de arenas limosas; con el fin de minimizar los daños en los equipos de medición, la instrumentación fue colocada con posterioridad al hincado. Se observó un asentamiento de 65 mm en la superficie del terreno. Se midieron fuerzas de arrastre de 440 kN para el pilote central y de 820 kN para el pilote de borde. La menor magnitud de la fuerza en el pilote central fue asociada a un efecto de colgamiento.

- Fellenius (2006): Recopila series de ensayos a largo plazo en pilotes instrumentados, ejecutados entre las décadas de los 60's y 90's en Noruega, Suecia, Japón, Canadá, Australia, Estados Unidos y Singapur, e involucrando pilotes hincados de acero y de concreto prefabricado. Al final de su estudio, Fellenius (2006) obtuvo las siguientes conclusiones:
 - ✓ La fricción negativa siempre se desarrollará a lo largo de los pilotes, acumulándose a la carga de arrastre.
 - ✓ Los casos estudiados han demostrado que el esfuerzo efectivo gobierna la transferencia de cargas del suelo al pilote y del pilote al suelo.
 - ✓ La distribución de cargas calculada a partir de los valores de resistencia al corte no drenada puede ocasionalmente coincidir con la distribución real de cargas cuando no existe exceso de presión de poros, sin embargo esto parece ser más una coincidencia que una regla general.
 - ✓ Si el asentamiento del suelo es significativo y la respuesta de la punta del pilote es rígida, el plano neutro se localizará muy cerca de la punta del pilote.
 - ✓ Pocos milímetros de movimiento relativo entre la superficie del pilote y el suelo pueden ser suficientes para movilizar completamente la fricción en el fuste, tanto en la dirección positiva como en la negativa.
 - ✓ La longitud de la zona de transición de la fuerza cortante actuando en dirección negativa frente a aquella actuando en dirección positiva es función de la magnitud del movimiento entre la superficie del pilote y el suelo, denominado *gradiente de asentamiento relativo*. Cuando dicho

movimiento relativo es pequeño se obtendrá una zona de transición larga, mientras que cuando dicho movimiento relativo es importante, se obtendrá una zona de transición corta.

- ✓ Una capa de recubrimiento muy delgada, de entre 1 mm o 2 mm, de bitumen con viscosidad apropiada, reducirá significativamente las fuerzas de corte a lo largo de la superficie del pilote.
- ✓ El efecto del bitumen es reducir la fricción negativa y la fuerza de arrastre. Ello también causará que el plano neutro se mueva hacia abajo, a una mayor profundidad en la que posiblemente el asentamiento sea menor y consecuentemente, el desplazamiento por arrastre (*downdrag*) sea menor. Es de notar que la capa de bitumen también reducirá la capacidad del pilote y su factor de seguridad.

Pruebas realizadas en pilotes instalados en los suelos arcillosos de Ciudad de México

De acuerdo con Marsal y Mazari (1969), las observaciones generales realizadas al tratar la influencia del hundimiento de la Ciudad de México sobre las construcciones, ponen en evidencia que los estratos atravesados por los pilotes pueden desplazarse relativamente a estos e inducir cargas adicionales a las que son transmitidas por la estructura. Al considerar que los pilotes típicos presentaban longitudes de entre 20 m y 28 m y áreas laterales cercanas a $1 \text{ m}^2/\text{m}$, solo se requeriría una fricción lateral o adherencia de $0.1 \text{ kg}/\text{cm}^2$ para que los esfuerzos asociados al desplazamiento relativo del suelo respecto a los pilotes fuesen del mismo orden de magnitud que los esfuerzos debidos a las cargas normales de trabajo.

Marsal y Mazari (1969) describen ensayos de extracción en pilotes de madera y concreto, realizados con el propósito de medir la fricción que puede desarrollarse por adherencia de las arcillas y su evolución en el tiempo. En el caso de los pilotes de concreto fueron hincados pilotes en la arcilla del antiguo lago para luego ser sometidos a cargas de extracción a los tiempos 39 minutos, 48 días y 249 días después de la instalación del elemento en el terreno, con velocidades de $0.9 \text{ cm}/\text{min}$, $0.8 \text{ cm}/\text{min}$ y $0.4 \text{ cm}/\text{min}$ respectivamente. Para la tercera extracción fueron medidas resistencias de $0.18 \text{ kg}/\text{cm}^2$ (máxima) y de $0.14 \text{ kg}/\text{cm}^2$ (final).

Los valores de resistencia a la extracción de los pilotes de concreto fueron, en general, menores a las obtenidas en los ensayos de extracción de los pilotes de madera, que rondaron entre $0.17 \text{ kg}/\text{cm}^2$ y $0.30 \text{ kg}/\text{cm}^2$. Sin embargo, Marsal y Mazari (1969) advierten que dichas diferencias posiblemente corresponden más bien a las características del suelo afectado en cada uno de los ensayos y al procedimiento de hincado. Con base en los ensayos descritos, los investigadores concluyeron que los materiales del subsuelo se adhieren a los pilotes y que la resistencia que oponen a la extracción depende principalmente del tiempo transcurrido desde el hincado y de la velocidad de extracción.

Investigaciones realizadas en laboratorio, y ensayos en equipo centrífugo

Alonso et al (1984) presentan los resultados de una serie de ensayos de laboratorio realizados para simular el comportamiento en la interfase suelo-pilote. Se modificaron cajas estándar para el ensayo de corte de 6 cm de lado, con el fin de reproducir ciclos de esfuerzo cortante típicos de los suelos

vecinos a pilotes sometidos a procesos de fricción negativa. La parte inferior de la caja fue llenada con un espécimen de concreto de superficie bastante lisa, mientras que una arcilla limosa fue consolidada contra dicho espécimen, tomándose las precauciones necesarias para no propiciar fricciones accidentales en el sistema. Se realizaron diversos ensayos variando el esfuerzo normal entre 25 kPa y 200 kPa y ajustando la velocidad del equipo de corte para garantizar condiciones drenadas. La Figura A-2 muestra la gráfica obtenida para uno de los especímenes ensayados, sometido a un esfuerzo normal de 100 kPa.

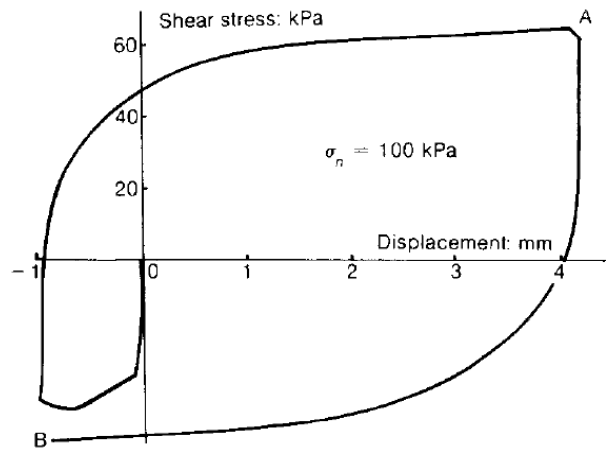


Figura A-2. Gráfico obtenido del ensayo cíclico de corte directo drenado para la interfase arcilla-concreto (Alonso et al, 1984).

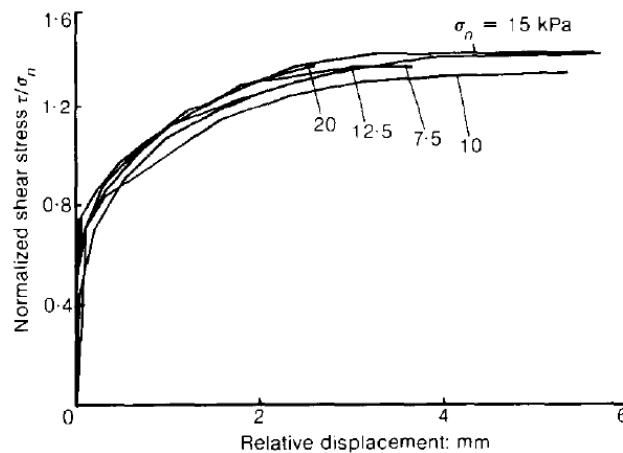


Figura A-3. Curvas de esfuerzo cortante vs desplazamiento para los ensayos de corte directo en la interfase suelo-concreto, para el primer ciclo de descarga (Alonso et al, 1984).

Alonso et al (1984) reporta que si bien se presentaron dificultades en la interpretación de los resultados de los ensayos, si se identificaron con facilidad varias tendencias. Desplazamientos relativos muy pequeños (del orden de 0.2 mm) movilizaron en todos los ensayos un alto porcentaje del esfuerzo cortante límite τ_l (cercano al 60%), resultado válido tanto para la carga como para la

descarga y la recarga ejecutadas durante el ensayo. Adicionalmente, un desplazamiento relativo de 3 mm desde el punto de inversión de esfuerzos movilizó hasta el 95% de τ_l .

La Figura A-3 muestra las curvas de descarga obtenidas en los ensayos para diferentes valores de esfuerzo normal. La descarga debe entenderse como la etapa en la que la fricción pasa de positiva a negativa, correspondiente al tramo A-B de la curva de la Figura A-2. Puede apreciarse que la fricción total es movilizad a valores muy bajos de desplazamiento, no mayores de 3.5 mm. Los resultados obtenidos por Alonso et al (1984) son especialmente útiles a la hora de determinar el desplazamiento requerido para movilizar la totalidad de la fricción.

Alonso et al (1984) hace referencia a diferentes estudios ejecutados por otros investigadores, en los que fue estimado el desplazamiento cortante requerido para movilizar la resistencia cortante pico a través de una línea de falla predeterminada. Entre los estudios citados se encuentran los siguientes:

- Lupini y otros (1981) presentaron resultados para una serie de ensayos de corte en anillo sobre suelos naturales. Para la mayoría de casos un desplazamiento de entre 2 mm y 3 mm fue suficiente para inducir la resistencia cortante pico. Las arcillas de plasticidad media a alta presentaron un comportamiento frágil, alcanzando su resistencia residual para desplazamientos mayores de 100 mm.
- Chandler y Martins (1982) reportaron curvas de carga lateral vs desplazamiento para modelos de pilotes a escala embebidos en arcilla, en las que la resistencia pico fue alcanzada para desplazamientos de 2 mm. Las arcillas presentaron un comportamiento frágil asociado a la disminución del ángulo de fricción en la interfase arcilla-pilote.
- Clemence y Brumund (1975) ejecutaron ensayos de corte directo con el fin de simular la interfase entre pilotes de concreto y arena. Para el rango de esfuerzos normales aplicados en los ensayos (10 kPa a 28 kPa) los desplazamientos requeridos para alcanzar el 95% de la resistencia pico variaron entre 1.1 mm y 2.0 mm. Los investigadores en comento también usaron modelos de gran escala para medir la fricción en el fuste de pilotes, alcanzando la fricción máxima a desplazamientos entre 1.2 mm y 1.6 mm.

A continuación se presenta un resumen de ensayos de laboratorio sobre pilotes, de acuerdo con el listado incluido en el trabajo de Sears (2008):

- Koerner y Mukhopadhyay (1972): Se realizaron una serie de ensayos en laboratorio para calcular los efectos de diferentes variables difícilmente manejables en ensayos a escala real por su costo, tales como el efecto de la inclinación del pilote (en pilotes diseñados de esa manera), el espaciamiento de los pilotes dentro de grupos de estos, el contenido de agua, el material del pilote y la viscosidad y espesor del asfalto usado como medida de mitigación de las cargas de arrastre. Los ensayos fueron ejecutados en pilotes de una pulgada de diámetro profusamente instrumentados en cinco puntos a lo largo de su longitud.

En el caso de pilotes inclinados, se observó un aumento muy notorio de las cargas de arrastre en los elementos con inclinaciones mayores a 1:10 (horizontal:vertical), como se muestra en la Figura A-4 (izquierda). En lo que respecta a los ensayos sobre grupos de pilotes, se encontraron incrementos en las fuerzas de arrastre desde espaciamentos mínimos hasta un espaciamiento de 2.50 diámetros; a partir de 2.50 diámetros, los cambios en las cargas de arrastre son mínimos o nulos (ver Figura A-4, derecha).

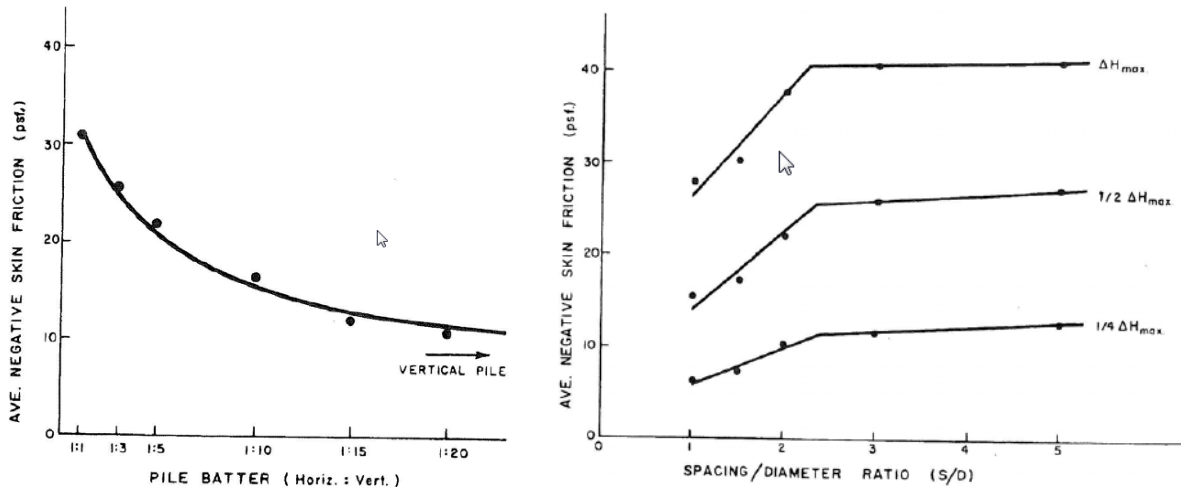


Figura A-4. Gráficos derivados de los ensayos realizados por Koerner y Mukhopadhyay (1972), citados por Sears (2008). Izquierda: Relación cargas de arrastre vs. inclinación de los pilotes. Derecha: Relación cargas de arrastre vs. separación entre los pilotes en grupos de estos.

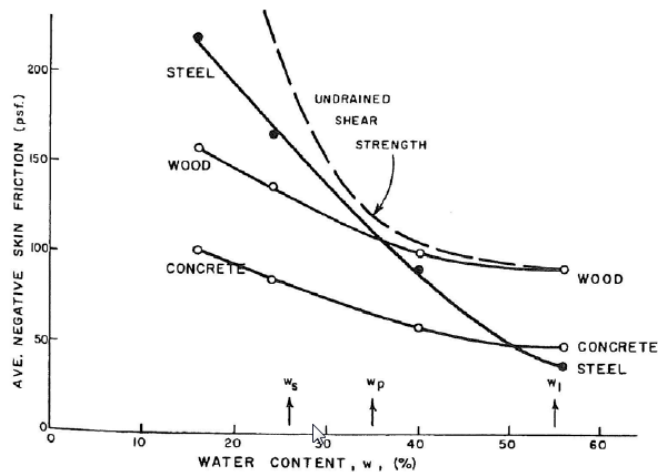


Figura A-5. Variación de las cargas de arrastre con el contenido de agua del suelo y el material del pilote; gráfica presentada por Koerner y Mukhopadhyay (1972), citados por Sears (2008).

Los ensayos también demostraron que las cargas de arrastre disminuyen con el aumento del contenido de agua, debido a que el suelo se hace menos rígido (Figura A-5); esto se debe a que el suelo pierde resistencia al corte cuando el contenido de agua aumenta.

En los ensayos realizados con pilotes con recubrimiento de bitumen se demostró que cuando la penetración del asfalto es mayor se aumentan las cargas de arrastre, situación explicable debido al aumento de la rugosidad de la superficie del pilote que implica una mayor capacidad para desarrollar fricción. Como es apenas previsible, también se encontró que a mayor espesor del recubrimiento, se desarrollan menores cargas de arrastre. Los pilotes con recubrimiento asfáltico presentaron notorias reducciones en las cargas de arrastre comparados con los pilotes que no recibieron dichos recubrimientos.

- Leung y otros (2004): Se ejecutaron ensayos en equipo centrífugo para modelar pilotes que soportan fuerzas de fricción negativa y carga axial. Se ejecutaron dos tipos de ensayos: el primero se centró en el estudio de las cargas de arrastre sin ninguna carga adicional aplicada. Los ensayos se ejecutaron para modelar un pilote prototipo de 27 m de longitud y 1.6 m de diámetro; se usó una capa de arena centrifugada hasta lograr un grado alto de compactación, añadiendo una capa de arcillas blandas sobre la de arena. El pilote fue insertado y el equipo fue sometido a giro hasta que se completó la consolidación de la arcilla; con posterioridad a ello, se colocó una sobrecarga por medio de una capa de arena con el fin de inducir consolidación adicional. El arreglo general para el ensayo se muestra en la Figura A-6 (izquierda).

En primera instancia fueron evaluadas las diferencias de comportamiento entre un pilote trabajando por fricción (su extremo insertado dentro de un estrato arenoso portante) y un pilote descansando sobre lecho rocoso (trabajando con la punta en un material rígido). Los ensayos demostraron que el plano neutro para el pilote de trabajo por fricción se localizaba dentro del estrato portante, mientras que para el pilote por punta el plano neutro se localizaba en el mismo lecho rocoso; dichos resultados se pueden ver en la Figura A-6 (derecha), en donde los resultados N1 corresponden al pilote de trabajo por fricción.

Ensayos posteriores se centraron en los efectos de las cargas aplicadas. Después que se alcanzó la consolidación por peso propio, alcanzándose una carga de arrastre muy cercana a la medida durante el primer ensayo, se aplicó gradualmente una carga a la cabeza del pilote. La carga de arrastre presente en el pilote fue lentamente disipada, siendo totalmente superada o anulada al final del ensayo; durante dicho proceso pudo apreciarse cómo el plano neutro cambiaba de localización desde haber estado cerca de la punta del pilote hasta ubicarse en la superficie de la capa de arcilla. Después que la carga total fue aplicada (equivalente a la mitad de la capacidad última del pilote), se aplicó la sobrecarga por medio de la capa de arena y se sometió a giros el equipo para alcanzar la consolidación adicional de la arcilla. Durante dicho proceso, las cargas de arrastre gradualmente sobrepasaron la carga aplicada y el plano neutro volvió ubicarse en la base del pilote, como puede apreciarse en la Figura A-7. El procedimiento se repitió para tres valores distintos de carga aplicada, y los resultados obtenidos fueron similares.

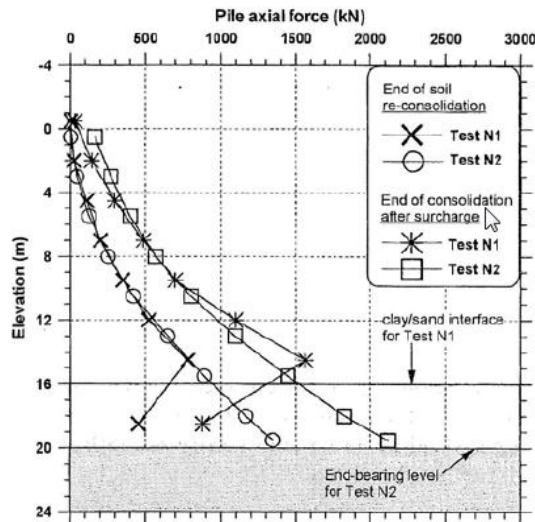


Figura A-6. Ensayos ejecutados por Leung en 2004; comparación de las cargas de arrastre obtenidas en diferentes condiciones del ensayo

La parte final de la segunda serie de ensayos se centró en los efectos de la longitud de empotramiento del pilote dentro del estrato portante arenoso. Se pudo observar que a mayores longitudes de empotramiento la carga de arrastre aumentaba ligeramente, el plano neutro se ubicaba levemente más abajo y el asentamiento de la cabeza del pilote disminuía.

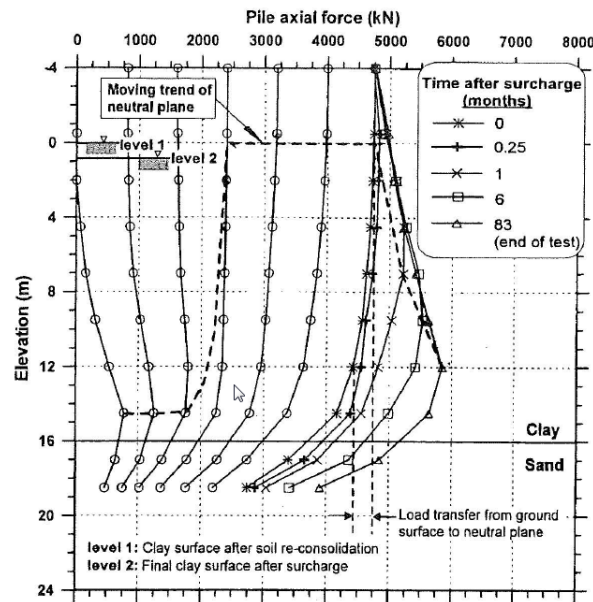


Figura A-7. Efectos de la carga aplicada sobre la localización del plano neutro en los ensayos realizados por Leung en 2004.



B. ANEXO 2

ALGUNAS PRUEBAS DE CARGA EN PILOTES REALIZADAS EN BOGOTÁ

Con el propósito de comparar los valores de fuerzas unitarias de fricción en el fuste obtenidos mediante el enfoque de los esfuerzos efectivos (método β), se citan a continuación los resultados de algunas pruebas de carga sobre pilotes desarrolladas en sectores de la ciudad de Bogotá:

Pruebas de carga estática

En el desarrollo de algunas obras de importancia construidas en la ciudad se han ejecutado pruebas de carga estática sobre pilotes. A continuación se presentan los resultados de algunos de dichos ensayos, destacándose los valores de resistencia unitaria por el fuste obtenidos.

- **Proyecto Bellavista 100**

Moya y Rodríguez (1987) reportaron una prueba de carga realizada de pilote en el marco del desarrollo del proyecto urbanístico Bellavista 100 ubicado en la Calle 98 con Carrera 8, consistente en dos edificios de 10 niveles y semisótano. El proyecto fue emplazado en un sector de transición entre las zonas plana y oriental de la ciudad, con predominancia de arcillas y limos blandos hasta los 30 m de profundidad, y con presencia de arenas limosas densas intercaladas con arcillas de consistencia media a baja entre los 30 m y los 55 m; a partir de los 55 m se encontró una arcilla muy dura, de baja compresibilidad.

Para la cimentación se consideraron óptimas dos opciones: 1) Pilotes hincados de concreto de sección cuadrada de 35 cm de lado y 40 m de longitud; 2) pilotes de concreto preexcavados de 60 cm de diámetro y 40 m de longitud. La carga última se estimó entre 110 ton y 160 ton. Para analizar las alternativas se realizaron pruebas de carga sobre un pilote representativo de cada una de ellas.

El pilote hincado presentó falla a una carga de 251 ton, estimándose que 133 ton fueron soportadas por fricción lateral y 118 ton por resistencia por punta; la resistencia unitaria por fricción fue estimada en 2.4 ton/m², pudiendo variar entre 0.9 ton/m² cerca de la superficie y 3.9 ton/m² a 40 m de profundidad. En la falla, el pilote presentó un desplazamiento total de 48 mm, de los cuales 34 correspondieron a acortamiento elástico y 14 mm a desplazamiento de la base. Al iniciar la descarga se presentó un asentamiento adicional de 3 mm, mientras que al final de dicha descarga el pilote mantuvo una deformación permanente de 12.5 mm, la cual fue atribuida a fricción negativa (o fricción residual).

El pilote preexcavado sufrió falla estructural por compresión del concreto cerca de la cabeza, a una carga de 404 ton, equivalente a cerca del 50% de la resistencia nominal; dicha falla posiblemente se asoció a contaminación del concreto con el lodo bentonítico. Los resultados fueron más difíciles de analizar, destacándose por parte de Moya y Rodríguez dos factores de imprecisión:

- Desconocimiento de la forma y dimensiones de la sección transversal del pilote y su variación con la profundidad. Se supuso que la compresión radial del suelo fue uniforme en toda la profundidad y que el diámetro final del pilote fue 0.707 m.
- La variación del módulo de deformación del concreto para diferentes niveles de esfuerzos, así como la influencia que sobre el módulo puede tener el método de construcción (concreto tremie) sobre la calidad del concreto.

Finalmente fueron estimados valores de fricción negativa entre 3.25 ton/m² y 7.15 ton/m², como se muestra en la Figura B-1. Los análisis llevaron a determinar que en el tramo inferior del pilote no se alcanzó el valor máximo de fricción.

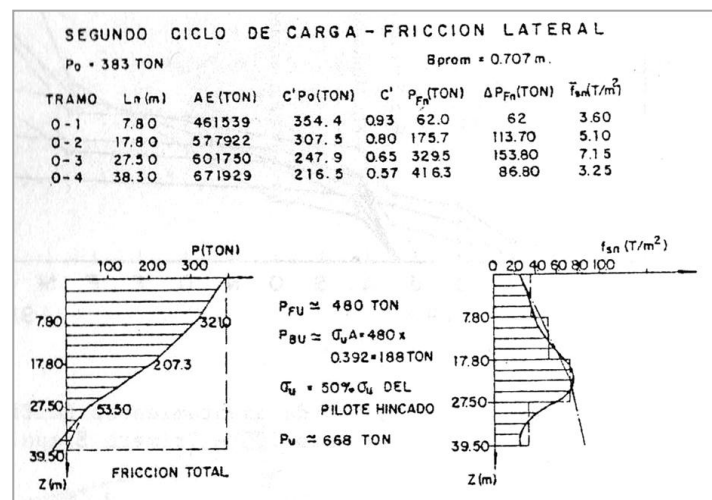


Figura B-1. Resultados del análisis por fricción lateral para el pilote preexcavado del proyecto Bellavista 100 (tomado de Moya y Rodríguez, 1987)

Llama la atención que se haya obtenido un valor menor de fricción para el caso del pilote hincado en comparación del preexcavado, lo que contradice lo expresado por otros investigadores que incluso recomiendan reducir la resistencia por fricción en el caso de pilotes preexcavados. Moya y Rodríguez (1987) consideran probable que posiblemente la resistencia al corte del suelo presentó una disminución muy significativa a causa del remoldeo y el aumento de las presiones de poro durante el hincado.

- **Proyecto Rafael Núñez**

Moya y Rodríguez (1998) presentaron los resultados de pruebas de carga sobre pilotes de concreto preexcavados de 0.60 m de diámetro nominal y de 23 m y 33 m de longitud, realizadas para el proyecto habitacional Rafael Núñez, que fue desarrollado al occidente de la Ciudad Universitaria. El proyecto fue emplazado en una zona cuyo subsuelo está formado por una secuencia de arcillas de consistencia media, de alta plasticidad que sobreyacen a estratos de arena fina limosa densa ubicadas a partir de los 30 m y hasta los 40 m.

El primer pilote, con una longitud efectiva de 20 m, fue llevado hasta la falla con incrementos de 10 ton, hasta una carga de 170 ton a la que se registró un asentamiento de 13 mm. Tras la etapa de descarga, el pilote recuperó elásticamente 7.5 mm, quedando una fricción residual a lo largo del fuste.

Los análisis iterativos realizados para compatibilizar las mediciones en campo con los cálculos, permitieron estimar la distribución de fricción lateral que se muestra en la Figura B-2, en la que la fricción alcanza valores entre 3.0 ton/m² y 7.0 ton/m². Los mayores valores se presentaron cerca de la superficie del terreno.

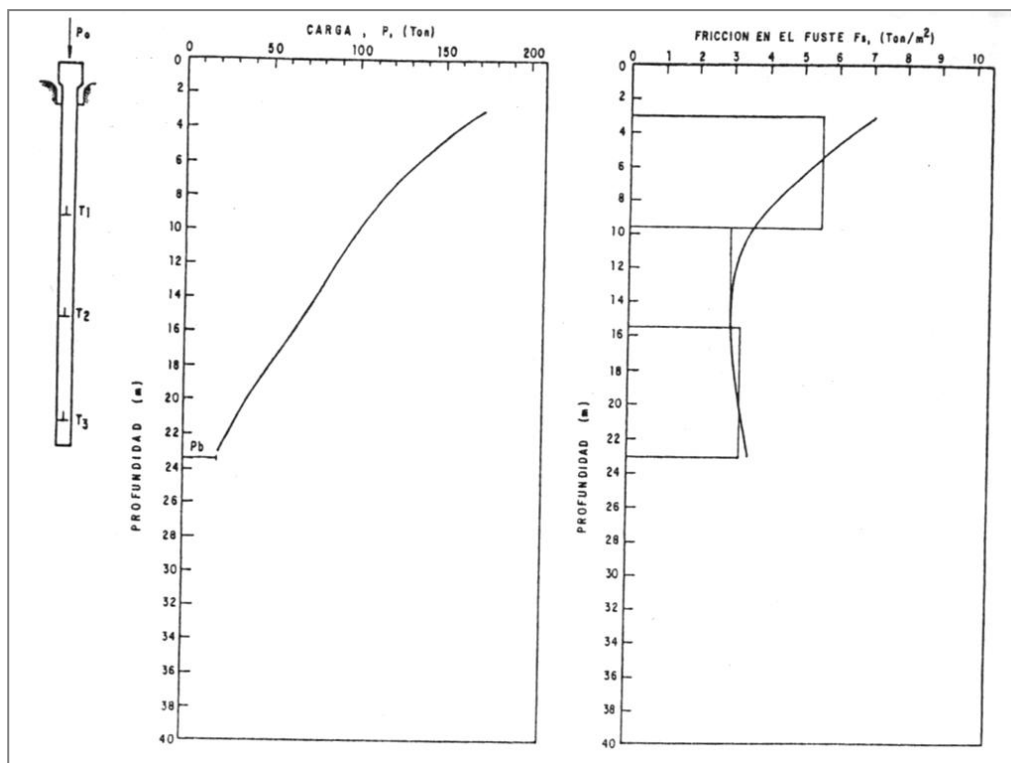


Figura B-2. Distribución de fricción en el fuste para el pilote de 23 m de longitud total (tomada de Moya y Rodríguez, 1998).

En el caso del pilote de 33 m de longitud total (30 m de longitud efectiva), este fue concebido esperando que su punta llegara a uno de los estratos de arena ubicados por debajo de los 30 m, de modo que se obtuviera resistencia tanto por la punta como por el fuste. El pilote fue cargado con incrementos de 20 toneladas cada 15 minutos hasta una carga máxima de 260 ton en la que se presentó un asentamiento de 13 mm. Con posterioridad a la descarga el pilote presentó una recuperación elástica de 6.0 mm, indicando que se conservó fricción residual en el fuste. El pilote no alcanzó el estrato resistente que se esperaba.

Los análisis realizados permitieron estimar la distribución de fricción lateral que se muestra en la Figura B-3, en la que la fricción alcanza valores entre 3.0 ton/m² y 5.5 ton/m². Si bien los mayores valores se presentan cerca de la superficie del terreno, la distribución de las fuerzas de fricción es mucho más pareja que la obtenida en el pilote de 20 m de longitud efectiva.

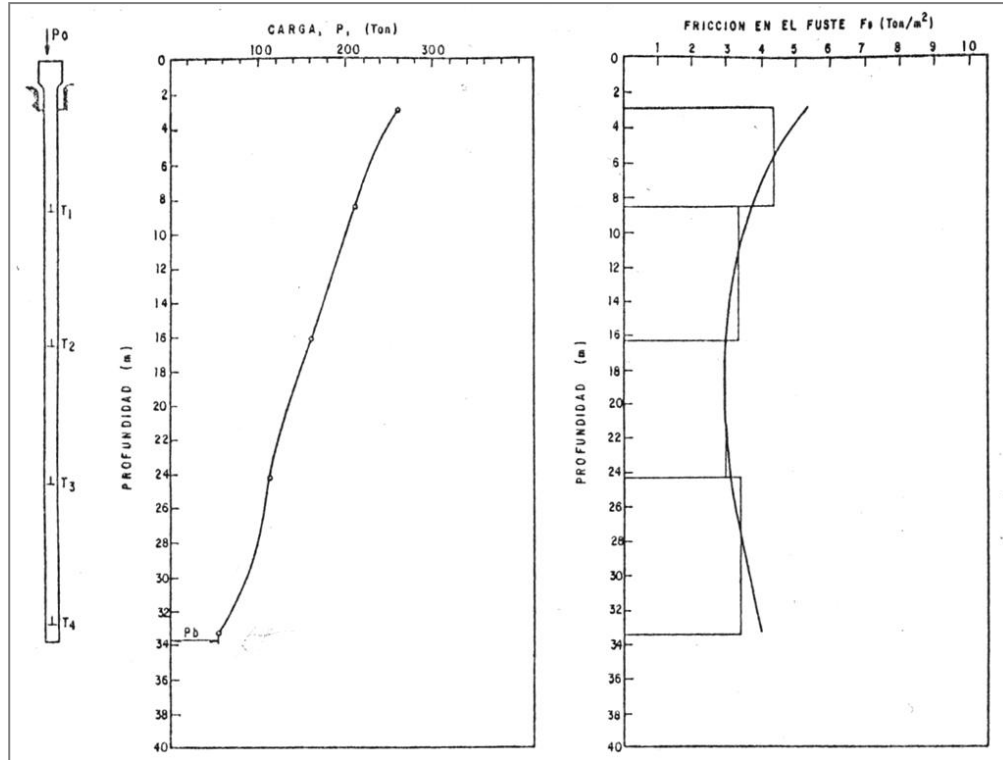


Figura B-3. Distribución de fricción en el fuste para el pilote de 33 m de longitud total (tomada de Moya y Rodríguez, 1998).

Moya y Rodríguez (1998) concluyen que la resistencia por fricción de los pilotes fue aproximadamente igual a la resistencia al corte del suelo, contrario a lo reportado en la literatura que incide que en general la fricción es menor por el efecto del método constructivo. Como posible explicación a este comportamiento se indica el efecto de presión del concreto fluido que produce una expansión de las arcillas blandas alrededor del pilote.

Orozco (2001) reporta resultados de cuatro pruebas realizadas en pilotes por fricción que se resumen a continuación:

- **Proyecto Parques de La Colina:**

El proyecto, localizado en el sector de Colina Campestre, fue emplazado en un terreno con perfil estratigráfico conformado principalmente por arcillas y limos blandos, con un nivel freático ubicado entre 2 m y 3 m de profundidad. El pilote ensayado había sido preexcavado y fundido in situ, con un diámetro de 0.60 m y una profundidad de 41.7 m, presentando una carga de diseño de 120 ton. Se aplicaron incrementos de carga de 7.5 ton y 15 ton hasta que se alcanzó una carga de 261 ton, bajo



la cual se comenzó a presentar un aumento notable en los asentamientos. Los análisis arrojaron una carga de falta de 253 ton, con una capacidad por fricción del orden de 3.2 ton/m².

- **Proyecto CUR II Compensar:**

El proyecto, ubicado en la intersección de la Carrera 68 con Avenida El Dorado, fue emplazado en un terreno con un perfil estratigráfico conformado principalmente por arcillas y limos blandos, con un nivel freático ubicado a 2.50 m de profundidad. Fueron ensayados dos pilotes, el primero de 25 m de longitud y 40 cm de diámetro diseñado para una carga de 38 ton. El segundo, con 25 m de longitud, 50 cm de diámetro y una carga de diseño de 48 ton. Los pilotes fueron llevados hasta el 200% de las cargas de diseño aplicando incrementos de 12.5% y 25% de las mismas; la descarga se realizó con decrementos del 50%. Los pilotes no alcanzaron la falla, demostrando un factor de seguridad mayor a 2. Se pudo establecer que la fricción promedio se encontraba alrededor de 2.4 ton/m².

- **Proyecto Bosque de Los Lagartos:**

Corresponde a un proyecto que fue desarrollado en la zona occidental de la ciudad, Avenida Boyacá cerca al río Juan Amarillo, en un terreno con un perfil estratigráfico caracterizado por la presencia de limos y arcillas blandas, con el nivel freático prácticamente a nivel de superficie. Fueron probados tres pilotes hincados, todos ellos con sección cuadrada de 27.5 cm de lado, dos con 36 m de longitud y uno con 42 m.

El pilote referenciado como No. 6, diseñado para una carga de 30 ton, presentó la falla a un nivel de carga igual al 325% de la de diseño; la carga de falla equivalente fue estimada en 91 ton. Dos años después, los pilotes fueron ensayados de nuevo para determinar al recuperación en la resistencia que ganaron en el tiempo. El pilote No 6 presentó la falla a una carga equivalente de 105 ton. La capacidad del pilote por fricción fue estimada en 2.9 ton/m².

Con base en los ensayos realizados, Orozco (2001) destaca la variación de la resistencia por fricción, que es menor en los pilotes de menor longitud (cercana a 2.0 ton/m²) y que aumenta en los de mayor longitud (4.0 ton/m² para pilotes de más de 40 m de longitud); por esta razón concluye que los pilotes con mayor relación L/D presentan una mayor eficiencia. Destaca igualmente que los resultados obtenidos para pilotes preexcavados en términos de resistencia por fricción y resistencia total, no difieren significativamente de aquellos obtenidos para pilotes hincados; sin embargo, recuerda que la capacidad por fricción del pilote hincado se desarrolla con posterioridad a la disipación de la presión de poros y de la recuperación tixotrópica de los suelos alrededor del pilote.

A modo de resumen, en la Tabla B-1 se presenta la recopilación de los datos principales de los ensayos reportados.



Tabla B-1. Resumen de las pruebas de carga sobre pilotes consultadas.

PROYECTO	MÉTODO	DIMENSIÓN	LONGITUD	RELACIÓN L/D	FRICCIÓN UNITARIA
Bellavista 100	Hincado	L = 35 cm	40 m	114	0.90 – 3.90 ton/m ²
Bellavista 100	Preexcavado	D = 60 cm	40 m	67	3.25 – 7.15 ton/m ²
Rafael Núñez	Preexcavado	D = 60 cm	20 m	33	3.00 – 7.00 ton/m ²
Rafael Núñez	Preexcavado	D = 60 cm	30 m	50	3.00 – 5.50 ton/m ²
Parques La Colina	Preexcavado	D = 60 cm	41.7 m	70	3.20 ton/m ²
CUR II Compensar	Preexcavado	D = 40 cm	25 m	160	2.40 ton/m ²
Bosque Los Lagartos	Hincado	L = 27.5 cm	30 m	109	2.90 ton/m ²

Pruebas de carga dinámicas

Adicionalmente, se presentan los resultados de pruebas de pruebas dinámicas. La fuente que facilitó dichos datos solicitó no revelar el nombre de los proyectos a los que pertenecen, de modo que solo se referenciará su localización aproximada:

- **Proyecto 1:**

Corresponde a un proyecto desarrollado en el sector de Modelia, al costado sur de la Avenida Calle 26. Se ejecutó una prueba sobre un pilote de 50 cm de diámetro con una longitud de 26 m usando un martillo de 14.50 toneladas. El reporte del ensayo no incluye información de los suelos del sector, remitiendo al lector a anexos que no fueron facilitados. Por medio de un análisis numérico de la fuerza y velocidad medidas durante el ensayo se obtienen los parámetros y distribución de resistencia del suelo a lo largo del pilote; la solución incluye la capacidad de carga del pilote descompuesta en resistencia por punta y por fricción en el fuste, factores de amortiguamiento y otras propiedades dinámicas.

La resistencia final del pilote fue estimada en 186 ton de las cuales 14 ton correspondieron a resistencia por la punta y las restantes 172 toneladas a resistencia por el fuste. Del análisis se desprende que la resistencia por fricción en el fuste varió entre 0.84 ton/m² en la cabeza del pilote y 5.68 ton/m² en la punta del mismo, presentando un promedio de 4.21 ton/m² (ver Figura B-4).

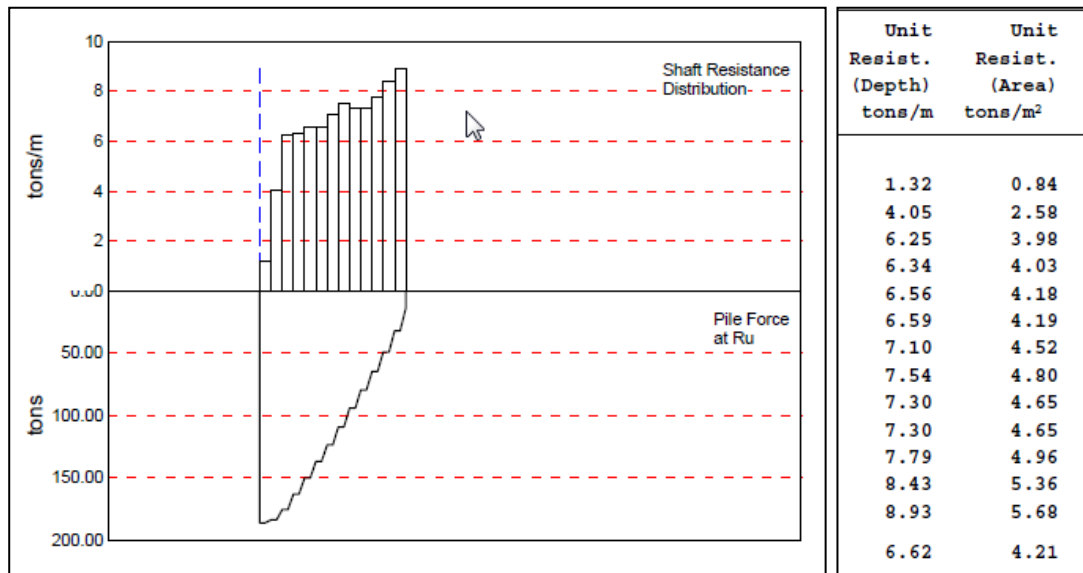


Figura B-4. Distribución de fuerzas en el pilote ensayado. Arriba: resistencia por fricción en el fuste; abajo: fuerzas en el pilote bajo carga máxima.

• **Proyecto 2:**

Proyecto desarrollado en el sector de La Cecilia, entre las Carreras 7 y 15 a la altura de la Calle 146 en la Localidad de Usaquén. En julio de 2009 fueron ensayados tres pilotes vaciados in situ, uno de 90 cm y dos 80 cm de diámetro, con longitudes variables entre los 40 m y los 50 m. De acuerdo con los análisis, durante las pruebas de carga la resistencia del suelo no fue totalmente activada, por lo que los valores obtenidos se consideran cargas movilizadas, pero no cargas últimas. Teniendo en cuenta lo anterior, se presentan los resultados obtenidos para cada pilote:

- Pilote de 90 cm de diámetro, con 50 m de longitud. Presentó carga máxima de 670 ton, de las cuales 40 ton fueron capacidad por la punta y 630 ton fricción positiva en el fuste. De acuerdo con los análisis, la resistencia unitaria por fricción en el fuste varió entre 7.53 ton/m² en la cabeza del pilote hasta 1.69 ton/m² a nivel de la punta, con un valor promedio de 4.50 ton/m² (ver Figura B-5).
- Pilote de 80 cm de diámetro, con cerca de 40 m de longitud. Presentó carga máxima de 565 ton, las cuales 40 ton fueron capacidad por la punta y 525 ton fricción positiva en el fuste. La resistencia unitaria por fricción en el fuste varió entre 1.27 ton/m² en la cabeza del pilote hasta un máximo de 8.52/ton/m² cerca de la parte media del pilote, con un valor promedio de 5.97 ton/m².

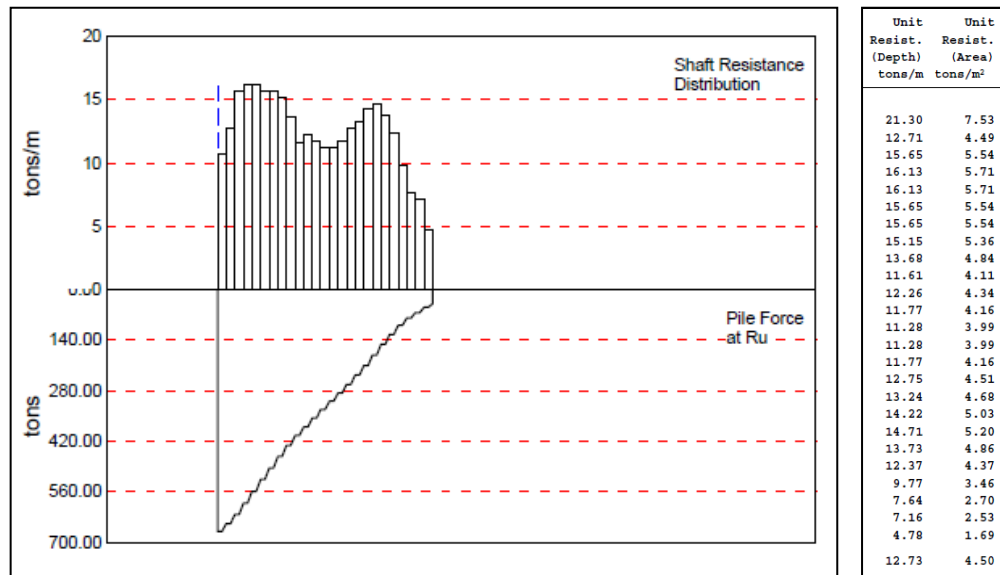


Figura B-5. Distribución de fuerzas en el pilote con diámetro 90 cm y longitud de 50 m.

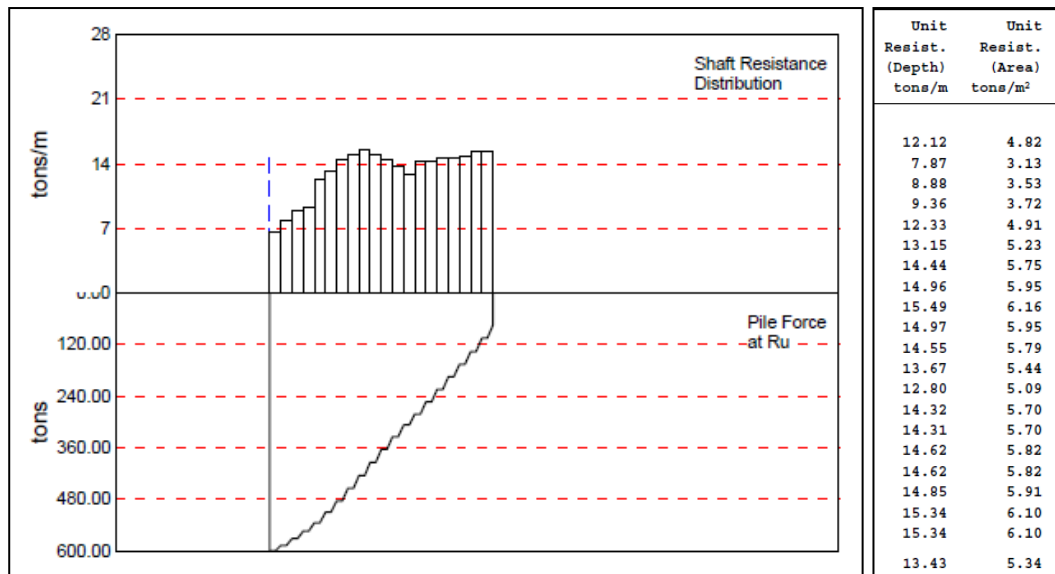


Figura B-6. Distribución de fuerzas en el tercer pilote, diámetro 80 cm y longitud de 40 m.

- Pilote de 80 cm de diámetro, con una longitud superior a los 40 m. Presentó carga máxima de 660 ton, de las cuales 75 ton correspondieron a capacidad por punta y 525 ton a fricción positiva en el fuste. La resistencia unitaria por fricción en el fuste varía entre 3.13 ton/m² en sectores superficiales y 6.16 ton/m² en algunos puntos más profundos, con un valor promedio de 5.34 ton/m² (ver Figura B-6).

