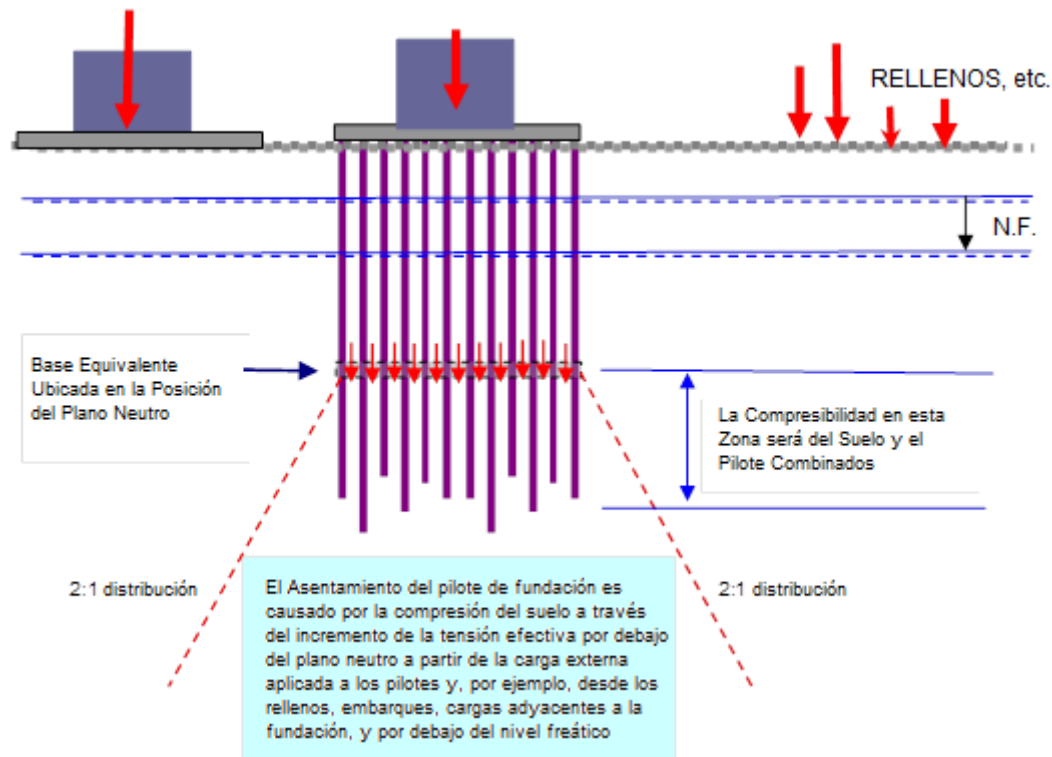


Fellenius, B.H., 2004. Diseño unificado de cimentaciones piloteadas con énfasis en el análisis de asentamientos. En Honor a George G. Goble — "Current Practice and Future Trends in Deep Foundations" Geo-Institute Geo-TRANS Conference, Los Angeles, July 27-30, 2004, Edited by J.A. DiMaggio and M.H. Hussein. ASCE Geotechnical Special Publication, GSP 125, pp. 253 - 275.



## DISEÑO UNIFICADO DE FUNDACIONES PILOTEADAS CON ÉNFASIS EN EL ANÁLISIS DE ASENTAMIENTOS

Bengt H. Fellenius<sup>1</sup>

### RESUMEN

EL diseño de una cimentación piloteada rara vez incluye un análisis de asentamientos y generalmente se limita a determinar que el factor de seguridad para la capacidad del pilote sea igual, al menos, a un valor determinado. Este enfoque no es rentable y, a veces, es peligroso. Todo diseño de una cimentación piloteada debe establecer la distribución de resistencia a lo largo del pilote, determinar la ubicación del plano de equilibrio de fuerzas (el plano neutro), estimar la magnitud de la fuerza de arrastre debida a la fricción negativa acumulada en el plano neutro, evaluar la longitud de la zona donde las fuerzas de corte cambian de negativas a positivas, establecer la relación carga-movimiento para la punta del pilote y la distribución de carga en el pilote para el momento en que los asentamientos se convierten en un problema de diseño, y, finalmente, realizar un análisis del asentamiento. El análisis de los asentamientos de una cimentación piloteada debe diferenciar entre los asentamientos debido a los movimientos causados por cargas externas que recibe el pilote y los

<sup>1</sup> Bengt H. Fellenius, Dr. Tech., P.Eng. 1905 Alexander Street SE, Calgary, Alberta, T2G 4J3  
Tel. :(403) 920-0752; e-address: <Bengt@Fellenius.net>

asentamientos debidos a causas distintas de las cargas sobre los pilotes. La comprensión fundamental para el enfoque de diseño, es que la capacidad de punta del pilote es un concepto erróneo. Cada uno de los puntos mencionados se explican en este artículo y además se presenta un enfoque para el diseño de cimentaciones piloteadas y cimentaciones tipo platea piloteada. Se incluyen ejemplos e historias de casos que muestran la distribución de la resistencia medida y calculada a lo largo de los pilotes y los asentamientos del suelo y los pilotes.

## **INTRODUCCIÓN**

La razón más común para la construcción de cimientos sobre pilotes en lugar de zapatas, plateas o de otros tipos, es minimizar los asentamientos de la cimentación. Sin embargo, el diseño de una cimentación piloteada rara vez incluye un análisis de los asentamientos. Desde el pasado permanece la noción de que si la capacidad es segura, la naturaleza se encarga del resto. Este enfoque de “diseño por la fe” es con frecuencia antieconómico y derrochador y no es siempre seguro. Además de determinar la capacidad, el análisis de asentamientos debe ser parte de cada diseño de una cimentación piloteada. Para un grupo de pilotes soportado en roca o morrena glacial, este puede ser simplemente una evaluación del hecho de que no ocurrirá ningún asentamiento adverso. Para otras condiciones, la evaluación de los asentamientos requiere un análisis detallado. Similar al diseño de cualquier tipo de cimentación, un análisis adecuado de los asentamientos requiere que el perfil del suelo y el régimen de la presión de poros sean bien establecidos y que la influencia de los rellenos, las cargas de otras fundaciones, excavaciones y cambios en el nivel freático sean incluidos en los cálculos. Para cimentaciones piloteadas, sin embargo, es necesario tener en cuenta otros factores, tales como la distribución de la resistencia en el fuste y la punta del pilote, en equilibrio a largo plazo entre las cargas en la cabeza del pilote, las fuerzas de arrastre en la ubicación del plano neutro debido a la fricción negativa acumulada. Además se debe considerar la longitud de la zona por encima y por debajo del plano neutro dentro de la cual las fuerzas de corte a lo largo del fuste cambian de dirección negativa a positiva, la relación carga-deformación de la punta del pilote y la distribución de la carga en el pilote. Además, un análisis de asentamientos debe distinguir entre los asentamientos debido a los movimientos causados por las cargas externas producidas por las estructuras que se soportan y los asentamientos debidos a causas distintas a la carga externa.

## **CAPACIDAD DEL PILOTE Y CARGA RESIDUAL**

La capacidad es un aspecto básico del diseño y el análisis del pilote. La capacidad es la resistencia última del pilote, o sea la carga para la cual su movimiento se vuelve excesivo o progresivo para incrementos pequeños de carga, como se observa, por ejemplo, en una prueba de carga estática. La capacidad es fácil de determinar en el caso de un pilote sin resistencia por punta y una resistencia por fuste con respuesta elasto-plástica a la carga, tal como se muestra en la típica curva carga-movimiento presentada en la Fig. 1A. Esta curva fue determinada en la simulación de una prueba de carga estática para un pilote metálico tubular con la punta cerrada, de 300 mm de diámetro y 15 m de largo, instalado en un suelo uniforme. El valor de la capacidad es obvio por un comportamiento por punzonamiento del pilote de fricción, es decir, un movimiento continuo sin ningún aumento en la carga. Como se indica en

la Fig. 1B, sin embargo, una vez que la resistencia de punta entra en juego, la curva de carga-movimiento ya no muestra un comportamiento por punzonamiento.

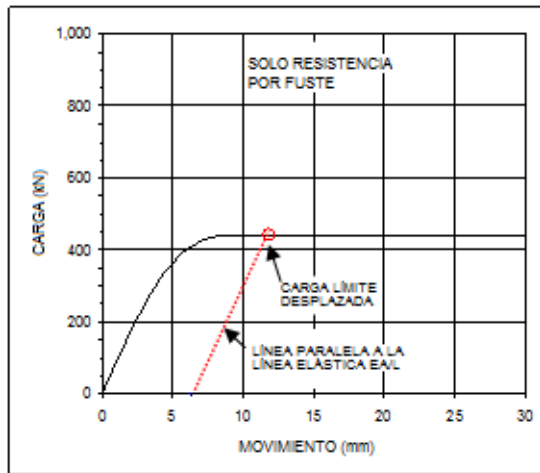


Fig. 1A Carga-movimiento para un pilote con 100% de capacidad por fuste

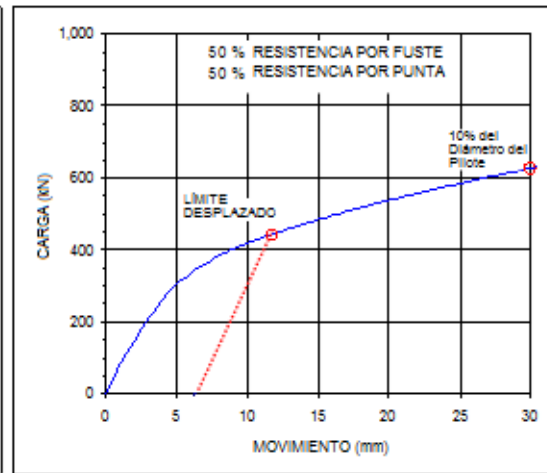


Fig. 1B Carga-movimiento para un pilote de igual Resistencia por fuste y por punta

La curva de carga-movimiento que se muestra en la Fig. 1B es representativa del mismo pilote asumiendo el 50% de la resistencia por fuste y el 50% por punta. Los parámetros del suelo para los cálculos que respaldan la Fig. 1B se seleccionaron con el fin de tener un límite de desplazamiento igual a la capacidad del pilote con resistencia total por fuste (Fig. 1A). La curva carga-movimiento de la Fig. 1B no muestra ninguna tendencia al "punzonamiento" o cualquier valor de carga obvio que pueda ser considerado como la capacidad del pilote. Para tales casos la práctica es, ya sea considerar que la capacidad simplemente es la carga que genera un movimiento igual al 10% del diámetro del pilote (30 mm en este caso), o seleccionar un valor de capacidad del pilote en base a una definición aplicada a la curvatura de la curva carga-movimiento.

Varias de tales definiciones están en uso, la más común en América del Norte es la "Carga de Límite de Compensación de Davisson", que es la carga correspondiente a la intersección de la curva carga-movimiento con una línea paralela a la línea elástica partiendo del eje de los movimientos con un valor igual a 4 mm más el diámetro del pilote dividido por 120. La multitud de definiciones de falla es una consecuencia de la inutilidad de forzar una teoría de resistencia final sobre una situación en la que no se aplica. Obviamente, hay más elementos a considerar para determinar la capacidad del pilote que la selección de un punto definido arbitrariamente en una curva.

La respuesta carga-movimiento de un pilote es la combinación del desarrollo de tres fenómenos. En primer lugar, la resistencia del fuste, que en la mayoría de los casos desarrolla una resistencia última y un modo de falla. En segundo lugar, el acortamiento del pilote, que es una respuesta más o menos lineal a la carga aplicada. En tercer lugar, la respuesta de la punta, la cual no muestra una resistencia final. Esta

última aseveración se puede entender al darse cuenta de que la punta del pilote no es nada más que una zapata sosteniendo una columna, y el comportamiento carga-movimiento de la punta del pilote es similar al de las zapatas, como se discute a continuación.

El concepto de resistencia última fue desarrollado hace muchos años atrás, partiendo de las observaciones de zapatas a gran escala en arcillas y de zapatas a escala de modelo reducido en arenas. Las pruebas de carga sobre zapatas de pequeña escala o de gran escala en arcilla se realizaron con incrementos de carga tales que las presiones de poro se desarrollaron incrementalmente a medida que el ensayo se desarrollaba, haciendo que el esfuerzo efectivo se redujese hasta el punto que se presentaba la falla. Esto no sucede cuando la velocidad de carga es tan lenta que las presiones de poro en exceso se disipan tan rápidamente como se desarrollan. Además, con respecto a los ensayos a pequeña escala en arena, no se percataron en ese momento que la respuesta del suelo en las pruebas de zapatas pequeñas colocadas en la superficie de arena está siempre en un modo de dilatación: la arena se expande, pierde densidad y pierde resistencia a medida que avanza el ensayo (Altaee y Fellenius 1994). En cambio, no se han observado fallas en zapatas enterradas, grandes o pequeñas.

Por ejemplo, Ismael (1985) realizó pruebas, en arenas finas compactas, de zapatas cuadradas con lados de 0,25 m, 0,50 m, 0,75 m y 1,00 m, a profundidades de 1,0 m a 2,8 m por encima del nivel freático. Los resultados, en términos de esfuerzos medidos versus movimiento, representados como un porcentaje de los anchos de las zapatas, se muestran en la Fig. 2A. Obsérvese que las curvas se curvan suavemente sin interrupción u otra indicación de falla a pesar de que los movimientos son tan grandes como el 10% a 15% del lado de la zapata. Resultados similares fueron presentados por Briaud y Gibbens (1994) para zapatas situadas muy por encima del nivel freático, en una arena fina limosa ligeramente preconsolidada. La relación natural de vacíos de la arena era 0,8. Los lados de las zapatas fueron 1,0 m, 1,5 m, 2,0 m y 3,0 m. Dos de las zapatas fueron de 3,0 m de ancho. Los resultados de la prueba se presentan en la Fig. 2B. Cabe señalar que no hay indicación de falla a pesar de los grandes movimientos.

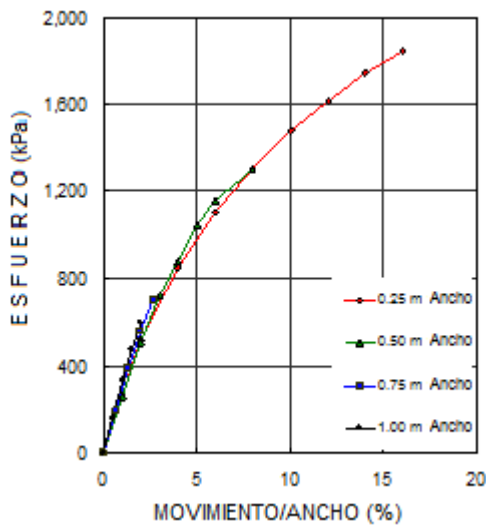


Fig. 2A Esfuerzo vs. movimiento para Cuatro zapatas (Datos de Ismael 1985)

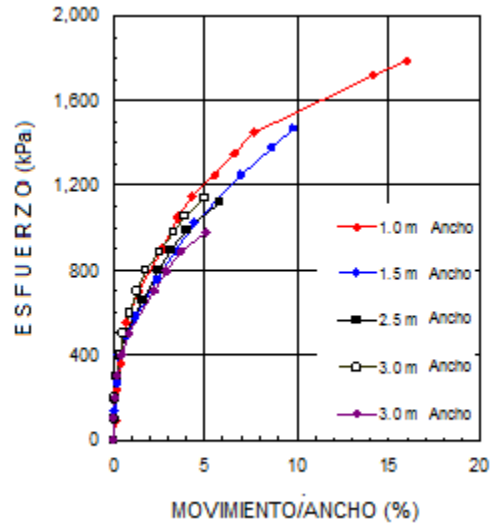


Fig. 2B Esfuerzo vs. movimiento para cinco zapatas (Datos de Briaud y Gibbens 1994)

El recientemente desarrollado ensayo O-cell (Celda Osterberg) (Osterberg 1998) ha permitido observaciones directas de la respuesta de la punta del pilote a medida que se incrementan las cargas del pilote y se muestran que la curva virgen carga-movimiento de respuesta de la punta del pilote tiene la forma de una curva suave que gradualmente se curva sin mostrar ningún cambio repentino o quiebre de pendiente, muy similar a la de una zapata. Claramente, la capacidad de carga como un concepto no es aplicable a la respuesta de la punta del pilote a las cargas.

Aunque el concepto de la capacidad de carga del pilote sea engañoso no significa que la aplicación del concepto de capacidad de carga de un pilote esté equivocado. El enfoque está bien establecido en la práctica de la ingeniería. Sin embargo, la práctica haría bien en reconocer las falsas ideas implícitas, como se demuestra a continuación.

La Fig. 3 presenta dos curvas carga-movimiento producidas por simulación de un ensayo estático de carga usando datos de pilotes y suelos idénticos. La única diferencia entre el cálculo de las dos curvas es que se supone que no hay carga residual en el pilote representado por la curva inferior, mientras que para la curva superior se supuso una carga residual que asciende hasta un tercio de la resistencia "última" de punta. (El término "carga residual" se refiere a la carga presente en un pilote inmediatamente antes del inicio de un prueba de carga estática). La línea Límite de Compensación ("línea Davisson") ha sido añadida para mostrar más claramente la gran diferencia - en este caso es el 20% - que la presencia de la carga residual puede tener en la interpretación de los resultados de una prueba de carga.

Para el cálculo de las curvas carga-movimiento, las respuestas de la resistencia de fuste y de punta fueron expresadas en términos de las curvas "t-z" y "q-z", como se indica en la Fig. 4. La curva de q-z (utilizada para la simulación de la Fig. 1B.) tiene la forma de una curva suave que gradualmente se curva sin llegar a un pico, típico de

una respuesta de punta del pilote. Sin embargo ambas curvas t-z tienen un pico distintivo. La curva t-z con "ablandamiento sin deformación" utilizada para las simulaciones en las Figs. 1A y 1B muestra una resistencia al corte que tiene una ligera tendencia al endurecimiento por deformación más allá del pico. La segunda curva t-z muestra una respuesta de ablandamiento con deformación más allá del pico, cuyo comportamiento carga-movimiento es típico de la resistencia por fuste de los pilotes en la mayoría de los suelos. Los resultados de la simulación empleando esta curva t-z son presentados en la Fig. 5. Como en la Fig. 3, la curva carga-movimiento de la Fig. 5 incluye el efecto de la carga residual y la diferencia entre las dos curvas es similar a las de las Figs. 1 y 3 (para facilitar la comparación, las curvas que se muestran en la Fig. 3 están también indicadas en la Fig. 5). Las curvas muestran que el aumento gradual de la resistencia por punta es compensado por la disminución simultánea gradual de la resistencia del fuste.

De manera rápida se puede notar que las curvas sugieren que el Límite de Compensación se podría interpretar de manera razonable como una "carga de falla" a partir de los resultados de las pruebas.

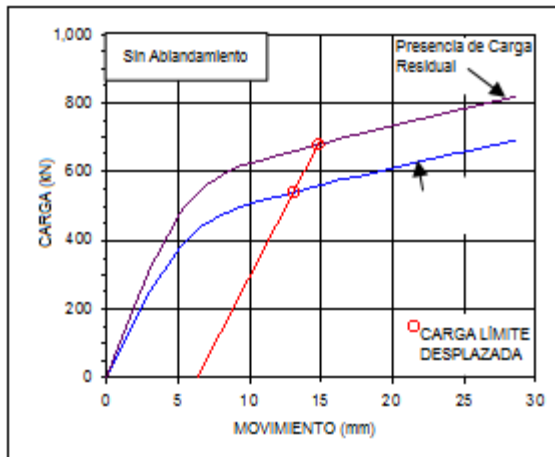


Fig. 3 Curvas carga-movimiento para pilote afectado y no afectado por carga residual

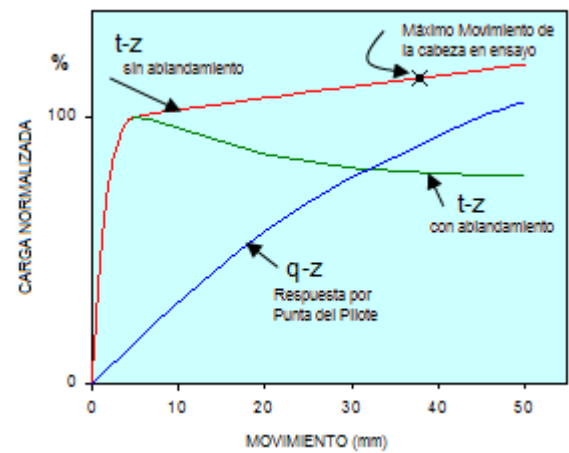


Fig. 4 Curvas t-z y q-z de respuesta de fuste y punta (carga normalizada)

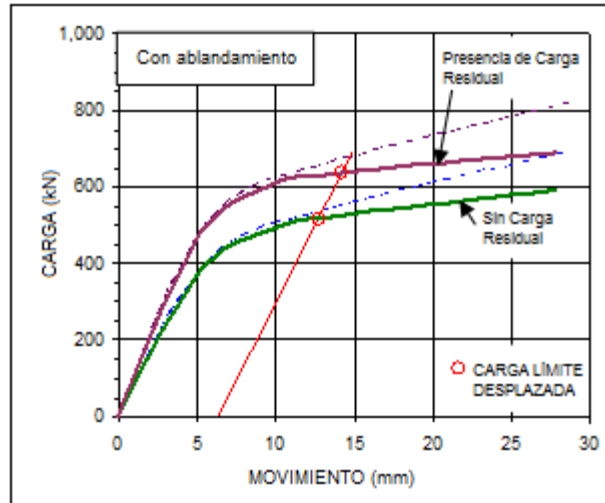


Fig. 5 Curvas carga-movimiento usando la curva t-z de ablandamiento con deformación, afectadas y no afectadas por la carga residual

A pesar del hecho de que la existencia de la carga residual ha sido observada e informada en diversas ocasiones (por ejemplo, Hunter y Davisson 1969; Gregersen et al 1973, Fellenius y Samson, 1976; Holloway et al. 1978), muchos mantienen la impresión equivocada de que su efecto es marginal y, en todo caso, limitada a pilotes en arcilla. Por lo tanto, los lleva a pensar que la carga residual puede ser despreciada en el análisis de los resultados de pruebas de carga en pilotes instrumentados. Sin embargo el efecto está lejos de ser marginal, ni está limitado a pilotes en arcilla. Las Figs. 6 y 7 muestran los resultados de una prueba de carga estática en un pilote instrumentado de 280 mm de diámetro, de hormigón prefabricado, hincado 16 m en arena, (Gregersen et al. 1973).

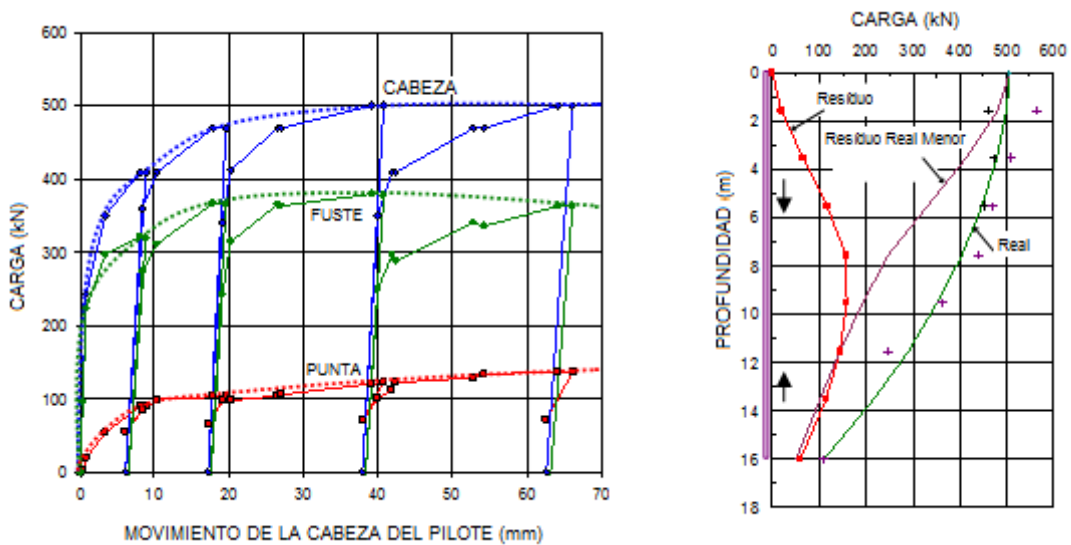


Fig. 6 Carga-movimiento para la cabeza, la punta y el fuste de un pilote instrumentado en arena (Datos de Gregersen et al. 1973)

Fig. 7 Distribución medida de carga residual y carga verdadera (Datos de Gregersen et al. 1973)

Obsérvese el aumento gradual, casi lineal de la carga de punta y la reducción de la resistencia por fuste para movimientos de la cabeza del pilote mayores a 40 mm, como se muestran en la Fig. 6. La forma más rígida al inicio de la curva es un efecto de densificación de la arena durante la hinca inmediatamente debajo de la punta del pilote. El aumento de la resistencia de punta más allá de un movimiento de 10 mm en la cabeza del pilote es aproximadamente igual a la disminución simultánea de la resistencia del fuste y resulta en la apariencia de una falla por punzonamiento en la curva carga-desplazamiento de la cabeza del pilote, para un valor de 500 KN de carga máxima. Nótese también que cada vez que la cabeza del pilote se descargó, la carga remanente aumentó, mostrando que el ciclo de carga precedente había añadido a la carga residual en el pilote.

El pilote fue instrumentado en varios niveles y Gregersen et al., (1973) midieron la distribución de la carga en el pilote inmediatamente antes y durante la prueba de carga estática.

La Fig. 7 presenta la distribución medida, inmediatamente antes de la prueba, de la "carga residual", y la distribución de la carga para la carga máxima de KN 500, la "carga verdadera". La diferencia entre las dos curvas, (la curva marcada "Verdadera menos Residual") es el incremento de carga medido que se impone en el pilote para la carga máxima del ensayo. Esto es lo que habría sido erróneamente considerado como la distribución de la carga "verdadera" al no haberse considerado la carga residual sino que hubieran asignado todas las lecturas iniciales de los instrumentos al inicio de la prueba con valor cero, es decir, lecturas de cero carga en el pilote.

La carga residual en el pilote puede ser explicada como parcialmente introducida durante la hinca del pilote y parcialmente debido a la recuperación (re-consolidación) del suelo de la perturbación causada por la hinca. Sin embargo, la carga residual para pilotes en arena no se limita a los pilotes hincados, lo que se ilustra en la Fig. 8, donde se presenta la distribución de carga en un pilote perforado en arena, instrumentado, de 0,9 m de diámetro.



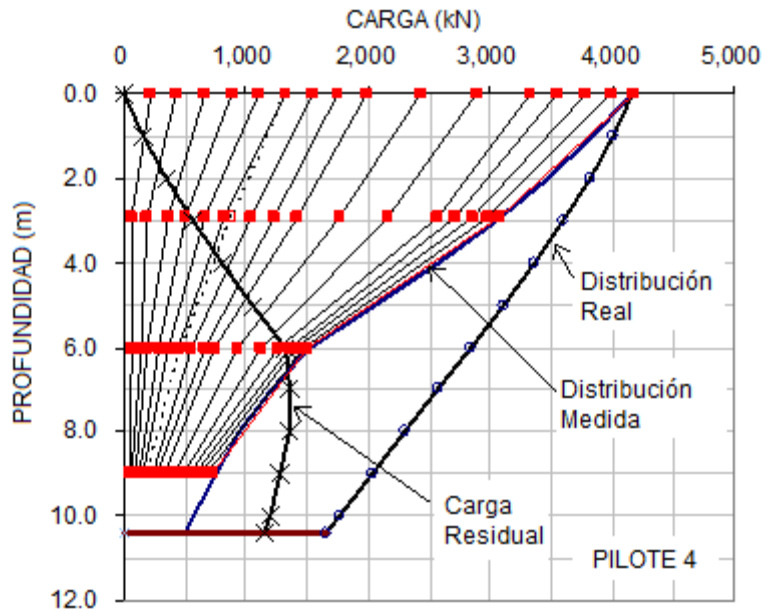


Fig. 8 Incremento de carga medido desde el principio de una prueba de carga estática en arena con distribuciones evaluadas de carga residual y carga verdadera (datos de Baker et al. 1993, re-analizados por Fellenius, 2001)

Las mediciones de la carga residual se obtienen principalmente a partir de la observación de la distribución de carga para pilotes en arcilla con el objetivo de estudiar el desarrollo de la carga de arrastre. Por lo general, no se realiza ninguna prueba de carga estática. Sin embargo, el término "carga de arrastre" es sólo el término para "carga residual" cuando no se realiza prueba de carga estática. La mecánica de ambas es idéntica.

Por ejemplo, Fellenius y Broms (1969) y Fellenius (1972) midieron la distribución de la carga en dos pilotes instrumentados de 300 mm de diámetro y 53 m de longitud. Estos pilotes fueron hincados a través de aproximadamente 40 m de arcilla hasta llegar a arena. La zona era virgen, sin haber sido afectada por ninguna construcción desde que el mar se elevó después del final de la Era de Hielo. La distribución de carga se midió inmediatamente después de la instalación y durante un largo período después de la hinca. Las distribuciones medidas se presentan en la Fig. 9, que muestra que inmediatamente después de la hinca las cargas fueron aproximadamente igual al peso propio de los pilotes. La disipación de las presiones de poro inducida durante la hinca, en los siguientes 154 días, resultó en un aumento de carga en el pilote. Sorprendentemente, la acumulación de carga continuó también después de que las presiones de poro inducidas por la hinca ya se habían disipado, y la Fig. 9 incluye también la distribución medida a 496 días después de concluida la hinca, 342 días más tarde. El aumento continuo de carga se considera debido a un pequeño asentamiento regional de aproximadamente un milímetro por año, coincidiendo con el levantamiento isostático de la tierra de aproximadamente la

misma magnitud. Si se hubiese realizado una prueba de carga estática en cualquiera de esas fechas, la carga de arrastre hubiese sido la carga residual en los pilotes.

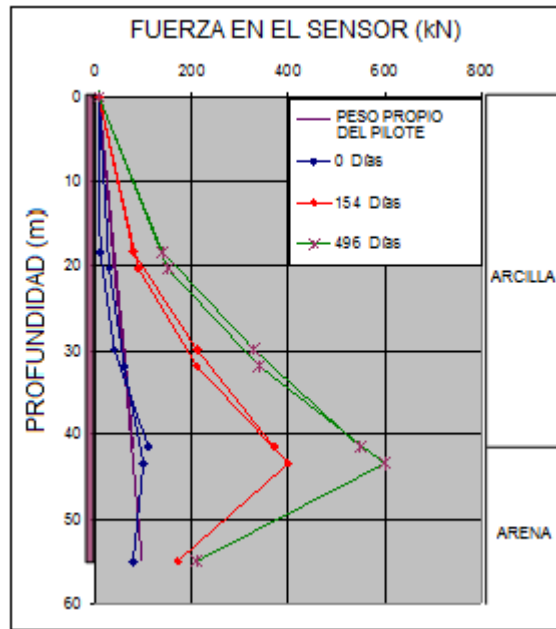


Fig. 9 Distribuciones de carga en dos pilotes inmediatamente terminada la hinca, a 154 días y 469 días después. (Datos de Fellenius and Broms 1969; Fellenius 1972)

Un ejemplo adicional se presenta en la Fig. 10, que muestra los resultados de un ensayo de carga estática sobre un pilote tubular de acero, instrumentado, hincado en arcilla blanda, de 45 m de longitud y 406 mm de diámetro (Fellenius et al. 2004). La prueba se ejecutó 46 días después de que el pilote fuera instalado cuando las presiones de poros inducidas se habían disipado. Hay que tener en cuenta que si la carga residual no se hubiese considerado en la evaluación de los datos de la prueba, es decir, si los sensores (“gages”) hubiesen sido “puestos a cero” al inicio de la prueba, las cargas medidas en los ensayos habrían sido consideradas como representativas de la distribución de la carga real. Entonces, la evaluación hubiera concluido erróneamente que no había resistencia a lo largo de los últimos 12 m del fuste.

Incluso un pequeño movimiento sería suficiente para desarrollar fuerzas de corte a lo largo de un pilote. Tal movimiento es el resultado de un gran número de influencias asociadas con la hinca de los pilotes, perforación e inyección del *grout* en pilotes perforados, el curado del *grout* de cemento, la reconsolidación del suelo alrededor del pilote, etc, así como el efecto de eventos ambientales en el sitio, tales como los asentamientos en progreso. El propósito de este documento no es el de extenderse en qué causa la carga residual, sino sólo indicar que si la carga residual no se tiene en cuenta en el análisis de los resultados de una prueba de carga estática, los resultados de los análisis serán erróneos.

La carga residual se produce por la acumulación de fuerzas de corte en dirección negativa a lo largo de la parte superior del pilote que está en equilibrio con la acumulación de esfuerzos de corte de dirección positiva a lo largo de la parte inferior del pilote. La longitud a lo largo del pilote (la zona de transición de esfuerzos) donde la dirección de corte cambia de negativa a positiva puede ser corta o larga.

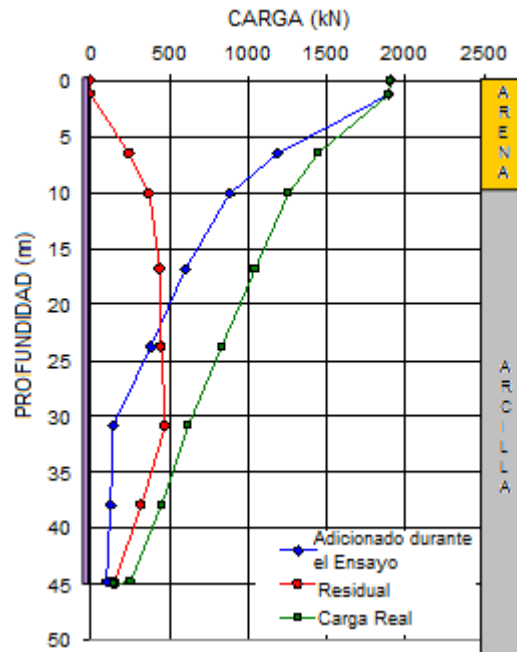


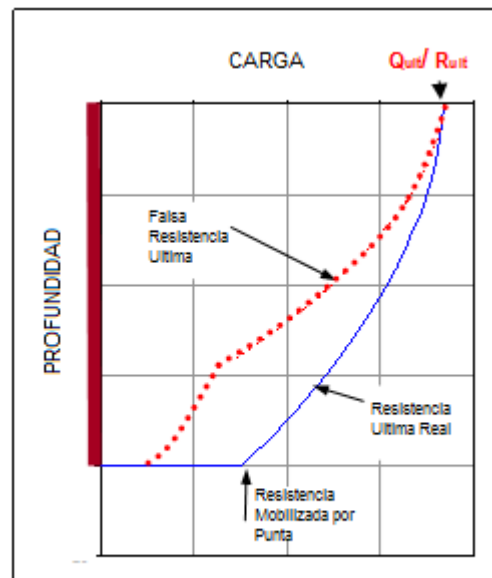
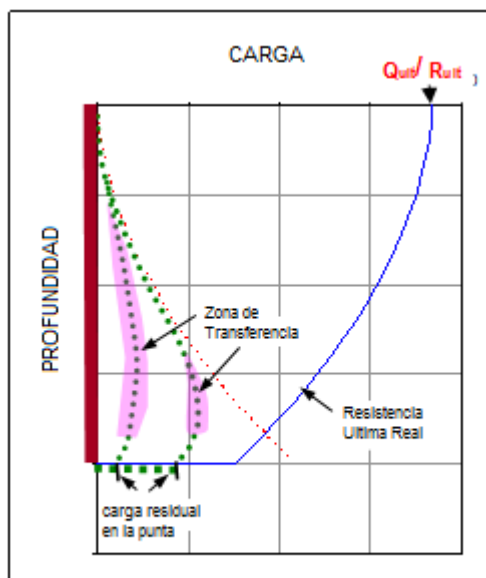
Fig. 10 Distribuciones de carga medidas un ensayo estático de carga de un pilote de 45 m de longitud en arcilla (Fellenius et al. 2004)

La resistencia al corte a lo largo de un pilote se rige por el esfuerzo efectivo y es aproximadamente proporcional al esfuerzo efectivo de sobrecarga. Por lo tanto, la distribución de resistencia en el fuste en un suelo homogéneo y uniforme tendrá la forma de una curva similar a la de la resistencia última mostrada en la Fig. 11A, cuya forma puede ser determinada en un ensayo realizado en un pilote instrumentado. La porción de resistencia por punta de la máxima resistencia, mostrada al nivel de la punta del pilote en la Fig. 11A, es la resistencia movilizada en la prueba de carga estática, típicamente en un movimiento de la punta de aproximadamente 10 mm. Como queda claro en lo anterior, antes del inicio de la prueba el pilote será sometido a una carga residual, a veces significativa, a veces insignificante. Para ilustrar esta afirmación, la figura muestra dos distribuciones de carga residual. La primera curva representa el caso de movimientos de suelo relativamente pequeños, donde el corte residual total del fuste sólo se moviliza cerca de la superficie del terreno (dirección negativa) y cerca de la punta del pilote (dirección positiva). Las fuerzas de corte no son completamente movilizadas a lo largo de la porción media del pilote, la zona de

cambio de la dirección del corte o "zona de transferencia". La segunda curva es típica de donde mayores movimientos relativos del suelo han causado que las fuerzas de corte sean plenamente movilizadas a lo largo de una mayor longitud del pilote, dejando una zona de transferencia más corta.

Si los sensores en el pilote hubieran sido "puestos a cero" inmediatamente antes del inicio de la prueba de carga estática, y sólo las cargas aplicadas en la prueba son consideradas en el informe final de la distribución, la distribución así determinada puede estar exageradamente errada.

La Fig. 11B muestra la curva de "distribución verdadera", que combina la carga residual y las cargas aplicadas en la prueba de carga, así como la "distribución falsa", que aparece cuando la carga residual es ignorada. Registros de casos publicados sobre los resultados de pruebas de carga en pilotes instrumentados frecuentemente han omitido incluir la carga residual, lo que ha dado lugar a la falsa idea tal como la "profundidad crítica" (Fellenius y Altaee 1995).



## FRICCIÓN NEGATIVA POR FUSTE, CARGA DE ARRASTRE Y MOVIMIENTO POR ARRASTRE

Diversos documentos importantes han publicado mediciones de la distribución de carga que presentan pilotes instrumentados con énfasis en la carga de arrastre, por ejemplo, Bjerrum et al 1965y 1969; Darvall et al. 1969; Endo et al. 1969; Fellenius y Broms 1969; Fellenius 1972; Clemente 1979 y 1981; Bozozuk 1981, Leung et al. 1991).

El documento del registro del caso publicado por Endo et al. (1969) es un estudio de campo extensivo de carga de arrastre y movimiento por arrastre en pilotes y demuestra la interacción entre las fuerzas en el pilote, el asentamiento y la penetración de la punta del pilote. El artículo presenta los resultados de mediciones en pilotes de tubería de acero, hincados, instrumentados, de 610 mm de diámetro y 43 m de longitud, así como los asentamientos de los pilotes y del suelo circundante durante un período de casi dos años (672 días). El perfil del suelo en el sitio consistió en un aluvión de gran espesor sobre un acuífero enterrado: una capa de 9 m de espesor de arena limosa seguido por limo hasta una profundidad de aproximadamente 25 m, sobre capas alternantes de limo y limo arenoso hasta una profundidad de 41 m seguido de arena. Dos pilotes fueron hincados con la punta cerrada y uno con la punta abierta. La resistencia a la penetración al final de la hinca fue baja, aproximadamente 20 mm para el último golpe. El nivel freático se encontraba a aproximadamente 1 m por debajo de la superficie del terreno. La presión de poros en el sitio fue afectada por el bombeo en la capa de limo inferior para obtener agua para una planta industrial, lo que creó un gradiente descendente en el sitio. La diferencia en términos de columna de agua entre el nivel freático y el estrato de arena a una profundidad de 40 m fue de aproximadamente 30 m. La consolidación subsiguiente de los suelos hizo que el suelo se asiente y se cuelgue de los pilotes, creando fricción negativa y movimiento por arrastre.

La Fig. 12A presenta una recopilación de las distribuciones de carga medidas en tres pilotes 672 días después de la hinca, denominados Pilotes oE43, cE43 y cB43. Los tres pilotes desarrollaron un plano neutro un poco por debajo de los 30 m de profundidad. Las distribuciones de carga en los dos pilotes con punta cerrada son muy similares. Para estos dos, la carga de arrastre es de unos 3.000 KN, en equilibrio con la suma de la resistencia positiva del fuste de aproximadamente 1.500 KN y la resistencia de punta alrededor de 1.500 KN. Si se hubiese incluido una prueba de carga estática en el estudio, la resistencia del fuste a lo largo de la longitud completa de los pilotes habría sido de aproximadamente 4.500 KN.

Las distribuciones de carga son particularmente interesantes cuando se relacionan a las distribuciones de los asentamientos medidos tanto en el suelo como en los pilotes. La Fig. 12B presenta las mediciones de asentamientos realizadas 124 días, 490 días y 672 días a partir de la finalización de la hinca del pilote cE43. Nótese que el punto donde el movimiento relativo entre el pilote y el suelo es cero (es decir, donde las curvas de asentamiento del suelo y el pilote se intersectan) es aproximadamente al nivel de la profundidad del plano de equilibrio de fuerzas : el plano neutro. La Fig. 12B muestra que el asentamiento de la superficie del terreno 672 días después del final de la hinca fue de 120 mm. En ese momento, el asentamiento (de suelo y pilote) en el plano neutro era alrededor de 30 mm, y el asentamiento de la cabeza del pilote fue de 53 mm, o sea el asentamiento en el plano neutro, más unos 13 mm de acortamiento entre la cabeza del pilote y el plano neutro debido a la carga de arrastre.

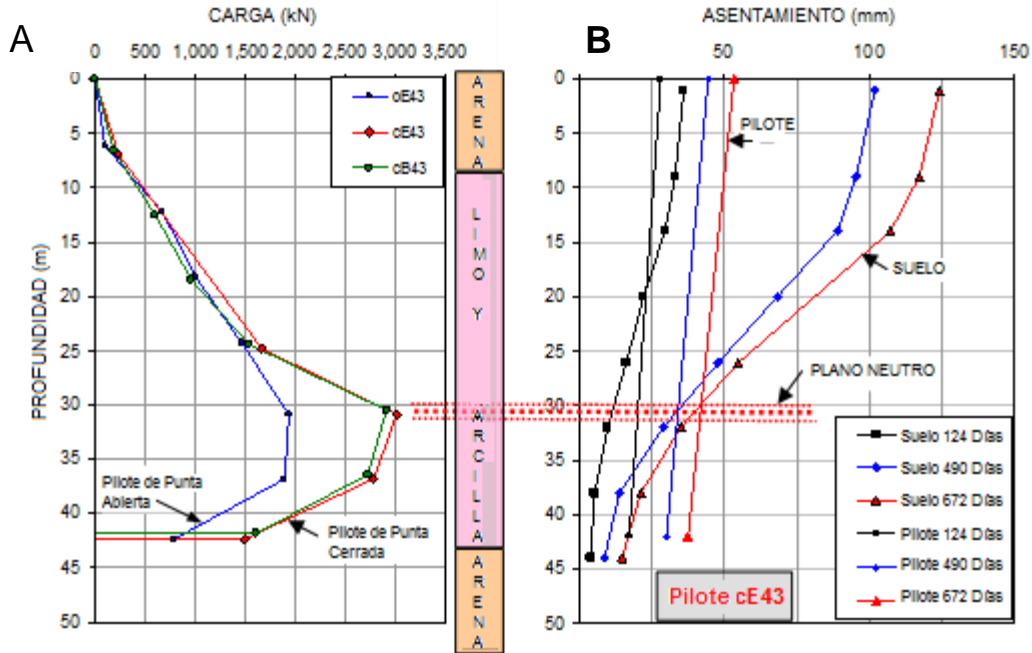


Fig. 12 Distribuciones de carga en tres pilotes tubulares 672 días después de terminada la hinca y distribuciones de asentamientos 124, 490 y 672 días después de terminada la hinca (datos de Endo et al. 1969)

Durante los 672 días de mediciones, la diferencia relativa entre los asentamientos del suelo a nivel de la punta del pilote y la punta del pilote mismo aumentó ligeramente, es decir, la penetración neta de la punta del pilote en la arena aumentó. Los registros también muestran que la carga en la punta del pilote aumentó. En la Fig. 13, las cargas medidas en la punta del pilote fueron graficadas contra la penetración neta de la punta del pilote, de acuerdo con lo registrado 124, 490 y 672 días después de la hinca de los pilotes. Las primeras mediciones tomadas al final de la hinca, indican que la punta del pilote estaba sometida a una carga residual inicial correspondiente a un movimiento inicial de punta de aproximadamente 8 mm.

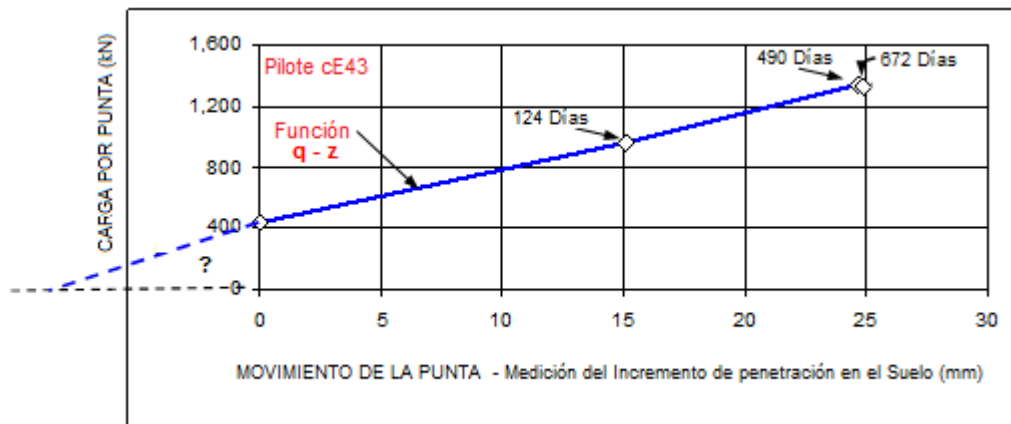


Fig. 13 Curva carga movimiento de la punta del pilote – la función  $q-z$  (datos de Endo et al. 1969)

La curva de carga-movimiento indica una relación prácticamente lineal entre la carga y la penetración. Obviamente, si el asentamiento hubiese sido mayor, la penetración neta hubiese sido mayor también, lo que hubiese movilizó una mayor resistencia por punta, que, a su vez, hubiese bajado la ubicación del plano de equilibrio de fuerzas.

En conjunto, los registros del caso establecen que:

1. El esfuerzo de corte a lo largo del fuste (fricción de fuste negativa, así como la resistencia del fuste) se rige por las presiones efectivas y requiere de muy pequeños movimientos relativos entre el suelo y la superficie del pilote para ser movilizó. En efecto, Bjerrum et al. (1969) reportaron que aproximadamente la misma magnitud de carga de arrastre se midió tanto para pocos milímetros de asentamiento en la superficie como para 2 m de asentamiento.
2. Para pilotes de alta capacidad por punta, se midieron grandes cargas de arrastre y para esos pilotes, el asentamiento observado consistió principalmente del acortamiento de los pilotes debido a la carga.
3. Un pilote sometido a carga de arrastre tiene una distribución que consiste en la suma de la fricción negativa acumulada en la parte superior del pilote en equilibrio con la resistencia positiva del fuste a lo largo de la parte inferior más la resistencia de punta del pilote. La zona en la que la transferencia de las fuerzas de corte pasan de dirección negativa a positiva puede ser corta o larga dependiendo de la magnitud de los movimientos del suelo y de la rigidez relativa del pilote y el suelo. La imagen es la misma que la de la distribución de la carga residual que se muestra en la Fig. 11A. De hecho, si Endo et al. (1969) hubiesen pulido su magnífico estudio completándolo con una prueba de carga estática, la carga de arrastre se habría convertido en la carga residual de la prueba.
4. La ubicación en la que las fuerzas descendentes que actúan son iguales a las fuerzas ascendentes es donde no hay movimiento entre el pilote y el suelo. El lugar se llama "plano de equilibrio de fuerzas" o "plano neutro". En esta ubicación, el pilote y el suelo se asientan igualmente, lo que es una visión muy importante para el diseño de grupo de pilotes.
5. Si ocurre un asentamiento apreciable del suelo en el plano neutro, el pilote (s) se verá sometido a un movimiento de arrastre, una condición indeseable para la mayoría de los cimientos piloteados.
6. La ubicación del plano neutro es solamente una función de las condiciones necesarias para el equilibrio de fuerzas. No es una función de la magnitud del asentamiento en ningún otro aspecto que no sea el equilibrio de fuerzas como una función de la penetración de la punta del pilote en los suelos de la punta, la que a su vez está gobernada por la magnitud del asentamiento en el plano neutro.
7. Donde los asentamientos del suelo son pequeños, la zona de transición es larga y donde los asentamientos del terreno son grandes, la zona de transición es corta. Todo lo demás es igual y la carga de arrastre es mayor en el segundo caso.

8. Las cargas vivas (cargas transitorias) reducirán o eliminarán la carga de arrastre.
9. La fricción negativa por fuste se desarrollará ya sea que haya o no una carga externa aplicada a la cabeza del pilote. La carga externa muerta y la carga de arrastre se combinarán y la carga máxima en el pilote tendrá lugar en el plano neutro.
10. Cuanto mayor sea la resistencia de punta del pilote más profundo será el plano neutro.
11. Una delgada capa de bitumen reducirá drásticamente la fuerza de corte entre la superficie del pilote y el suelo, y así reducirá la fricción negativa por fuste (así mismo reducirá la resistencia por fuste positiva y la capacidad de soporte del pilote).

A causa de la palabra "carga" en "carga de arrastre", algunos creen que la carga de arrastre es otra carga similar a las cargas aplicadas a la estructura soportada en los pilotes. Sin embargo, la carga de arrastre es sólo de preocupación para la resistencia estructural del pilote. En contraste a las cargas externas (las cargas provenientes de la estructura), la carga de arrastre no tiene ninguna consecuencia para la capacidad de carga o los asentamientos del pilote o grupo de pilotes. Simplemente, la carga de arrastre no es un aspecto negativo para un pilote más allá de lo que es la tensión de pretensado en un pilote de hormigón pretensado. En efecto, un pilote sometido a una carga considerable de arrastre es más rígido que un pilote que no se somete a mucha carga de arrastre y mostrará menores deformaciones a las variaciones de carga aplicadas a la cabeza del pilote. El movimiento de arrastre, por otro lado, es un problema importante de asentamiento que tiene que ser cuidadosamente considerado en el diseño. El autor ha denominado el enfoque de diseño "El diseño unificado de cimentaciones piloteadas para capacidad, asentamiento, carga de arrastre y movimiento de arrastre" (Fellenius 1984, 1989).

### **EL DISEÑO UNIFICADO**

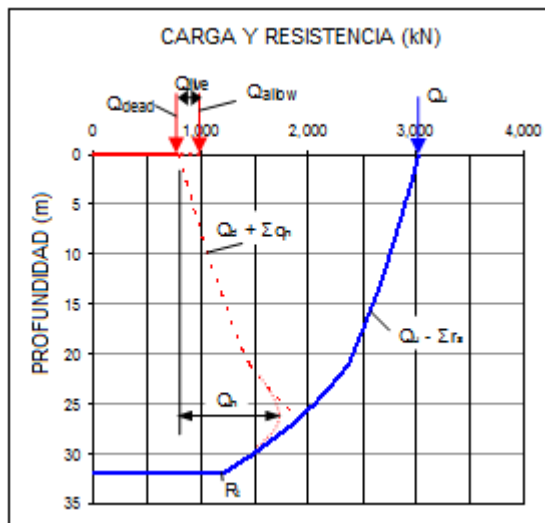
El diseño de una cimentación con pilotes debe tener en cuenta tres aspectos principales: capacidad, carga de arrastre y asentamientos, como se reconoce en el Manual Canadiense de Ingeniería de Cimentaciones (CFEM 1992) y otros textos reconocidos, como la CSA y la el Código de diseño de Puentes y Autopistas de Ontario (OHBDC 1991), el informe 343 NCHRP-FHWA (Barker et al. 1991) y las Guías de Diseños Técnicos Nos. 1 y 7 del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE.UU. y ASCE (ASCE 1993, 1994). (Desafortunadamente, el mal uso de la terminología en estos dos últimos textos con frecuencia hace poco claros los procedimientos allí sugeridos). Algunas otras guías, textos, códigos y normas limitan la recomendaciones al aspecto de la capacidad, lo que causa que muchos ingenieros en ejercicio tomen la decisión por lo general segura, en ocasiones peligrosa, y casi siempre demasiado costosa por el sólo hecho de dejar fuera los otros dos criterios. Algunos diseñadores, que sí se percatan de que los asentamientos ocurrirán en el sitio, y, por lo tanto, concluirán que la carga de arrastre actuará sobre el pilote, tratan este asunto mediante la adición de la carga de arrastre a las cargas externas (las cargas provenientes de la estructura) o reduciendo por la capacidad del pilote con la cantidad



de carga de arrastre antes de dividir la capacidad por el factor de seguridad para obtener la carga admisible. Si bien la decisión puede tener el efecto positivo de la reducción de la profundidad del plano neutro y, por lo tanto, la reducción del movimiento por arrastre, a menudo no es un método muy rentable, y no considera correctamente los factores involucrados. A veces, el diseñador decide reducir la fricción negativa por fuste por medio de una capa bituminosa sin darse cuenta de que esta también reduce la capacidad del pilote en igual magnitud.

La **capacidad del pilote** es la suma de la resistencia positiva del fuste a lo largo de toda la longitud del pilote más la resistencia de punta para un cierto movimiento. Como se ha indicado en lo que antecede, habitualmente no se reconoce que la punta del pilote no presenta una resistencia última sino que es una función de la respuesta  $q$ - $z$  de la punta. Sin embargo, a la práctica de la ingeniería desde hace mucho tiempo le ha funcionado bien el escoger el concepto de una capacidad del pilote, y establecer una capacidad admisible dividiendo esa capacidad del pilote por un factor de seguridad. La capacidad puede ser determinada por los métodos empíricos de cálculo que utilizan datos obtenidos por medio de pruebas de campo a escala real, tales como pruebas de carga estática o pruebas dinámicas, o mediante el uso de ensayos in situ, tales como el penetrómetro de cono (CPT) y ensayos de penetración estándar (SPT) en combinación con procedimientos analíticos bien calibrados, como el análisis de esfuerzos efectivos (método  $\beta$ ) o, pero menos fiable, el análisis de esfuerzos totales (método  $\alpha$ ). En la práctica se usa aplicar un factor de seguridad en los resultados de la prueba de campo de aproximadamente 2,0 y entre 2,5 y 3,0 en los ensayos in-situ. Cabe notar que todos los resultados de las pruebas deben ser combinados con un análisis estático y ser correlacionados con las condiciones generales del sitio y sus variaciones, pues de lo contrario los citados factores de seguridad pueden ser demasiado bajo.

El método para determinar la carga admisible, que consiste de carga muerta y carga viva, se ilustra en la Fig. 14 para un pilote con una capacidad de 3.000 KN asociado a un factor de seguridad de 3,0, lo que determina la carga admisible igual a 1.000 KN de los cuales 800 KN es carga muerta y 200 KN es carga viva.



- $Q_d$  = Carga muerta
- $Q_l$  = Carga viva
- $Q_q$  = Carga admisible =  $Q_d + Q_l$
- $Q_u$  = Resistencia última =  $R_u$
- $q_n$  = Fricción negativa unitaria
- $Q_n$  =  $q_n$  acumulado
- $r_s$  = Resistencia unitaria positiva del fuste
- $R_s$  = Resistencia total del fuste
- $R_t$  = Resistencia de punta

Fig. 14. Ejemplo ilustrativo de la metodología a la carga admisible, carga muerta y carga viva y carga de arrastre

La ubicación del plano neutro se indica en la Fig. como la distribución de la carga a partir de la carga muerta y que incrementa con la fuerza cortante del fuste en dirección negativa hasta la intersección con la distribución de la curva de carga empezando con la resistencia última (capacidad del pilote) la que se reduce con el corte en el fuste en la dirección positiva. En este análisis, la carga viva no debe ser incluida: la carga de arrastre y la carga viva no pueden existir al mismo tiempo.

Se debe tener en cuenta que para determinar la carga admisible a partir de la capacidad del pilote, la carga de arrastre no debe estar incluida. La carga de arrastre se debe combinar con la carga muerta y la suma será tomada en cuenta al evaluar la resistencia estructural del pilote (en el plano neutro).

**Resistencia estructural.** Como se indica en la Fig. 14, la carga de arrastre del ejemplo se estima en 900 KN, lo que significa que la carga máxima en el pilote, que consta de la carga muerta y la carga de arrastre, se convierte en 1.700 KN. La resistencia axial estructural del pilote debe ser tal que esta carga puede ser resistida. Sin embargo, los pilotes se instalan frecuentemente de manera que la carga estructural permitida en el cabezal del pilote sea aproximadamente igual a la carga geotécnicamente admisible (la capacidad dividida por el factor de seguridad). A menos que la carga viva sobre el pilote sea una parte inusualmente grande de la carga admisible, esto significa que la carga en el plano neutro (carga muerta más la carga de arrastre) será mayor que la carga permitida estructuralmente en el cabezal. Sin embargo, la carga estructuralmente admisible en el cabezal tiene que incluir consideraciones como colocación de pilotes fuera de posición, flexión y corte lateral, cuyos aspectos no se aplican a la carga estructuralmente admisible en el plano neutro, y los dos no deben ser lo mismo. Se debe permitir que la carga axial en el plano neutro sea mayor que la de la cabeza del pilote. El autor ha aplicado la condición de que en el plano neutro, por lo general, se puede aceptar una deformación de aproximadamente 0,001. El requisito de compatibilidad de la deformación se aplica en particular a los pilotes compuestos, por ejemplo, un pilote tubular de acero hormigonado o un pilote de hormigón armado.

Debido a que la transición de dirección negativa a positiva del corte en el fuste requiere de cierta longitud, la carga máxima en el pilote no es la carga en la intersección de la curva (calculada por la movilización completa de la fricción negativa y la resistencia positiva del fuste), sino una carga más pequeña, cuya magnitud se rige por la longitud de la zona de transición (ver más adelante), y que a su vez está determinada por la magnitud del movimiento relativo entre el pilote y el suelo. En la mayoría de los casos, se puede suponer que el cambio se inicia y se termina donde el movimiento relativo es de aproximadamente 2 mm. En suelos con alto contenido de materia orgánica, la movilización total de las fuerzas de corte puede requerir un mayor movimiento relativo.

**Análisis de los asentamientos.** Al evaluar los asentamientos de una cimentación sobre pilotes, la ubicación del plano neutro gobierna el análisis. Cualquiera que sea la magnitud de los asentamientos en el plano neutro, el valor de asentamiento de la cabeza del pilote es ese valor más el acortamiento del pilote debido a las cargas (peso muerto más la carga de arrastre) por encima del plano neural. Sin embargo, la ubicación del plano neutro no es constante. A medida que se fuerza el pilote hacia abajo, se aumenta la penetración neta de la punta del pilote en el suelo, y, por lo tanto, se aumenta la resistencia de punta, que a su vez hace que la ubicación del plano de equilibrio de fuerzas (plano neutro) se desplace hacia abajo. El aspecto principal es que si la ubicación final de plano neutro se encuentra en una capa de suelo no compresible donde el asentamiento del suelo es pequeño, el movimiento por arrastre también es pequeño y, probablemente, insignificante. Sin embargo, si el asentamiento en el ubicación final del plano neutro es grande, el movimiento por arrastre puede ser grande y crítico para la cimentación.

El cálculo de asentamiento no puede hacerse sin una evaluación de la interdependencia de la longitud de la zona de transición, la ubicación del plano neutro, y la magnitud de la resistencia por punta del pilote como una función de la penetración neta de la punta, que a su vez es una función de la magnitud del asentamiento del suelo. Esto se ilustra en la Fig. 15. El Caso 1 es para un caso en el que el asentamiento del suelo es pequeño, la zona de transición es larga, la resistencia por punta es pequeña, el plano neutro "se encuentra alto", la carga de arrastre es pequeña, y el asentamiento de la cabeza del pilote (A) es pequeño. El Caso 2 es para una distribución idéntica de la resistencia del suelo, sólo que los asentamientos del suelo son mayores, lo que resulta en una mayor resistencia movilizada por punta, una posición inferior del plano neutro, una carga de arrastre más grande, y un asentamiento mayor en la cabeza del pilote (B). Si el asentamiento del suelo aumentase aún más, la resistencia por punta podría llegar a ser mayor que el valor determinado en la prueba de carga estática (que se supone que es la forma cómo se determinó la distribución de la resistencia final). El plano neutro se encontraría entonces cerca de, o a nivel, con la punta del pilote. Esto sólo ocurre cuando la respuesta carga-movimiento del suelo es muy rígida.

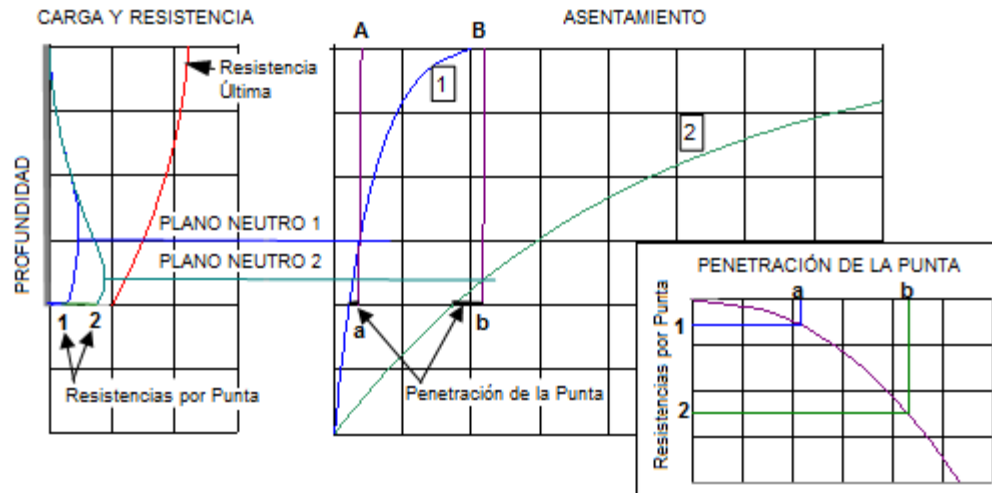


FIG 15 Ejemplo de la interdependencia de la longitud de la zona de transición, la ubicación del plano neutro, y la magnitud de la resistencia de punta del pilote como una función de la penetración de la punta en un suelo homogéneo. El Caso (1) para un asentamiento pequeño y el Caso (2) para asentamiento grande.

Un análisis de asentamientos comienza con la determinación de la ubicación del plano de equilibrio de fuerzas (plano neutro). En muchos casos, tal vez en la mayoría, una vez que se ha establecido que la ubicación es donde los asientos del terreno son pequeños, el análisis está esencialmente completo. El análisis presupone que todos los factores influyentes fueron considerados, tales como la carga sobre la cimentación piloteada y otros cambios en el esfuerzo efectivo en el suelo desde la terminación de la construcción de la estructura apoyada sobre los pilotes. Esto último es de importancia primordial. Nótese que el asentamiento es causado por el aumento del esfuerzo efectivo en el suelo y la carga de arrastre no puede contribuir al asentamiento de una cimentación sobre pilotes.

Donde no es obvia la existencia de estratos de suelo no compresibles, la clave para determinar la ubicación del plano de equilibrio de fuerzas consiste en encontrar la magnitud de la resistencia de punta, que está determinada por la función particular de la resistencia por punta, la función  $q$ - $z$ . La sencilla función  $q$ - $z$  es proporcionada por la siguiente relación (Fellenius 2002).

$$\frac{R_{mob}}{R_{ult}} = \left( \frac{\delta_{mob}}{\delta_{ult}} \right)^e$$

- donde
- $R_{mob}$  = resistencia movilizada
  - $R_{ult}$  = resistencia última
  - $\delta_{mob}$  = movimiento movilizado para  $R_{mob}$
  - $\delta_{ult}$  = movimiento movilizado para  $R_{ult}$
  - $e$  = un exponente usualmente dentro de un rango que va desde un valor muy pequeño hasta la unidad

Si, por ejemplo, una prueba ha movilizadado una resistencia de punta de 1.000 KN, para un movimiento de la punta de 10 mm y el exponente  $e$  es 0,6, entonces, la resistencia por punta para un movimiento de la punta de 8 mm es de 875 KN. O, si la resistencia por punta es de 750 KN, entonces el movimiento de la punta es de 6,2 mm. El encontrar la resistencia por punta que se ajuste al movimiento es un procedimiento iterativo sencillo entre los valores de resistencia de punta que determinan la ubicación del plano de equilibrio de fuerzas, que a su vez determina el valor del movimiento de la punta, que determina la resistencia de la punta . . . Dado que el exponente  $e$  de la curva  $q$ - $z$  es un valor estimado y el proceso depende del buen juicio, no tiene sentido buscar decimales en los resultados.

Para un pilote simple, o un grupo de pilotes que consta de pocos pilotes, la carga en el grupo de pilotes no causará un asentamiento importante de la cimentación. El asentamiento está casi enteramente gobernado por los "aspectos ambientales", es decir, el aumento del esfuerzo efectivo debido a causas distintas de las cargas aplicadas a los pilotes. Sólo para un grupo grande de pilotes las cargas sobre los pilotes van a contribuir significativamente en los asentamientos. Como se ilustra en la Fig. 16, el aumento del esfuerzo efectivo en el suelo debido a las cargas sobre el grupo de pilotes (cabezal) se puede entonces calcular mediante la transferencia de las cargas a una zapata virtual, llamada "zapata equivalente" ubicada en la posición del plano neutro y que tiene las mismas dimensiones que el cabezal. El asentamiento de la cimentación sobre pilotes entonces se asume que es igual al asentamiento calculado para la zapata equivalente. Un aspecto importante del cálculo de asentamientos que usa el método de la zapata equivalente es que se permite un cálculo que puede incorporar todos los factores ambientales externos al grupo de pilotes, tal como se indica en la Fig.

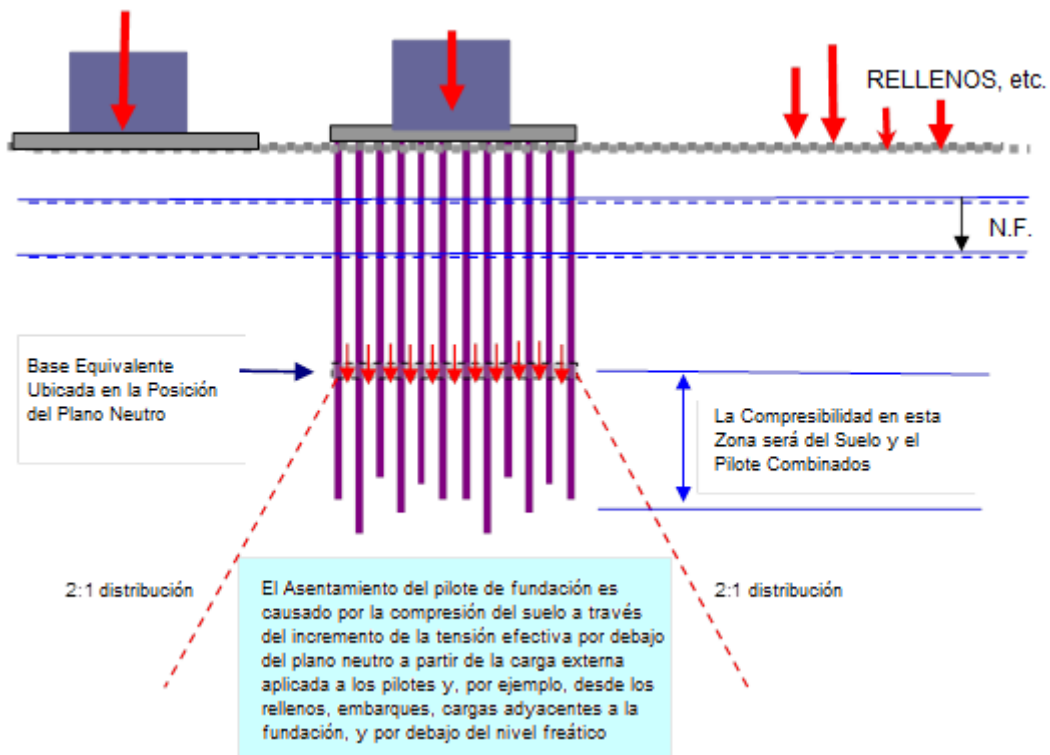


Fig. 16 Principio para el análisis de asentamientos de un grupo de pilotes

En el cálculo del asentamiento de la zapata equivalente, se debe tener en cuenta el efecto de refuerzo (rigidización) de los pilotes. Esto se puede hacer de manera sencilla proporcionando el módulo del suelo y del pilote a las respectivas porciones de suelo y pilote de la superficie de "zapata" y asignando el módulo combinado al estrato de suelo entre el plano neutro y el nivel de la punta. En la mayoría de los casos, el módulo combinado es tan grande que los asentamientos calculados para el suelo entre el nivel de la zapata equivalente y la profundidad de la punta del pilote son despreciables. Uno puede, por lo tanto, ahorrar tiempo y esfuerzo, simplemente colocando la zapata equivalente a nivel de la punta .

La capacidad total de un pilote puede ser establecida por medio de métodos empíricos simplificados, tales como el análisis de esfuerzos totales (siempre y cuando se haga referencia a fuentes de información confiables aplicables al caso). Sin embargo, para la distribución de la resistencia del fuste se debe emplear métodos que reconozcan que la resistencia del fuste es proporcional al esfuerzo efectivo y, por lo tanto, en un suelo homogéneo, la resistencia del fuste siempre aumenta con la profundidad. Una ubicación incorrecta del plano neutro tendrá un efecto considerable sobre el valor del asentamiento calculado para la cimentación piloteada.

Lo anterior se demuestra en la Fig. 17. El ejemplo involucra pilotes de 54 m de longitud "flotando" en un suelo homogéneo que se asienta (el ejemplo está basado en un caso real, pero algo ajustado a la intención del mensaje). La capa de suelo que se asienta es de aproximadamente 65 m de espesor, la cual está seguida por un suelo que no se asienta de baja resistencia. La capacidad del pilote es de aproximadamente 8.500 KN y consiste principalmente de la resistencia por fuste (la resistencia por punta es sólo del orden de 300 KN).

Los resultados de los dos cálculos diferentes, "A" y "B", se muestran. En "A", la capacidad se supone representada por una resistencia unitaria de fuste constante, lo que resulta en una distribución lineal de la resistencia en el fuste y un plano neutro a una profundidad de 24 m. En cambio, cuando la capacidad se supone representada por una resistencia unitaria del fuste proporcional al esfuerzo efectivo de sobrecarga, como se muestra en "B", la distribución de resistencia del fuste se vuelve curva, y el plano neutro se encuentra a una profundidad de 36 m. Debido a un relleno pequeño en la superficie del suelo y a una disminución del nivel freático, se prevé un asentamiento de 200 mm a nivel de la superficie del terreno. Dos distribuciones de asentamientos se indican, "A" y "B". Como se hace a veces, la distribución "A" está linealmente distribuida a lo largo de la profundidad de suelo que se asienta. Para la distribución "B", los valores de asentamiento calculados se presentan como calculados para capas alternas de parámetros de compresibilidad del suelo ajustados para dar los mismos 220 mm de asentamiento en la superficie del suelo. La distribución "B" refleja el hecho de que para un mismo incremento real del esfuerzo, el aumento relativo se hace más pequeño con la profundidad y el asentamiento calculado, por lo tanto, se reducirá exponencialmente con la profundidad.

La consecuencia en los resultados de las dos simplificaciones - distribución lineal de la resistencia del fuste y del asentamiento- en contraposición a los resultados de

distribuciones más realistas, es obvio: el asentamiento calculado para la cimentación piloteada se reduce de 150 mm a menos de 40 mm, haciendo la diferencia entre un diseño que puede ser rechazado a uno que podría ser aceptado.

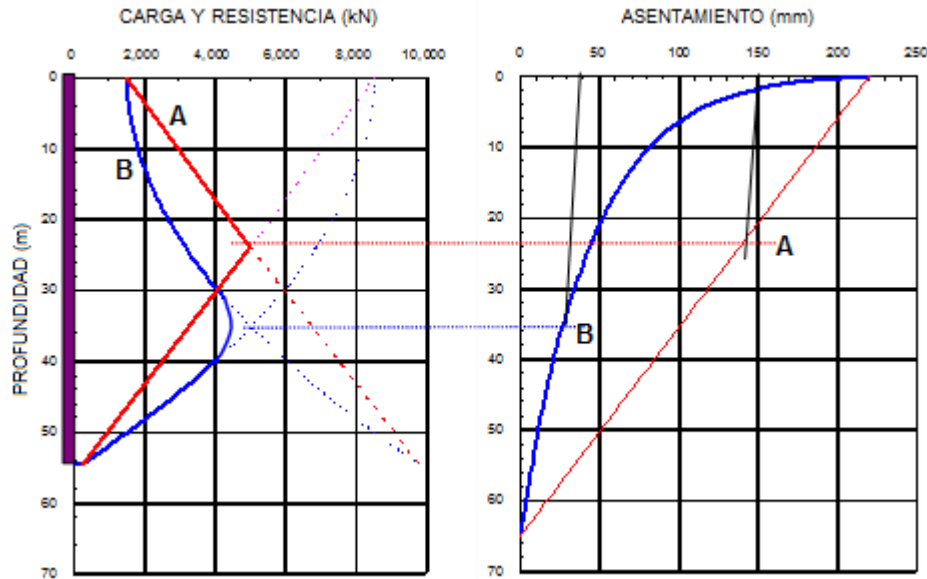


Fig. 17 Comparación entre resultados de esfuerzos totales y resultados de esfuerzos efectivos

**PLATEA PILOTEADA** . Como se indica en el registro del caso de Endo et al. (1969) presentado en la Fig. 12B y en las distribuciones típicas de asentamientos que se muestra en las Figs. 15 y 17, al nivel del cabezal no hay presión de contacto entre la cara inferior del cabezal y el suelo, porque el suelo siempre se asentará más que el cabezal. Es por lo tanto incorrecto permitir cualquier contribución de la presión de contacto. La excepción a esto es en la caso de una platea piloteada, que se refiere a una cimentación piloteada diseñada con un factor de seguridad para los pilotes cercano a la unidad, o mejor expresado, donde el plano neutro está diseñado para estar situado cerca o en la parte inferior de la platea. Sólo si las cargas externas son iguales o mayores que las capacidades combinadas de los pilotes habrá presiones de contacto.

El énfasis del diseño de una platea piloteada es la de asegurar que la presión de contacto esté uniformemente distribuida a través de la platea. El diseño de una platea piloteada tiene la intención de que los pilotes sirvan tanto de elementos de refuerzo del suelo (rigidización) para reducir asentamientos y como unidades para recibir las inevitables cargas concentradas de la platea. Esta condición gobierna la distribución, a lo largo y ancho de la platea, de la cantidad y el espaciamiento de los pilotes. El diseño primero decide sobre la profundidad y número de pilotes (espaciamiento promedio y el límite inferior de número de pilotes) necesarios para reforzar el suelo para que el asentamiento de la platea sea igual o menor que el aceptable. Este análisis incluye todas las cargas a ser recibidas por la platea. A partir de entonces, se decide la magnitud de la presión de contacto uniforme, y finalmente, la separación y el número

de pilotes para soportar las concentraciones de carga (la parte de la carga en exceso de la determinada para la tensión de contacto) serán diseñados a una profundidad y ubicaciones a las que se le asigna un factor de seguridad igual a la unidad. Un procedimiento iterativo de estos pasos puede ser requerido.

## RESUMEN

Sólo para pilotes que tienen la mayor parte de su capacidad en la resistencia por fuste y que están sometidos a una carga residual, los resultados de una prueba de carga estática serán interpretados para mostrar un valor de capacidad (resistencia final) que puede ser percibida intuitivamente y aceptada como tal. Para la mayoría de las pruebas de pilotes, por lo tanto, la capacidad es un concepto de ingeniería cruda que requiere una definición específica. La razón es que la punta del pilote no muestra una resistencia última, sino que tiene una curva de carga-movimiento sin cambio abrupto de curvatura u otra indicación de la resistencia última. Aunque el concepto de capacidad de pilote sigue siendo útil, para avanzar, la práctica de diseño de ingeniería tiene que poner más énfasis en el análisis del asentamiento y considerar que la respuesta del pilote a la carga es ante todo un movimiento de respuesta a la carga junto con el asentamiento del suelo debido a factores ambientales.

El diseño de una base piloteada se lleva a cabo en tres pasos "unificados", como se sigue:

**Carga Admisible y Carga de Diseño.** La carga admisible es una función de la capacidad de carga, sin reducirla por la carga de arrastre. La carga admisible incluye carga muerta y viva pero no la carga de arrastre

**Carga Máxima y Esfuerzo Estructural.** La carga máxima en el pilote se produce en el plano neutro y es la suma de la carga muerta más la carga de arrastre. La carga viva no debe ser incluida. La resistencia axial estructural del pilote es lo que determina la máxima carga admisible en el plano neutro.

**Asentamiento.** El asentamiento de una cimentación piloteada es causado por el aumento de los esfuerzos en el suelo debido a rellenos, terraplenes y excavaciones, cambio del nivel freático, y de la carga de la estructura soportada por el sistema de pilotes. La estimación del asentamiento requiere del conocimiento de la ubicación del plano neutro y el asentamiento del suelo en el plano neutro. El asentamiento de un pequeño grupo de pilotes se analiza mejor en términos de funciones q-z para la punta del pilote en respuesta a la carga aplicada al pilote y la incorporación de aspectos de necesaria conformidad con el movimiento en el plano neutro. Un grupo grande de pilotes también se verá afectado por el aumento de los esfuerzos en los suelos por debajo de la punta de los pilotes debido a las cargas externas soportadas por los pilotes. Esto puede ser convenientemente analizado por medio de una zapata equivalente colocada en la ubicación del plano neutro o en la punta del pilote.

## APÉNDICE I — REFERENCIAS

Altaee, A. and Fellenius, B. H., 1994. Physical modeling in sand. Canadian Geotechnical Journal, (31)3, 420-431.



ASCE, 1993. US Army Corps of Engineers Technical Engineering Design Guide No. 1 Pile Foundations, 142 p.

ASCE, 1994. US Army Corps of Engineers Technical Engineering Design Guide No. 7 Bearing capacity of Soils, 99 p.

Baker, C.N., Park, G., Braid, J.L., Drumright, E.E., and Mensah, F. (1993). Drilled shafts for bridge foundations. Federal Highway Administration, FHWA, Washington, Report No. FHWA RD 92 004, 335 p.

Barker, R.M., Duncan, J.M., Rojiani, K.B., Ooi, P.S.K, Tan, C.K., and Kim, S.G., 1991. Manual for the design of bridge foundations. National Cooperative Highway Research Programme, Report 343, Transportation Research Board, Washington, D. C., 308 p.

Bjerrum L. and Johannessen, I.J., 1965. Measurements of the compression of a steel pile to rock due to settlement of the surrounding clay. Proceedings 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, September 8 - 15, Vol. 2, pp. 261 - 264.

Bjerrum L. Johannessen, I.J., and Eide, O., 1969. Reduction of negative skin friction on steel piles to rock. Proceedings 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, August 25 - 29, Vol. 2, pp. 27 - 34.

Bozozuk, M., 1981. Bearing capacity of a pile preloaded by downdrag. Proc. 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, June 15 -, 19, Vol. 2, pp. 631 - 636.

Briaud J-L and Gibbens R.M., 1994, Predicted and measured behavior of five spread footings on sand — Tests and Prediction Proceedings of a Symposium sponsored by the Federal Highway Administration at the, 1994 ASCE Conference Settlement '94. College Station, Texas, June 16 - 18, pp., 192 - 128.

Canadian Foundation Engineering Manual, CFEM, 1992. Third Edition. Canadian Geotechnical Society, BiTech Publishers, Vancouver, 512 p.

Clemente, F.M., 1981. Downdrag on bitumen coated piles in a warm climate. Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, June 15 -, 19, Vol. 2, pp. 673 - 676.

Clemente, F.M., 1979. Downdrag. A comparative study of bitumen coated and uncoated prestressed piles. Proceedings, Associated Pile and Fittings 7th Pile Talk Seminar, New York, N.Y., pp. 49 - 71.

Endo M., Minou, A., Kawasaki T, and Shibata, T,1969. Negative skin friction acting on steel piles in clay. Proc. 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, August 25 - 29, Vol. 2, pp. 85 - 92.

Fellenius, B.H., 1972. Downdrag on piles in clay due to negative skin friction. Canadian Geotechnical Journal, 9(4), pp. 323 - 337.

Fellenius, B.H., 1984. Negative skin friction and settlement of piles. Proceedings of the Second International Seminar, Pile Foundations, Nanyang Technological Institute, Singapore, 18 p.

Fellenius, B.H., 1989. Unified design of piles and pile groups. Transportation Research Board, Washington, TRB Record 1169, pp. 75 - 82.

Fellenius, B.H., 2001. Determining the true distribution of load in piles. American Society of Civil Engineers, ASCE, International Deep Foundation Congress, An International Perspective on Theory, Design, Construction, and Performance, Geotechnical Special Publication No. 116, Edited by M.W. O'Neill, and F.C. Townsend, Orlando, Florida, February 14 - 16, 2002, Vol. 2, pp. 1455 - -1470.

Fellenius, B.H., 2002. Basics of foundation design. Electronic Edition. www.Geoforum.com, 250 p. (*Latest edition is 2012*).

Fellenius, B.H. and Broms, B.B., 1969. Negative skin friction for long piles driven in clay. Proc. 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, August 25 - 29, Vol. 2, pp. 93 - 97.

Fellenius, B. H. and Samson, L., 1976. Testing of drivability of concrete piles and disturbance to sensitive clay. Canadian Geotechnical Journal, 13(2), 139-160.

Fellenius, B.H. and Altaee, A., 1995. The critical depth – How it came into being and why it does not exist. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering Journal, London, No. 113-2, pp. 107 - 111. Discussion and Reply in No. 119-4, pp. 244 - 245.

Fellenius, B.H., Harris, D., and Anderson, D.G., 2004. Static loading test on a 45 m long pipe pile in Sandpoint, Idaho. Canadian Geotechnical Journal, 41(4) 613-628.

Gregersen, O.S., Aas, G., and DiBiagio, E. (1973). Load tests on friction piles in loose sand. Proceedings of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, ICSMFE, Moscow, August 1973, Vol. 2, Paper 3/17, pp. 109 – 117.

Leung, C.F., Radhakrishnan, R., and Tan, S.A., 1991. Performance of precast driven piles in marine clay. American Society of Civil Engineers, ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, 117(4) 637-657.

Holloway, D.M., Clough, G.W., and Vesic A.S. (1978). The effects of residual driving stresses on pile performance under axial load. Proceedings of the 10th Offshore Technology Conference, Houston, TX., Vol. 4, pp. 2225 - 2236.

Hunter, A.H. and Davisson, M.E.T. (1969). Measurements of pile load transfer. Proceedings of Symposium on Performance of Deep Foundations, San Francisco, June (1968, American Society for Testing and Materials, ASTM, Special Technical Publication, SPT 444, pp. 106 - 117.

OHBDC, 1991. Ontario Highway Bridge Design Code, 3rd. Edition, Code and Commentary, Min. of Transp., Quality and Standards Division, Toronto.

Osterberg, J.O., 1998. The Osterberg load test method for drilled shaft and driven piles. The first ten years. Great Lakes Area Geotechnical Conference. Seventh International Conference and Exhibition on Piling and Deep Foundations, Deep Foundation Institute, Vienna, Austria, June 15 - 17, 1998, 17 p.

Walker, L.K., Le, P., and Darvall, L., 1973. Dragdown on coated and uncoated piles. Proc. 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, August, Vol. 2, Paper 3/41, pp. 257 - 262.