

## **ENSAYOS DE CARGA ESTÁTICOS DE COMPRESIÓN EN PILOTES DE HORMIGÓN MOLDEADOS EN SITIO.**

### **Análisis y utilización de los resultados.**

**Ingeniero Civil Arnoldo J. L. Bolognesi**

Los pilotes moldeados en sitio son una de las soluciones actualmente preferidas para las fundaciones de puentes, especialmente porque permiten la adopción de grandes diámetros para resistir los momentos flectores que originan en la parte no soportada, que debe incluir la socavación del lecho, las fuerzas horizontales que transmiten los cabezales. Son de utilización frecuente en fundaciones en general por razones que hacen su empleo indispensable o se los prefiere en competencia con otras soluciones. En este artículo solo se consideran las cargas axiales.

Como todos los pilotes, los moldeados en sitio deben necesariamente proyectarse de acuerdo con los asentamientos máximos que toleran las estructuras que soportan. Deben descartarse los cálculos basados en la suma de las resistencias máximas teóricas de punta y de fricción afectándolas por el mismo factor de seguridad.

En los pilotes en arena existe una gran diferencia en los asentamientos necesarios para alcanzar la fluencia plástica. Los de fricción son una fracción de los requeridos en la punta. El porcentaje de la carga soportada por fricción se incrementa a medida que aumenta el diámetro de los mismos.

En los pilotes en arcilla la fluencia plástica también se obtiene mucho antes por fricción que por resistencia de punta. Se señala que la misma se desarrolla con asentamientos considerablemente menores que en las arenas. Mientras que en estas últimas la fluencia plástica no se obtiene aun con asentamientos del orden del 20% del diámetro, en las arcillas los requeridos son del orden del 5%.

Como consecuencia de ello hay una diferencia entre las arenas y las arcillas en los porcentajes de la carga que se toma por fricción y por punta para asentamientos iguales de pilotes de igual diámetro.

El método más seguro para obtener las relaciones asentamientos en la cabeza – cargas que los producen es el ensayo de carga estático de compresión (ASTM D 1143). El más simple es el que se limita a obtener dichas relaciones. Para determinar los porcentajes de resistencia por fricción y por punta se requiere además células de presión o “strain gages” muy cercanas a la punta. Para determinar como se transfiere la carga del pilote al suelo se requieren células de presión a distintas alturas o más comúnmente “strain gages”. La célula de Osterberg, usadas en muchos proyectos aplica las cargas mediante gatos especiales en la punta y rutinariamente obtiene como mínimo los valores por fricción y por punta. Igualmente los pilotes pueden instrumentarse para lecturas a distintas profundidades de los mismos mediante células de Osterberg adicionales a las profundidades deseadas o por “strain gages”.

Los pilotes moldeados en sitio pueden ejecutarse con una camisa metálica o de hormigón armado o sin camisa. Este último es el método más utilizado en la Argentina. Es el que requiere más controles para asegurar que las cargas asignadas puedan ser soportadas por los mismos con los coeficientes de seguridad establecidos. En este artículo se consideran ambos.

Particularmente en las arenas de compacidad media la capacidad de carga de los pilotes moldeados en sitio puede aumentarse apreciablemente mediante inyecciones bajo altas presiones de lechadas de cemento. La Argentina se encuentra entre los primeros países que aplicaron la precarga en forma extensiva para las fundaciones de puentes, Bolognesi-Moretto (1973). En esa oportunidad se efectuaron ensayos de carga estáticos en pilotes, previamente y posteriormente a lo que se denominó precarga, por haberse efectuado las inyecciones desde la punta.

En este artículo son objeto de estudio y de interpretación de resultados. Hay una bibliografía importante con respecto a diferentes fundaciones en los que se ha empleado En EE. UU. se ha despertado recientemente una interés creciente por esta posibilidad de mejora (post-grouted drilled shafts). Hay investigaciones en progreso que permitirán perfeccionar su aplicación.

A pesar del uso extensivo de los pilotes moldeados en sitio en la Argentina es reducido el número de publicaciones originadas en el país que permitan entender y controlar correctamente su comportamiento. El propósito de este artículo es el de estimularlas. Hay una muy extensa bibliografía extranjera para consultas y ejemplos y trabajos de investigación con pilotes instrumentados de inmediata aplicación práctica para la solución adecuada de proyectos y verificaciones que interesan a ingenieros proyectistas, ejecutores y controladores, aplicaciones que varían según la importancia de las obras y los coeficientes de seguridad introducidos en función de la mayor o menor información con que se efectuaron los proyectos y de los métodos de verificación durante la construcción.

En este artículo se tratan tres temas. PILOTES EN ARENA SIN PRECARGA, PILOTES EN ARCILLA SIN PRECARGA y PILOTES CON PRECARGA, constituidos con subtemas. En el texto que sigue se usará simplemente la palabra pilotes desde que el título del artículo señala que se tratará exclusivamente de pilotes moldeados en sitio.

### **1.1.0 PILOTES EN ARENA SIN PRECARGA CON CAMISA**

El procedimiento más extensivamente usado para ejecutar los pilotes con camisa es el de hincar mediante un martillo vibrador una camisa o tubo suficientemente resistente para resistir todas las tensiones originadas por su hincada e instalación. Hincado a la profundidad deseada se procede a la remoción del suelo en su interior y al posterior hormigonado. Cuando el efecto del tapón de suelo impide la hincada se lo socava durante la misma con las precauciones necesarias. La principal ventaja de los pilotes con camisa es que son los que mejor retienen el estado de tensiones existentes previamente a su hincada en el suelo. Los mismos se consideran como los que permiten los valores más altos de la fricción, la cual depende del valor  $K_{\sigma}$ .

En la Argentina la información más completa sobre el comportamiento de este tipo de pilotes es el de las fundaciones del puente Chaco-Corrientes, hoy General Belgrano. En lo que sigue usaremos la expresión Chaco – Corrientes porque permite al lector una rápida ubicación geográfica de esta obra.

El Presidente de la empresa contratista de esta obra, Diamanti (1973) explica con detalle la solución constructiva usada para la ejecución de los pilotes de 1,80 de diámetro. Bolognesi-Moretto (1973) presentan los datos que permiten el análisis de los resultados que se efectúa a continuación.

### 1.1.1.0 Identificación del pilote: Chaco Corrientes. Pilote 1 sin precarga.

Según Bolognesi-Moretto (1973)

Longitud total: 48,2 m

Longitud: no soportada: 27,1 m

Longitud embebida: 21,1 m, sumergida en toda su longitud.

Diámetro exterior: 1,8 m

Camisa exterior de hormigón armado de 13 cm de espesor.

Densidad predominante de la arena: media densa

Otras propiedades de la arena del río Paraná en Chaco Corrientes

$D_{10} = 0,1$  mm

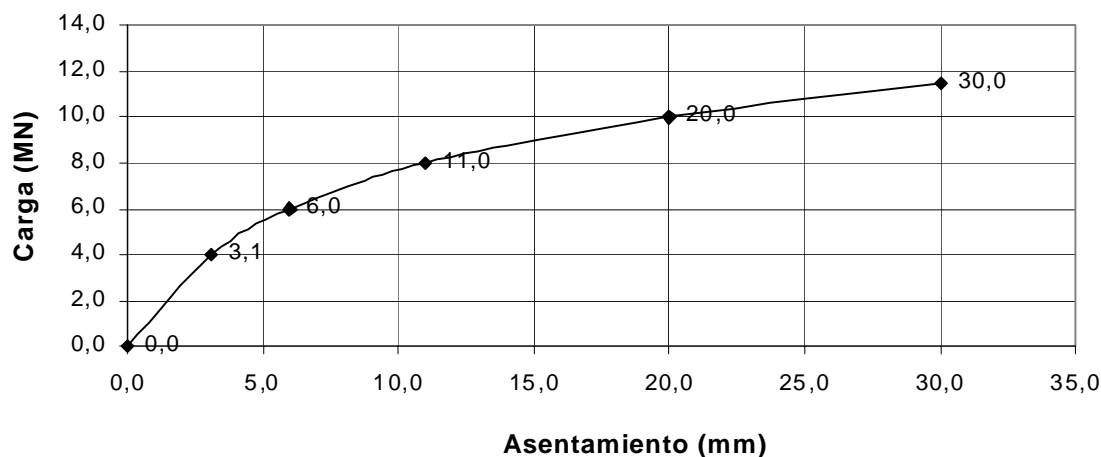
$D_{50} = 0,35$  mm

$\gamma_s = 26,5$  kN/m<sup>3</sup>

$n_{\min} = 30\%$

$n_{\max} = 45\%$

Para utilizar la información que provee la Figura 1.1.1.1 en caso de futuras socavaciones y en otros pilotes con distintos diámetros y distintas longitudes no soportadas y embebidas debe separarse la parte no soportada de la parte embebida, en la cual se desarrolla la fricción. En la longitud no soportada el pilote toma toda la carga mientras que en la longitud embebida el total o parte de ella se transmite al suelo. Por ello corresponde trabajar con la figura 1.1.1.2, en la cual la carga íntegra del pilote actúa sobre la sección ubicada al comienzo de la parte embebida.



**Figura 1.1.1.1** Chaco Corrientes. Pilote 1 sin precarga. Relación carga asentamiento para carga en la cabeza (según Bolognesi-Moretto, 1973)

Los puntos y sus números en la curva son los asentamientos en la cabeza que producen las cargas de 4, 6, 8, 10 y 11,5 MN.

Para construir la figura 1.1.1.2 se debe restar de los asentamientos en la cabeza del pilote la deformación elástica del mismo en la parte no soportada. Para ello se ha asignado un módulo de elasticidad de 30 GPa (300.000 kg/cm<sup>2</sup>) a las secciones en dicha longitud, por que en la misma la armadura del pilote tiene el mayor valor.

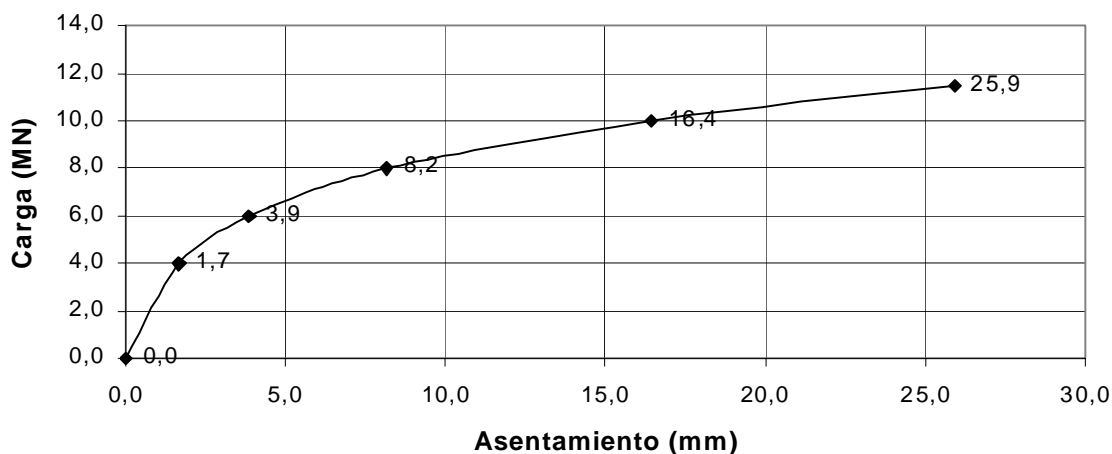
Para una carga de 10 MN (1000 t) en la cabeza, que se transmite íntegramente a la parte embebida, la deformación elástica de la parte no soportada es:

$$((10 \text{ MN}/2.54 \text{ m}^2)/ 30 \text{ Gpa})*27.100 \text{ mm.} = 3.56 \text{ mm}$$

Esta deformación debe ser restada del asentamiento en la cabeza del pilote para cada una de las cargas de 4, 6, 8, 10 y 11.5 MN y como la única variable es la carga aplicada en la cabeza es inmediata la determinación de la deformación elástica para las dichas cargas sobre el pilote.

La figura 1.1.1.2 representa la contribución de la parte embebida a los asentamientos totales. Por ejemplo para la carga de 10 MN, dicha contribución es igual a  $(20 - 3.56) \text{ mm} = 16.44 \text{ mm}$ .

Como en este caso no se tienen mediciones de la presión que se transmite al suelo por la punta del pilote se debe hacer una estimación de dicho valor para poder determinar la parte de la carga que es tomada por fricción.



**Figura 1.1.1.2.** Chaco Corrientes. Pilote 1 sin precarga. Relación carga asentamiento para carga a la cota superior de la longitud embebida.

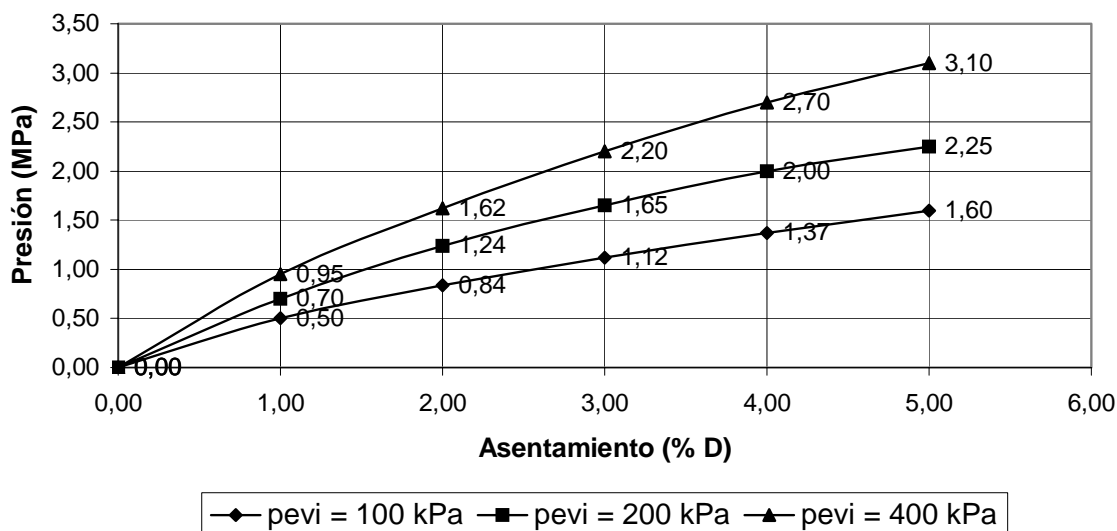
Los puntos y sus números en la curva son los asentamientos a la cota superior de la longitud embebida que producen las cargas de 4, 6, 8, 10 y 11,5 MN.

### 1.1.1.1 Estimación de la resistencia de punta del pilote

Lee y Salgado (1999) determinaron las curvas asentamientos-presiones en la punta de pilotes en arena, para diferentes presiones y densidades utilizando el análisis por elementos finitos de un modelo constitutivo elástico-plástico.

La arena utilizada para los cálculos tiene un  $D_{10} = 0.36$ , un  $D_{50} = 0.54 \text{ mm}$  y  $\gamma_s = 26,23 \text{ kN/m}^3$ . Los resultados están expresados en la Figura 3 de su artículo mediante gráficos que relacionan la presión unitaria con el asentamiento que produce la misma, en función de la densidad relativa de la arena y la presión efectiva vertical previa a la construcción del pilote a la cota de fundación. La Figura 3 de este artículo ha sido hecha interpolando valores de dichos gráficos para una densidad relativa del orden de la media densa, expresando los asentamientos como un porcentaje del diámetro de los pilotes.

La relación directa entre el asentamiento y el diámetro del pilote es válida en el campo de las deformaciones elásticas. Es el caso en consideración. Mayne y Poulos (2001) y otros autores han observado que se opera en ese campo para los asentamientos tolerables para las estructuras que soportan. En su figura 15, que compara asentamientos medidos para bases cuadradas con lados de 1 a 3 m, muestran una remarcable aceptación del criterio de normalización para fundaciones superficiales en arena.



**Figura 1.1.1.3.** Presión en la base en función de la deformación para densidad relativa media densa. Interpolación de valores de Lee y Salgado (1999). **pevi** = presión efectiva vertical inicial al nivel de la punta del pilote. **Figura válida para pilotes en arena en general.**

En la figura 4 de Lee y Salgado los asentamientos están normalizados dividiéndolos por el diámetro del pilote y las presiones lo están con respecto a la resistencia de la punta del cono en el ensayo CPT (ASTM D3441), cuya versión presente es D3441-98. En el texto respectivo hay información sobre los valores establecidos como aceptables por distintos autores y códigos. Los cálculos de Lee y Salgado han sido efectuados para un pilote de 60 cm de diámetro, expresando los asentamientos como un porcentaje del diámetro de los pilotes.

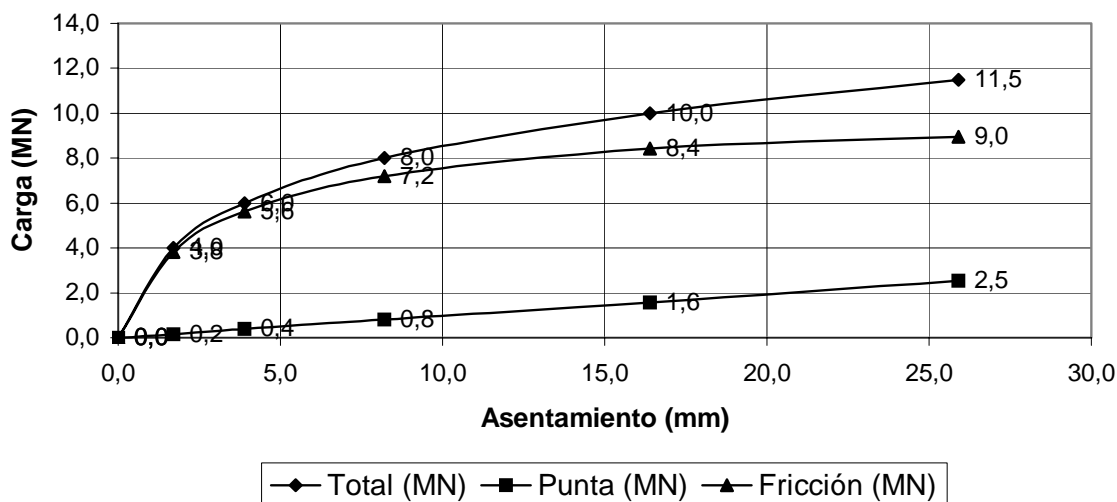
### 1.1.1.2 Resistencia por la fricción lateral y por la punta del pilote

Los puntos y números en la curva superior de la Figura 1.1.1.4 son las cargas totales 4, 6, 8, 10 y 11,5 MN. En las dos curvas inferiores la parte tomada por fricción y por la punta para cada uno de los valores anteriores.

Por ejemplo si se establece que por la carga transmitida por la estructura el asentamiento de la cabeza del pilote sea 15 mm, se obtiene gráficamente de la Figura 1.1.1.1 que dicha carga es de 9 MN. El asentamiento a la cota superior de la longitud embebida puede obtenerse de la Figura 1.1.1.2 o restando de 15 mm la deformación elástica del pilote que es igual a  $3,56 \text{ mm} \times 9 \text{ MN} / 10 \text{ MN} = 3,2 \text{ mm}$  lo que da 11.8 mm.

De la Figura 1.1.1.4 de este artículo se determina que, para la carga de 9 MN, la carga de punta o sea la carga que la punta del pilote transmite al suelo, obtenida de la Figura 1.1.1.3 es de 1,14 MN. Por consiguiente en la longitud embebida la carga sobre la sección del pilote

disminuirá, a medida que aumenta la profundidad, de 9 MN a 1.14 MN, por lo cual la carga de 9 MN sería soportada en un 13 % por la punta y en un 87 % por fricción. Cuando se mide la carga de punta generalmente dicho valor es menor que el que resulta de los cálculos anteriores debido principalmente a la inevitable perturbación ocasionada por los métodos de perforación. Por consiguiente en general el porcentaje tomada por fricción es mayor que el determinado por cálculos que no tienen en cuenta esta perturbación. Debe señalarse también que ésta puede reducirse grandemente mediante prolijos trabajos de limpieza del fondo de la excavación.



**Figura 1.1.1.4.** Chaco Corrientes. Pilote 1 sin precarga. Relación carga asentamiento para carga total, de punta y por fricción para carga a la cota superior de la longitud embebida.

### 1.1.1.3 Deformación elástica de la longitud embebida

Como es obvio la deformación elástica de la longitud embebida es menor que la que se obtiene para longitudes iguales de la parte no soportada. En este caso la longitud no soportada es de 27.10 m y la longitud embebida es de 21.10 m. Para la parte no soportada se ha determinado anteriormente que dicha deformación es 3.2 mm para la carga de 9 MN en la cabeza del pilote.

Para la longitud embebida se utilizará un módulo de elasticidad de 25 GPa, menor que el de la longitud no soportada.

La Figura 1.1.1.5 muestra gráficamente las cargas para calcular las presiones, en cada sección del pilote a distintas longitudes medidas desde la cabeza.

La deformación elástica del pilote es directamente proporcional al área limitada por los ejes del gráfico y las líneas que marcan los valores de las cargas. Debe tenerse en cuenta que, en general, hay diferencias en el módulo de elasticidad entre las longitudes no soportadas y las embebidas. Como  $\epsilon$  es igual a  $\sigma / E$ ,  $\sigma$  es igual a la carga dividida por la sección del pilote y la deformación elástica es igual a  $\epsilon \times$  la longitud en la que se aplica, se obtiene:

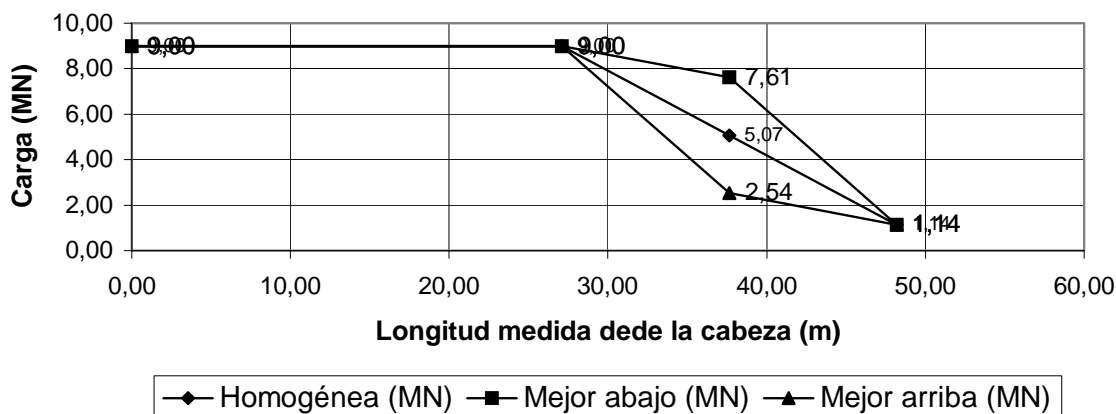
$$\begin{aligned} \text{Para la longitud no soportada: } \sigma &= (9 \text{ MN} / 2,54 \text{ m}^2) = 3,54 \text{ MN} / \text{m}^2 \\ \epsilon &= (3,54 \text{ MN} / \text{m}^2) / 30 \text{ GPa} = 0,118 \times 10^{-3} \\ \text{Deformación elástica} &= (27,1 \times 10^3) \text{ mm} \times \epsilon = \mathbf{3,20 \text{ mm}} \end{aligned}$$

Para la longitud embebida y arena homogénea;

$$\sigma = (5,07 \text{ MN} / 2,54 \text{ m}^2) = 2 \text{ MN} / \text{m}^2$$

$$\varepsilon = (2 \text{ MN} / \text{m}^2) / 25 \text{ GPa} = 0,08 \times 10^{-3}$$

$$\text{Deformación elástica} = (21,1 \times 10^3) \text{ mm} \times \varepsilon = 1,69 \text{ mm}$$



**Figura 1.1.1.5.** Chaco Corrientes. Pilote 1 sin precarga. Reducción de la carga a soportar por la sección del pilote en función de la longitud medida desde la cabeza

Como se indica en la Figura 1.1.1.5 para la longitud embebida el valor de  $\sigma$  es una función del comportamiento de los estratos de arena en que se encuentra la misma. Si son homogéneos la reducción de la carga sobre las secciones a medida que aumenta la profundidad es una línea recta. Si la parte superior es la más resistente, en ella se producirá la mayor parte de la reducción y el área para determinar la deformación elástica será menor y por consiguiente la deformación elástica de la longitud embebida será menor de 1.69 mm. Si la parte inferior es la más resistente dicha deformación elástica será mayor.

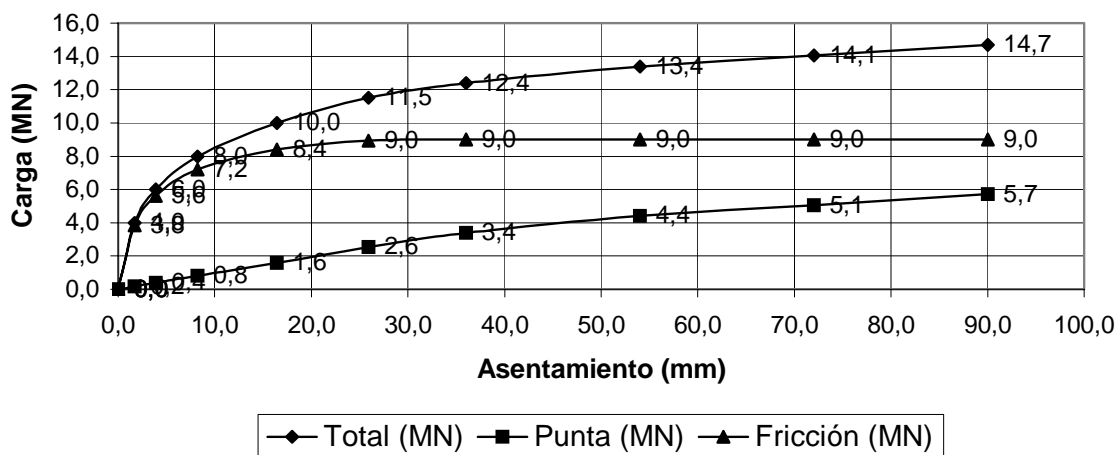
Para conocer esta distribución con precisión es necesario instrumentar el pilote a diferentes profundidades. En la Figura 1.1.1.5 se ha enfatizado esta desviación con respecto a la línea recta. En general es más suave y gradual y una aproximación es posible con los datos del estudio de suelos.

#### 1.1.1.4 Extrapolaciones para mayores asentamientos que los medidos

En la Figura 1.1.1.6 se han extrapolado los resultados del ensayo hasta un asentamiento igual al 5% del diámetro del pilote. La carga de punta se ha determinado mediante la figura 1.1.1.3 Se ha supuesto que la fricción mantiene su valor máximo para deformaciones mayores que la necesaria para alcanzarlo. Una posible disminución se puede estimar mediante ensayos de laboratorio. Debe señalarse que los asentamientos aceptables para estructuras son en general, menores que los necesarios para alcanzar el máximo valor de fricción, por lo cual solo en casos en que se permitan grandes asentamientos es necesario precisar el valor de esta reducción, cuando existe.

Una vez que el pilote agota su resistencia por fricción el aumento de carga lograda por una mayor deformación debe ser una paralela al correspondiente aumento de carga tomado por la

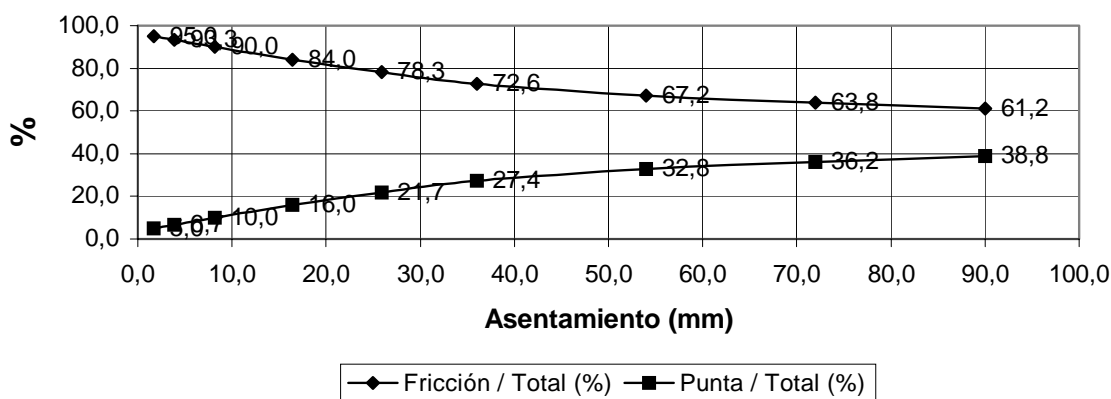
punta. El perfecto ensamble de ambas curvas es una verificación de la corrección de las hipótesis introducidas en el cálculo.



**Figura 1.1.1.6** Chaco Corrientes. Pilote 1 sin precarga. Extrapolación hasta asentamiento de 90 mm de la carga por fricción, la punta y la total

Los puntos y números en las curvas son los mismos de la Figura 1.1.1.4 hasta la carga total de 11.5 MN. Se han agregado los correspondientes a asentamientos iguales a 2, 3, 4, 5 por ciento del diámetro del pilote, respectivamente, 36, 54, 72 y 90 mm.

Con los valores de la Figura 1.1.1.6 se ha confeccionado la Figura 1.1.1.7. Para un asentamiento de la longitud embebida de 20 mm se observa que el 80% de la carga se toma por fricción.



**Figura 1.1.1.7.** Chaco Corrientes. Pilote 1 sin precarga. Carga tomada por la fricción y por la punta como porcentaje de la total.

Los puntos y números en las curvas han sido calculados para los mismos asentamientos y los correspondientes valores de carga de la Figura 1.1.1.6.



**1.1.1.5 Valores obtenidos de las Figuras 1.1.1.1, 1.1.1.4, 1.1.1.6 y 1.1.1.7 para 3 diferentes asentamientos de la cabeza del pilote requeridos por exigencias de las estructuras que soportan.**

**Tabla 1.1.1.1** Confeccionada con datos de la Figura 1.1.1.1

Asentamiento de la cabeza del pilote (mm) requerido	Carga en la cabeza del pilote (MN) medida	Deformación longitud no soportada (mm) calculada
5	5,5	1.96
15	9,0	3.20
25	10,8	3.85

**Tabla 1.1.1.2.** Confeccionada con datos de las Figuras 1.1.1.4

Asentamiento cabeza pilote (mm) requerido	Asentamiento cabeza longitud embebida (mm) calculado	Carga total (MN) medida	Carga fricción (MN) calculada	Carga punta (MN) calculada
5,00	3,04	5,5	5,2	0.3
15,00	11,80	9,0	7,9	1,1
25,00	21,15	10,8	8,7	2,1

Con propósitos comparativos Brusey (2000), en coincidencia con otros autores, utiliza como carga última la correspondiente a un asentamiento equivalente al 4% del diámetro del pilote. Si se aplica este criterio al pilote en estudio dicha carga resulta 14,1 MN, que es el valor utilizado para la confección de la Tabla 1.1.1.3.

**Tabla 1.1.1.3..** Confeccionada con datos de las Figuras 1.1.1.6 y 1.1.1.7. Máxima punta calculada para asentamiento igual a 4% del diámetro. Máxima fricción calculada.

I

Asentamiento cabeza pilote (mm) requerido	% de carga por fricción calculada	% de carga por punta calculada	% de máxima fricción calculada	% de máxima punta calculada
5,00	95	5	58	2
15,00	88	12	88	8
25,00	81	19	97	15

En las Tablas 1.1.1.1, 1.1.1.2 y 1.1.1.3 se han señalado los valores medidos y los calculados. Corresponde una estimación de la exactitud de estos últimos. Si el ensayo de carga se efectúa con carga en la cabeza, los asentamientos de la misma son medidos. Si se mide la presión que transmite la punta, la fricción se obtiene como diferencia entre las dos mediciones. Si se utiliza la célula de Osterberg, la carga se aplica en la punta y se miden la carga por fricción y la carga por punta y la carga en la cabeza se calcula sumando las cargas por fricción y por punta correspondientes a valores iguales de los desplazamientos hacia arriba para la fricción y hacia abajo para la punta.

En los casos anteriores hay dos valores medidos y uno calculado. Cuando se dispone solamente de los asentamientos en la cabeza correspondientes a cada carga, como en la gran mayoría de los ensayos de carga, se tiene un solo valor medido y dos calculados. Este es el caso del pilote 1 sin precarga de Chaco Corrientes, aquí analizado. En los pilotes de gran diámetro,

debido a la baja participación de la punta en la carga total, si se dispone de una buena solución teórica para determinar la carga de punta, como la utilizada en este caso, se obtienen valores con aceptables errores probables. Si se supone que la carga de punta fuera la mitad o el doble de la calculada, la influencia en la determinación de la fricción se muestra en la Tabla 1.1.1.4.

**Tabla 1.1.1.4.** Confeccionada con valores de Tabla 1.1.1.2

Asentamiento de la cabeza del pilote. (mm) Requerido	Error que se cometería si la carga de punta fuera la mitad de la calculada en la Tabla 1.1.1.2. En %	Error que se cometería si la carga de punta fuera el doble de la calculada en la Tabla 1.1.1.2. En %
5	3	6
15	7	14
25	12	24

Se concluye que aun para las hipótesis extremas de la Tabla 1.1.1.4 los errores están dentro de la precisión posible en el conjunto de valores que permiten calcular la capacidad de un pilote. Lo más probable es que la carga de punta sea menor que la calculada por perturbaciones ocasionadas por la construcción del pilote explicadas en 1.1.1.2.

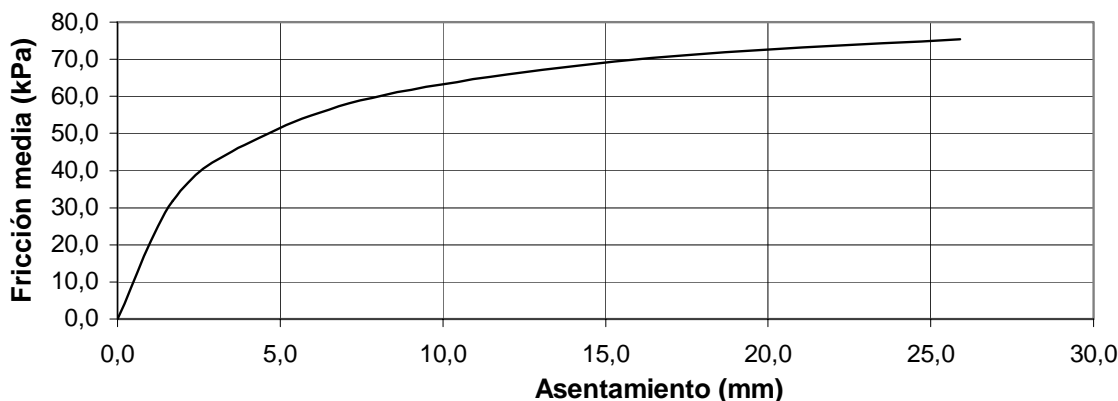
Con los valores obtenidos de las tablas 1.1.1.1, 1.1.1.2, 1.1.1.3 y 1.1.1.4 se puede determinar la carga de proyecto que será una fracción de la medida para el asentamiento requerido en el ensayo de carga. Esta fracción será determinada por el proyectista teniendo en cuenta el valor de representatividad del pilote ensayado. Si ésta fuera 0,5 la carga de proyecto sería 4,5 MN. El hormigón del pilote en la longitud no soportada estaría sometido a una presión de  $4.5 \text{ MN} / 2,54 \text{ m}^2 = 1,77 \text{ MN} / \text{m}^2 = 1770 \text{ kN} / \text{m}^2 = 17,77 \text{ kg} / \text{cm}^2$  lo que es una tensión muy baja consecuencia de la resistencia que puede ofrecer el suelo. De ahí la búsqueda de soluciones que permitan aumentarla. Este tema será considerado en el capítulo PILOTES CON PRECARGA. La tensión mayor corresponde a la longitud no soportada. En la longitud sumergida disminuye con la profundidad hasta quedar reducida a la presión que soporta el suelo bajo la punta del pilote.

Para que la utilización de los resultados de un ensayo de carga no quede limitado a condiciones similares a las del mismo es necesario un análisis como el hasta aquí desarrollado. Las fundaciones de puentes tienen longitudes no soportadas variables en una misma obra y los ensayos excepcionalmente puede realizarse en condiciones de máxima socavación del lecho. La reducción de la longitud sumergida al producirse la socavación produce una reducción de la resistencia por fricción y punta que debe tenerse en cuenta al establecer la carga de proyecto. En fundaciones de estructuras en situaciones menos complejas puede requerirse la información anterior, por ejemplo si se utilizan pilotes de diferentes longitudes y diámetros o hay oscilaciones en el nivel del nivel freático. Para la carga de punta la Figura 1.1.1.3 permite considerar las variaciones posibles. La fricción, que en pilotes de gran diámetro aporta un gran porcentaje de la resistencia, es objeto del análisis que se efectúa a continuación.

#### 1.1.1.6 Fricción máxima promedio, $f(\text{max.})_{\text{prom}}$ y $\beta$

La Figura 1.1.1.8 da los valores de la fricción media en la longitud embebida obtenidos dividiendo la carga por fricción de la Figura 1.1.1.4 por el área de la longitud embebida,  $119,32 \text{ m}^2$ . Puede observarse que para obtener la fricción máxima promedio,  $f(\text{max.})_{\text{prom}}$ , se requiere un asentamiento del orden de los 30 mm. y que el valor de la misma es 75,4 kPa (0,754

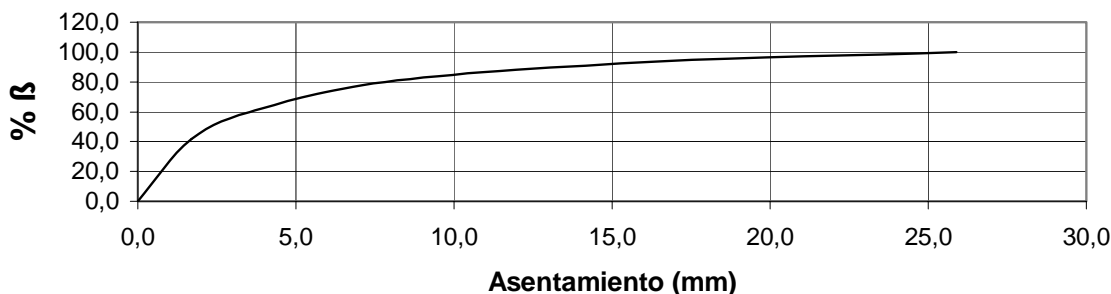
kg/cm<sup>2</sup>). Este es el número de cálculo, redondeando en 75 kPa es conceptualmente más correcto.



**Figura 1.1.1.8.** Chaco Corrientes. Pilote 1 sin precarga. Fricción media en función del asentamiento de la cota superior de la longitud embebida.  $f(\text{max.})_{\text{prom}} = 75 \text{ kPa}$

La fricción en el contacto pilote arena es la resistencia al corte en dicho contacto y por consiguiente igual a la presión normal a la superficie lateral del pilote por la tangente del coeficiente de fricción pilote suelo,  $\delta$ . Esta presión normal es igual a la presión vertical,  $\sigma'_v$ , por el coeficiente de presión de empuje,  $K$ . Se denomina  $\beta$  al valor máximo del producto  $K \tan \delta$ . Es un símbolo frecuentemente utilizado para definir las características de una arena conjuntamente con el del método utilizado para la construcción de pilotes moldeados in situ. El valor práctico es evidente porque precisar el valor de  $K$  y el de  $\delta$  es dificultoso.  $\beta$  requiere una deformación para movilizar el máximo valor de  $\delta$  que es la correspondiente al valor de la carga tomada por fricción cuando esta última llega a su valor máximo. La fórmula  $f(\text{max.})_{\text{prom}} = \beta \sigma'_{v \text{ prom}}$  permite calcular el valor de la fricción promedio.

En el ensayo que se ha analizado en este artículo el valor de  $\beta$  se ha calculado dividiendo el valor máximo de la fricción media,  $f(\text{max.})_{\text{prom}}$ , de la Figura 1.1.1.8 por  $\sigma'_{v \text{ prom}} = (21.1 \text{ m} / 2) \times 9.5 \text{ kN} / \text{m}^3 = 100,23 \text{ kPa}$ , en la cual el peso unitario de la arena sumergida es  $9.5 \text{ kN} / \text{m}^3 = 0.95 \text{ t} / \text{m}^3$ .



**Figura 1.1.1.9.** Chaco Corrientes. Pilote 1 sin precarga. % de  $\beta$  en función del asentamiento de la cota superior de la longitud embebida.  $\beta = 0,75$

La Figura 1.1.1.9 muestra el porcentaje de  $\beta$  disponible para asentamientos menores que el requerido para obtenerlo.

El valor  $\beta = 0,75$ , es aceptable. Los límites extremos del valor de  $\beta$  conocidos por el autor son 1,20 y 0.063.

Con esto se completa el análisis de los datos obtenidos mediante el ensayo de carga del Pilote 1 sin precarga del Puente Chaco Corrientes.

### **Referencias**

Bolognesi A. J. L. – Moretto O. (1973). “Stage Grouting Preloading of Large Piles on Sand”. *Proceedings of 8<sup>th</sup> ICSMFE, Moscow*, Volume 2, Part 1, p.19-25.

Brusey W. G (2000). “Post-Grouted Tests Shafts at JFK International Airport”. *Proceedings of Sessions of Geo-Denver 2000. ASCE Geotechnical Special Publication N° 100. New Technological and Design Developments in Deep Foundations*. 18-32.

Diamanti R. (1973). “Nouvelle Technique pour L’Execution des Pieux de Grand Diametre”. *Proceedings of 8<sup>th</sup> ICSMFE, Moscow*, Volume 2, Part 1, p.75-81.

Lee J. H. and Salgado R. (1999). “Determination of Pile Base Resistance in Sands” *J. Geotech. and Geoenviron. Engrg. ASCE* 125(8) 673-583.

Mayne P. W. and Poulos H. G. (2001) “Approximate Displacement Influence Factor for Elastic Shallow Foundations”. Closure by Authors. *J. Geotech. and Geoenviron. Engrg. ASCE* 127(1)100-10.