MICROPILOTES INYECTADOS PARA LA FUNDACIÓN DE PUENTES

Juan Manuel Fernández Vincent
Ingeniero Civil
Gerente Técnico Pilotes Terratest S.A.

RESUMEN

El presente artículo trata la tecnología de los micropilotes inyectados de reciente introducción en Chile, la cual puede aportar innovadoras soluciones para resolver la fundación de estructuras en lugares con pobres condiciones de suelo y dificultad de acceso de equipos.

Se describen los conceptos fundamentales de los micropilotes, tipos y los métodos de diseño de los mismos para determinar su capacidad de carga interna y externa. En especial se hace mención al micropilote inyectado autoperforante Ischebeck Titan.

SUMMARY

This article deals with the recent technology of injected micropiles available in Chili, which could give innovative solutions to resolve structure's foundations in areas of poor soil condition and with accessibility problems to equipment.

Here are presented fundamental concepts of micropiles, types and design procedures in order to verify the internal an external capacity of them. Especially we mention the self-boring injection micropile Ischebeck Titan.

INTRODUCCIÓN

Los micropilotes son pilotes de pequeño diámetro (menor de 300 mm) perforados e inyectados, que tienen una alta capacidad de carga debido a la alta fricción que pueden desarrollar.

Los micropilotes pueden ser hechos in situ o compuestos. Los in situ, son de hormigón con un refuerzo longitudinal de acero en toda su longitud. El hormigón puede ser reemplazado por mortero de cemento. Su sección mínima es de 150 mm (DIN 4128, 1983).

Los micropilotes compuestos tienen un elemento estructural portante prefabricado de hormigón armado o de acero en toda su longitud. El elemento estructural es introducido en una perforación en el suelo o introducido en el suelo con la ayuda de otros elementos. En el proceso, un grout o lechada de cemento rodea al elemento estructural en toda su longitud en el suelo. Los esfuerzos son transmitidos a través de la adherencia del elemento estructural al grout en toda o parte de la longitud del micropilote. Su diámetro mínimo es de 100 mm. (DIN 4128, 1983).

ANTECEDENTES

La tecnología de los micropilotes fue introducida en Italia en 1.952 por la empresa especialista en fundaciones Fondedile, bajo la dirección técnica del Dr. Fernando Lizzi. Estos pilotes menores que los permitidos por los códigos de la época fueron llamados "palo radice" y fueron concebidos como un método para socalzar edificios históricos y monumentos.

Los primeros micropilotes fueron construidos de 100 mm de diámetro y fueron ensayados a cargas de 400 kN sin registros de fallas en la interfase grout-suelo.(Bruce et al. 1996)

En 1962, Fondedile introdujo los micropilotes en Inglaterra para el socalzado de edificios históricos y en la misma década fueron introducidos en Alemania, para alcanzar en la década de los 80' una amplia difusión y aplicación, siendo hoy en día una alternativa valorada y aceptada por los ingenieros proyectistas. Actualmente en Estados Unidos se los utiliza en forma permanente para los denominados "sismic retrofit" de estructuras.

CONCEPTOS FUNDAMENTALES

Cuando uno habla de pilotes, uno hace primeramente la distinción entre pilotes que desplazan la masa del suelo (ej. hincados) y los que reemplazan al suelo (ej. perforados y hormigonados in situ). Los micropilotes, en general, entran dentro de la categoría de los que reemplazan al suelo.

Con los pilotes convencionales perforados y hormigonados in situ, en general, la carga es resistida por el hormigón en contrapartida del acero, y pequeñas secciones de los mismos están asociadas a pequeña capacidad estructural. Los micropilotes, en cambio, se distinguen por usar aceros de alta resistencia que ocupan hasta el 50% del volumen de la perforación y son usados como el principal elemento estructural y en algunos casos como el único. En este último caso, el grout sólo sirve como elemento de transferencia de carga entre el acero y el suelo.

Los métodos de perforación e inyección desarrollados para otras prácticas geotécnicas como los anclajes postensados inyectados, permiten la generación de altos valores de fricción en la interfase grout/suelo a lo largo del perímetro del micropilote y su ejecución en todo tipo de suelo, natural y artificial, con mínima vibración, ruido y cualquier ángulo de inclinación.

La capacidad de carga del micropilote por punta no es significante dado los pequeños diámetros de los mismos y, generalmente, no es tenida en cuenta. Dado que su capacidad de carga es fundamentalmente de fricción, las deformaciones necesarias para desarrollarlas son muy pequeñas. El rango de diámetros práctico va desde los 100 mm a los 300 mm, con longitudes de 10.0 m a 30.0 metros y sus capacidades de carga habituales van de los 300 kN hasta los 1.000 kN, habiendo registros de cargas de 5.000 kN. Los micropilotes trabajan fundamentalmente bajo cargas axiales tanto de compresión como de tracción.

Podemos resumir a un micropilote de la siguiente manera: pilote perforado de pequeño diámetro (menor a 300 mm), compuesto por mortero o grout inyectado, y teniendo alguna forma de refuerzo de acero para resistir una alta proporción de la carga de diseño. La carga es principalmente e inicialmente tomada por el refuerzo de acero y transferida vía el grout al suelo/roca circundante, por altos valores de fricción con una componente mínima de capacidad de carga por punta.

CLASIFICACION DE LOS MICROPILOTES

Michel Bustamante (1986) describe al micropilote inyectado como una armadura metálica formada por tubos o barras, introducida mediante una perforación de pequeño diámetro y sellada al terreno con inyecciones de lechada o de mortero a presión más o menos elevada.

La clasificación dada por Bustamante para los micropilotes esta basada en los procedimientos de inyección:

a) Inyección Repetitiva y Selectiva (IRS)

Pertenecen a esta todos los micropilotes sellados en el suelo mediante la introducción de un doble obturador en el tubo manguito que permite forzar la lechada ya fraguada o endurecida de la primera inyección, en la formación a nivel del maguito elegido (selectividad) y de repetir la operación, en principio varias veces (repetividad).

b) Inyección Global Unitaria (IGU)

Pertenecen a este grupo los micropilotes que contengan o no tubos manguito, pero para los cuales la inyección de lechada se fuerza a presión en la formación, en el curso de la extracción de la entubación o se efectúa a partir de la cabeza del anclaje, partiendo de un simple obturador o a partir de un simple flexible empalmado directamente a la bomba. Con este procedimiento la inyección se realiza en un solo paso, sin posibilidad de reinyección.

La clasificación aceptada por la Federal Highway Administration (FHWA) de los mismos, esta basada actualmente en dos criterios: la filosofía de su comportamiento (concepto de diseño) y el método de inyección.

Los pasos de ejecución de un micropilote son en general los siguientes:

1 - Perforación.
2 - Instalación del refuerzo de acero.
3 - Colocación e inyección a presión del grout a medida que se retira la tubería de perforación (casing).

No hay duda que el método y técnica de perforación afecta la magnitud de la fricción grout/suelo que puede ser movilizada, pero es practica conocida que el método de inyección es generalmente la más sensitiva en el desarrollo final de la fricción grout/suelo.

MICROPILOTES INYECTADOS AUTOPERFORANTES ISCHEBECK TITAN

En el caso del micropilote inyectado autoperforante Titan de la firma Ischebeck, la armadura misma del micropilote constituye la barra de perforación e inyección. Esta es una característica fundamental, que asociada a la alta calidad de los elementos componentes del sistema (barras, acoples, bits, etc.) resulta en una solución de alta velocidad en terreno.

Los micropilotes Titan están compuestos por barras huecas con rosca externa continua en toda su longitud. La longitud de fabricación de estas barras es de 3.0 metros, y se empalman mediante manguitos roscados hembra-hembra, siendo siempre posible empalmar barras hasta alcanzar las longitudes totales deseadas, cortándose las barras en caso de ser necesario.

La perforación con barras Titan puede ser rotativa pura o por rotopercución en cabeza, eligiéndose la broca de perforación según las condiciones del terreno (fig. 1). Como la lechada de cemento cumple la función de fluido de perforación, se inyecta durante todo momento mientras se perfora, retornando gran parte de la suspensión por el espacio anular que queda entre la barra y suelo.

Por el método de perforación, en el cual la barra penetra a rotopercución, en el suelo se produce un desplazamiento y reemplazo, desplazamiento sobre todo en suelos blandos. Teniendo en cuenta una cantidad importante de ensayos de carga realizados, podemos decir que las fricciones que alcanza este tipo de micropilote corresponde a una intermedia entre la IGU y la de IRS de las indicadas por el trabajo de Bustamante.

En la práctica se utilizan las barras 30/16, 30/11 y 40/16 como anclajes o nails y las barras 40/16 a 103/78 se utilizan como micropilotes (tabla I).

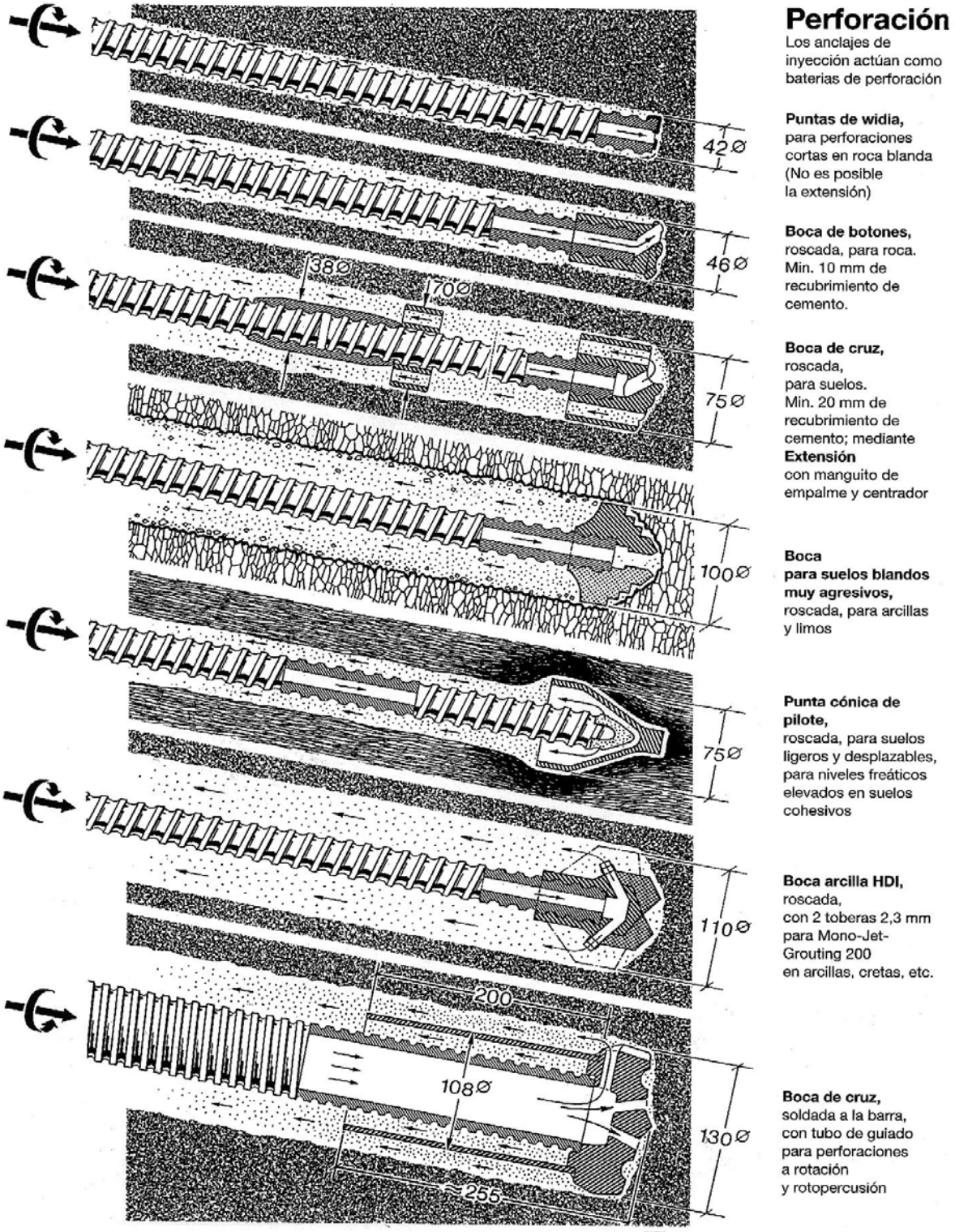


Figura 1. Perforación con diferentes brocas según condiciones del terreno

Durabilidad

Habitualmente las cargas de los micropilotes son de compresión pero existen configuraciones y/o estados de cargas que hacen que los micropilotes estén solicitados con esfuerzos de tracción o de tracción y compresión según el estado.

En cuanto a la durabilidad del micropilote, la lechada de cemento que rodea a la barra (colocada con espaciadores para centrarlo en la perforación) le brinda una protección similar a la de una barra de hormigón armado, esto es gracias a que la barra Ischebeck Titan posee una cualidad excepcional, pues las características de su hilo continuo hacen que se produzca una distribución y limitación de las fisuras (microfisuración, fotogr. 1) que garantiza la vida útil del elemento.

El draft de la norma europea CEN/TC288 WG8/N 2 E "Execution of special geotechnical work: micropiles" indica que para los micropilotes con refuerzos de acero de baja resistencia (< 560 Mpa) no se deben tomar precauciones cuando el recubrimiento (de grout, mortero u hormigón) es de por lo menos 30 mm para las barras comprimidas y de 50 mm para las traccionadas.

También podemos citar la evaluación realizada por Mr. S. Beirne-Lewis, respecto de la protección anticorrosiva del anclaje/micropilote Titan, para su utilización según la norma BS 8081 (British Standard) para anclajes permanentes valiéndose del concepto de microfisuración, siendo estos sus comentarios:

La limitación del ancho de las fisuras cuerpo de grout inyectado provee una protección para el acero y los ensayos realizados en el LGA Instituto Geotécnico de la Universidad de Munich establecieron por ensayos extensivos que la geometría del hilo continuo de la barra Ischebeck Titan controla completamente la fisuración del cuerpo de inyección.

Cuando las barras con hilo continuo Titan son cargadas al 125% de su carga de servicio de tracción, todas las microfisuras que aparecen en el grout, permanecen debajo de 0.1 mm.

Fotografia 1. Detalle de la barra con hilo continuo y la fisuración uniforme en el cuerpo del grout
Teniendo en cuenta los antecedentes presentados podemos concluir que las barras Titan poseen una protección anticorrosiva intrínseca asociada a su diseño y método de ejecución.

DISEÑO DE LOS MICROPILOTES

Capacidad de carga interna

La capacidad de carga interna del micropilote esta dada por la falla de los materiales con los cuales el micropilote esta constituido. En el caso de los micropilotes Titan esta está dada por la capacidad de carga de la barra de acero.

TABLA I.
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS MICROPILOTES

Tipo de barra	**TITAN 30/11**	**TITAN 40/16**	**TITAN 52/26**	**TITAN 73/53**	**TITAN 103/78**
Diámetro exterior - interior nominal [mm]	30 - 11	40 – 16	52 – 26	73 – 53	103 - 78
Carga última [kN]	320	660	929	1160	1950
Carga de fluencia [kN]	260	525	730	970	1570
Tensión $T_{0,2}$ de fluencia [N/mm^2]	580	590	550	590	500
Area de la sección [mm^2]	446	879	1337	1631	3146
Momento de Inercia [cm ^{4}]	2,24	8,98	25,6	78,5	317
Peso [kg/ml]	3,5	6,9	10,5	12,8	24,7

Los coeficientes de seguridad para el elemento portante de acero según la DIN 4125 son:

η_{acero} =1,75 para el caso de carga 1 según DIN 1054 (cargas constantes y vivas de regular ocurrencia, incluyendo al viento)

η_{acero} =1,50 para el caso de carga 2 según DIN 1054 (a parte de las del caso 1, cargas vivas simultáneas pero no de ocurrencia regular y cargas que ocurren sólo durante el período de construcción)

Dado que los micropilotes son esbeltos, existe la posibilidad del pandeo de los mismos, pero esto está restringido sólo a suelos de pobrísima calidad. De acuerdo a la norma DIN 4128, sólo cuando la resistencia al corte de un suelo cohesivo no drenado sea menor a 10 kN/m^2 se debe proveer evidencia de seguridad al pandeo para la barra que no esta soportada lateralmente. Para estos casos una solución puede consistir en encamisar con un tubo de acero el micropilote en la potencia del estrato blando.

Capacidad de carga externa

La capacidad de carga externa del micropilote esta dada por la falla del suelo que soporta al micropilote. En este punto lo que se debe diseñar es la longitud del bulbo del micropilote, adecuada para transferir la carga desde el elemento estructural al suelo.

Para el diseño de la longitud del bulbo se utiliza el trabajo realizado por Bustamante, el cual correlaciona los resultados de los sondajes SPT (números de golpes) con la fricción unitaria última disponible para cada tipo de suelo.

De las figuras 1 y 2 podemos extraer la resistencia unitaria última del suelo q_s $[kN/m^2]$.

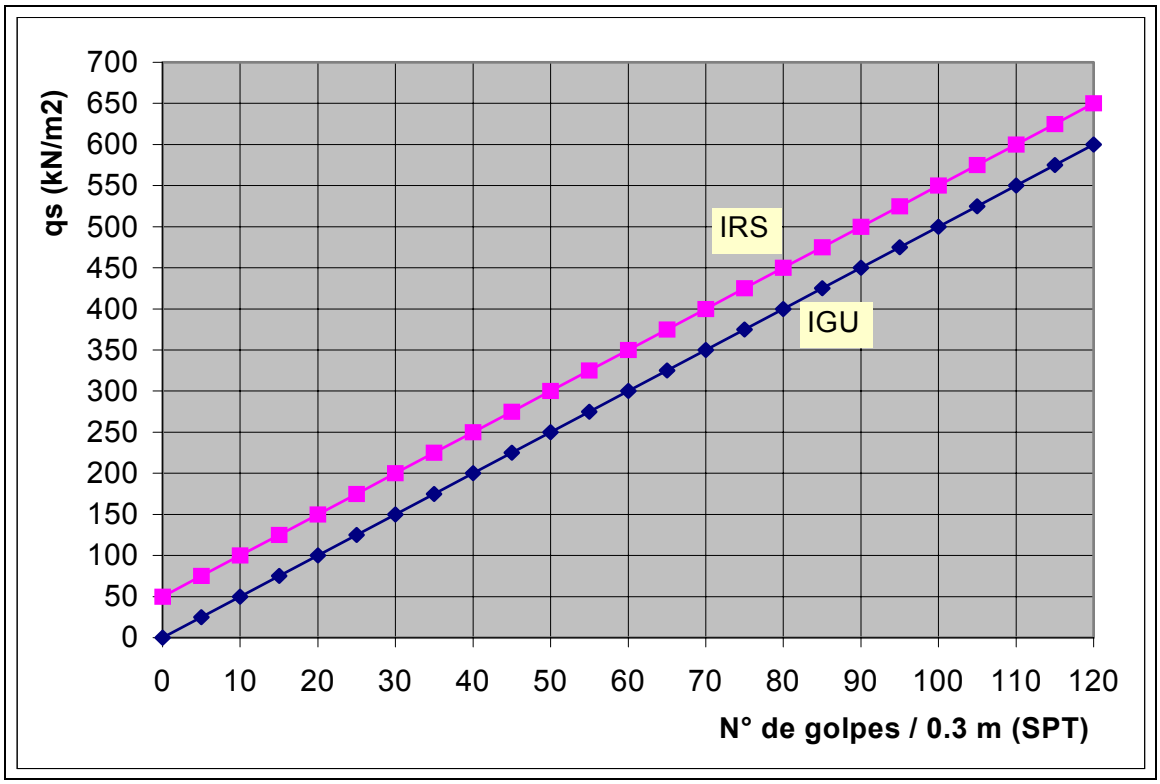


Figura 1. Correlación propuesta por Bustamante para la fricción unitaria en arenas y gravas.

Para obtener la longitud necesaria de un micropilote se calculará

$$N_{fadm} \geq \frac{1}{\eta_f} \sum_{i=1}^{n} \Delta l_i \cdot \pi \cdot \phi_b \cdot q_s \text{ (Ecuación 1)}$$

$$L_{nec} = \sum_{i=1}^{n} \Delta l_i \text{ (Ecuación 2)}$$

siendo:

N_{fadm} = carga admisible por fricción del micropilote.

η_f = coeficiente de seguridad para la fricción (DIN 4128)

Δl_i = longitud del tramo i del micropilote a lo largo del cual se tiene N (SPT) aproximadamente constante y por lo tanto q_s aprox. constante también.

ϕ_b = diámetro promedio del bulbo inyectado (1,2 a 2,0 veces el diámetro de la broca de perforación, dependiendo del tipo de suelo).

q_s = fricción unitaria última en el fuste del micropilote (contacto bulbo suelo).

L_{nec} = longitud necesaria por fricción del micropilote, según diseño.

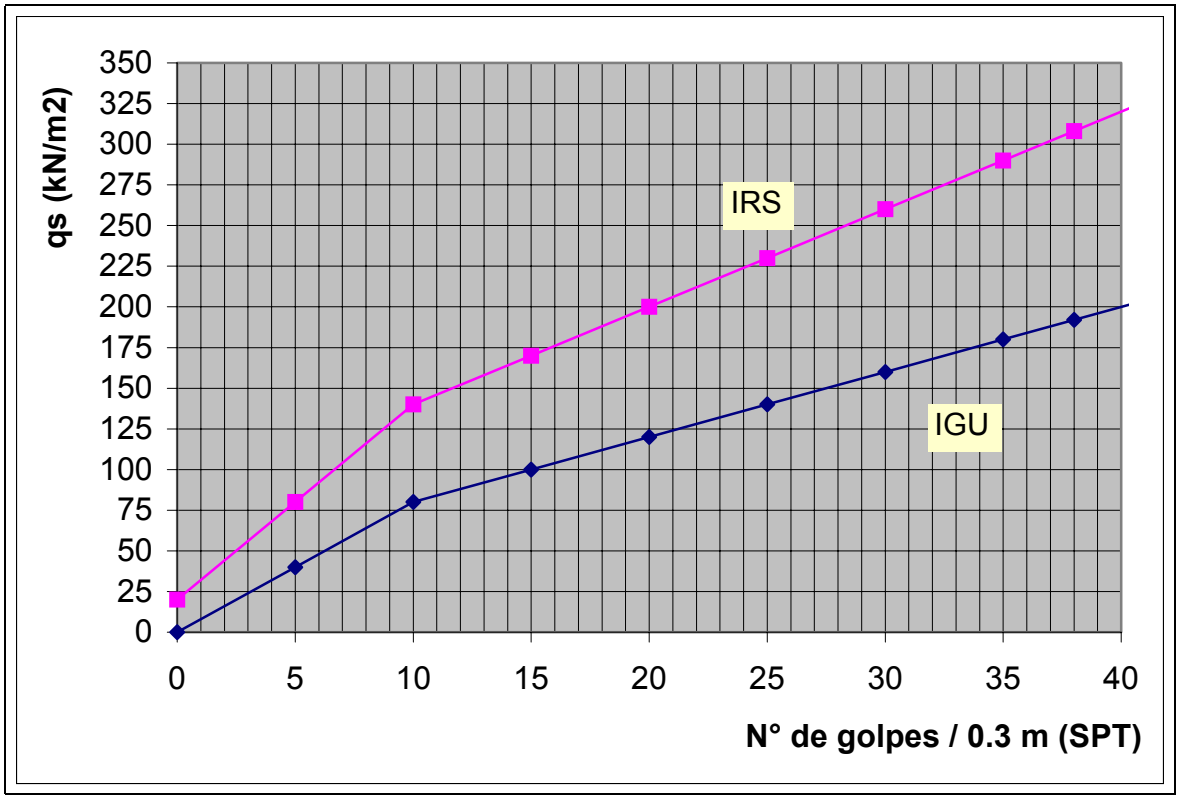


Figura 2. Correlación propuesta por Bustamante para la fricción unitaria en arcillas y limos.

Los coeficientes de seguridad para la fricción fijados por la norma DIN 4128 son

$\eta_f = 2.00$ para micropilotes comprimidos, y traccionados hasta un ángulo de inclinación de 45° respecto de la vertical, para el caso de carga 1 según DIN 1054 (cargas constantes y vivas de regular ocurrencia, incluyendo al viento)

$\eta_f = 1.75$ para micropilotes comprimidos, y traccionados hasta un ángulo de inclinación de 45° respecto de la vertical, para el caso de carga 2 según DIN 1054 (a parte de las del caso 1, cargas vivas simultáneas pero no de ocurrencia regular y cargas que ocurren sólo durante el período de construcción)

Adicionalmente a esta longitud, se debe estudiar la unión micropilote estructura, donde generalmente se construye un encepado. Se debe calcular la longitud de anclaje del micropilote como si fuese una barra de hormigón armado (del lado de la seguridad por el hilo continuo del Titan), y en caso de ser excesiva su dimensión, se utiliza una placa con doble tuerca para realizar un anclaje mecánico, debiéndose en este caso verificar el punzonado de la cepa.

CASOS DE APLICACIONES EN PUENTES

En Chile, la tecnología de los micropilotes fue introducida por Pilotes Terratest S.A. en el año 1.996, habiéndose ejecutado hasta el presente más de 1.600 unidades, más de 15.000 metros lineales y más de 15 ensayos de carga, para diferentes usos.

La mayor ventaja de los micropilotes es su pequeño diámetro de perforación. Lo cual permite su construcción con equipos menores a los tradicionales de los pilotes y en todas las condiciones de suelo. El procedimiento de perforación e inyección para la construcción del micropilote introduce menores vibraciones y reduce los efectos adversos en las estructuras vecinas, comparadas con las técnicas de construcción de los pilotes.

Son ideales para fundaciones de puentes con dificultad de accesos para equipos grandes, con restricción de altura, pobres condiciones del suelo, o entornos sensitivos a vibraciones o ruidos, construcciones sensitivas a asentamientos o cerca de otras existentes y para refuerzo/rehabilitación de estructuras.

F. Lizzi menciona en su artículo la utilización de micropilotes para la rehabilitación de puentes históricos a los siguientes casos:

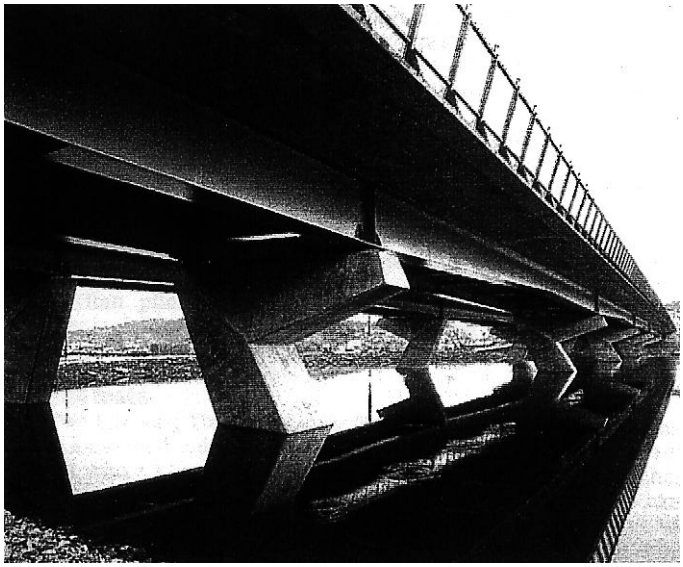
Tre Archi Bridge (siglo XVII), Venecia, Italia. Debido a serios asentamientos sufridos, se había decidido demolerlo, sin embargo fue rehabilitado utilizando micropilotes perforados a través de la estructura del puente.

St. Mary's Bridge (siglo XV), Derby, R.U. La corriente socavó sus dos pilas centrales, produciéndose asentamientos que requerían de un refuerzo de la estructura. Se rellenaron las cavidades y se colocaron micropilotes desde el mismo puente, a través de la mampostería, que penetraron 12 metros en la arcilla.

Proyecto: Värby Bridge (Suecia, 1996)

El Värby Bridge sobre la ruta E4, aproximadamente a 30 km al sur de Estocolmo, cruza el Lago Målaren con un largo de 250 metros, consistiendo en dos puentes paralelos separados unos pocos metros, soportando cada puente tres líneas de trafico (Sture E., 1997). Los 250 metros descansan en siete soportes, estando el puente original (de cuatro líneas) fundado sobre un relleno de rocas.

El suelo es de origen glacial y consiste en arcillas blandas de espesores de 5 a 15 metros que descansan en arenas y gravas arenosas y la roca fue encontrada a 50 metros en los extremos y 100 metros en el medio del cruce. El suelo fue fuertemente influenciado por dragados y rellenos previos.



Fotografía 2. Vista general del puente Vårby.

Se analizaron varias alternativas de fundación, incluyendo pilotes hincados y pilotes de acero perforados con una combinación de jet-grouting para su anclaje, pero se optó por la de micropilotes como la mejor alternativa, la cual consistía en los Titan 103/78 encamisados a través del enrocado y arcillas blandas, y anclados en las arenas y gravas arenosas..

Se ensayaron dos micropilotes en cada cepa a 1.500 kN, usando cuatro micropilotes cercanos como reacción. Los asentamientos registrados para los 800 kN variaron entre 8 y 14 mm, reflejando principalmente las variaciones de profundidad de las arenas y gravas.

El puente Vårby fue fundado exitosamente con micropilotes Titan 103/78, con una carga de diseño de 830 kN, anclados en arenas y gravas glaciales, utilizando 34 micropilotes por cepa de los cuales 32 tenían una inclinación 5:1. La longitud de los micropilotes era variable en función del enrocado y arcillas, debiéndose anclar en una longitud estimada de 15 metros.

Proyecto: Paso Inferior Camilo Olavarría (Chile, 1999)

En la Ilustre Municipalidad de Coronel, en las fundaciones del Paso Inferior Camilo Olavarría fue incorporada la tecnología de micropilotes inyectados para su resolución, utilizando los autoperforantes Ischebeck Titan 73/53, con una capacidad de carga de diseño estática de 554 kN y 646 kN sísmica.

El paso inferior es de un tramo en esviaje con una longitud de 15.20 m y un ancho de 16.00 m, siendo su estructura un marco rígido de 5.20 m de altura de diseño. El suelo de fundación está compuesto por arenas limpias medias de compacidad media a alta, determinándose el nivel freático a la cota –2.62 NTN.

En el proyecto original, la fundación estaba resuelta con 8 pilotes perforados in situ de 1.0 m de diámetro de hormigón armado de 8.0 m de longitud.

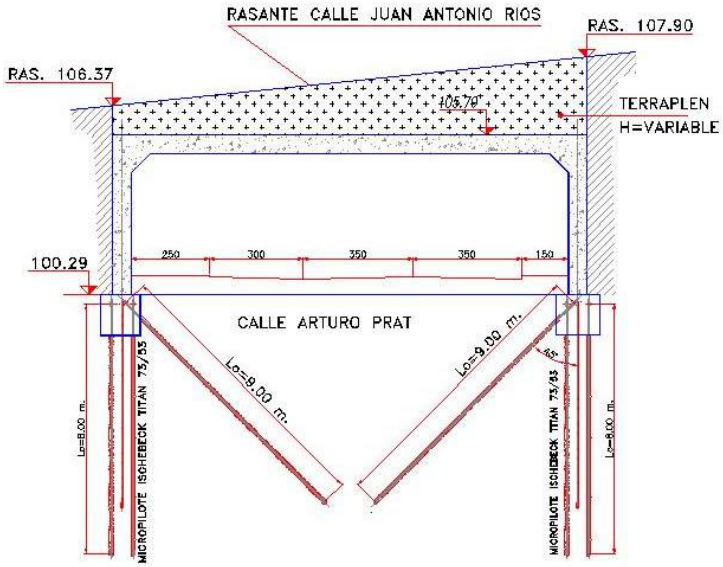


Figura 3. Sección transversal del paso inferior Camilo Olavarría

Los micropilotes se diseñaron para cargas predominantes de compresión, con longitudes entre los 8.0 y 9.0 metros, colocándose micropilotes inclinados en ambas direcciones, para tomar los esfuerzos de corte de la estructura.

El anclaje de los micropilotes en la cepa se resolvió con un anclaje mecánico, formado por tuerca, placa y contratuerca, todos elementos del sistema Titan.

La obra tuvo una duración efectiva neta de 3 días, donde se ejecutaron 36 micropilotes (aprox. 300 ml).

CONCLUSIONES

Aquí se ha presentado la tecnología de los micropilotes inyectados como alternativa de fundación para puentes, la cual ya es de aplicación habitual en los países desarrollados, esperando que atraiga el interés de los proyectistas para que lo contemplen dentro de sus herramientas habituales de trabajo.

Por último, auguramos un futuro promisorio a la utilización de micropilotes como alternativa de fundación de estructuras en general, dada las excelentes perfomances por ellos demostradas dentro del terreno de las fundaciones especiales.

REFERENCIAS

ASCE (1997). "Micropiles" Ground Improvement, Ground Reinforcement, Ground Treatment. Geotechnical special publication No 69.

Bustamante, M. (1986), "Un método para el cálculo de los anclajes y los micropilotes inyectados", Boletín de la Sociedad Española de Mecánica del Suelo y Cimentaciones.

Bruce, D.A. (1994). Small diameter cast-in-place elements for load bearing and in situ earth reinforcement." Ground Control and Improvement. Capítulo 6. John Wiley and Sons.

Bruce and Juran (1996) "Drilled and grouted Micropiles: State-of-Practice Review" Final Report. Publication Nos. FHWA-RD-96-016/9.

Comisión de ensayos en laboratorio y campo, ISSMFE, (1983), "Axiale Pfahl-Probebelastung – Teil 1: Statische Belastung – Empfehlungen für die Durchfürung (4. Vorschlag)

DIN 4128, (1983), Micropilotes inyectados.

DIN 4125, (1990), Anclajes inyectados en suelo y rocas.

Lizzi, F. (1981) "The Static Restoration of Monuments" Sagep. Genova.

Lizzi, F. (1983) "Pali radice (root piles) and reticulated pali radice".

Mascardi, C. A. (1982) "Design criteria and perfomance of micropiles" Symposioum on Soil and Rock Improvement Techniques including Geotextiles, Reinforced Earth and Modern Piling Methods. Bangkok. Paper D3.

Sture Eresund, (1997) "Titan piles supporting Swedish motorway bridge", Ground Engineering.