

## **ANCLAJES Y MICROPILOTES INYECTADOS ISCHEBECK UN CASO DE APLICACIÓN PRÁCTICA**

**Aldo Daniel Guzmán Giuliani**  
Ing. Civil (UBA - Arg.)  
Master en Geotécnia (Univ. de Hannover - Alemania)  
Gerente Técnico de Pilotes s.a.

### **RESUMEN**

Hoy existen en el mundo numerosos sistemas de anclajes y micropilotes. Pocos de ellos en cambio reúnen la característica de que el tensor mismo del anclaje o la armadura misma del micropilote constituyan la barra de perforación e inyección.

Los anclajes y micropilotes Ischebeck se destacan por esta característica fundamental, lo que sumado a la alta calidad de los elementos componentes del sistema (barras, acoples, bits, etc), resulta en una solución de alta velocidad de ejecución en terreno.

En este trabajo se describe este sistema de anclajes y micropilotes, incluyendo su rango de aplicación y se ejemplifica con un caso de aplicación práctica para fundar la ampliación de una estructura industrial con acceso restringido para grandes máquinas de fundaciones.

En el marco de este trabajo, realizado en Octubre de 1996 en la fábrica CMPC en Laja, se llevó a cabo una prueba de carga estática a tracción de un micropilote Ischebeck TITAN 73/53 hasta 831 kN. En este ensayo fué posible comprobar la buena aproximación del método utilizado para el diseño y la baja deformación de los micropilotes inyectados para cargas de servicio.

### **DESCRIPCION DEL SISTEMA Y SUS COMPONENTES**

Los anclajes y micropilotes Ischebeck están compuestos por barras huecas (o tubos) con rosca externa continua en toda su longitud. La longitud de fabricación de estas barras es de 2, 3 ó 4 m. Al empalmarse mediante manguitos roscados hembra-hembra, siempre es posible acoplar las barras hasta alcanzar las longitudes totales deseadas. También se pueden cortar las barras en cualquier punto para agregar tramos de longitudes especiales, debido a que la rosca es continua.

Hasta aquí el sistema tiene ventajas similares a otros conocidos en el mercado, pero donde se marca la primera gran diferencia es en el hecho de que las barras son huecas y diseñadas para ser utilizadas como barras de perforación.

Esto es posible gracias a los siguientes elementos (Fig 1):

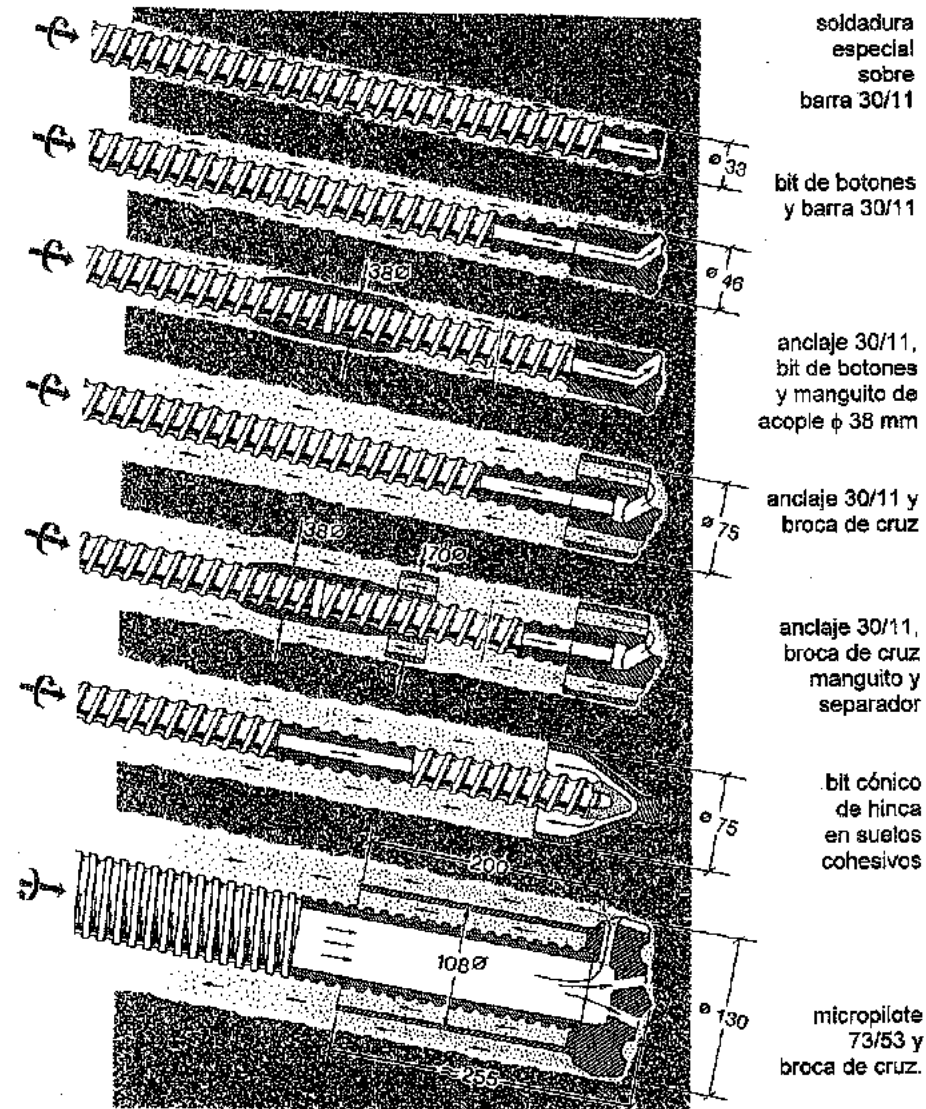


Figura 1. Perforación con diferentes brocas según las condiciones del terreno.

- brocas especiales que se adaptan al tipo de suelo o roca a perforar,
- inyección permanente de lechada de cemento a través de las mismas barras. Esta lechada (relación a/c = 1,00 a 0,5 - variable durante la perforación) cumple la función de:

- fluído de perforación, extrayendo el detritus;
  - fluído estabilizante de las paredes de la perforación y
  - al fraguar, forma el bulbo inyectado que recubre la barra de acero, protegiéndola de la corrosión y permitiendo transferir la carga axial del anclaje o micropilote mediante la fricción lateral al suelo circundante,
- cabezales de inyección especiales, los cuales permiten inyectar la lechada a altas presiones mientras las barras giran durante la perforación

La perforación con barras Ischebeck puede ser rotativa pura o por rotoperCUSión en cabeza. Como la lechada de cemento cumple la función de fluído de perforación, se inyecta durante todo momento mientras se perfora, retornando gran parte de la suspensión por el espacio anular que queda entre barra y suelo. Las presiones de inyección que se alcanzan son altas (valores máximos de 50 a 100 bares), lo cual en zonas blandas o poco compactas tiende a formar ensanches o bulbos que luego actúan como cuñas en el funcionamiento estructural del anclaje o micropilote. Por esta razón este tipo de micropilotes en la bibliografía especializada se lo denomina "pilote raíz" ("root-pile").

En la Tabla I se presentan las características principales de las barras de anclajes y micropilotes Ischebeck. Puede apreciarse que el rango de cargas admisibles varía de 100 a 900 kN, definiéndose las mismas a partir de las respectivas cargas de fluencia con un factor de seguridad 1,75.

En la práctica se utilizan las barras 30/16 a la 40/16 como anclajes o "nails", o sea trabajando a tracción. Las barras de mayores diámetros (52/26 a 103/78) se utilizan tanto para tracción (anclajes) como para micropilotes (compresión).

En cuanto al grado de protección anticorrosiva, las barras son provistas en bruto, con un recubrimiento combinado galvanizado + epoxy (combi-coated) o en casos extremos de acero inoxidable (INOX). El revestimiento epoxy y el inoxidable sólo se utilizan para anclajes por la condición de doble protección anticorrosiva.

#### CASO DE APLICACIÓN PRÁCTICA DE MICROPILOTES ISCHEBECK 73/53: Fundación de estructura industrial adyacente a máquinas en operación en proceso continuo (Proyecto PROFAL "A" - CMPC - Laja)

##### Pfanteo del problema de fundación a resolver

En la planta industrial de CMPC en Laja se procedió a ampliar la secadora Nro. 2 mediante una nueva instalación ubicada en gran parte por encima de la máquina existente. Esta nueva estructura está fundada en siete (7) bases mediante las cuales se transfieren cargas concentradas en X, Y y Z (reacciones de apoyo). El proyecto consideró el análisis de cinco (5) estados de carga, cuatro de los cuales son estados de carga sísmicos. Por las condiciones del subsuelo en la zona afectada por la nueva construcción (ver próximo apartado) se concluyó que debía fundarse la estructura sobre pilo-

**TABLA I. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LAS BARRAS ISCHEBECK**

Tipo de Barra	TITAN 30/16	TITAN 30/11	TITAN 40/16	TITAN 52/26	TITAN 73/53	TITAN 103/78
Diámetro ext. nominal [mm]	30	30	40	52	73	103
Diámetro interno [mm]	16	11	16	26	53	78
Carga última [kN]	220	320	660	929	1160	1950
Tensión $T_{0,2}$ de fluencia [ $N/mm^2$ ]	470	580	590	550	590	500
Carga de fluencia [kN]	180	260	525	730	970	1570
Carga admisible	100	150	300	400	554	900
Area sección [ $mm^2$ ]	382	446	879	1337	1631	3146
Momento de inercia [ $cm^4$ ]	2,37	2,24	8,98	25,6	78,5	317
Peso [kg/m]	3,0	3,5	6,9	10,5	12,8	24,7
rosca	izq	izq	izq	der	der	der
rosca /der.	izq	izq	izq	der	der	der

tes para eliminar asentamientos diferenciales importantes entre las bases que podrían haber afectado a los nuevos equipos. Todas las estructuras existentes en este sector habían sido fundadas anteriormente con pilotes tipo Franki. Una solución de este tipo, sin embargo, no era posible no sólo porque este tipo de pilote ya no se ejecuta normalmente en Chile, sino porque era prácticamente inviable el acceso de equipos grandes de pilotaje (p.e.: grúas con osciladoras, camiones con perforadoras por rotación o equipos Benoto). Además, las vibraciones provocadas por equipos de este tipo hubieran interferido con el normal funcionamiento de la planta, ya que algunas bases nuevas estaban ubicadas a sólo uno o dos metros de la máquina secadora en funcionamiento continuo.

**Características geotécnicas del suelo en el sector**

Se contaba con los siguientes antecedentes para la ejecución del proyecto:

1. Un (1) sondaje con cuchara normal y dos (2) penetraciones con cono dinámico. Todos estos ensayos ejecutados por el IDIEM en 1992.
2. Un (1) sondaje con cuchara normal ejecutado por el CESMEC en 1994

El tipo de suelo detectado en ambos sondajes oscila entre arenas finas limosas o arcillosas y limos arcillosos o arenosos (clasificación U.S.C.S. preponderantemente ML y SM). La napa freática se encontró al momento de los ensayos entre cotas -6,82 y -8,90 m.

En las figuras 2 a 5 se muestran el resultado del SPT y el porcentaje de finos a lo largo de la profundidad. La ubicación de estos sondajes no era exactamente dentro de la zona de influencia de la nueva estructura, sino en dos sectores adyacentes a cada lado de ésta, de manera que en principio podía suponerse que las condiciones a encontrar debían ser aproximadamente el promedio de las indicadas en los ensayos.

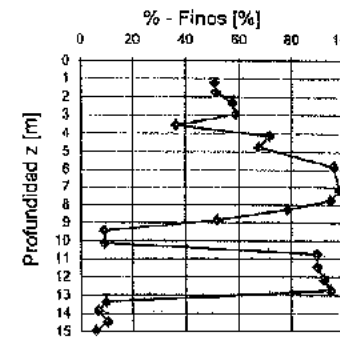


Figura 2 - Sondaje IDIEM

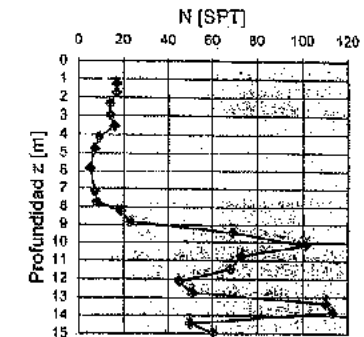


Figura 3 - Sondaje IDIEM

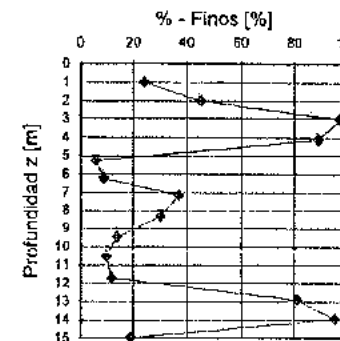


Figura 4 - Sondaje CESMEC

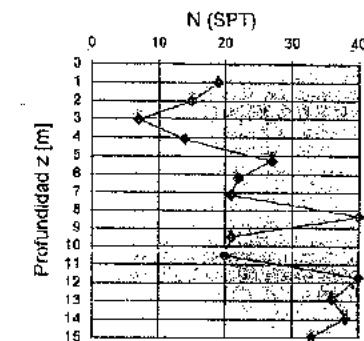


Figura 5 - Sondaje CESMEC

**Solución propuesta con micropilotes**

Dado que la geotécnica del sector hace necesaria una fundación profunda mediante pilotes y ante la imposibilidad de acceder con equipos de gran porte al

síto, se propuso utilizar un sistema de fundación mediante micropilotes inyectados Ischebeck Titán 73/53.

Para el diseño de los micropilotes debe tenerse en cuenta que éstos son elementos estructurales que pueden resistir esfuerzos axiales, pero su resistencia y rigidez a la flexión es prácticamente nula (ver p.e. DIN 4128, 9.4).

En este proyecto, las bases sólo tienen solicitaciones en X, Y y Z (sin momentos), pero ante la probable existencia de excentricidades en las cargas, ya sea por pequeñas diferencias en la posición real de los micropilotes o del montaje de la estructura, se eligió un sistema de fundación que permita absorber pequeños momentos con pequeñas variaciones de esfuerzos axiales en los micropilotes, pero sin generar flexiones en éstos.

Para lograr el equilibrio de un sólido en el espacio se necesitan restringir seis (6) grados de libertad. Dado que los micropilotes pueden modelarse estructuralmente como bielas que restringen sólo un grado de libertad al tomar únicamente cargas axiales, harían falta al menos seis micropilotes por base para que el sistema sea estable isostáticamente. En este proyecto se consideró la colaboración de la losa de radier para absorber eventuales momentos torsores  $M_z$  en las bases, bastando entonces con cinco (5) micropilotes para absorber las cargas  $F_x, F_y, F_z$  y momentos pequeños imprevistos  $M_x$  y  $M_y$ .

**Cálculo de las cargas sobre los micropilotes**

En la figura 6 se muestra el planteo básico utilizado para calcular las reacciones sobre los micropilotes  $P_i$  ante la acción de cargas externas  $F_x, F_y, F_z, M_x$  y  $M_y$  sobre una base.

La posición en el espacio de un micropilote genérico queda definida mediante las coordenadas  $x_i, y_i, z_i$  y los ángulos  $\alpha_i$  (ángulo de la proyección del micropilote

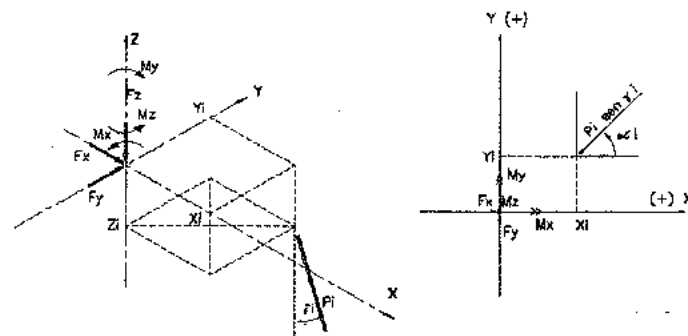


Figura 6. Cargas actuantes y posición geométrica de un micropilote

sobre el plano xy con respecto a x) y  $\gamma_i$  (ángulo del micropilote con respecto a la vertical). Planteando el equilibrio en todas las direcciones se obtienen las siguientes ecuaciones ( $n_p$  = número de micropilotes en la base):

$$F_x = \sum_{i=1}^{n_p} P_i \cdot \text{sen } \gamma_i \cdot \text{cos } \alpha_i \quad [1]$$

$$F_y = \sum_{i=1}^{n_p} P_i \cdot \text{sen } \gamma_i \cdot \text{sen } \alpha_i \quad [2]$$

$$F_z = \sum_{i=1}^{n_p} P_i \cdot \text{cos } \gamma_i \quad [3]$$

$$M_x = \sum_{i=1}^{n_p} (P_i \cdot \text{sen } \gamma_i \cdot \text{sen } \alpha_i \cdot z_i - P_i \cdot \text{cos } \gamma_i \cdot y_i) + rm_x \quad [4]$$

$$M_y = \sum_{i=1}^{n_p} (-P_i \cdot \text{sen } \gamma_i \cdot \text{cos } \alpha_i \cdot z_i + P_i \cdot \text{cos } \gamma_i \cdot x_i) + rm_y \quad [5]$$

$$M_z = \sum_{i=1}^{n_p} (P_i \cdot \text{sen } \gamma_i \cdot \text{sen } \alpha_i \cdot x_i - P_i \cdot \text{sen } \gamma_i \cdot \text{cos } \alpha_i \cdot y_i) + rm_z \quad [6]$$

donde  $rm_x, rm_y$  y  $rm_z$  son las reacciones en (eventuales) vínculos que restringen el giro alrededor de los ejes x, y, z respectivamente.

En este caso, al suponer un arriostamiento mediante la losa de radier impidiendo el giro en z, es:

$$rm_z \neq 0 \quad [7]$$

Por otro lado, para que el sistema de micropilotes que sostiene la base sea isostático, se debe cumplir que:

$$i + j = 6 \quad [8]$$

siendo:

- $i$  = número de micropilotes de la base
- $j$  = número de vínculos que restringen el giro (máximo = 3)

En caso de existir un mayor número de micropilotes, la solución ya no será estáticamente determinada, sino que para el cálculo de los esfuerzos deberán considerarse las rigideces de cada micropilote (Schenck, Smolczyk, Lächler 1992).

A partir de las ecuaciones [1] a [6] es posible plantear el problema en forma matricial como:

$$\{A_i\} \cdot \{P_i\} = \{F_i\} \quad [9]$$

siendo  $\{F_i\}$  el vector de carga:

$$\{F_i\} = \begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{Bmatrix} \quad [10]$$

y  $\{P_i\}$  es el vector incógnita con las reacciones de cada micropilote y la de los vínculos  $m_i$ .

Una vez planteado el problema estructural de acuerdo a este modelo, es muy sencillo traducirlo a un programa de computación. Para el proyecto CMPC-Laja se desarrolló un pequeño programa capaz de calcular las reacciones sobre los pilotes de un cabezal sobre el cual actúan fuerzas externas  $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y$  y  $M_z$ .

Introduciendo como datos estas cargas y la geometría de los micropilotes, el programa calcula las cargas  $\{P_i\}$ .

**Dimensionado (estimación de la longitud necesaria de bulbo inyectado)**

Los micropilotes transfieren su carga por fricción a lo largo del bulbo inyectado. La resistencia de punta, si bien existe, es despreciable por su bajo valor de movilización en servicio (debido a las bajas deformaciones de los micropilotes) y a la pequeña área de la punta en comparación con el fuste.

Para evaluar la resistencia unitaria a lo largo del fuste, se utilizó una correlación entre dicho valor y el número de golpes N (SPT) (Bustamante, 1986) para arenas y limos.

En la Fig. 7a y 7b pueden apreciarse las correlaciones propuestas por Bustamante para arenas / gravas y para limo / arcilla respectivamente. La resistencia unitaria  $q_s$  [MN/m<sup>2</sup>] debe interpretarse como la fricción lateral última unitaria entre el bulbo de cemento y el suelo. Para arenas se consideró la curva denominada SG 2 y para limos la AL 2 que corresponden a inyección global única, aunque el método en este caso probablemente arroje resultados intermedios entre la inyección global única y la repetitiva.

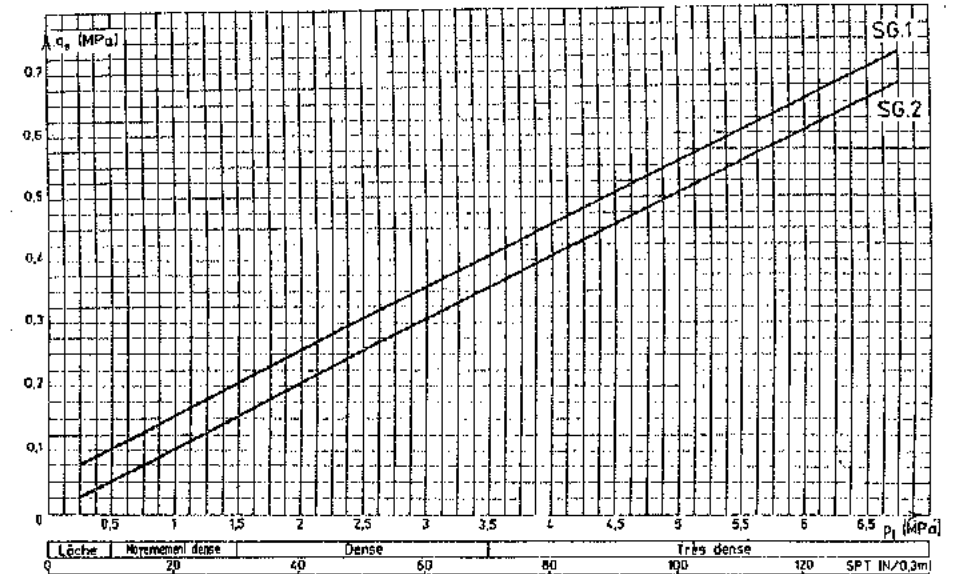


Figura 7a. Correlación propuesta por Bustamante para la fricción unitaria en arenas y gravas.

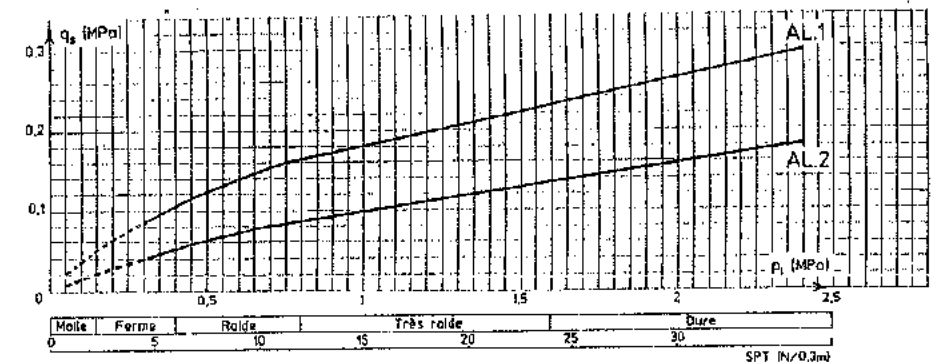


Figura 7b. Correlación propuesta por Bustamante para la fricción unitaria en limos y arcillas.

A partir de las cargas máximas calculadas para cada micropilote, se calcularon las cargas últimas multiplicando las primeras por el factor de seguridad (FS = 2).

Con las cargas últimas se determinó, mediante otro programa de computación, la longitud que debían tener los micropilotes para absorber dichas cargas, asignando una fricción última  $q_s$  variable en cada estrato de acuerdo al N (SPT) medido en los sondajes. Se adoptó en cada caso el sondaje más desfavorable para el dimensionado.

Así, se obtiene la longitud necesaria de un micropilote como aquella que cumple:

$$Q_u \geq \sum_{i=1}^n \Delta L_i \cdot \pi \cdot \phi_b \cdot q_s \quad [11]$$

$$L_{nec} = \sum_{i=1}^n \Delta L_i \quad [12]$$

siendo:

$Q_u$  = Carga última del micropilote [kN]

$\Delta L_i$  = 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.

$\phi_b$  = Diámetro promedio del bulbo inyectado = 1,20 a 2,50  $\phi_{broca\ perf.}$  [mm]  
 Valor adoptado en este proyecto  $\phi_b = 160$  mm, en base a experiencias en casos similares.

$q_s$  = Fricción unitaria última en el fuste del micropilote (contacto bulbo-suelo) [MN/m<sup>2</sup>]

**Prueba de carga sobre micropilote a tracción**

*Preparación del ensayo y objetivos del mismo*

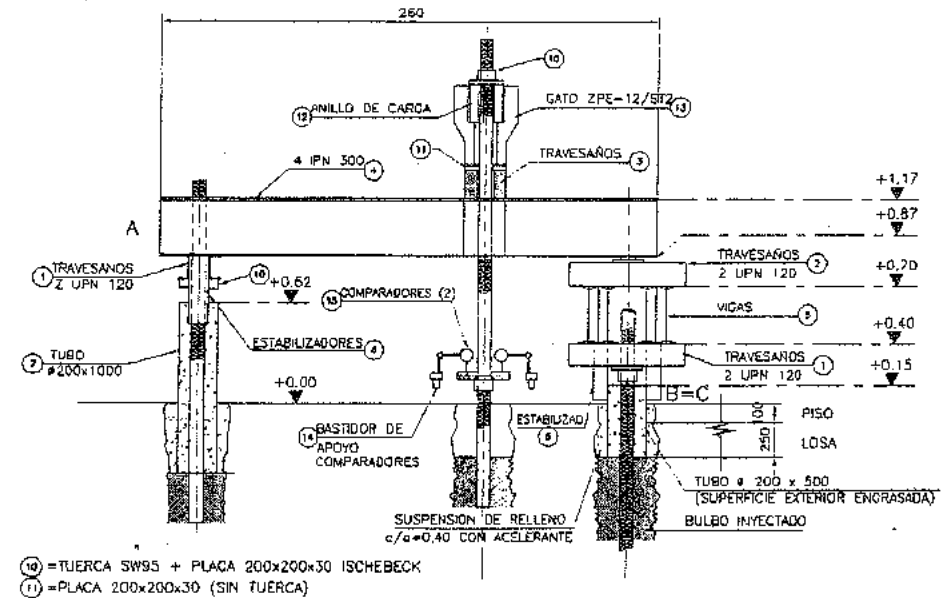
Para comprobar las hipótesis del diseño, particularmente en cuanto al dimensionado de la longitud necesaria de los micropilotes, se ejecutó un ensayo de carga a tracción sobre un micropilote vertical construido especialmente para ese fin.

La estructura de ensayo se muestra en la Fig. 8 y se diseñó colocando tres pilotes de reacción (compresión) en los vértices de un triángulo equilátero y en el centro del mismo el micropilote de prueba a traccionar.

Las ventajas de esta distribución son las siguientes:

- Se eliminan excentricidades constructivas de forma más eficiente que en el caso de estar los pilotes de reacción y ensayo en un mismo plano.

- Se reparte la carga de reacción (compresión) en tres pilotes y por lo tanto se disminuyen problemas de inestabilidad en éstos en el tramo no embebido en suelo.
- Se reducen las dimensiones de los elementos flexionados.



**PLANTA**

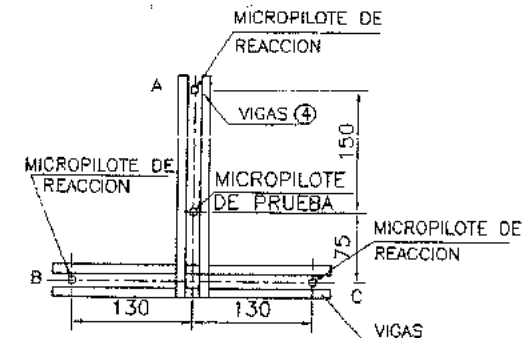


Figura 8. Estructura del ensayo de carga (Superior: vista, Inferior: planta)

La carga se aplicó mediante un gato hidráulico hueco que permite pasar la barra Ischebeck TITAN 73/53 a través del mismo. El manómetro se calibró conjuntamente con el conjunto gato-bomba.

La medición de las deformaciones axiales del micropilote de prueba se realizó mediante comparadores con diales que permitan lecturas de hasta 0,01 mm. Los comparadores fueron montados con base magnética a un bastidor o estructura auxiliar apoyada en forma independiente de la estructura cargada. Se colocaron dos comparadores en forma simétrica respecto al eje del micropilote, de modo de tomar el promedio de ambos como la lectura correcta.

La carga máxima de ensayo fué limitada únicamente por la necesaria seguridad contra falla del acero de la barra. La carga máxima admisible de la barra TITAN 73/53 es  $Q_{adm.} = 554$  kN. Como carga de ensayo se adoptó  $Q_L = 1,5 \times 554 = 831$  kN siendo la carga de la barra al límite del fluencia teórico  $T_{0,2} : Q_f = 970$  kN. Se cumple entonces que  $Q_L = 831$  kN  $< 0,9 \times 970 = 873$  kN. Esta última es una recomendación de la norma DIN 4125 para el tensado de anclajes.

La secuencia de carga se adoptó en base a las recomendaciones de la comisión "Ensayos de laboratorio y campo" del ISSMFE para pruebas de carga axiales estáticas sobre pilotes (ISSMFE, 1983).

Luego de aumentar la carga en cada escalón el valor  $\Delta Q = 104$  kN, ésta se mantiene constante durante 60 minutos. Si el crecimiento de las deformaciones en los últimos 20 minutos supera 0,10 mm, deberá alargarse el período de observación a carga constante en 20 minutos adicionales sucesivamente hasta obtener una desaceleración de las deformaciones por debajo del límite indicado.

De acuerdo al mismo criterio utilizado en el diseño, el micropilote de prueba se dimensionó para una carga admisible obtenida dividiendo la carga del ensayo por el factor de seguridad  $FS = 2$ . Lo mismo se hizo para los micropilotes de reacción, que estarían sometidos a su respectiva carga última al final del ensayo. Para estas cargas admisibles se calculó la longitud total necesaria  $L$  en cada caso (medida desde el nivel +0,00 = piso de la planta). En la Tabla II se muestra un resumen de los valores.

Así, el objetivo del ensayo era alcanzar la supuesta carga última del micropilote de prueba (o la última de los de reacción).

#### Resultados del ensayo de carga

El ensayo permitió comprobar la alta capacidad de carga que pueden alcanzar los micropilotes TITAN y los bajos asentamientos (o levantamientos en este caso) para cargas de servicio.

En la Fig. 9 se muestra la curva carga - deformación para el micropilote de prueba. En esta gráfica no se ha deducido la deformación elástica correspondiente al tramo libre de la barra desde la placa donde apoyan los

TABLA II. CARGAS DE ENSAYO, CARGAS DE DIMENSIONADO Y LONGITUD TOTAL DE LOS MICROPILOTES DE PRUEBA Y REACCIÓN

Micropilote	$Q_U$ [kN]	$Q_D$ [kN]	$L$ [m]
Prueba (tracción)	831	415	14,39
Reacción (compresión)	277	138	8,52

$L$  = Longitud necesaria de micropilote para obtener la carga admisible  $Q_D$  con seguridad  $FS = 2,00$  (calculada con el mismo criterio que para todos los micropilotes del proyecto).

comparadores hasta el comienzo del bulbo inyectado en el suelo. Siendo esta longitud de 45 cm puede calcularse la deformación elástica como:

$$\Delta s = \frac{P \cdot L}{E \cdot A} = \frac{P \cdot 450}{210 \cdot 1631} = 0,0013 \cdot P[\text{kN}]$$

lo que da 1,08 mm de deformación a restar para la carga máxima de 831 kN.

En la Fig. 10 se grafican para los diferentes escalones de carga las deformaciones a lo largo del tiempo, pudiendo apreciarse la estabilización de las deformaciones después de pasados los primeros 15 minutos.

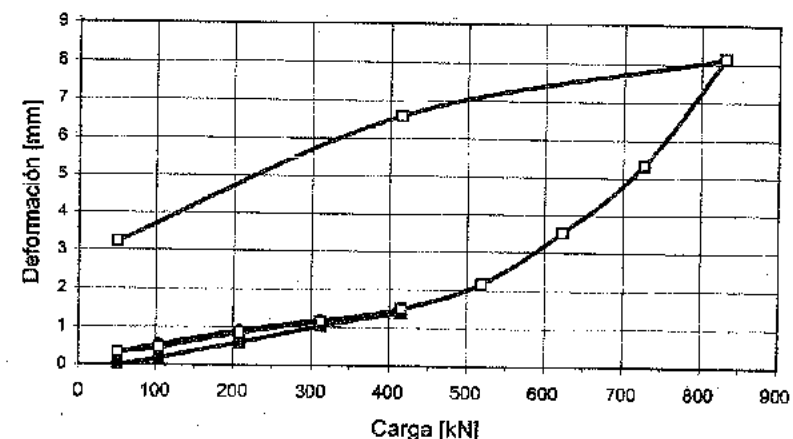


Figura 9. Curva carga - deformación