

CONTRIBUCIÓN AL ESTUDIO DE LOS MICROPILOTES TUBULARES INYECTADOS

RESUMEN

Este trabajo presenta algunos de los resultados del análisis teórico y experimental de 33 segmentos del fuste de micropilotes tubulares (sin vaina e inyección), sometidos a la compresión simple. Los segmentos son analizados en el régimen elástico y son estudiadas las influencias de los componentes en la resistencia de los micropilotes. Son presentadas expresiones para determinación de la carga de ruptura del fuste (P_R), determinadas a partir de estudios experimentales. Como consecuencia de los resultados de los ensayos, fue determinado el módulo de rigidez a la compresión (AE) de dos tipos de micropilotes y son hechas las comparaciones con los resultados teóricos.

Este estudio se completa con un análisis de prueba de carga por lo cual se verificó que en determinadas condiciones del conjunto “micropilote – subsuelo”, la aplicación de la teoría elástica aportó resultados comparables a los valores admisibles (P_{adm}) por la prueba de carga.

INTRODUCCIÓN

Se consideran micropilotes tubulares inyectados aquellos elementos de fundación en pilotes, encuadrados en el ítem 7.3.3.4, *Pilotes inyectados de pequeño diámetro* de la NBR 6122/1984, *Proyecto y Ejecución de Fundaciones* de la Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Resulta de la ejecución de un pre hueco en el subsuelo con diámetro entre 10,0 y 20,0 cm; instalación de tubo metálico con válvulas de inyección debidamente dispuestas a todo lo largo, inyección de vaina llenando el espacio anelar entre la pared del hueco y el tubo; inyección individual de las válvulas en fase de llenado del interior del tubo con herrajes complementarias y de conexión.

Para sus dimensiones como fundación, dos puntos deben ser verificados: capacidad estructural del fuste y largo de embutimiento necesario a la transferencia adecuada de la carga al subsuelo.

En face de su reducido diámetro, estos micropilotes trabajan predominantemente por atrito lateral, y alcanza importante papel, por tanto, la inyección de lechada de cemento bajo presión.

Los estudios realizados con micropilotes en estas condiciones se limitaron, en su mayoría, al campo geotécnico (1, 2, 3, 7, 8, 16, 17, 18).

En otros trabajos para pilotes de fundación convencionales, realizados en países europeos y en Brasil, se estudio el modo de transferencia de carga al suelo y la interacción “pilote – suelo” mereció atención de estudios teóricos y experimentales (4, 5). Los estudios geotécnicos también se dirigieron para intentar explicar la influencia de la inyección en el aumento de carga de los micropilotes en diferentes tipos de suelo (6, 16, 17).

De los estudios realizados en el Brasil, merecen destaque los trabajos realizados por la Agrupación de Geotecnia del Instituto Paulista de Tecnologia – IPT – (7, 8), en la falta de valores de los parámetros de inyección para utilización de la formulación en nuestros suelos, tornándose en difícil utilización. Resulta que la dimensión (largo) de embutimiento es actualmente determinada sobre la base de las experiencias anteriores de consultores y ejecutores, acumuladas en la práctica en la confección de anclajes postensadas inyectadas, para contenciones.

Desde el punto de vista de la resistencia estructural del fuste, los micropilotes compuestos por tubos metálicos se insertan en el contexto de los plotes mixtos “acero – concreto”. Estos componentes estructurales no tienen normalización específica en el Brasil. En el exterior, solamente en los últimos años han merecido tratamiento más detallado, principalmente en Inglaterra. La norma brasileña NBR 6122/1984 aborda el pilote mixto apenas genéricamente, y se limita al cálculo de los tubos revestidos con camisa metálica, donde él es considerado apenas en el estado límite último. En el contexto encima presentado, este trabajo presenta un análisis de algunos ensayos del fuste de micropilote sin vaina o inyección. Muestra peculiaridades que podrán ser interesantes para el estudio pormenorizado de estos elementos de fundación, y permitan evaluar el coeficiente de seguridad a la ruptura para una dada sección estructural propuesta.

Como veremos más adelante, el comportamiento estructural del fuste de los micropilotes tubulares, que tiene su espacio interno lleno de lechada de cemento común, ensayados durante siete días, presentó la contribución limitada de la nata debido a su bajo módulo de deformación en la gama de las deformaciones elásticas. Pesquisas que se utilizan de arenas bien graduadas y algunos aditivos como, por ejemplo, microsíllica, están siendo desarrolladas para el material que rellena el fuste. Con mejor compatibilidad entre los módulos de la argamasa de relleno y de acero, tendremos comportamiento superior, en los límites de la ley de Hooke. La presente pesquisa posibilita la existencia de este fenómeno y norteó su solución, en desarrollo, obteniéndose costos muy inferiores a las ventajas adicionadas.

1. LA RESISTENCIA DEL FUSTE DE LOS MICROPILOTES A LA COMPRESIÓN SIMPLE

Los ensayos tuvieron por objetivo investigar la resistencia de los segmentos de micropilotes en la compresión simple. En este contexto, se examinó la influencia, en el régimen elástico, de los tres componentes de los micropilotes en su resistencia.

Posteriormente, después del estudio de los gráficos tensiones x deformaciones (σ x ϵ) de estos componentes y de la observación de los gráficos (σ x ϵ) de cada segmento de micropilotes, fueron deducidas expresiones para la determinación de la carga de ruptura (P_R) de algunos tipos de micropilotes ensayados que son presentados en este trabajo.

Serán mostrados los resultados de doce cuerpos de prueba del conjunto de 33 ya ensayados.

1.1 Características geométricas y mecánicas de los micropilotes

Las características geométricas y mecánicas de los cuerpos de prueba se encuentran en las Tablas 1 y 2, y en el Diseño 1. Las resistencias medias de los componentes de los micropilotes se encuentran en la Tabla 2. Los segmentos de micropilotes fueron amoldados en las dependencias de la Este Engenharia, con la asesoría técnica de la Agrupación de Estructuras del IPT. En este trabajo, los micropilotes de 6 a 12 fueron rellenos con nata de cemento, con trazo de $a/c = 0,5$ (en peso). Los micropilotes 10 a 12 tenían armazón complementar de diámetro 25,0 mm y tensión de escoración media (f_y) igual a 557,3 Mpa (5.687 kgf/cm²); la ruptura de estas barras ocurrió en la carga de 866,3 Mpa (8.840 kgf/cm²), el acero era del tipo CA-50A.

De cada cuerpo de prueba fueron amoldados seis cuerpos de prueba 5 x 10 cm para la determinación de la resistencia a la compresión (f_{cn}) y el módulo de defor-

mación (E_n). Durante el período de cura, los cuerpos de prueba de la nata se quedaron sumergidos en el agua (Tabla 2).

1.2 Instrumentos y ensayos

1.2.1 Camisas Metálicas

En las camisas metálicas fueron instaladas bases de extensómetros mecánicos (del tipo Tensostast), sobre la soldadura, en la soldadura y debajo de la soldadura, en todos los segmentos de camisas metálicas o de micropilotes. Los extensómetros mecánicos tenían base de 100 mm y sensibilidad de 10×10^{-6} mm/mm (Diseño 2).

1.2.2 Armazón complementario y nata de cemento

Las bases de la armazón complementario de los micropilotes 10, 11 y 12, fueron instrumentadas con dos extensómetros eléctricos de resistencia. Estos extensómetros eran del tipo KFC-5-C1-11, cuya base de medida es de 5 mm. En los micropilotes 7, 8 y 9, que no tenían armazones complementarios, fueron instalados dos extensómetros eléctricos en la nata, del tipo KM-120-A2-11, cuya base de medida nominal es de 120 mm. La sensibilidad del conjunto extensométrico es de 10×10^{-6} mm/mm (Diseño 2).

1.2.3 Medidas para acortar

Antes de cada ensayo fueron instalados dos deflectómetros de sensibilidad igual a 10^{-2} mm para las medidas de los acortamientos totales de cada cuerpo de prueba.

1.2.4 Ensayos

Todos los cuerpos de prueba fueron ensayados según una misma sistemática. Después de centrar los cuerpos de prueba en la presna, éstos fueron cargados según incrementos de carga de 98 KN (10,0 tf) y fueron efectuadas algunas descargas para observar el comportamiento elástico. Entre cada nuevo incremento de carga, eran hechas las lecturas de todos los aparatos; el tiempo utilizado para la lectura de todos los aparatos fué cerca de tres minutos.

Los ensayos transcurrieron sin anomalía y visualmente todos los cuerpos de prueba se comportaron de forma semejante en la ruptura. Todos los ensayos de los segmentos de micropilotes fueron realizados cuando la nata llegaba a marcar entre los siete y diez días de cura.

2. ANALISIS DE LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN LA RESISTENCIA DEL FUSTE DE LOS MICROPILOTES

El modo de ruptura de los micropilotes se caracterizó por la plastificación localizada en el tercio central, seguida de la flexión hasta que los desplazamientos se tornaban visibles a simple vista y era agotada la capacidad resistente de los cuerpos de prueba. Lo mismo sucedió en todos los segmentos de micropilotes y en una carga inferior a la carga crítica (P_{cr}) de las camisas metálicas, aproximadamente 1.470 KN (150,0 tf). Las cargas de ruptura (P_R) de los micropilotes se encuentran en la Tabla 2.

2.1 Determinación de las parcelas de carga en los componentes de los micropilotes

El análisis elástico demostró buena concordancia entre los valores teóricos y experimentales. Las parcelas de carga en el régimen elástico fueron calculadas por las siguientes expresiones para los micropilotes con armazón complementaria:

$$\frac{P_{cam}}{P_{adm}} = \frac{1}{1 + \{E_n (1 - \alpha_2) + E_s \cdot \alpha_2\} \frac{A_s}{E_{cam}}} \quad (1)$$

$$\frac{P_n}{P_{adm}} = \frac{1}{1 + \left\{ E_{cam} \left(\frac{1}{\alpha_1 - \rho} \right) + E_s \cdot \left(\frac{\alpha_2}{1 - \alpha_2} \right) \right\} \frac{A_s}{E_n}} \quad (2)$$

$$\frac{P_s}{P_{adm}} = \frac{1}{1 + \left\{ E_n \left(\frac{1}{\alpha_2} - 1 \right) + \frac{E_{cam}}{\rho} \right\} \frac{A_s}{E_s}} \quad (3)$$

donde

$$\rho = \frac{A_s}{A_{cam}} \quad (4)$$

$$\alpha_1 = \frac{A_n}{A_{cam}} \quad (5)$$

$$\alpha_2 = \frac{A_s}{A_n} \quad (6)$$

- P_{cam} = Carga en la camisa metálica al inicio de la plasticidad del cuerpo de prueba.
- P_n = Carga en la nata al inicio de la plasticidad localizada del cuerpo de prueba.
- P_s = Carga en la armazón complementaria al inicio de la plasticidad localizada del cuerpo de prueba.
- P_{adm} = Carga de inicio de la plasticidad localizada del cuerpo de prueba.
- A_s = Área total de las armazones complementarias.
- A_n = Área de nata (u argamasa).
- A_{cam} = Área de camisa metálica.
- E_n = Módulo de deformación de la nata (o argamasa).
- E_s = Módulo de deformación de las armazones.
- E_{cam} = Módulo de deformación de la camisa.

Las comparaciones teóricas y experimentales se encuentran en la Tabla 3.

2.2 Influencia de la camisa metálica

Las camisas metálicas son las armazones principales de los micropilotes. La ruptura de los micropilotes es definida por el agotamiento de la capacidad de resistencia de las camisas metálicas.

Los valores experimentales medios de las relaciones P_{cam}/P_{adm} son:

- Micropilotes sin armazón complementaria: 87%
- Micropilote con armazón complementaria: 78%

2.3 Influencia de las armazones complementarias

Aunque exista la posibilidad de ser ejecutados sin armazón complementaria, los micropilotes con armazón complementaria aumentan su resistencia a la compresión, su flexión y su rigidez. Los valores experimentales medios de las relaciones P_s/P_{adm} son:

- Micropilotes con armazón de acero CA-50A: 23%

Las medidas de las deformaciones específicas efectuadas en las armazones complementarias, en los micropilotes constituídos de una barra de 25,0 mm CA-50A, revelaron que: próximo de la carga de ruptura (P_R) las tensiones en estas armazones son del orden de grandeza de la tensión de escoramento del acero (f_{ys}).

2.4 Influencia de la nata de cemento

La baja parcela de carga absorbida por la nata (o argamasa) debe ser acreditada al bajo módulo de deformación de la nata (E_n). Valores más altos de los módulos de deformación de la nata (o argamasa) resultarán en el aumento de la participación de estos componentes en la resistencia del conjunto.

Los valores experimentales medios de las relaciones P_n/P_{adm} son:

- Micropilotes sin armazón complementaria: 8%
- Micropilotes con armazón complementaria: 3%

Se aprecia, por tanto, una importante peculiaridad de los micropilotes metálicos tubulares reforzados con armazón complementaria; aunque el módulo de deformación de la nata (E_n) sea de apenas 4.500 Mpa (46.000 Kgf/cm²), posibilita el agotamiento de la capacidad resistente de las armazones complementarias y ésto sucede cuando ocurre el agotamiento de la camisa metálica. Evidentemente los valores más altos de E_m harán que el componente estructural resista a cargas más elevadas.

Aunque en el régimen elástico se tenga una pequeña cantidad de carga en la nata, los ensayos mostraron que en las proximidades de la ruptura aumenta la importancia de estos componentes, ya que después del proceso de plasticidad de la camisa metálica y el escoramento de las armazones se nota una reserva de resistencia en los cuerpos de pruebas.

2.5 Influencia de la soldadura en las camisas metálicas

Debido a las características de los ensayos laboratoriales que trataron los segmentos de micropilotes como pilares (fue movilizada apenas la resistencia de punta, en condiciones más rigurosas de lo que son encontradas usualmente en la práctica), las deformaciones específicas en la soldadura son mayores que las deformaciones específicas en la camisa metálica (ϵ_{cam}). Este factor no afectó las resistencias de las camisas

con soldadura intermediaria, la diferencia, en relación a las camisas sin soldadura es de 1%. Tabla 2.

Se verifica, por tanto, que los segmentos de micropilotes presentan resistencias elevadas en relación a su pequeño diámetro (de $\approx 9,0$ cm). Obsérvese que en las obras, las propias características constructivas aumentan considerablemente la sección transversal y existe la acción confinante del suelo aumentada sustancialmente por el proceso de inyección.

3 DETERMINACION DE LA CARGA DE RUPTURA (P_R) DE LOS SEGMENTOS DE LOS MICROPILOTES

El valor de la carga de ruptura de los segmentos de los micropilotes (fuste) se encuentran en la Tabla 2. Diferentes autores ya investigaron la resistencia de tubos metálicos rellenos con concreto o argamasa. Como resultado de estos estudios experimentales existen fórmulas en la literatura técnica que permiten el cálculo de carga admisible (P_{adm}) o la carga de ruptura (P_R). Estas fórmulas semi-empíricas son presentadas en algunas normas y su empleo es limitado por las características particulares de los componentes, y en todas existen limitaciones en cuanto a su uso.

3.1 Cargas de ruptura (P_R) obtenidas por medio de ensayo

En la Tabla 2 se encuentran valores de carga de ruptura de los segmentos de micropilotes (fuste) y de las camisas metálicas. Cada cuerpo de prueba es compuesto por dos segmentos soldados, Diseño 1. El estudio de las características mecánicas de los materiales componentes, permitió que fuera determinada una expresión para la carga de ruptura (P_R) de algunos segmentos de micropilotes ensayados.

3.1.1 Micropilotes sin armazón complementaria

Para los micropilotes constituídos apenas de nata y camisa metálica se tiene:

$$P_R = 0,95 f_{\gamma, cam} A_{cam} + 0,34 f_n A_n \quad (7)$$

3.1.2 Micropilotes con armazón complementaria

Para los micropilotes compuestos por camisa metálica, nata y armazón complementaria, se tiene:

$$P_R = 0,95 f_{\gamma, cam} \cdot A_{cam} + 0,54 f_n A_n + 0,82 f_{\gamma, s} A_s \quad (8)$$

Los parámetros usados en estas expresiones tienen los siguientes significados:

- A_{cam} = Área de la sección transversal de la camisa metálica
- A_n = Área de la sección transversal de la nata
- A_s = Área de la armazón complementaria
- $f_{\gamma, cam}$ = Tensión mínima de escoramento de las camisas metálicas
- f_n = Resistencia de la nata a la compresión simple
- $f_{\gamma, s}$ = Tensión mínima de escoramento de las barras de la armazón complementaria

Los estudios revelaron que estas expresiones no pueden ser usadas en caso que la armazón complementaria sea compuesta de barra o de cuerdas de acero de alta resistencia.

3.2 Determinación de la resistencia del micropilote (fuste) según la NBR 6122, del Agosto 1984

En el sub ítem 7.3.3.4.3 del ítem que trata de los pilotes inyectados de pequeño diámetro, se dice que el fuste deberá tener un factor de seguridad mínimo igual a dos en relación a la ruptura. En este caso, por la Tabla 2, las cargas admisibles (P_{adm}) para los segmentos de micropilotes ensayados son:

- Micropilotes apenas con nata: $P_{adm} = 256,4$ kN
- Micropilotes con armazón complementaria: $P_{adm} = 310,3$ kN

Se debe destacar que en las condiciones reales de utilización, pensándose apenas en términos de compresión simple, se infiere que esta recomendación, según la cual el factor de seguridad deba ser igual a dos, vale apenas en el tope de los micropilotes. Como ellos funcionan predominantemente por el atrito lateral desarrollado en la conexión “fuste – suelo”, la carga disminuye considerablemente debajo del tope, consecuentemente el factor de seguridad para la mayor parte de los micropilotes es mayor que dos.

4. DETERMINACION DE LA RIGIDEZ EN LA COMPRESION SIMPLE – (AE)

4.1 Determinación del (AE) en el laboratorio

La determinación del (AE) en el laboratorio fué hecha en base a las medidas de las deformaciones específicas en la camisa metálica (ϵ_{cam}). El cálculo teórico fué hecho según la expresión siguiente:

$$AE = A_{cam} \cdot E_{cam} + A_n E_n + A_s E_s \quad (9)$$

Donde:

- A_{cam} = Área de la sección transversal de la camisa metálica
- A_n = Área de la sección transversal de la nata de cemento
- A_s = Área de la sección transversal de la armazón complementaria
- E_{cam} = Módulo de deformación de la camisa metálica
- E_n = Módulo de deformación de la nata de cemento
- E_s = Módulo de deformación de las barras de la armazón complementaria

Los valores calculados por la expresión (9) están en la Tabla 4 y presentan buena concordancia con los valores obtenidos por las deformaciones específicas en la camisa metálica (ϵ_{cam}). El procedimiento expuesto para el cálculo del valor de AE para los micropilotes mixtos es corroborado por los ensayos de R.W. Furlong. En los ensayos conducidos por este investigador, con pilares mixtos, el error entre los valores teóricos y los experimentos fue de = 12,5%. Este procedimiento también es encontrado en trabajos ingleses (14) (15).

4.2 Determinación del AE *in situ*

En los trabajos desarrollados por la Agrupación de Geotecnia del IPT fueron ejecutadas pruebas de carga en tres micropilotes tubulares inyectados. Con el objetivo de medir las deformaciones específicas (ϵ_s) a lo largo de los micropilotes, dentro de cada camisa metálica fue instalada una barra de 12,5 mm (1/2") de diámetro, convenientemente instrumentada. Los micropilotes E-1 y E-2 fueron cargados hasta la carga máxima de 735 kN (75tf). (7)

Con los valores de las medidas de las deformaciones específicas (ϵ_s) y los cargamentos (P) en la sección más próxima del tope del micropilote E-1, los autores concluyeron que el módulo de rigidez a la compresión (AE), *in situ* es $1,3 \times 10^6$ kN ($1,33 \times 10^5$ tf). Obsérvese que el micropilote E-1 poseía 5,55 m de fuste y tenía 2,0 m engastados en roca, el E-2 tenía 9,92 m de largo y la extremidad apoyada en la roca (7).

Los ensayos realizados con segmentos de micropilotes demostraron que hay una buena concordancia entre los valores teóricos y los experimentos de AE. De esta forma, siendo el valor teórico del AE de los micropilotes E-1 y E-2 igual a $0,44 \times 10^6$ kN ($0,45 \times 10^5$ tf), se llega a la conclusión que la relación entre el AE obtenido de la prueba de carga y el valor teórico es aproximadamente 3,0. En esta evaluación se consideró el módulo de nata (E_n) a los siete días como siendo 4.900 Mpa (50.000 kgf/cm²) y la resistencia f_n de 17,0 Mpa (173 kgf/cm²). Estos valores fueron obtenidos experimentalmente en trabajos posteriores. Se debe añadir que estas determinaciones fueron hechas para las condiciones de suelo y micropilotes mostrados en el Diseño 2. Los segmentos de camisas metálicas usadas en las pruebas de carga citadas eran rosqueados.

5 CÁLCULO DEL MICROPILOTE EN EL REGIMEN ELÁSTICO

Después de constatar que la relación entre los valores teóricos y los experimentales de AE es 3,0, se verificó por el gráfico que relaciona $P_e \times \epsilon_s$ en las pruebas de carga, que en la carga máxima igual a 735 kN (75,0 tf), aún en régimen elástico, la deformación específica en el tope del micropilote es aproximadamente 500×10^6 mm/mm, valor éste medido en la krioestaca E-1 (7).

Calculándose las parcelas de carga en estos micropilotes E-1 y E-2 con las expresiones (1), (2) y (3) se tiene:

$$\begin{aligned} P_{cam} / P_{adm} &= 92\% \\ P_s / P_{adm} &= 6\% \\ P_n / P_{adm} &= 2\% \end{aligned}$$

Las resistencias nominales de los materiales componentes de estos pilotes son:

$$\begin{aligned} F_{\gamma, cam} &= 215,6 \text{ Mpa (2.200 kgf/cm}^2\text{)} \\ f_{\gamma, s} &= 490,0 \text{ Mpa (5.000 kgf/cm}^2\text{)} \\ f_n &= 15,9 \text{ Mpa (173 kgf/cm}^2\text{)} \end{aligned}$$

Con los datos anteriores se calculan tensiones en cada componente de los micropilotes, teóricamente despreciando la vaina y en las pruebas de carga. Las comparaciones entre las tensiones actuantes en los componentes del micropilote E-1 se encuentran en la Tabla 5.

Obsérvese, por tanto, que las tensiones en el régimen elástico, que surgen en los ensayos en laboratorio, son cerca de tres veces mayores que los valores que se manifiestan en las

cargas máximas en las pruebas *in situ*. Se constata por la Tabla 5 que las tensiones en las camisas metálicas (ϵ_{cam}) en el cálculo elástico son superiores a los valores de las tensiones admisibles 216,0 Mpa (2.200 kgf/cm²).

Calculándose la carga admisible (P_{adm}) y dividiéndose por 1,5, se concluye que las cargas admisibles de los micropilotes E-1 y E-2 son respectivamente, 441,0 kN (45,0 tf) y 392 kN (40,0 tf). Estos valores son ligeramente inferiores a los valores obtenidos en la prueba de carga, 490 kN (50,0 tf) y 441 kN (45tf).

Obsérvese que los micropilotes E-1 y E-2, en la carga máxima de los ensayos, se encontraban aún en el régimen casi-elástico. Se puede inferir que en suelos del mismo tipo, con la extremidad engastada o apoyada en roca los valores de (AE), calculados y medidos, son parámetros adecuados para la evaluación de la capacidad de carga de los micropilotes en la fase de ante-proyecto. En esta carga no habrá ruptura del fuste. Aunque las evaluaciones elásticas aquí descritas tengan validez para todas las secciones de los micropilotes, es evidente que los cálculos serán de mayor utilidad próximo del tope, ya que estos micropilotes funcionan por atrito lateral y en las secciones inferiores las cargas en el fuste son reducidas sensiblemente.

La influencia del largo y del tipo de vinculación de la extremidad de los micropilotes tubulares en el tipo de distribución de las cargas a lo largo del fuste fue estudiada por Massad "et al" (8).

8 CONCLUSIONES

- A. Los ensayos revelaron que la camisa metálica es la armazón principal de los micropilotes. Aunque la nata de cemento presente bajo módulo de deformación (E_n), en los casos de micropilotes con armazón complementaria, ésta absorbe una parcela significativa de la carga actuante.
- B. Los resultados de los ensayos realizados con segmentos de los micropilotes (fuste) posibilitaron el desarrollo de las fórmulas que permiten el cálculo de la carga de ruptura P_R . De este modo, para fustes con características geométricas y mecánicas semejantes, la resistencia admisible del fuste (P_{adm}) puede ser determinada por las expresiones presentadas en este trabajo, introduciéndose el coeficiente de seguridad igual a dos, conforme prescripto en el ítem 7.3.3.4.3 de la NBR 6122/1984 *Proyecto y Ejecución de Fundaciones* da la ABNT.
- C. Las determinaciones laboratoriales del módulo de rigidez a la compresión (AE) y las teorías presentaron una diferencia máxima de 5%. El estudio de pruebas de carga demostró que, para determinadas condiciones geotécnicas del subsuelo (7), la relación entre el valor del módulo de rigidez *in situ* del fuste, y aquel determinado teóricamente, es aproximadamente tres. Esto significa que las deformaciones específicas (tensiones) calculadas *in situ* son tres veces menores que las deformaciones específicas (tensiones) determinadas en el régimen elástico.
- D. Aunque los micropilotes y el subsuelo presenten características peculiares, la aplicación de la teoría elástica después del conocimiento de la relación $(AE)_{exp} / (AE)_{teor}$, mostró resultados comparables con los obtenidos por las pruebas de carga.

La continuidad de los estudios experimentales y teóricos ampliará el conocimiento de la capacidad de carga de los micropilotes tubulares inyectados en cada tipo de suelo y, en particular, posibilitará evaluar correctamente el aumento de la resistencia del fuste *in situ*.

TABELA 1
CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DOS SEGMENTOS DE MICROESTACAS

Corpo de Prova nº	Altura h (cm)	Espessura da camisa metálica (cm)	Diâmetro externo da (cm)	Área da camisa metálica A_{cam} (cm ²)	Área do núcleo (nata Na) (cm ²)	Área das armaduras As (cm ²)	Área total A (cm ²)	Tipo da microestaca ensaiada
1	150	0,81	8,92	20,6			62,3	Camisa metálica sem solda
2	150	0,83	9,00	21,3			63,6	Camisa metálica sem solda
3	150	0,86	9,00	22,0			63,6	Camisa metálica sem solda
4	150	0,85	8,90	21,5			62,2	Camisa metálica sem solda
5	150	0,80	8,90	20,3			62,2	Camisa metálica sem solda
6	150	0,88	8,95	22,3			62,9	Microestaca com armadura complementar
7	150	0,78	8,95	20,0	42,9		62,9	Microestaca com armadura complementar
8	150	0,79	9,00	20,4	43,2		63,6	Microestaca com armadura complementar
9	150	0,75	8,93	19,3	43,3		62,6	Microestaca com armadura complementar
10	150	0,82	8,95	20,9	36,8	5,1	62,9	Microestaca com uma barra de armadura complementar
11	150	0,82	8,92	20,9	36,5	5,1	62,5	Microestaca com uma barra de armadura complementar
12	150	0,85	8,94	21,6	36,0	5,1	62,4	Microestaca com uma barra de armadura complementar

TABELA 2
CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DOS COMPONENTES DAS MICROESTACAS

Corpo de Prova nº	f_c (MPa)	$f_{y,cam}$ (MPa)	$f_{y,s}$ (MPa)	$E_{cam} = E_s$ (MPa)	E_n (MPa)	P_R (kN)	Características particulares dos corpos de prova
1		216			205800	450,8	Camisa metálica sem solda
2		216			205800	421,4	Camisa metálica sem solda
3		216			205800	426,3	Camisa metálica sem solda
4		216			205800	367,5	Camisa metálica com solda
5		216			205800	372,4	Camisa metálica com solda
6		216			205800	548,8	Camisa metálica com solda
7	27,8	216		6900	205800	421,4	Microestaca sem armadura complementar
8	27,8	216		6900	205800	480,2	Microestaca sem armadura complementar
9	27,8	216		10000	205800	637	Microestaca sem armadura complementar
10	17,0	216	557	4500	205800	637	Microestaca com armadura complementar
11	17,0	216	557	4500	205800	568,4	Microestaca com armadura complementar
12	17,0	216	557	4500	205800	656,6	Microestaca com armadura complementar

NOTA: E_n – Módulo de deformação de la nata de cemento
 E_{cam} – Módulo de deformação de la camisa metálica
 E_s – Módulo de deformação de la armazón complementaria
 f_n – Resistencia a la compresión simple a los siete dias de la nata de cemento
 $f_{y,cam}$ – Tensión de escoramento del acero del tubo ASTM A53
 $f_{y,s}$ – Tensión de escoramento de la barra de acero CA-50A

TABELA 3 DETERMINAÇÃO TEÓRICA E EXPERIMENTAL DAS PARCELAS DE CARGAS AOS COMPONENTES DAS MICROESTACAS										
Corpo de Prova nº	P _{adm} (KN)	ε _{cam} (10 ⁻⁶)	ε _n (10 ⁻⁶)	ε _s (10 ⁻⁶)	P _{cam} / P _{adm} %		P _n / P _{adm} %		P _s / P _{adm} %	
					teórico	ensaio	teórico	ensaio	teórico	ensaio
1	392,0	900			100	97				
2	392,0	1000			100	112				
3	294,0	630			100	97				
Média	359,3	843			100	102				
4	294,0	710			100	107				
5	294,0	755			100	107				
6	392,0	900			100	105				
Média	326,7	788			100	106				
7	294,0	645	730		93	90	7	7		
8	294,0	565	700		93	81	7	7		
9	392,0	880	820		90	89	10	9		
Média	326,7	697	750		92	87	8	8		
10	392,0	665		920	82	73	3	3	16	25
11	392,0	755		890	83	83	3	3	16	24
12	392,0	675		950	83	77	3	3	16	20
Média	392,0	698		920	83	78	3	3	16	23

NOTA: a deformação específica média na solda (ε_s) é 80%, maior do que na camisa metálica

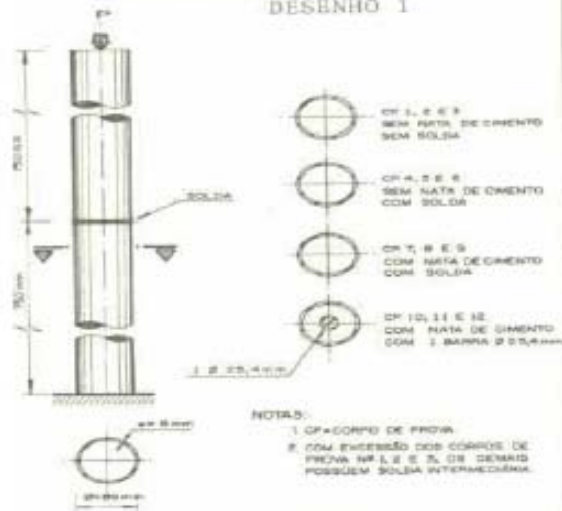
TABELA 4 DETERMINAÇÃO TEÓRICA E EXPERIMENTAL DA RIGIDEZ (AE) DAS MICROESTACAS VALORES MÉDIOS					
Corpo de Prova nº	Determinação Teórica (AE) = A _{cam} · E _{cam} + A _n E _n + A _s E _s		Determinação experimental AE = P / ε _{cam}		(AE)teó. (AE)exp.
	(kN)	(tf)	(kN)	(tf)	
1, 2, 3	438000	44700	430000	43400	1,02
4, 5, 6	439000	44800	414000	42300	1,06
7, 8, 9	443000	45200	468400	47800	0,95
10, 11, 12	556000	56700	561500	57300	0,99

NOTA: ε_{cam} = deformação específica média nas camisas metálicas, determinadas nos gráficos P x ε_{cam}

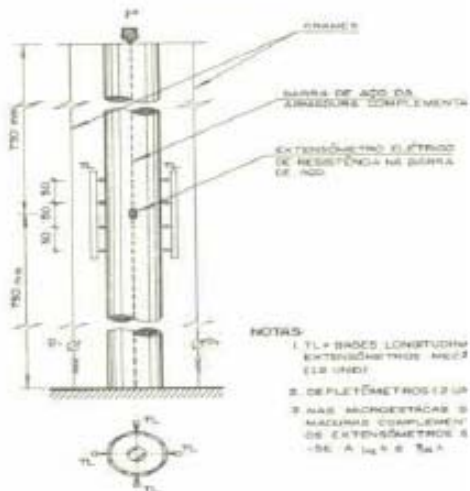
TABELA 5 RELAÇÕES ENTRE AS TENSÕES CALCULADAS E AS MEDIDAS (Microestacas E-1)						
Componente	Tensão atuante	Valores calculados (Regime elástico)		Valores medidos (Prova de carga)		Valores calculados Valores medidos
		(MPa)	(kgf/cm ²)	(MPa)	(kgf/cm ²)	
Camisa metálica	σ _{cam}	341,4	3484,0	103,0	1050,0	3,3
Armadura complementar	σ _c	339,1	3460,0	103,0	1050,0	3,3
Nata	σ _n	7,1	72,0	202,0	22,5	3,2

NOTA: P = 735,0 kN (75,0 tf), no topo da microestaca

ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES EM
SEGMENTOS DE MICROESTACAS
DESENHO 1



ESQUEMA DA INSTRUMENTAÇÃO
DESENHO 2



ESQUEMAS DOS SUBSOLOS E DAS MICROESTACAS
E-1 E E-2

DESENHO 3

