

**UTILIZACION DE MICROPILOTES COMO ELEMENTOS ESTRUCTURALES
PARA CIMENTACIONES Y ESTABILIZACIÓN DE TALUDES**

**Universidad del Valle de Guatemala
Facultad de Ciencias y Humanidades
Departamento de Ingeniería Civil
Maestría en Ingeniería Estructural**

**Utilización de Micropilotes como Elementos Estructurales para
Cimentaciones y Estabilización de Taludes**



FERNANDO RAFAEL CALLEJAS BENITEZ

**Trabajo de investigación presentado para optar al grado de
Maestría en Ingeniería Estructural**

Guatemala

2002

CONTENIDO

	Páginas
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	3
A. Objetivo general	3
B. Objetivos específicos	3
III. ASPECTOS GENERALES	5
A. Micropilotes	5
B. Elementos estructurales de un micropilote	9
1. Refuerzo	10
2. Bulbo Inyectado	10
C. Clasificación de los micropilotes	11
1. Por tipo de armadura	11
2. Por tiempo de servicio	11
3. Por modo de sellado	12
D. Ventajas de la utilización de micropilotes	13
E. Desventajas de la utilización de micropilotes	14
F. Aplicaciones de los micropilotes	14
1. Recalce de estructuras	15
2. Cimentación de estructuras	16
3. Estabilización de taludes y excavaciones	18

	Páginas
G. Capacidad resistente de micropilotes	19
H. Transmisión de carga de la estructura al micropilote	26
I. Ensayos de adecuación	27
1. Procedimiento del ensayo de adecuación	28
2. Interpretación de los resultados	29
V. DISEÑO DE MICROPILOTES	33
A. Consideraciones de diseño	33
B. Elementos a diseñar	33
1. Determinación de la longitud libre	35
2. Diseño del bulbo	36
3. Diseño del refuerzo	40
a. Diseño de acoples del refuerzo	42
b. Protección contra la corrosión.....	44
C. Ejemplo de diseño de micropilotes	46
V. PROCESO CONSTRUCTIVO	57
A. Descripción del proceso	57
1. Perforación	59
2. Equipamiento o inserción del refuerzo	60
3. Inyección del bulbo y sellado del refuerzo	60

	Páginas
B. Equipo y personal en la ejecución de micropilotes	62
VI. CONCLUSIONES	63
VII. BIBLIOGRAFÍA	65

LISTA DE FIGURAS

Figura	Páginas
1 Detalle típico de micropilotes	5
2 Sección transversal de un micropilote	7
3 Recalce de cimentación con utilización de micropilotes	8
4 Detalle de micropilote inyectado	9
5 Secciones típicas de micropilotes según el tipo de armadura	12
6 Recalce directo de la estructura con asentamientos diferenciales	15
7 Recalce directo de la basílica de Nuestra Señora del Pilar, Sevilla	16
8 Cimentación de maquinaria	17
9 Cimentación de muelle	18
10 Estabilización de talud con utilización de micropilotes	18
11 Pantalla de micropilotes	19
12 Abaco para determinar q_s en Arena + Grava	22
13 Ábaco para determinar q_s en Limos y arcillas	23
14 Ábaco para determinar q_s en Marmocalcáreas	24
15 Ábaco para determinar q_s en Roca alterada y fragmentada	25
16 Sistema para ensayo de adecuación	27
17 Gráfico de desplazamiento lento	30
18 Gráfico de tensión de desplazamiento lento crítico	31
19 Cimentación directa con utilización de micropilotes	35

20 Refuerzo de micropilote armado parcialmente	41
21 Detalle de tubo de acople	44
22 Diagrama de flujo para diseño de micropilotes	45
23 Perfil de suelo del ejemplo	47
24 Ábaco para determinar q_s en Arena + Grava para el ejemplo	49
25 Diferentes tipos de detalles de cabezas para micropilotes	55
26 Plano constructivo del ejemplo	56
27 Ejecución de micropilotes con bulbo	57
28 Ejecución de micropilote convencional	57
29 Perforación de micropilotes	59
30 Colocación del refuerzo	60
31 Inyección del bulbo de lechada	61

LISTA DE TABLAS

Tabla	Páginas
1 Valores de resistencia media al deslizamiento	21
2 Selección del ábaco para la determinación de la fricción límite q_s	21
3 Valores experimentales para el coeficiente de expansión α	39
4 Resumen de características y dimensiones del micropilote del ejemplo	54
5 Equipo y personal para ejecución de micropilotes	62

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación	Páginas
1 Carga admisible T_a	20
2 Carga admisible T_a diseño conservador	20
3 Carga que resiste el micropilote a tracción	36
4 Área de acero requerida en un micropilote	38
5 Esfuerzo permisible para el acero de refuerzo en compresión	40
6 Relación de esbeltez	41
7 Esfuerzo permisible en tensión	42
8 Área de soldadura de filete	43
9 Área de soldadura de filete 45°	43
10 Longitud de soldadura	43
11 Volumen de inyección	48

SIMBOLOGIA

α : Coeficiente de seguridad

α : Factor de expansión del bulbo

Φ : Diámetro

p_i : Presión al inicio

p_f : Presión al final

q_c : Módulo presiométrico

q_s : Fricción límite

r : Radio de giro

A_s : Área de acero requerida

C_c : Relación de esbeltez

E : Módulo de elasticidad del acero (199,950 MPa (29,000 Ksi))

F_E : Esfuerzo nominal del electrodo

F_p : Esfuerzo permisible

$F.S.$: Factor de Seguridad

F_t : Esfuerzo permisible de tensión

F_u : Esfuerzo último del acero

F_y : Esfuerzo nominal del acero

K : Factor de longitud efectiva

L : Longitud del bulbo

N: Número de golpes del ensayo de penetración estándar

P: Carga

T: Carga a tracción

T_a: Carga admisible

T_c: Tensión crítica

T_L: Carga límite

I. INTRODUCCION

La utilización de micropilotes para recalce de estructuras empezó en Italia a finales de la década de los 60's y su utilización como elementos estructurales para cimentaciones y estabilización de suelos

transcurso de las dos últimas décadas. Esto, debido a la versatilidad de aplicaciones y a las ventajas que ofrecen respecto a los métodos convencionales de cimentación y estabilización de suelos (pilotes, muros de gravedad, muros en voladizo). Es relevante mencionar la importancia de la utilización de los micropilotes como soluciones estructurales para situaciones "difíciles", tales como recalce de estructuras, nivel freático elevado, limitaciones de espacio, estratos de suelo de baja capacidad de soporte, en donde soluciones convencionales son muy caras o no aplican por completo.

Este trabajo pretende mostrar las consideraciones de diseño y factores que se deben tomar en cuenta durante la construcción de los micropilotes, particularmente de los micropilotes de armadura de tubería rígida e inyectados a presión, aunque se mencionan también los diferentes tipos de micropilotes existentes. El diseño de los micropilotes debe ir acompañado de las consideraciones prácticas para la elaboración de un diseño que brinde seguridad y a su vez economía. Este trabajo presenta tres partes principales. La primera parte muestra las generalidades y aplicaciones de los micropilotes. La segunda presenta las consideraciones de diseño y un ejemplo de aplicación. En la última parte se indican los factores de relevancia durante la construcción y los tipos de inyección que se utilizan.

II. OBJETIVOS

A. OBJETIVO GENERAL

Proporcionar información técnica y práctica para la utilización de los micropilotes como estructuras de cimentación y estabilización de taludes.

B. OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Presentar las diferentes aplicaciones de los micropilotes para cimentaciones y estabilidad de taludes.
2. Proporcionar una referencia de los factores de relevancia en el diseño de micropilotes.
3. Realizar un ejemplo de diseño de micropilotes.
4. Mostrar los aspectos constructivos que se deben tomar en cuenta en la ejecución de los micropilotes.

103 → 104
179 → 180

III. ASPECTOS GENERALES

A. Micropilotes

Un micropilote es un elemento estructural embebido en el suelo capaz de transmitir y soportar esfuerzos de tensión, compresión, cortante y flexión.

Funciona por la transmisión directa de esfuerzos al suelo en forma de fricción (tracción). Los micropilotes se componen de una zona libre y un bulbo que se conforma de tres elementos:

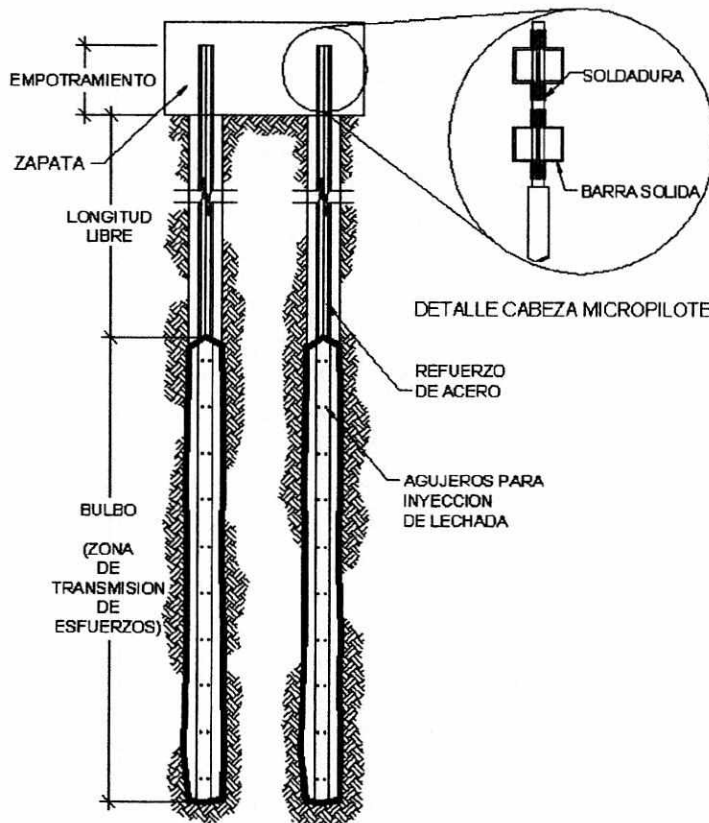


Figura1. Detalle típico de micropilote

1. el suelo,
2. el refuerzo o armadura y
3. lechada inyectada a alta presión que recubre al refuerzo.

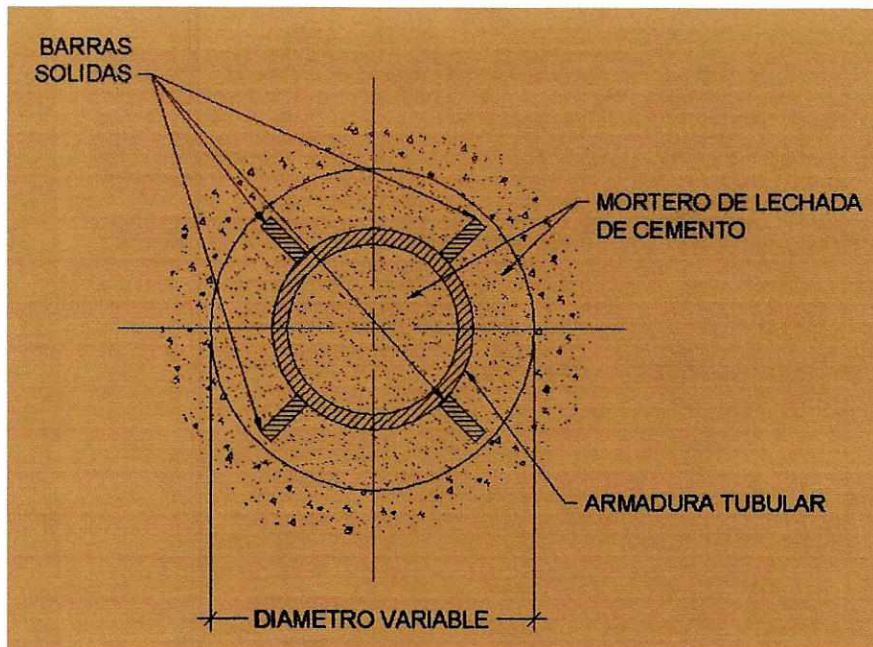


Figura 2. Sección transversal de un micropilote

El refuerzo central es rígido, de acero, le provee la capacidad de resistir esfuerzos de tensión, compresión y flexión al mismo tiempo a diferencia de los anclajes de cables.

Los diámetros de perforación para los micropilotes van desde 75 mm. (3 pulg.) hasta 300 mm. (12 pulg.), diámetros mayores de 300 mm. se consideran como pilotes. Debido a las características de los micropilotes, éstos se pueden inclinar para aumentar la capacidad de la estructura a esfuerzos de corte tales como el sismo. Los micropilotes son utilizados generalmente como cimentaciones permanentes. Sin embargo, durante la fase de montaje pueden utilizarse de modo provisional.

La transferencia de los esfuerzos de los micropilotes al suelo se realiza directamente a través de la lechada de inyección, o indirectamente a través de tuberías metálicas, o de otros materiales. El comportamiento de los micropilotes



Figura 3. Recalce de cimentación con utilización de micropilotes

cuando la fuerza exterior actúa sobre ellos depende de las características de rigidez, longitud, inclinación de éstos y del suelo.

La utilización de micropilotes para reparar estructuras dañadas es una de las más apreciadas aplicaciones en geotecnia. Esto debido a su conveniencia, especialmente en casos en los que se presentan limitaciones de espacio o funcionalidad de las estructuras o carga sobre el terreno.

B. Componentes estructurales de un micropilote

Los micropilotes en general se componen de dos elementos estructurales esenciales: el bulbo y el refuerzo. La cabeza del micropilote o zona de empotramiento se considera como parte del refuerzo. Existen diferentes tipos de micropilotes patentados en el mercado, tales como Rodipress® de la empresa española Rodio, los micropilotes con el Sistema IM-Solétanche y TMD-Bachy de la empresa francesa Solétanche-Bachy y micropilotes con Sistema Dywidag-Gewi® de la empresa alemana Dywidag-Systems.

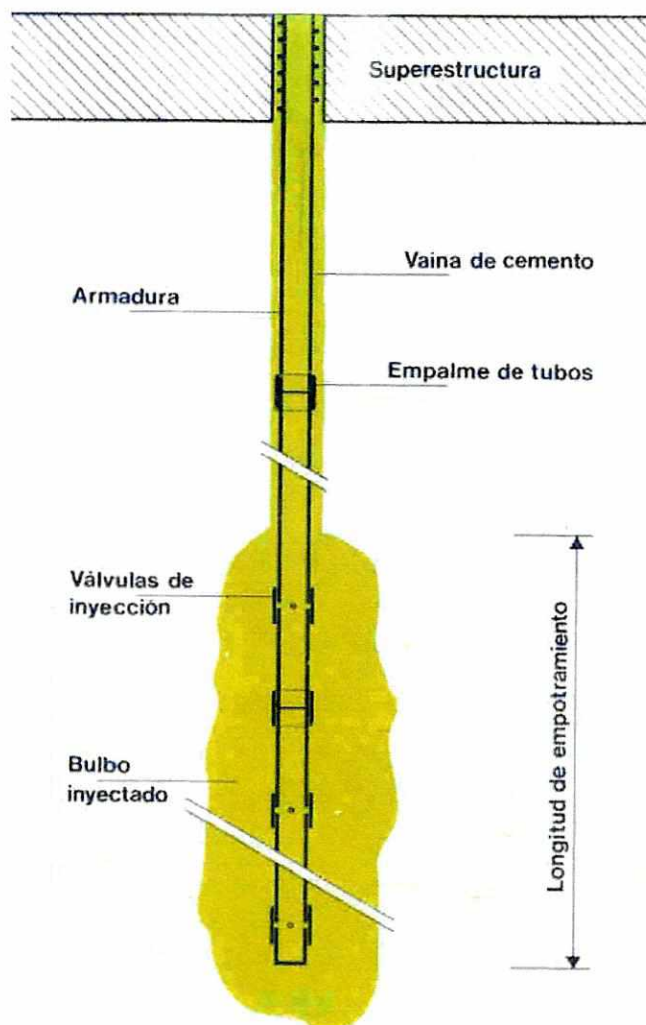


Figura 4. Detalle de micropilote inyectado

1. Refuerzo

El refuerzo de los micropilotes es de acero, en grado 275 – 415 MPa (40,000 – 60,000 psi) cuando se trata de barras sólidas de acero o cuando se utiliza jaula o armadura. Cuando el refuerzo es de tubería de acero, generalmente se utiliza acero conforme a la norma ASTM A53 Grado B o A501. También se pueden utilizar las barras de perforación (barras helicoidales “Auger”) como refuerzo, tal es el caso de los micropilotes con armadura helicoidal de la empresa Estadounidense Atlas.

2. Bulbo inyectado

La correcta formación del bulbo es un factor de gran importancia, ya que en esta área se transmiten los esfuerzos al suelo. El bulbo puede ser llenado por gravedad o inyectado a bajas o altas presiones, desde el fondo del agujero perforado y a través del refuerzo o con la utilización de una manguera o ducto de llenado, lo cual reduce el bulbo al diámetro de la perforación. La inyección de la lechada (grout) a altas presiones (mayores a 4 MPa) provoca una expansión del bulbo, el cual de acuerdo al tipo de suelo puede estar en un rango de 1.2 a 1.8 veces el diámetro de la perforación. La inyección del grout bajo esta técnica se hace a través de un canal de diámetro pequeño en el refuerzo o a través de un tubo delgado de acero soldado al refuerzo, bajo una presión lo suficientemente alta para causar la fractura hidráulica del suelo perimetral. Generalmente se instalan válvulas antiretorno y se utilizan obturadores neumáticos para sellar los tramos a inyectar en cada etapa.

La inyección del bulbo por medio de la técnica de *jet grouting* proporciona, además, compactación del suelo perimetral y en suelos granulares puede incrementar significativamente la resistencia al corte y a la tracción.

C. Clasificación de los micropilotes

1. Los micropilotes se pueden clasificar por el tipo de armadura o refuerzo:

SECCIONES RESISTENTES TÍPICAS SEGUN LA ARMADURA

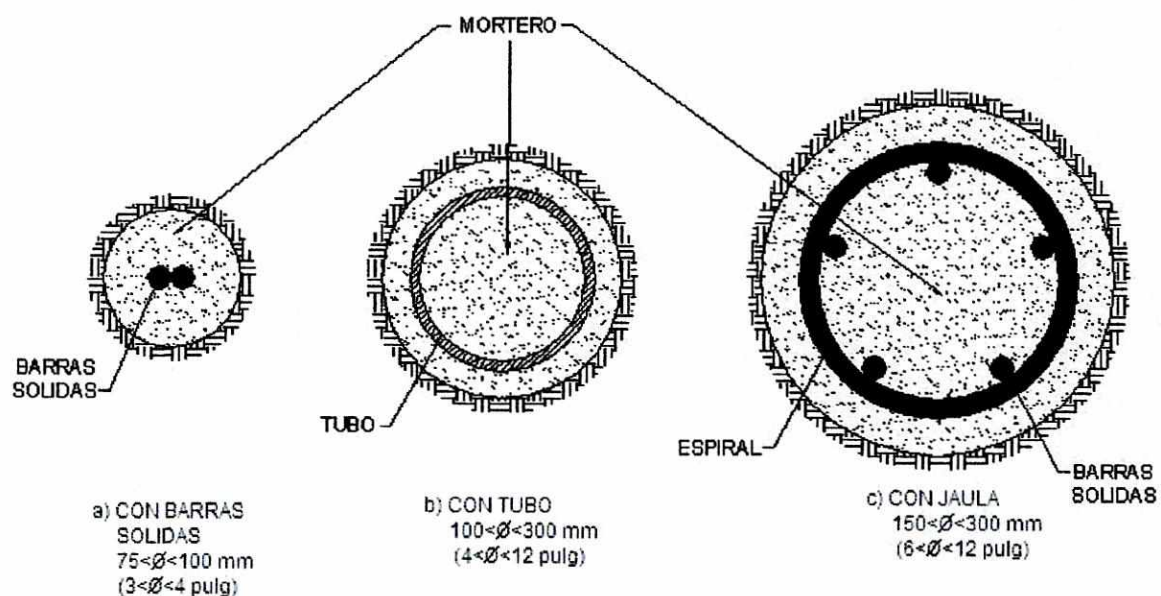


Figura 5. Secciones típicas de micropilotes según el tipo de armadura

- Con barras sólidas, con diámetro de perforación entre 75 mm. (3 pulg.) y 100 mm. (4 pulg.)
- Con tubo, con diámetro de perforación entre 100 mm. (4 pulg.) y 300 mm. (12 pulg.)
- Con jaula, con diámetro de perforación entre 150 mm. (6 pulg.) y 300 mm. (12 pulg.).

- d. Otro tipo de armadura podría ser la barra helicoidal de perforación (Auger) que se deja en la perforación.
2. La disposición de los micropilotes puede efectuarse para actuar durante un tiempo de servicio más o menos prolongado, por lo que cabe distinguir entre:
- a. Micropilotes provisionales.
 - b. Micropilotes permanentes.

Los primeros tienen el carácter de medio auxiliar y proporcionan las condiciones de estabilidad a la estructura, durante el tiempo necesario para disponer otros elementos resistentes que los sustituyan. Los micropilotes permanentes se diseñan, evidentemente, con mayores coeficientes de seguridad.

3. También se podría tomar como clasificación el modo de inyección de los micropilotes
- a. **IRS, Inyección Repetitiva y Selectiva.** Este tipo de inyección se realiza por tramos y puede repetirse, en cualquier tramo lo que permite mayores presiones de inyección y por consiguiente mejorar la formación del bulbo y aumentar su fricción con el suelo.
 - b. **IGU, Inyección Global y Única.** Esta inyección se realiza una sola vez, se hace desde el fondo de la armadura, limita la presión de inyección y la expansión del bulbo.

D. Ventajas de la utilización de micropilotes

La utilización de micropilotes presenta ventajas técnicas y económicas sobre las soluciones convencionales para cimentar estructuras en suelos con baja capacidad soporte, nivel freático elevado o estratos compresibles. También presenta ventajas en la estabilización de taludes y excavaciones. Entre las ventajas se incluyen las siguientes:

1. Pueden ejecutarse con una alteración mínima del suelo y cimentación existente por tanto, ocasionan movimientos muy pequeños que en la mayoría de los casos son admisibles aun para una estructura dañada.
2. Pueden ejecutarse a través de las cimentaciones, y en cualquier tipo de suelo por irregular y problemático que sea, con equipos manejables y adaptables a las condiciones de obra que suelen presentar los recalces.
3. Permiten una conexión sencilla por adherencia con las cimentaciones existentes.
4. El tiempo de ejecución es inferior hasta un 60% respecto a otros métodos de recalce y cimentación de estructuras.
5. Se trata de una técnica muy flexible y ágil para adaptarse sobre la marcha a los imprevistos, sobre todo suelo, que suelen ser frecuentes en este tipo de obras.
6. Pueden ejecutarse sin interferencias notables con la funcionalidad normal de la estructura a recalzar y, en muchos casos, no es necesaria la desocupación de los edificios.

7. Permiten la completa consolidación del suelo sin aportar nuevos componentes de riesgo (movimiento de tierras, excavaciones, percusiones y, en general, actividades que puedan afectar el equilibrio de edificios y estructuras)
8. Su coste económico es bien definido "a priori " y sin sorpresas indeseables en esta materia, cuando se cuida adecuadamente el proyecto. (P. Sola, 2,000:4)

E. Desventajas de la utilización de micropilotes

Los micropilotes presentan algunas desventajas inherentes a los elementos embebidos en el suelo tales como:

1. El costo de la utilización de materiales de alta resistencia y equipos de perforación de gran capacidad y/o alta precisión puede ser elevado en comparación con los costos de una cimentación directa, para soluciones convencionales.
2. Se debe utilizar mano de obra calificada para la construcción de las armaduras e instalación de útiles de perforación.
3. La corrosión de los elementos de refuerzo de la armadura debe ser tomada en cuenta en el diseño y proporcionar el adecuado recubrimiento.

F. Aplicaciones de los micropilotes

La técnica del micropilotaje es utilizada en múltiples aplicaciones, lo cual le permite ofrecer todo tipo de soluciones a problemas geotécnicos y constructivos en general. La utilización de los micropilotes se ha extendido ampliamente con

finalidades diversas, que pueden agruparse en los siguientes campos principales de aplicación:

1. Recalce de estructuras

- a. Recalces directos cuando los micropilotes, pasan a través de la estructura a recalzar y transmiten al terreno las cargas sin necesidad de ulteriores medios de unión.
- b. Recalces indirectos cuando los micropilotes son construidos fuera de las estructuras. En este caso se hace necesario el empleo de sistemas auxiliares para la transmisión de las cargas.

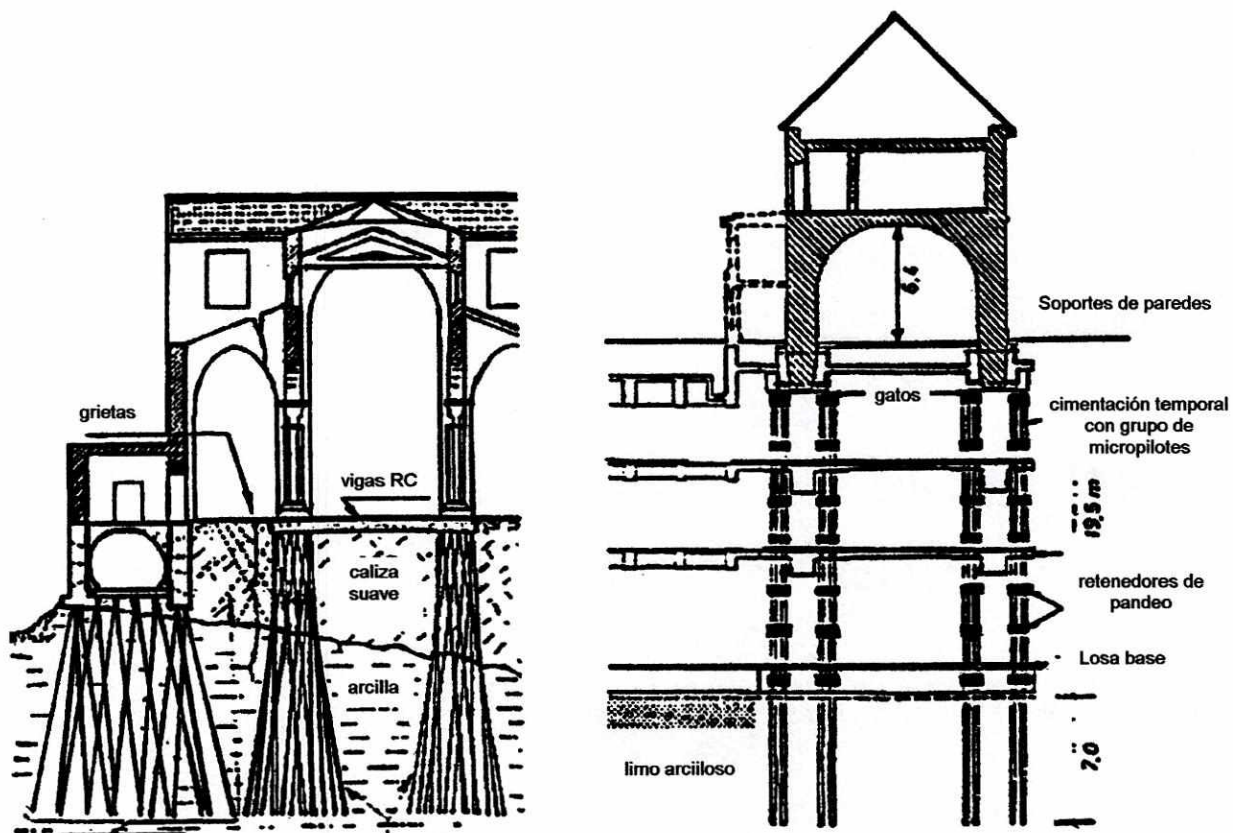


Figura 6. Recalce directo de la en estructura con asentamientos diferenciales

- c. Refuerzo de cimentaciones existentes. Es el caso de cimentaciones continuas o aisladas, superficiales o profundas, que necesitan ser reforzadas por distintas causas (ejemplos: por fallos del terreno, aumento de carga sobre los cimientos, etc.).

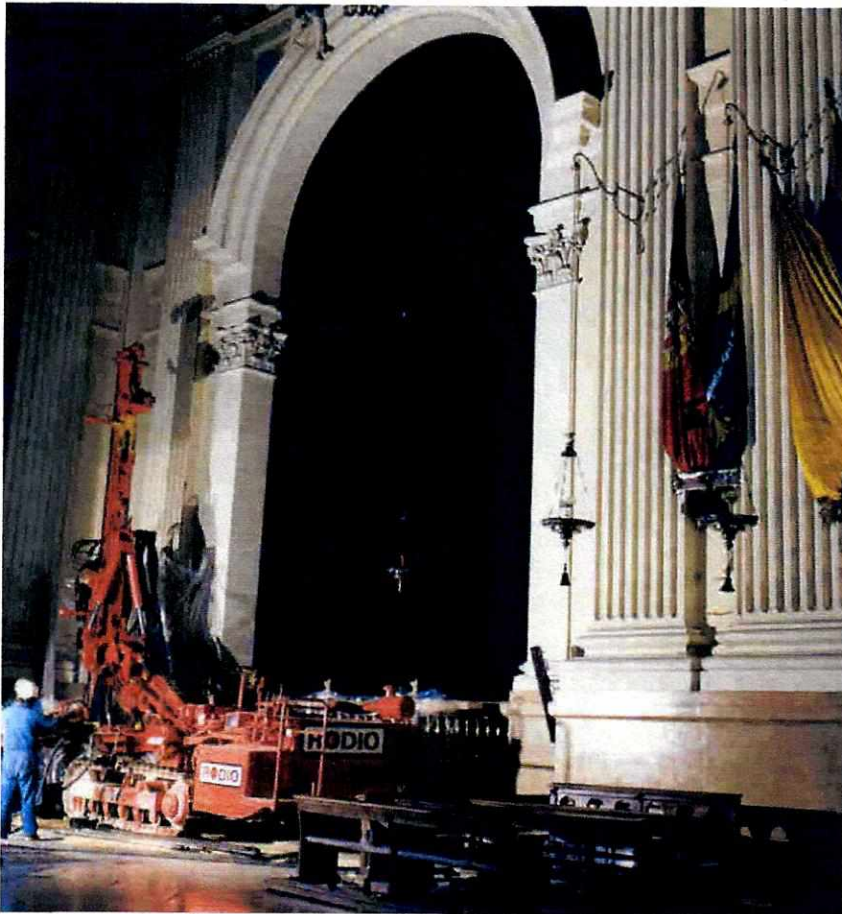


Figura 7. Recalce directo de la basílica de Nuestra Señora del Pilar, Sevilla

2. Cimentación de estructuras

- a. Cimentaciones profundas en terrenos no aptos para pilotajes convencionales.
- b. Cimentaciones profundas en solares de pequeñas dimensiones o con accesos difíciles.

- c. Nuevas cimentaciones en el interior de edificaciones en general, para poner nuevas cargas pesadas en estructuras antiguas o nuevas que no habían sido previstas en la fase de construcción, sin que las mismas actúen sobre las cimentaciones ya existentes.
- d. En cimentaciones de puentes, viaductos, acueductos, etc., ya sea como cimentaciones nuevas, como refuerzo a existentes o para permitir ensanche de calzadas, etc.



Figura 8. Cimentación de maquinaria

- e. Cimentaciones de estructuras para permitir posteriores excavaciones bajo las mismas (para túneles, galerías, acueductos, colectores, etc.).
- f. Cimentaciones de grandes depósitos sujetos a esfuerzos alternos de compresión y tracción.
- g. Cimentaciones de muelles y obras portuarias.
- h. Refuerzo de bancadas de máquinas industriales. Es el caso de sustitución de antiguas máquinas por nuevas sobre la misma bancada, de eliminación de vibraciones de los equipos, o aumento de carga sobre la misma

cimentación. Muchas veces las obras se pueden realizar sin necesidad de alejar la maquinaria de la bancada.



Figura 9. Cimentación de muelle

3. Estabilización de taludes y excavaciones

- a. Pantallas de micropilotes para estabilización de excavaciones con grandes empujes laterales.
- b. Estabilización de taludes
- c. Refuerzo de macizos rocosos

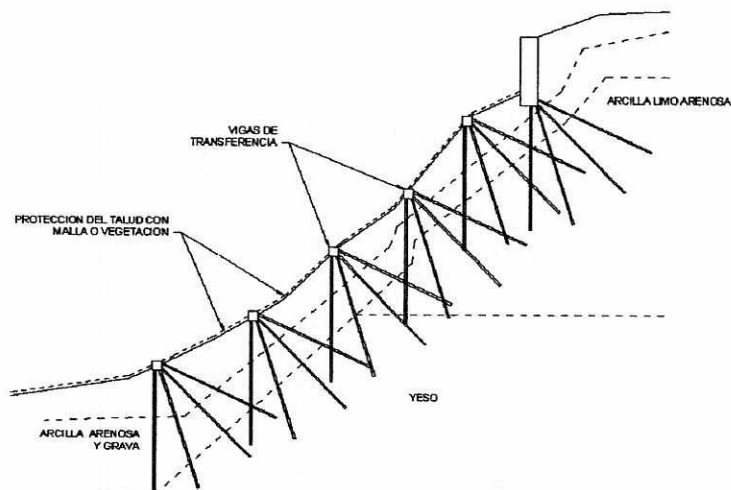


Figura 10. Estabilización de talud utilizando micropilotes



Figura 11. Pantalla de micropilotes

G. Capacidad de resistencia de los micropilotes

La capacidad de resistencia de los micropilotes viene determinada por la resistencia del acero de refuerzo y la fricción entre el bulbo de lechada y el suelo, en donde se transmiten los esfuerzos al terreno.

En un micropilote, al igual que en un anclaje, se suelen definir los conceptos de carga límite y carga admisible. Se entiende por carga límite o última, T_L , a la carga que produzca un alargamiento o punzonamiento permanente del 2 por 1,000, siempre que sea inferior al 90% de la carga de rotura.

La carga admisible T_a (ver ecuación 1) es igual a la carga límite multiplicada por un coeficiente de seguridad $\alpha < 1$.

$$T_a = \alpha \cdot T_L \quad (1)$$

El coeficiente de seguridad, α , depende del tiempo de servicio que deban tener los micropilotes y de la confianza de la hipótesis y método de cálculo utilizado para la determinación de los esfuerzos. Suele utilizarse un valor de 0.6 en el caso de micropilotes permanentes o provisionales, con un plazo de utilización superior a 2 años y un valor de 0.75 para micropilotes provisionales con periodo de servicio inferior a un año (hasta 2 años en algunos casos).

Generalizando para un diseño conservador podríamos decir:

$$T_a = T_L/2 \quad (2)$$

La resistencia de la armadura determina la sección necesaria de acero, mientras que la fricción entre el suelo y el bulbo o resistencia al deslizamiento, q_s , depende del tipo de suelo, el método de inyección utilizado y de la adherencia entre el acero y la lechada de cemento.

A continuación, y con carácter ilustrativo, se muestran algunos valores de la resistencia media al deslizamiento para el bulbo de micropilotes y anclajes inyectados a presión, en distintos tipos de terreno:

Tabla 1. Valores de resistencia media al deslizamiento

<i>Tipo de Terreno</i>	Resistencia media al deslizamiento (Kg./cm.²)
Rocas duras (granito, gneis, caliza)	10 a 25
Roca floja	3 a 10
Gravas y arenas gruesas	7 a 10

Arenas medias y finas	3 a 6
Arcillas con resistencia a compresión simple:	
> 4 Kg./cm. ²	>8.0
1 a 4 Kg./cm. ²	4.0 a 8.0
0.5 a 1 Kg./cm. ²	2.5 a 4.0

(Jiménez, 1980:1151)

También se han desarrollado métodos experimentales para determinar la fricción entre el suelo y el bulbo, q_s , tales como el método de los ábacos. En este método se designa un ábaco experimental para diferentes tipos de suelos, que dependen del método de inyección del módulo presiométrico del suelo q_c o del valor N del ensayo de penetración estándar SPT.

Tabla 2. Selección del ábaco para la determinación de la fricción límite q_s

Suelo	Ábaco correspondiente	Técnica de inyección	
		IRS (al principio $p_i > p_i$)	IGU (al principio $p_i < p_i$)
Gravas Gravas arenosas Arenas gravosas Arenas gruesas Arenas medias Arenas finas Arenas limosas	Figura 12	SG.1	SG.2
Limos Arcillas	Figura 13	AL.1	AL.2
Creta Marmocalcáreas Caliza alteras o fragmentadas	Figura 14	MC.1	MC.2
Roca alterada o fragmentada	Figura 15	>R.1	>R.2

(Bustamante et al., 1985:17)

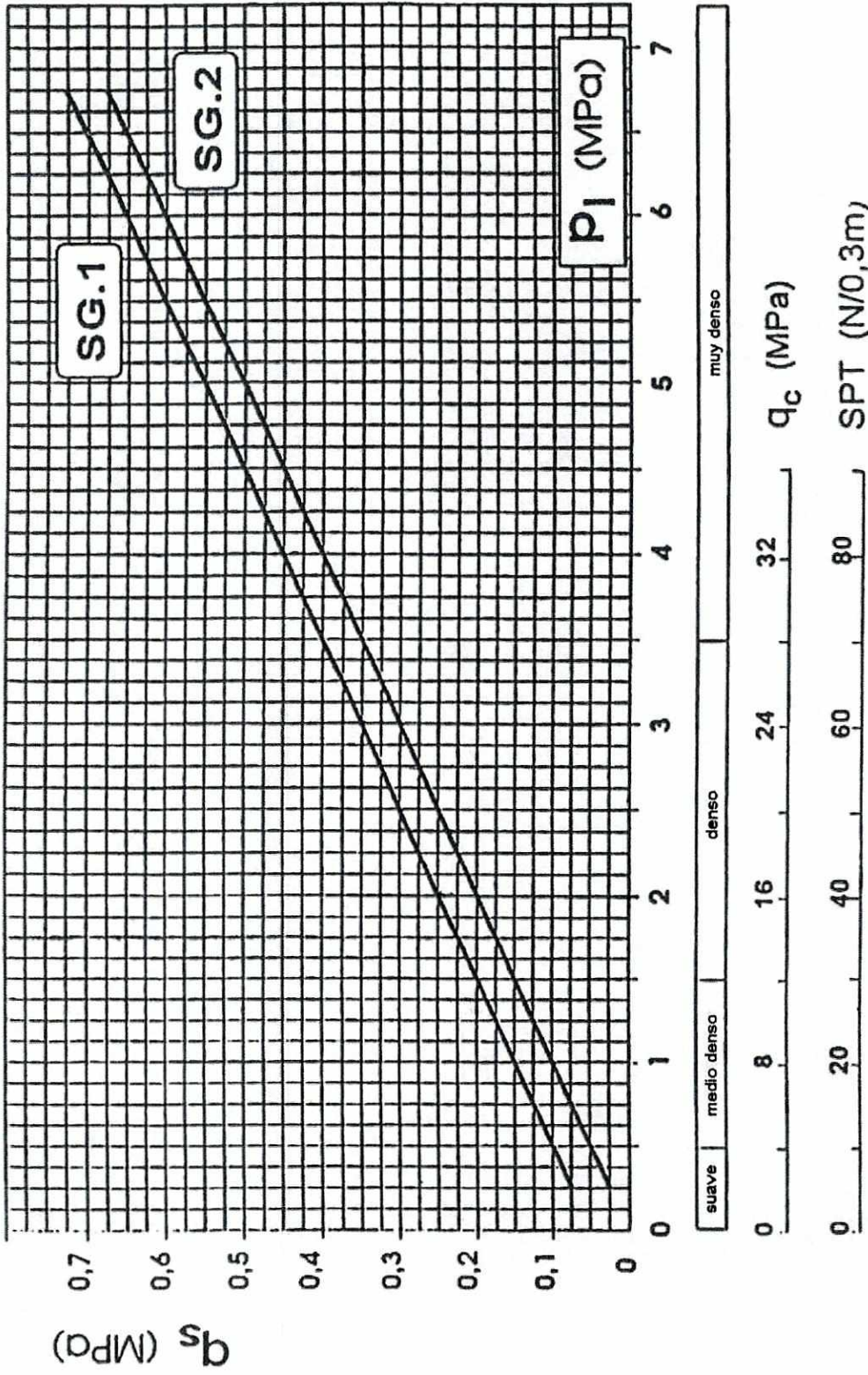


Figura 12. Ábaco para determinar q_s en Arena + Grava

(Bustamante, 1985:19)

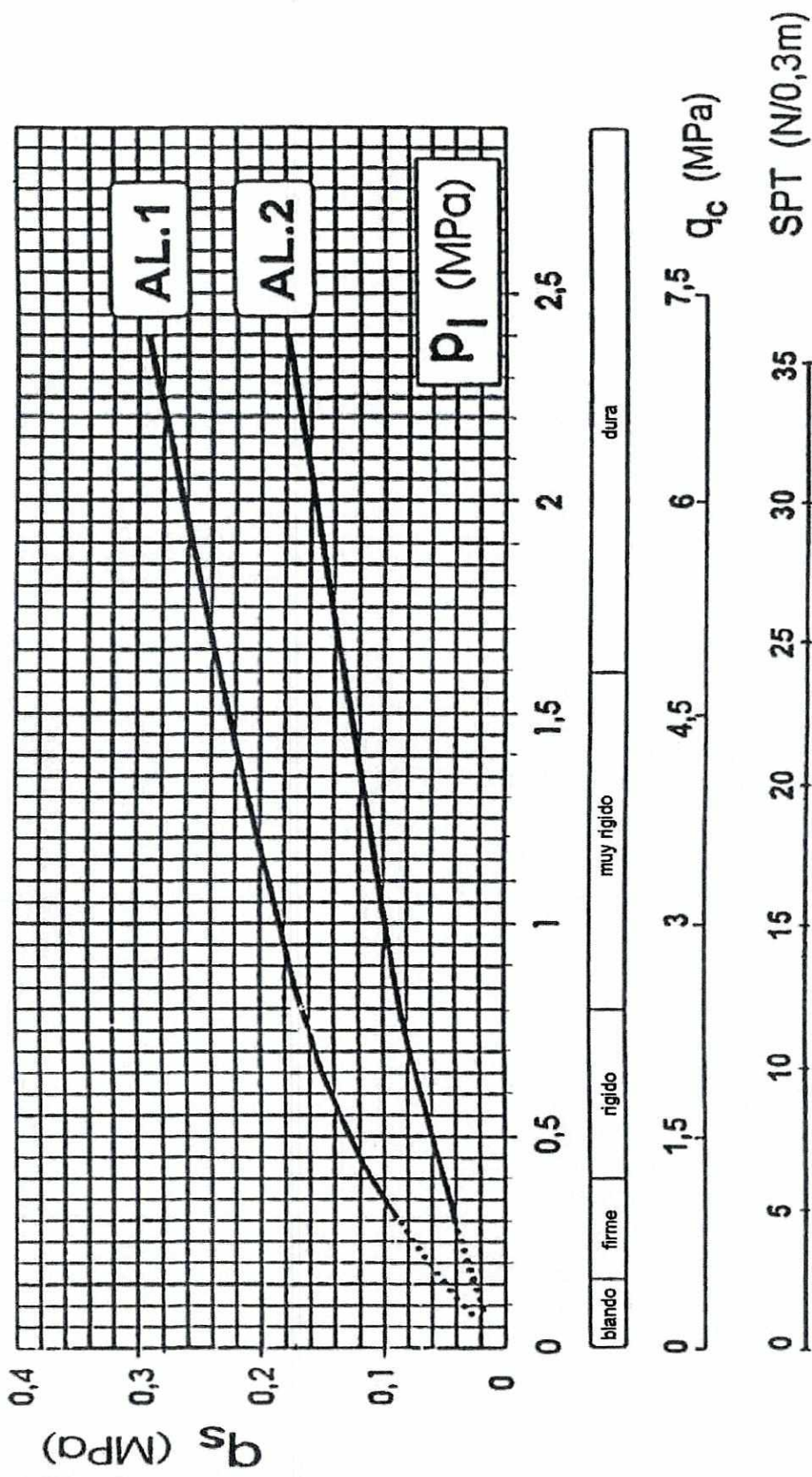


Figura 13. Ábaco para determinar q_s en Limos y Arcillas

(Bustamante, 1985:19)

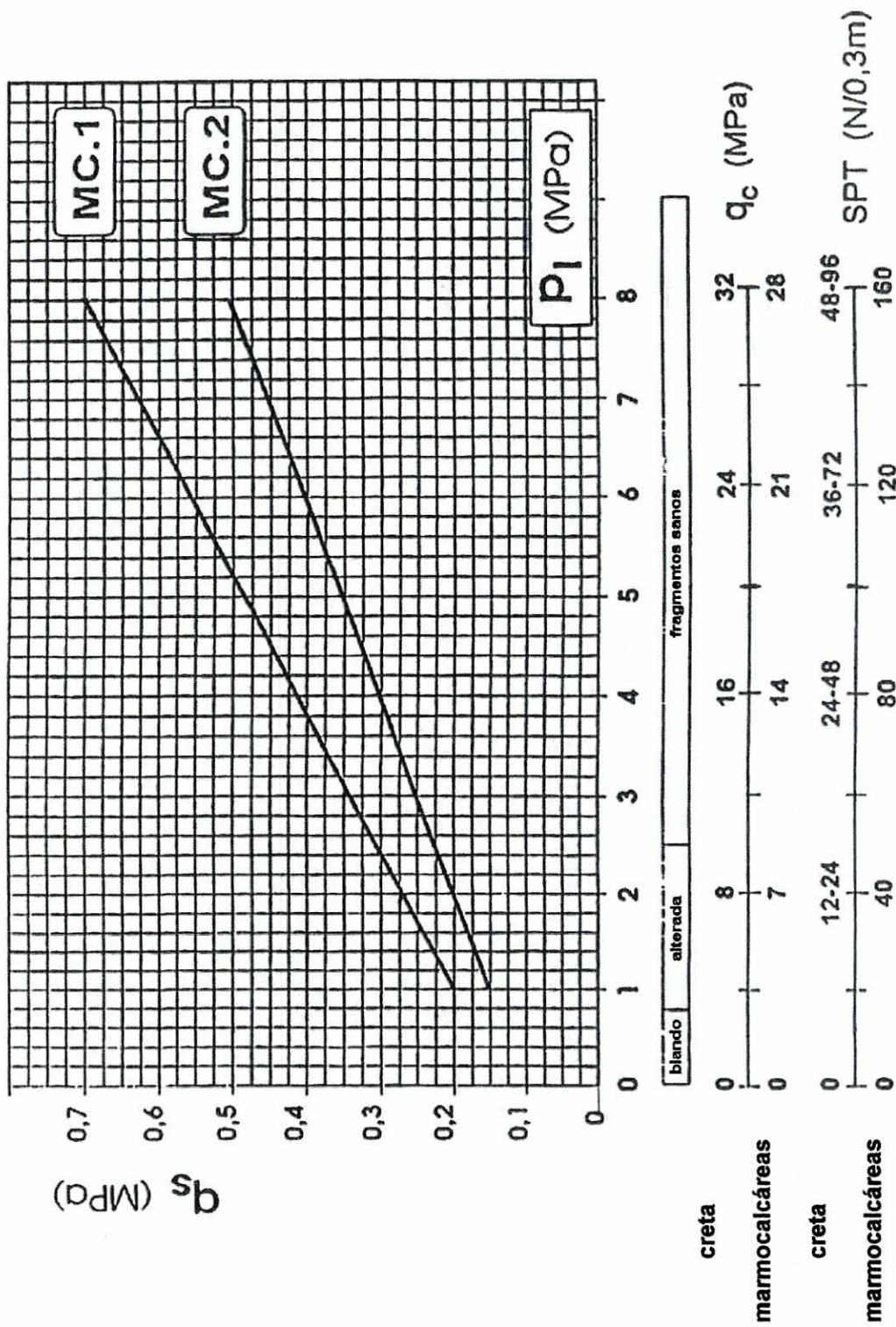


Figura 14. Ábaco para determinar q_s en Creta + Marmolcáreas

(Bustamante, 1985:20)

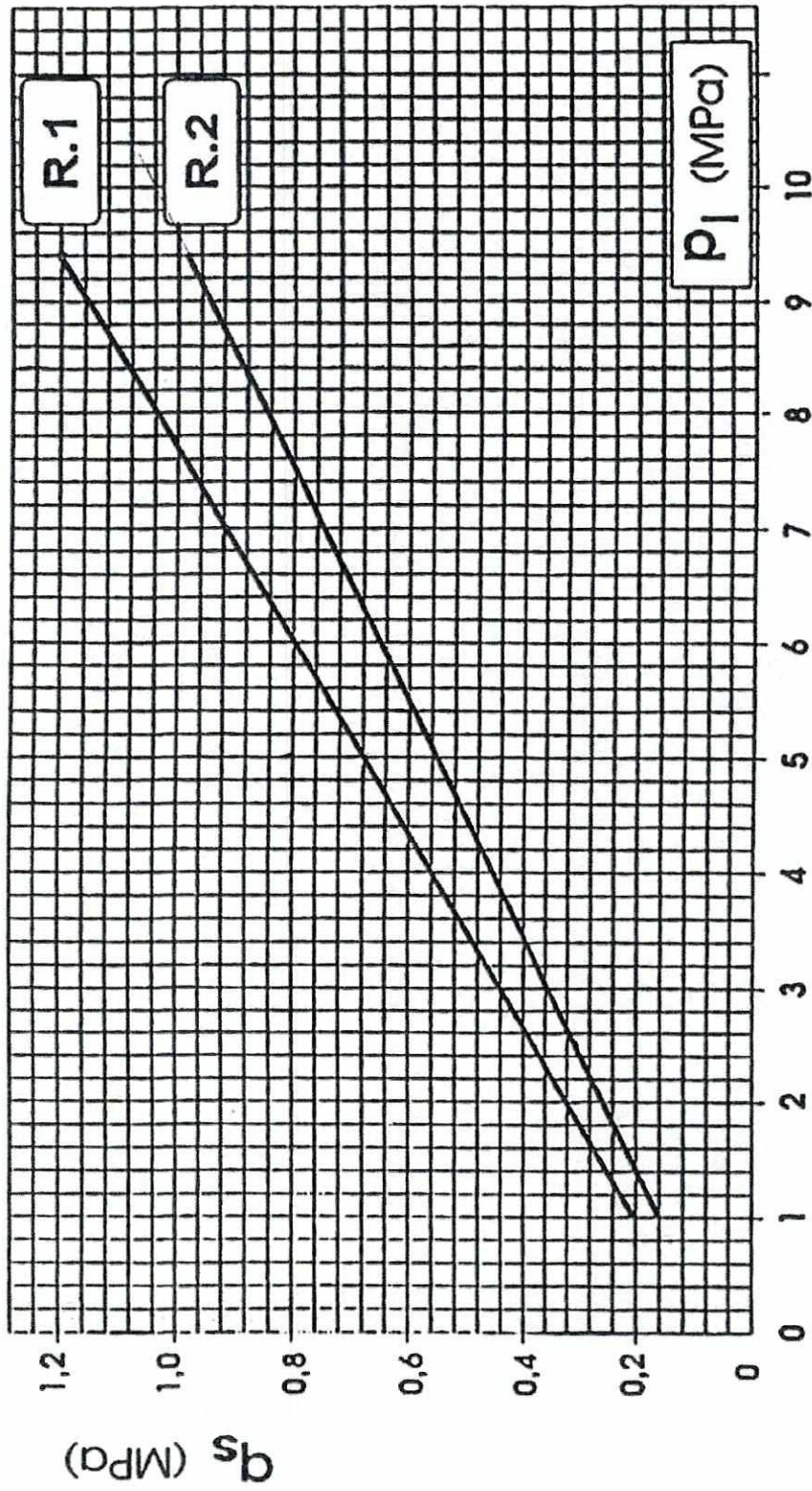


Figura 15. Ábaco para determinar q_s en Roca Alterada y Fragmentada

(Bustamante, 1985:20)

Salvo que se tenga experiencia con el tipo de micropilote en un determinado suelo específico, lo más conveniente para definir la resistencia media al deslizamiento y, por tanto, la longitud del bulbo de los micropilotes es efectuar ensayos de adecuación con micropilotes construidos para determinar los parámetros resistentes. A los resultados se les aplica un coeficiente de seguridad que suele ser de 1.75 a 2.0 para micropilotes provisionales y de 2.5 a 3.0 para micropilotes permanentes. Con estos coeficientes la resistencia de la zona de anclaje resulta igual a la carga límite, T_L , multiplicada por un factor comprendido entre 1.3 y 1.5 en caso de micropilotes provisionales y entre 1.5 y 1.8 en el caso de micropilotes permanentes.

H. Transmisión de carga de la estructura al micropilote

La transmisión de carga de la estructura al micropilote se puede realizar de varias formas tales como:

1. **Fricción:** Cuando la armadura del micropilote está en contacto directo con la cimentación y transmite la carga por medio de la fricción entre el concreto de la cimentación y la armadura. Esto ocurre generalmente en los recalces que atraviesan cimentaciones ya existentes.
2. **Mecánica:** Este tipo ocurre cuando la transmisión de la carga no ocurre directamente de la estructura al micropilote, sino que se usa alguna pieza, generalmente metálica. Este tipo de transmisión se utiliza para etapas temporales previas a una conexión definitiva.
3. **Directa por corte o aplastamiento:** Esto implica la construcción de un elemento estructural de conexión, como una zapata, en el cual se empotra

la cabeza del micro y la transmisión ocurre directamente al elemento. Por ejemplo, cuando se construyen los micropilotes y luego se construye una cimentación sobre éstos.

I. Ensayos de adecuación

La finalidad de construir micropilotes de ensayo es definir cuál va a ser el coeficiente de seguridad a utilizar y averiguar si las hipótesis tomadas en cuenta por el proyecto se verifican.

1-Micropilote

2-Gato

3-Bomba y manómetro

4-Medidor de asientos

5-Carga de Reacción

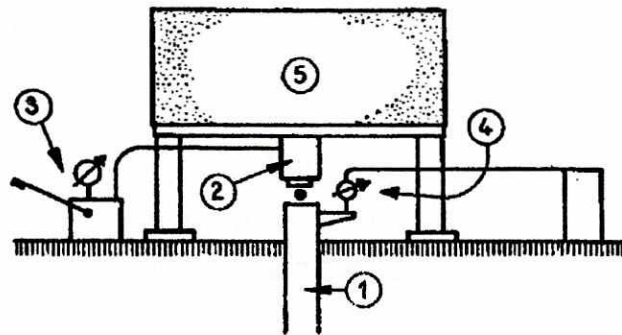


Figura 16. Sistema para ensayo de adecuación

Los micropilotes de ensayo se hacen antes de construir la obra y se deben cargar o tensar hasta su falla, quiere decir que en ningún caso se deben incluir en el sostenimiento de la obra.

Los resultados de los ensayos de micropilotes van a permitir conocer:

- i. Cuál es la carga o tensión de rotura del sellado y, por ende, cuál es el valor que podemos tomar en cuenta sobre el proyecto, al tomar en cuenta un coeficiente de seguridad
- ii. Cuál es el valor del fluaje del suelo (carga en la que se presenta una deformación permanente del suelo, previa a la falla del mismo).

1. Procedimiento del ensayo de adecuación

Los procedimientos de la prueba son independientes del tipo de suelo. El procedimiento seguido para hacer estos ensayos de campo se compone de los siguientes pasos.

- a. La aplicación de la carga al refuerzo del micropilote se realiza por medio de un gato hidráulico alimentado por una bomba manual o eléctrica. Este se coloca sobre una placa de acero apoyada directamente sobre la cabeza del micropilote y según como se aplique la carga así será el detalle de unión entre la cabeza del gato y la del micropilote.
- b. Se aplican incrementos de carga de $0.10 F_y(\text{Área del micropilote})$, se mantiene constante esta carga de tracción o compresión entre 10 y 60 minutos, en cada uno de estos incrementos de carga ($0.10 F_y \text{Área}$) hasta que se llega a un máximo de $(0.90 F_y \text{Área})$, siendo F_y la resistencia del acero al punto cedente. Durante cada uno de los incrementos de carga se llevan a cabo mediciones de asentamiento o elongación, por medio de un medidor de deformaciones análogo o digital fijado al cuerpo del gato y colocado de tal manera que la deformación sea medida directamente en la cabeza del mismo gato. Estas mediciones se realizan a los 0.0, 0.5, 1.0, 3.0, 5.0 y 10.0 minutos después de aplicar los incrementos de carga de $(0.10 F_y \text{Área})$. De acuerdo a la deformación registrada entre los minutos

1.00 y 10.00 se deciden los siguientes intervalos de aplicación de la carga. Si la deformación es menor de 1.0 cm. (0.4 pulg.) en los 10 primeros minutos, se prosigue con el siguiente ciclo de carga en intervalos de 10 minutos. De no haber sido así se tiene que dejar el ciclo de carga constante durante los siguientes 50 minutos y realizar las mediciones cada 10.0 minutos, si se produjera una deformación mayor.

- c. Los incrementos de carga ($0.10 F_y \cdot \text{Área}$) son aplicados hasta llegar al ciclo correspondiente a los ($0.90 F_y \cdot \text{Área}$), según las especificaciones o hasta la carga de la falla; se define la carga de falla como la que al mantenerse constante por un período de 60.0 minutos o menor produjera una deformación de 2.50 cm..

Durante el tensado, las precauciones de seguridad son esenciales. Operadores y observadores deben estar en los lados del equipo de tensado y nunca pasar enfrente o por encima de éste cuando está bajo carga.

2. Interpretación de los resultados

A partir de todos los datos obtenidos durante la tensión hasta ($0.9 F_y \cdot \text{Área}$ transversal del micropilote) se hace el siguiente gráfico sobre papel semi-logarítmico (Figura 17).

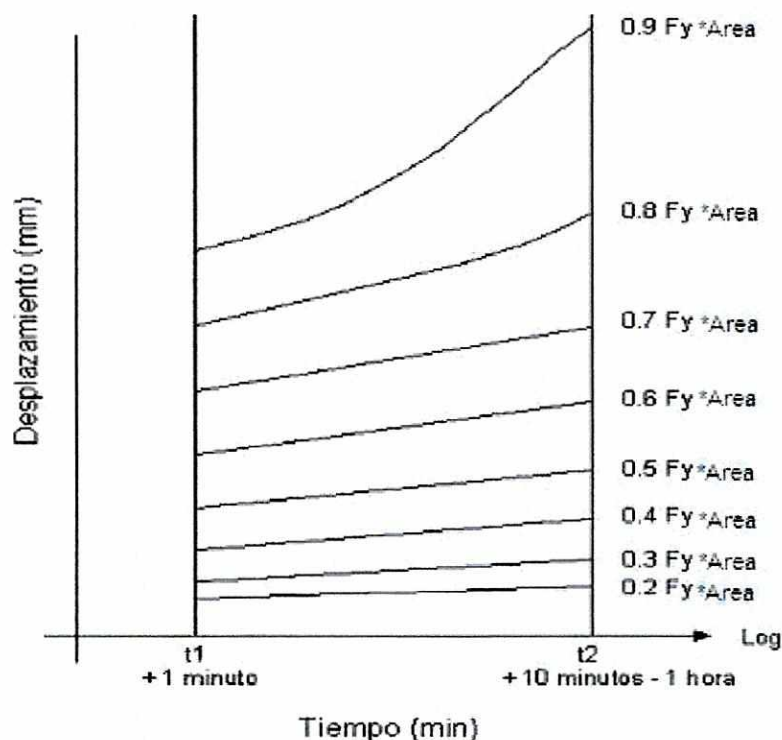


Figura 17. Grafico de desplazamiento lento

El examen del gráfico (Figura 17) presenta 3 posibilidades:

- Todas las curvas están casi rectas, como las curvas ($0.2F_y \cdot \text{Área}$) hasta ($0.7F_y \cdot \text{Área}$) de la Figura 17; quiere decir que no hemos obtenido la tracción límite del sellado (T_L).
- A partir de ($\alpha F_y \cdot \text{Área}$ transversal del micropilote), (α entre 0.2 y 0.7 (Figura 17)) obtenemos una curva con curvatura importante y rápidamente creciente (curva ($0.9F_y \cdot \text{Área}$) de la Figura 17). En tal caso hemos alcanzado la rotura entre $(\alpha - 0.1) \cdot \text{Área} \cdot F_y$ y $\alpha \cdot \text{Área} \cdot F_y$ por lo tanto definimos la tracción límite $T_L = (\alpha - 0.1) \cdot \text{Área} \cdot F_y$

- c. Si la curva de $(0.9F_y \cdot \text{Área})$ presentara una pequeña curvatura la rotura hubiera sido alcanzada en un valor intermedio entre $(0.9F_y \cdot \text{Área})$ y $(F_y \cdot \text{Área})$, en tal caso $T_L = 0.9 \cdot \text{Área} \cdot F_y$.

A partir de ese gráfico semilogarítmico, se hace un segundo gráfico (aritmético), se coloca sobre el eje OY la pendiente de las curvas obtenidas sobre el dibujo semilogarítmico y sobre el eje OX , los valores de diferentes incrementos de carga, sin importar los intervalos de tiempo utilizados en el ensayo para cada intervalo de carga (Figura 12).

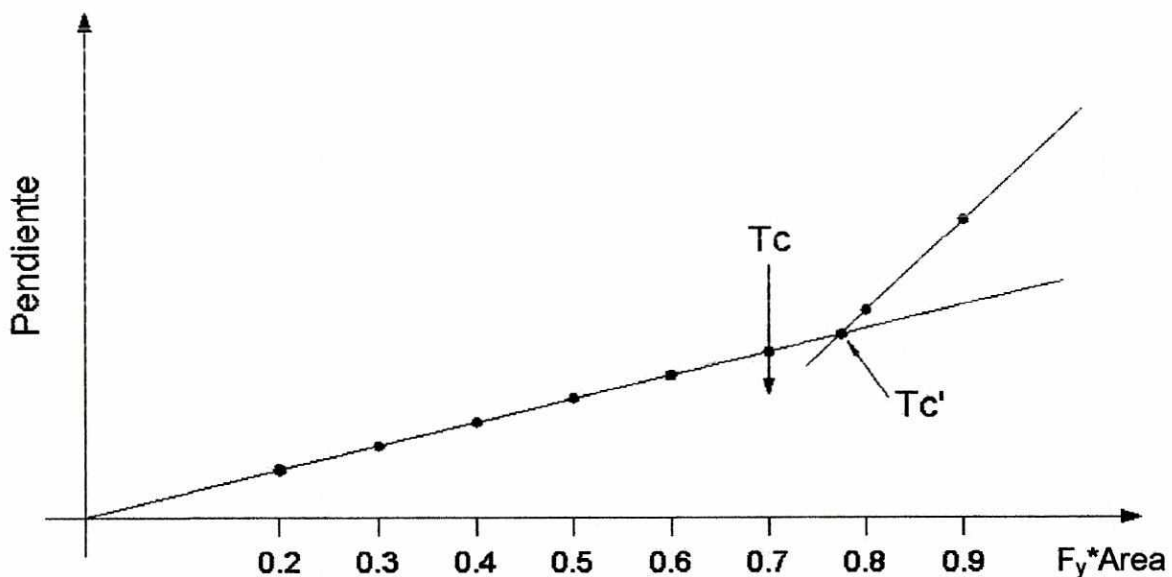


Figura 18. Gráfico de tensión de desplazamiento lento crítico

Si la tensión crítica se obtuvo, el dibujo presenta una serie de puntos alineados a partir de los cuales se puede hacer una recta que pasa por el origen y tiene validez, si un mínimo de 3 puntos está sobre dicha recta. Después, el gráfico

presenta un marcado cambio de pendiente, este punto es el que define la tensión crítica T_C' como lo muestra la Figura 18

Entonces la tensión crítica se define como $T_C = 0.9T_C' = 0.9(0.8F_y \cdot \text{Área})$, la reducción del 10% en la tensión T_C' se aplica como factor de seguridad para efectos de diseño.

IV DISEÑO DE MICROPILOTES

A. Consideraciones de diseño

Tomar la decisión de utilizar micropilotes debe ser un proceso cuidadoso y analítico. Lo primero es obtener un estudio de suelos del sitio, si es posible, efectuar perforaciones en un radio de 5.00 metros alrededor del punto de construcción de los micropilotes. También se deben examinar los siguientes factores:

1. Profundidad del estrato competente.
2. Carga y tipo de carga.
3. Limitaciones de espacio.
4. Interrupción de áreas de trabajo.
5. Costo de soluciones alternativas o convencionales.

Una vez determinada la necesidad de utilizar micropilote, se procede a la determinación de la clase que se utilizará y así iniciar el diseño del mismo. La norma francesa DTU 13.2, en su capítulo 7 (Micropilotes), indica que se deben utilizar al menos dos micropilotes para cimientos aislados.

B. Elementos del diseño

En los micropilotes se pueden diferenciar tres principales elementos de diseño.

1. Longitud Libre
2. Bulbo
3. Acero de refuerzo

1. Determinación de la Longitud Libre

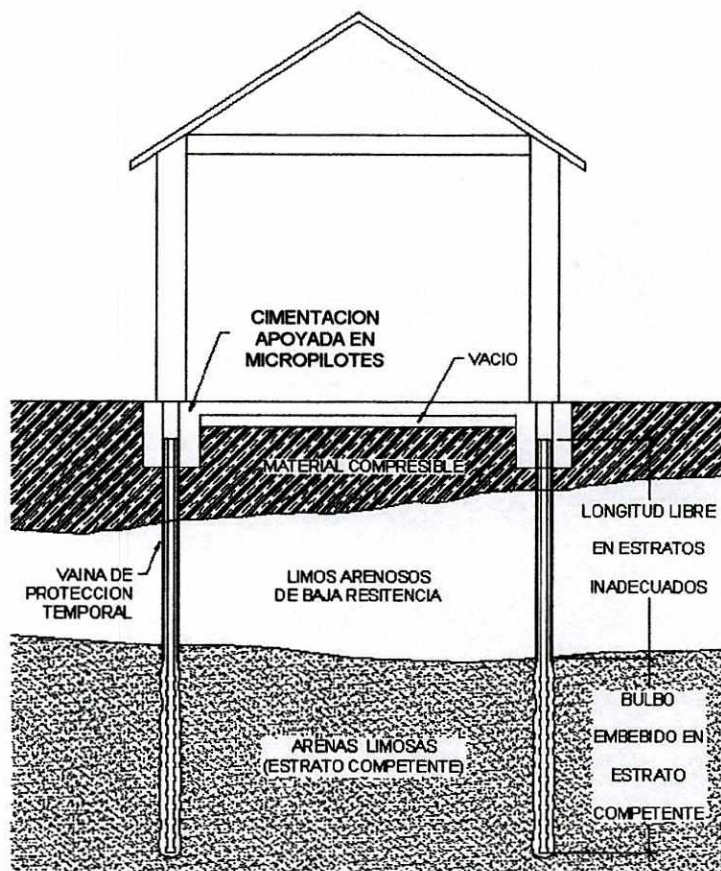


Figura 19. Cimentación directa utilizando micropilotes

La longitud libre se puede definir como la longitud del refuerzo de un micropilote que se encuentra embebida en un estrato inadecuado de suelo, por lo que su fricción con éste se desprecia. Generalmente esta zona no se inyecta a presión, pero lleva un recubrimiento con lechada para evitar la corrosión del refuerzo.

La longitud libre de un micropilote está básicamente definida por la estratigrafía del suelo, ya que al observar dicho perfil estratigráfico y sus características se determina cuál será el estrato adecuado para la formación del bulbo. Cabe mencionar que se debe tomar en cuenta el pandeo que puede sufrir el refuerzo en esta longitud.

La selección del estrato competente debe considerarse según las cargas que deba resistir, ya que un estrato puede ser adecuado para cargas pequeñas y distribuidas pero no así para la misma carga concentrada en un solo punto o área. De acuerdo a lo anterior se debe estudiar cuidadosamente el reporte de suelos realizado para el proyecto y determinar así el estrato adecuado.

2. Diseño del Bulbo

Al ser el bulbo una de las partes fundamentales de un micropilote, su diseño debe ser realizado de manera cuidadosa y debe tomar en cuenta todos los factores que pueden llegar a influir en su funcionamiento, tales como:

- a. Tipo de suelo (puede construirse en varios estratos contiguos)
- b. Tipo de carga
- c. Método de Inyección
- d. Nivel freático

Una vez analizado lo anterior y al saber las cargas (ya factorizadas) que deberá resistir el micropilote, se procede a realizar el diseño del bulbo en base a la siguiente relación:

$$T = \frac{\pi * \phi * \alpha * L * q_s}{F.S.} \quad (3)$$

Donde T es la carga admisible que resiste el micropilote (tracción), Φ es el diámetro de la perforación, α es un factor de expansión del bulbo del micropilote respecto al diámetro de la perforación, L es la longitud del cuerpo de la inclusión,

q_s es la fricción entre el bulbo del micropilote y el suelo y F.S. es el factor de seguridad.

Generalmente se determina el diámetro de la perforación según sea la capacidad de los equipos disponibles, usualmente se utilizan diámetros de 11.43 cm (4 ½"), 12.70 cm (5") y 15.24 cm (6 ¼"). La utilización de diámetros comerciales facilita la ejecución de los trabajos y a su vez disminuye el costo.

El factor α depende únicamente del tipo del suelo y del método de inyección. Para determinar este factor se han elaborado tablas que presentan valores experimentales (ver tabla 3). Aunque se recomienda ser conservador y tomar un valor 1.2 si no se conocen con exactitud las propiedades del suelo. Al mismo tiempo que se decide el factor de expansión se puede determinar la relación cemento/agua para la elaboración de la lechada.

La fricción entre el bulbo del micropilote q_s puede ser determinada de varias maneras, con los valores referenciales de la tabla 1, el método de los ábacos tabla 2 y sus figuras, o por medio de ensayos de carga, que es la manera más segura de obtener este valor.

El factor de seguridad es determinado por el uso que tendrán los micropilotes. Si son provisionales, el factor de seguridad es de 1.5 y si son permanentes de 1.66. Como se menciona anteriormente un valor de 2 reflejaría un diseño conservador.

La lechada de inyección está compuesta por agua y cemento. Se le puede agregar bentonita a modo de lubricante y/o aditivos según sean las necesidades de fraguado debido a presencia de nivel freático u otra limitación o condición

constructiva. La relación cemento/agua en la lechada se encuentra en la tabla 3 y depende del método de inyección que se utilizará. La resistencia de la lechada debe ser mayor que la fricción entre el bulbo y el suelo. Se recomienda utilizar una lechada con una resistencia no menor de 20.6 MPa (210 Kg/cm²).

La longitud del bulbo quedaría como incógnita para resolver. También se podría resolver como incógnita el diámetro a partir de una longitud predeterminada, principalmente por alguna delimitación de linderos.

3. Diseño del refuerzo

El diseño del refuerzo se puede realizar con utilización de cualquier código que sea conocido y de confianza para el diseñador, siempre con la siguiente relación:

$$As = \frac{T}{Fp} \quad (4)$$

Donde As es el área de acero requerida, T es la carga, Fp es el esfuerzo permisible.

Cabe mencionar que el refuerzo de acero está limitado por el diámetro de la perforación y debe contemplar alguna holgura para la inserción de la armadura de refuerzo en la perforación, al menos 2.5 cm (1") entre el refuerzo y todo el perímetro de la perforación.

Tabla 3 Valores experimentales para el coeficiente de expansión α

Suelo	Coeficiente " α "		Condiciones indicativas de aplicación	
	IRS (Al principio $p_i > p_l$)	IGU (Al principio $p_i < p_l$)	Cantidad de lechada al inyectar V_i	Dosificación lechada C/A
Gravas	1.8	1.3 a 1.4	1.5 V_s	
Gravas arenosas	1.6 a 1.8	1.2 a 1.4	1.5 V_s	
Arenas gravosas	1.5 a 1.6	1.2 a 1.3	1.5 V_s	
Arenas gruesas	1.4 a 1.5	1.1 a 1.2	1.5 V_s	
Arenas medias	1.4 a 1.5	1.1 a 1.2	1.5 V_s	1.7 a 2.4
Arenas finas	1.4 a 1.5	1.1 a 1.2	1.5 V_s	
Arenas limosas	1.4 a 1.5	1.1 a 1.2	1.5 a 2 V_s para IRS – 1.5 V_s para IGU	
Limos	1.4 a 1.6	1.1 a 1.2	2 V_s para IRS – 1.5 para IGU	1.7 a 2.4
Arcillas	1.8 a 2.0	1.2	2.5 a 3 V_s para IRS – 1.5 a 2 V_s para IGU	
Creta	1.8	1.1 a 1.2	1.5 a 2 V_s para capas compactas	1.7 a 2.4
Marmocalcáreas	1.8	1.1 a 1.2	2 a 6 V_s o más, para capas fracturadas	
Caliza alteras o fragmentadas	1.8	1.1 a 1.2	1.1 a 1.5 V_s para capas finamente fisuradas	
Roca alterada o fragmentada	1.2	1.1	2 V_s o más, para capas fracturadas	1.7 a 2.4

Donde:

IRS: Inyección Repetitiva y Selectiva a presiones elevadas

IGU: Inyección Global y Única a baja presión

P_i : presión de inyección en el tubo de perforación.

V_s : Volumen del bulbo excedente asociado al diámetro de perforación D_s

C/A: relación cemento/agua

(Bustamante, 1985:16)

Para este estudio se hará referencia al manual del Instituto Americano de Construcción de Acero (American Institute of Steel Construction, AISC). Se utilizará el método de los esfuerzos permitidos (Allowable Stress Design, ASD) en su novena edición, según el cual se deben tomar las siguientes relaciones para esfuerzos permisibles:

Para tensión, caso en que los micropilotes trabajen por fuerzas de arrancamiento.

Esto aplica para secciones prismáticas sujetas a tensión axial.

F_p es el menor de:

$0.60F_y$ sobre el área gruesa

ó

$0.50F_u$ sobre el área neta

Donde F_y es el esfuerzo nominal del acero y F_u es el esfuerzo último del acero.

Para compresión, en el caso en el que los micropilotes trabajen por fuerzas que los punzonen en el terreno. Esto se aplica para secciones prismáticas sujetas a compresión axial a través de su eje centroidal. El esfuerzo permisible para este caso está determinado por la longitud efectiva (Kl), y por la relación de esbeltez

C_c .

F_p es:

$$F_p = \frac{\left[1 - \frac{(Kl/r)^2}{2C_c^2}\right] F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(Kl/r)}{8C_c} - \frac{(Kl/r)^3}{8C_c^3}} \quad (5)$$

Donde

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}} \quad (6)$$

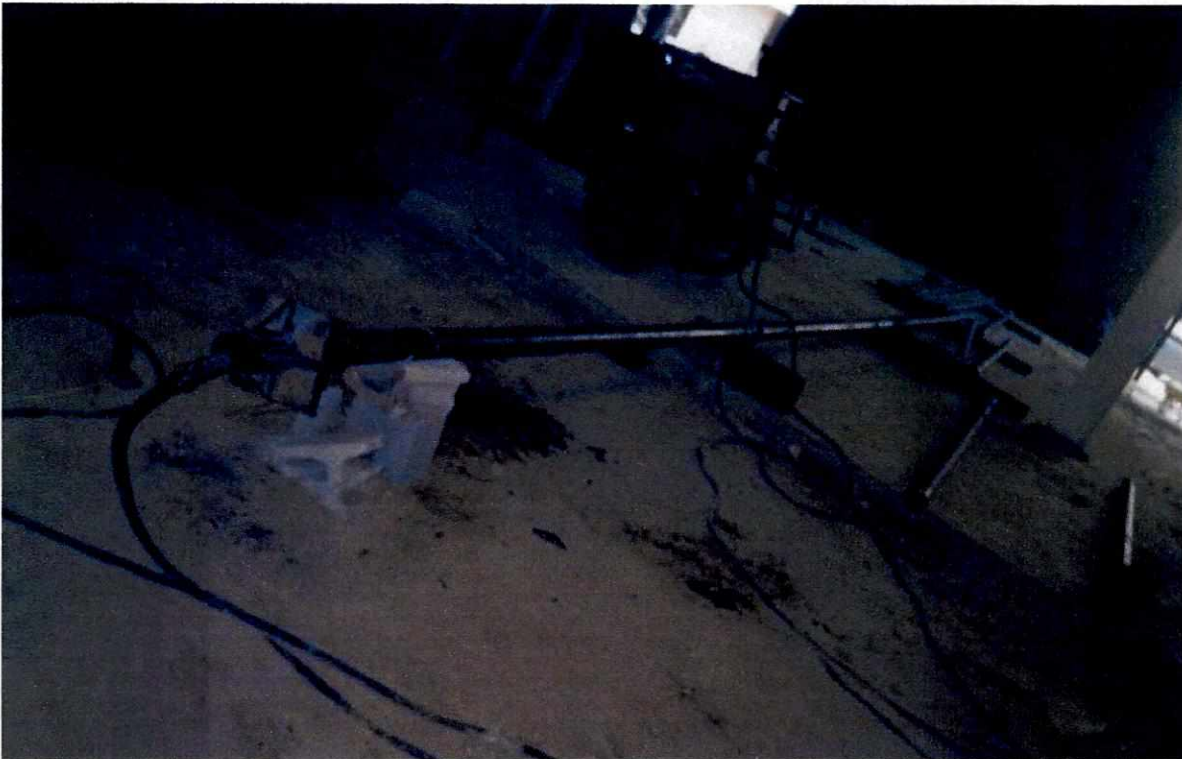


Figura 20. Refuerzo de micropilote armado parcialmente

Donde K es el coeficiente para longitud efectiva que es de 0.65 para el caso de micropilotes, l es la longitud libre del micropilote, ya que la zona del bulbo se considera empotrada en el terreno, r es el radio de giro de la sección y E es el módulo de elasticidad de la sección (199,950 MPa (29,000 ksi)).

Es importante resaltar que en situaciones en las que el micropilote esté sometido a esfuerzos de tensión y compresión prevalecerá el menor F_p de ambos. Para casos en que se presenten esfuerzos de flexión o esfuerzos combinados, tal es el caso

de las pantallas de micropilotes, se tomará únicamente la altura de la pantalla o longitud descubierta para ser analizada. En la figura 20 podemos observar la armadura de un micropilote ensamblada parcialmente, antes de ser introducida dentro de la perforación.

Por último se deja la distribución de los agujeros de inyección. Estos dependen en gran parte de los equipos que se tengan para ejecutar el trabajo, básicamente el tamaño del obturador, siempre y cuando la separación no sea mayor de 1.00 m. El diámetro de los agujeros varía entre $\frac{3}{8}$ " y $\frac{1}{2}$ " de acuerdo al equipo disponible para la inyección.

a. Diseño de acoples del refuerzo

Como parte complementaria del diseño del refuerzo, se realiza el cálculo de los acoples o roscado entre tubos, ya que éstos tienen una longitud de hasta 6.00 metros. Se hace necesario normalmente unir tubos para alcanzar la longitud requerida.

El roscado no es utilizado frecuentemente por la dificultad que presenta roscar los tubos debido a su longitud y especialmente cuando los diámetros son mayores a los 150 mm. Esta dificultad se refleja en el costo del roscado. Para calcular la resistencia del roscado se toma el área gruesa (nominal) de la tubería que se utilizará, según el manual de la AISC parte 4 el esfuerzo de tensión permisible, F_t , es:

$$F_t = 0.33 F_u \quad (7)$$

Donde F_u es el esfuerzo mínimo a tensión especificado para el material.

Para el diseño de acoples con un tubo exterior sin rosca soldado a la tubería, se busca una sección de mayor diámetro interior que el diámetro exterior de la tubería del micropilote con una área transversal igual o mayor que la tubería que se acoplará, y del mismo material. La longitud de este acople debe ser de al menos una vez el diámetro de la tubería a acoplar. Para la unión del tubo de acople se utiliza soldadura de filete, cuya longitud se determina a partir del espesor efectivo de la soldadura y la resistencia del electrodo que se utilizará.

$$A = t \cdot L \quad (\text{ver Figura 21}) \quad (8)$$

$$A = 0.707w \cdot L \quad (\text{ver Figura 21}) \quad (9)$$

$F_v = 0.30 \cdot F_E$ (para soldaduras por corte normal o paralelo al área efectiva, según AISC, parte 5, capítulo J)

Entonces

$$L = \frac{P}{0.3F_E \cdot 0.707w} \quad (10)$$

Donde A es área de la soldadura, t es el espesor efectivo de la soldadura, w es la base del triángulo de la soldadura, L es la longitud de la soldadura, F_v es el esfuerzo permisible para la soldadura, F_E es el esfuerzo nominal del electrodo y P es la carga aplicada.

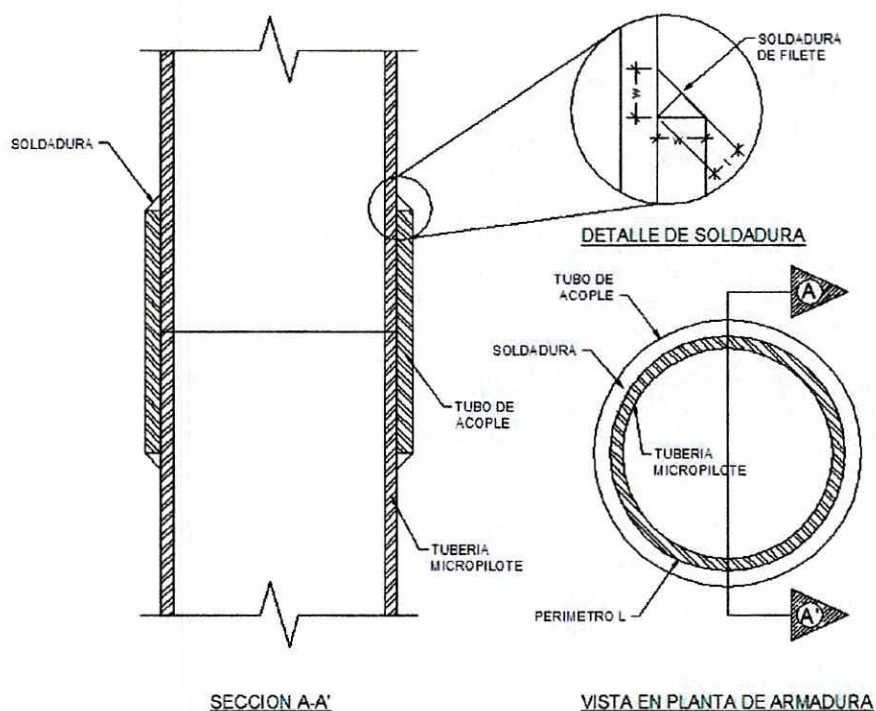


Figura 21. Detalle de tubo de acople

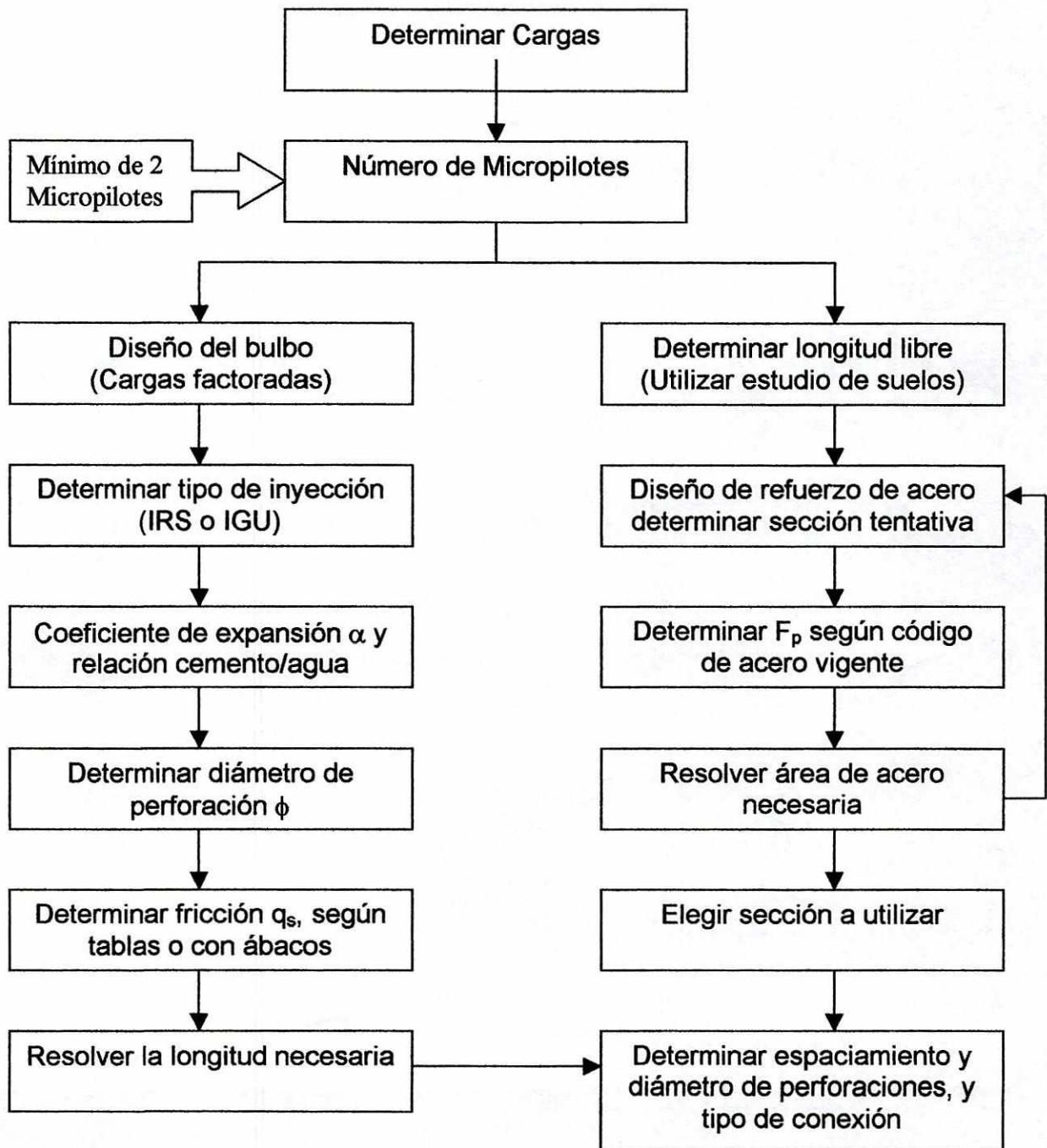
b. Protección contra la corrosión

- 1) El refuerzo en la longitud libre debe quedar protegido por lechada que debe llenar el vacío entre el suelo y la armadura. Para una protección extra contra la corrosión, especialmente en la presencia de cloruros, se pueden utilizar varios métodos, aplicar pinturas anticorrosivas, epóxicas, tratamientos químicos o variación en el porcentaje de carbono en el acero por ejemplo. Algunos métodos para la protección contra la corrosión son:
- 2) Protección catódica o anódica según ASTM G 109 utilizando aditivos en la lechada.
- 3) Aleaciones especiales según ASTM A 789/A 789M – 90, A 790/A 790M – 91, A 847 para resistencia a la corrosión en general y corrosión por fatiga para tubería de acero inoxidable y soldada.

- 4) Pinturas epóxicas para revestimiento
- 5) Aumento de la sección entre un 5 a 10% como prevención de la corrosión
- 6) Agregar anticorrosivos no catódicos ni anódicos en la lechada.

Todo el proceso se resume en un diagrama de flujo (Figura 22).

Figura 22. Diagrama de flujo para diseño de micropilotes



C. Ejemplo de diseño de micropilotes

Se ha decidido ampliar las instalaciones de un edificio público. Para tal fin se construirán dos pisos adicionales sobre la edificación existente. El edificio consta de un solo sótano con una altura de 2.50 metros hasta las vigas y de 2.90 hasta la losa de entrepiso. Originalmente la cimentación de este edificio no estaba diseñada para estas cargas, por lo que se ha decidido recalzar la cimentación existente, la cual está compuesta por cimientos individuales cuadrados de 1.50 metros.

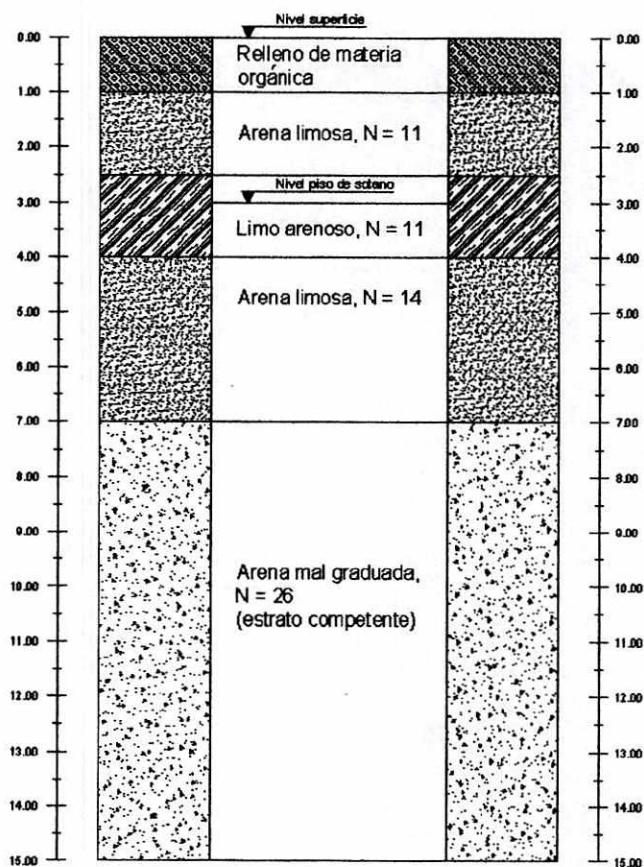


Figura 23. Perfil de suelo

Por aparte se ha reforzado el sistema estructural para resistir las cargas adicionales, tanto verticales como laterales (viento, sismo, etc.). El diseñador de la

nueva estructura ha determinado que cada cimiento deberá soportar una carga ya mayorada de 60 Ton y sin mayorar 35 Ton. Según el estudio de suelos su capacidad soporte no es suficiente para las cargas de la nueva estructura. Por requerimientos del cliente no se deberán suspender las actividades en el edificio durante la ejecución de los trabajos de la cimentación.

Al Analizar lo anterior se ha tomado la decisión de recalzar estas estructuras por medio de micropilotes.

Como primer paso y según las cargas proporcionadas, se ha determinado utilizar dos micropilotes por cada zapata por lo que cada micropilote soportará una carga axial de 30 Ton.

Al observar el perfil del suelo determinamos una longitud libre de 4.00 metros menos 0.50 metros de espesor de la zapata nos da una profundidad de 3.50 metros de longitud libre.

Para este caso se ha decidido utilizar micropilotes inyectados a presión con el método de inyección IRS (Inyección Repetitiva y Selectiva).

Basado en esto nos referimos a la Tabla No. 3 (Valores experimentales para el coeficiente de expansión α). En esta tabla se observa que para Arenas Gruesas el coeficiente α tiene un valor entre 1.4 y 1.5, si somos conservadores tomamos 1.4. En esta misma tabla se observa la relación de cemento/agua para la elaboración de la lechada, con un valor de 1.7 a 2.4 por lo que tomamos el valor promedio = $((1.7 + 2.4))/2 = 2.05$ aproximado a la décima superior 2.1. También en esta misma tabla se puede observar el consumo aproximado de lechada que se tendrá con relación al volumen de la perforación:

$$V_i = F_i \cdot \pi \cdot r^2 \cdot L_b \quad (11)$$

Donde

V_i es el volumen de la inyección, F_i es el factor de inyección, r es el radio de la perforación y L_b el de la longitud del bulbo.

Luego de esto se determina el diámetro de la broca de perforación el que será de 158.75 mm (6 ¼ "). Esto basado en la confirmación de disponibilidad de este diámetro en el mercado.

Luego se utiliza el método de los ábacos para determinar la fricción entre el bulbo y el suelo q_s . Para esto se toma la Tabla No. 2 (ábacos para la determinación de la fricción límite q_s) que indica utilizar el ábaco A3.03, SG.1 para arenas gruesas con el método de inyección IRS (ver figura 12) según el cual $q_s = 0.175$ MPa (1.785 Kg/cm²).

Se utiliza un factor de seguridad de 2 para micropilotes definitivos, para un diseño conservador.

Con todos los datos anteriores se procede a calcular la longitud adecuada, de ser necesario se cambiará el diámetro de la perforación.

$$L = \frac{T \cdot F.S.}{\pi \cdot \phi \cdot \alpha \cdot q_s}$$

Donde T está en Kg, ϕ en cm, q_s en Kg/cm² y $F.S.$, α son adimensionales

$$L = \frac{30,000 \cdot 2}{\pi \cdot 15.875 \cdot 1.2 \cdot 1.785} = 561.65 \text{ cm}$$

Al aproximar la longitud al metro superior tenemos un bulbo con una longitud final de 6.00 metros.

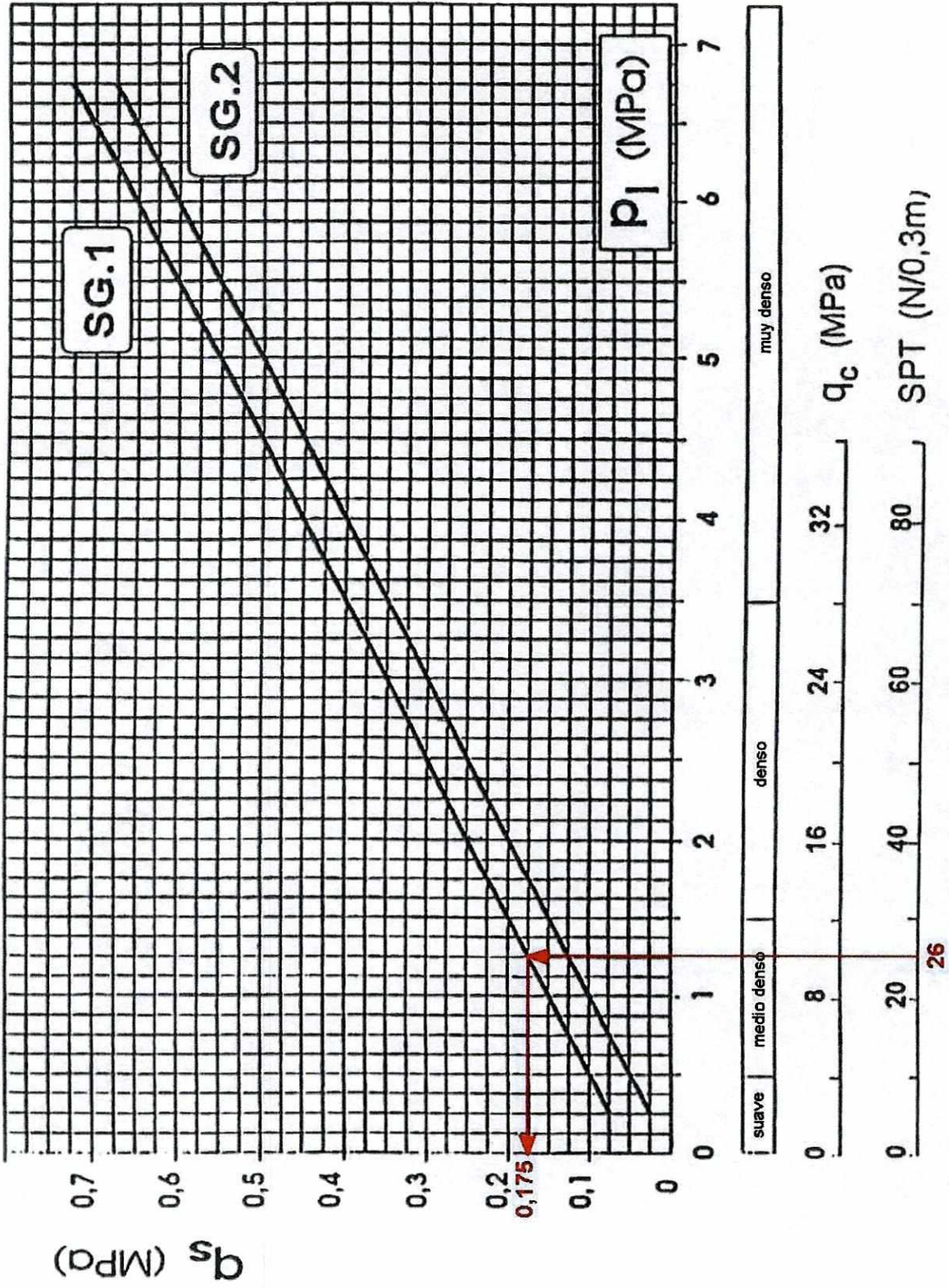


Figura 24. Ejemplo del Ábaco para determinar q_s en Arena+Grava

Al tener ya definida la longitud libre se puede iniciar el diseño del refuerzo de acero limitado por el diámetro de perforación.

En este caso solamente sería necesario calcular el refuerzo por los esfuerzos de compresión, pero a manera ilustrativa se calcularán para la misma carga en tensión.

1. Caso I. Cálculo del refuerzo por compresión:

Con la longitud libre, longitud a analizar y el diámetro definidos se selecciona una sección tentativa, que cumpla con los requerimientos constructivos (diámetro) para luego determinar F_p :

Acero a utilizar A53 Tipo E Grado B con $F_y = 35$ Ksi y $F_u = 60$ Ksi y se elige una sección tubular de 3" de diámetro nominal cédula 40, diámetro exterior 3.500", diámetro interior 3.068" con un espesor de pared de 0.216" y un área de 2.230 pulg²

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}}$$

Donde E y F_y están en Ksi y C_c es adimensional. En el caso del diseño del refuerzo se utilizará el sistema inglés por compatibilidad con el manual utilizado.

$$C_c = \sqrt{\frac{2 * \pi^2 * 29,000}{35}} = 127.89 \text{ y } (Kl/r) = (0.65 * 137.79 / 1.16) = 77.21$$

Entonces F_p es:

$$F_p = \frac{\left[1 - \frac{(Kl/r)^2}{2C_c^2}\right] F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(Kl/r)}{8C_c} - \frac{(Kl/r)^3}{8C_c^3}}$$

Donde l y r están en pulgadas, F_p y F_y están en psi y K y C_c son adimensionales

$$F_p = \frac{\left[1 - \frac{(0.65 * 137.79 / 1.16)^2}{2 * 127.89^2}\right] F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(0.65 * 137.79 / 1.16)}{8 * 127.89} - \frac{(0.65 * 137.79 / 1.16)^3}{8 * 127.89^3}} = 0.44F_r = 0.44(35,000) = 15,400 \text{ psi}$$

$$F_{p \text{ requerido}} = \frac{T}{A_{s_{\text{tubo}}}}$$

Donde A_s está en pulg^2 , T en libras y F_p en psi.

$$F_{p \text{ requerido}} = \frac{17,500 * 2.2046}{2.23} = 17,300.67 \text{ psi}$$

Se elige otra sección Acero a utilizar A53 Tipo E Grado B con $F_y = 35 \text{ Ksi}$ y $F_u = 60 \text{ Ksi}$ y elegimos una sección tubular de 3.000" de diámetro nominal cédula 80, diámetro exterior 3.500", diámetro interior 2.900", con un espesor de pared de 0.300" y un área de 3.020 pulg^2 .

$$(Kl/r) = (0.65 * 137.79 / 1.14) = 78.56$$

$$F_p = \frac{\left[1 - \frac{(0.65 * 137.79 / 1.14)^2}{2 * 127.89^2}\right] F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(0.65 * 137.79 / 1.14)}{8 * 127.89} - \frac{(0.65 * 137.79 / 1.14)^3}{8 * 127.89^3}} = 0.43F_r = 0.43(35,000) = 15,050 \text{ psi}$$

$$F_p \text{ requerido} = \frac{17,500 * 2.2046}{3.02} = 12,775 \text{ psi}$$

Esta sección satisface los requerimientos constructivos y técnicos.

Por último se determina el espaciamiento de los agujeros para inyección y el tipo de unión entre tubos. Primero se harán cuatro perforaciones concéntricas cada 50 cm, esto con el conocimiento de que se tiene un obturador con gomas de 65 cm, por lo que se dejará una distancia libre entre el fondo y el primer juego de perforaciones de 65 cm. Al analizar el probable volumen de lechada que se va a consumir y el estimado de la tabla 2, se utilizarán agujeros de ¼".

Se empleará una unión con tubo exterior soldado a la tubería principal para lo cual se eligió un tubo de diámetro interior de 2.900", un diámetro exterior de 3.500", con una pared de .300" de espesor y con un área transversal de 3.020 pulg² y un perímetro interior de 9.11". Se ha decidido utilizar un electrodo tipo E90 con un F_E de 90 Ksi.

$$A = t * L$$

$$A = 0.707w * L$$

$$F_v = 0.30 * F_E \text{ (para soldaduras con corte normal o paralelo al área efectiva, según}$$

AISC, parte 5, capítulo J)

Entonces

$$L = \frac{P}{0.3F_E * 0.707w}$$

$$L = \frac{17.50 * 2.2046}{0.3(90) * 0.707(.3)} = 6.74" \cong 7.00"$$

Esta longitud es menor al perímetro por lo que se acepta. Como parte de una buena práctica se recomienda soldar el perímetro completo para mayor seguridad.

2. Caso II. Cálculo del refuerzo por tensión (se presenta sólo como ilustración):

La variación respecto al diseño por compresión se da únicamente en el refuerzo de acero, ya que el bulbo al funcionar a tracción (fricción entre el bulbo y el suelo) no presenta diferencia si la carga es de compresión o tensión.

Si se toman las limitantes constructivas anteriormente expuestas, se selecciona una sección tentativa: Acero a utilizar A53 Tipo E Grado B con $F_y = 35$ Ksi y $F_u = 60$ Ksi y elegimos una sección tubular de 3" de diámetro nominal cédula 40, diámetro exterior 3.500", diámetro interior 3.068", con un espesor de pared de 0.216" y un área de 2.23 pulg²

F_p es el menor de:

$$F_p = 0.6F_y = 0.6 \cdot 35,000 = 21,000 \text{ psi}$$

$$F_p = 0.5F_u = 0.5 \cdot 60,000 = 30,000 \text{ psi}$$

$$F_p = 21,000 \text{ psi}$$

$$F_{p \text{ requerido}} = \frac{17,500 \cdot 2.2046}{2.23} = 17,300.67 \text{ psi} \quad \text{Esta sección cumple}$$

Se intenta con la siguiente sección más pequeña y se toma en cuenta que el diámetro del obturador es de 2", por lo que no se debería utilizar una sección con diámetro interno inferior a 2 ½ "

Acero a utilizar A53 Tipo E Grado B con $F_y = 35$ Ksi y $F_u = 60$ Ksi y elegimos una sección tubular de 2 ½" de diámetro nominal cédula 40, diámetro exterior 2.875",

diámetro interior 2.469" con un espesor de pared de 0.203" y un área de 1.700 pulg²

$$F_{\text{requerido}} = \frac{17,500 * 2.2046}{1.70} = 22,694.41 \text{ psi} \quad \text{No cumple}$$

Por lo que se toma la sección anterior de 3" de diámetro nominal.

En resumen se tiene un micropilote de 10.00 metros de longitud total con las siguientes características:

Tabla 4. Resumen de características y dimensiones del micropilote del ejemplo

Características	Dimensiones
Empotramiento en zapata	0.50 m
Longitud libre	3.50 m
Longitud de bulbo	6.00 m
Diámetro nominal (Cédula 80, A53)	0.0762 m (3")
Diámetro interior	0.0737 m (2.900")
Diámetro exterior	0.0889 (3.500")
Área de acero	19.48 cm ² (3.02 in ²)
Separación vertical entre agujeros	0.50 m
Separación diametral entre agujeros	Simétricos al eje del tubo (cada 90°)

Por último cabe mencionar que el detalle de la cabeza del micropilote tiene el objeto de brindar sujeción extra entre la carga (cimentación, maquinaria, columna, etc...) y el acero de refuerzo, por lo que deberá estar acorde a cada caso específico. En el caso de este ejemplo se decidió utilizar cuatro orejas dobladas

de barras de acero de 3/8" grado 60 (60,000psi o 4200 Kg/cm²) (ver detalle en plano constructivo Figura 26).



Figuras 25. Diferentes tipos de detalles de cabezas para micropilotes

V. PROCESO CONSTRUCTIVO

A. Descripción del proceso

El proceso constructivo de los micropilotes se puede dividir en tres etapas:

EJECUCION DE UN MICROPILOTE CON BULBO

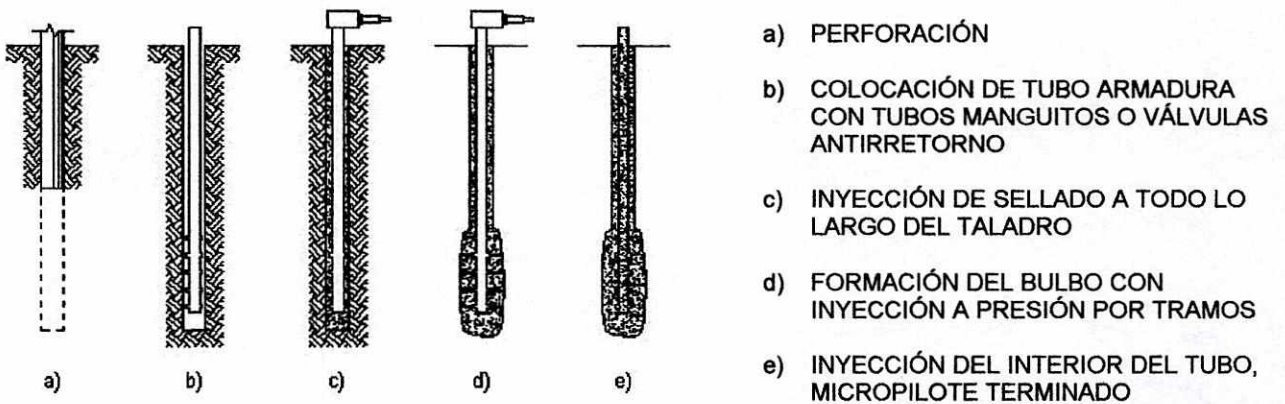


Figura 27. Ejecución de micropilotes con bulbo

EJECUCION DE UN MICROPILOTE CONVENCIONAL

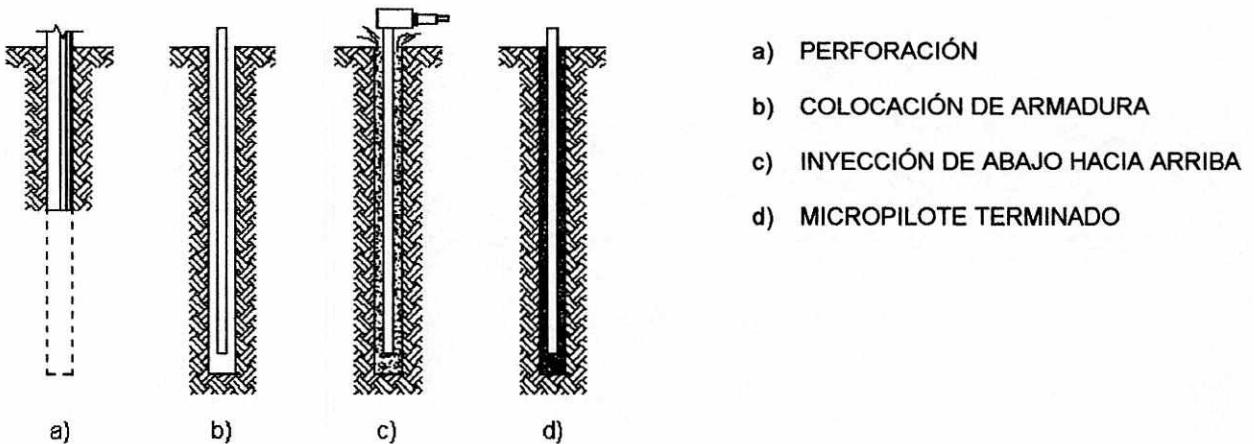


Figura 28. Ejecución de micropilote convencional

1. Perforación

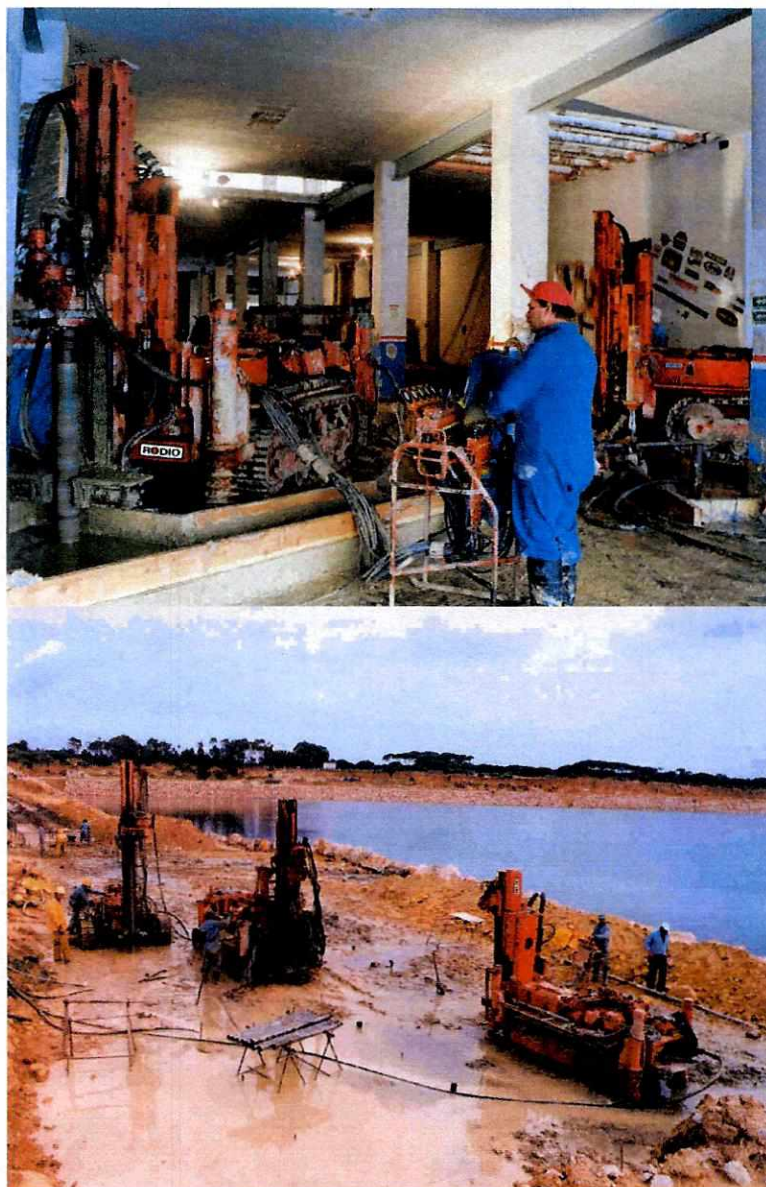


Figura 29. Perforación de micropilotes

La perforación se puede realizar con la utilización de los diferentes métodos de perforación existentes, rotación, rotopercusión, percusión. Se puede utilizar aire o agua para facilitar la perforación. Existen actualmente en el mercado muchos fabricantes de maquinaria que satisfacen las necesidades de desplazamiento y capacidad para ejecutar este tipo de perforación.

2. Equipamiento o inserción del refuerzo

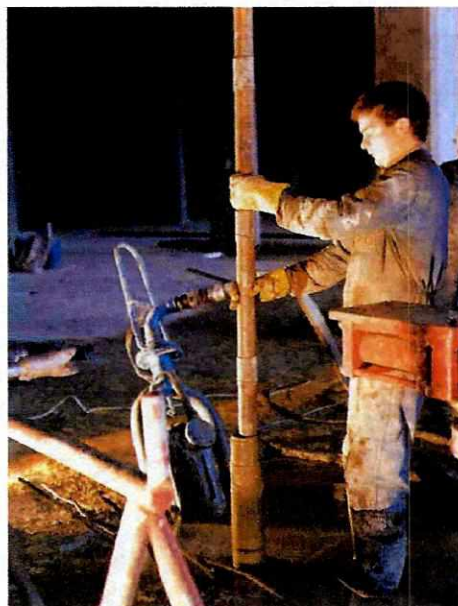


Figura 30. Colocación del refuerzo

Debido a la versatilidad de esta técnica, el refuerzo puede tener diferentes formas por lo que su colocación puede variar, aunque la colocación del refuerzo consiste básicamente en insertar una armadura dentro de la perforación, ésta se puede introducir por partes o en un solo tramo. Es importante hacer notar que para la correcta inserción del refuerzo se deben colocar centralizadores a la armadura, para así evitar dificultades y excentricidades no deseadas.

3. Inyección del bulbo y sellado del refuerzo

El procedimiento de inyección depende del método que se utilizará. Para el método IGU se emplea una bomba de inyección y un obturador de una goma accionado neumáticamente por un compresor. El obturador se coloca en la boca del tubo (la boca está abierta) donde se inyecta desde el fondo a través de una manguera. Esta inyección se realiza sólo una vez.

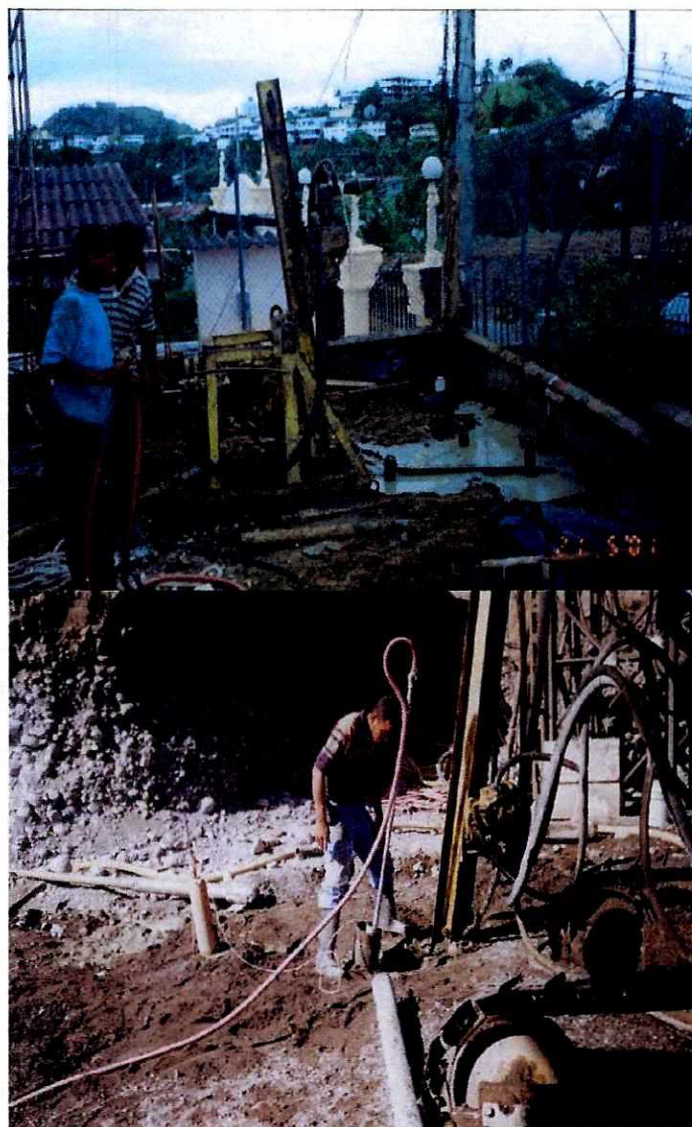


Figura 31. Inyección del bulbo de lechada

Para el método IRS se utiliza la bomba de inyección y un obturador de doble goma accionado neumáticamente por un compresor. En este caso el obturador se coloca en la boca del tubo (la boca está sellada), luego se cierran las dos gomas del obturador y se comienza la inyección. Esta inyección se va realizando por tramos y se repite en un mismo punto si es necesario.

B. Equipo y personal en la ejecución de micropilotes

En las obras de micropilotes, el personal y los equipos se pueden definir con facilidad lo que permite reducir riesgos. Para la ejecución de micropilotes se requiere el siguiente equipo y personal (obra con un único equipo).

Tabla No. 5 Equipo y personal para ejecución de micropilotes

Equipo	Personal
Perforadora (Hidráulica o neumática)	Operador de perforadora
Soldadora	Soldador
Bomba de Inyección	Operador de compresor y bomba de inyección
Compresor	
Obturador	
Accesorios de perforación e inyección	2 ayudantes
Bomba de Agua	

VI. CONCLUSIONES

- A. La utilización de micropilotes como elementos estructurales para cimentaciones y estabilización de taludes presenta ventajas sustanciales en tiempo y costo, especialmente en situaciones con limitaciones de espacio, funcionalidad de las estructuras o condiciones adversas del terreno.
- B. Los micropilotes tienen tres componentes principales: el refuerzo, el bulbo y el suelo y dos elementos estructurales: el bulbo y la armadura de refuerzo.
- C. Los micropilotes son elementos con capacidad de resistir esfuerzos de tensión, compresión y flexión, característica proporcionada por el refuerzo rígido de acero.
- D. Como primer paso para el mejor desarrollo de un proyecto de micropilotes, tanto para el diseño como para la ejecución, se debe realizar un estudio de suelos que incluya perforaciones en un radio no mayor de 5 metros del sitio de construcción de los micropilotes.
- E. Durante el diseño se debe hacer más hincapié en las características del terreno (nivel freático, expansión de la lechada, características físicas y mecánicas) para realizar un diseño eficiente.
- F. El diseño del refuerzo de acero se puede realizar con el método de esfuerzos permitidos (ASD (Allowable Stress Design)) o el método de factor de carga y resistencia (LRFD Load Resistance Factor Design), siempre y

cuando se mantenga congruencia con las cargas utilizadas al diseñar el bulbo.

- G. Para garantizar la durabilidad de los micropilotes se deben tomar medidas para proteger el refuerzo, especialmente en la longitud libre. Es básico proveer un tratamiento anticorrosión y/o aumentar la sección del refuerzo.

VII. BIBLIOGRAFÍA

Annual Book of American Society for Testing and Materials Standards Vol 01.01..

1995. American Society for Testing and Materials. EEUU.

Bustamante, Michelle, et al. 1985. *Un método para el cálculo de los anclajes y de los micropilotes inyectados*. Francia, Sección de Cimentaciones, Laboratorio Central de Puentes y Caminos.

DTU 13.2 Normalisation française. Fondations profondes pour le bâtiment. 1992.

Francia, Afnor.

Fenoux, G. 1988. *Technical guide*. Francia, Soletanche,

Jiménez, José Antonio, et al. 1980. *Geotecnia y cimientos III segunda parte*.

España, Editorial Rueda.

Los Micropilotes. 1986. SETRA, Ministère de l'urbanisme du logement et des transports, Francia.

Manual of steel construction, Allowable Stress Design. 1995. American Institute of Steel Construction (ASIC). 9ª. ed, EEUU

Norma DIN 4125 Parte 1: Anclajes provisionales inyectados en el terreno, cálculo, ejecución y ensayo. 1978. DIN. España.

Norma DIN 4125 Parte 2: Anclajes permanentes inyectados en el terreno, cálculo, ejecución y ensayo. 1978. DIN. España.

Reinforced soil structures Volume I. Design and construction guidelines. 1989.

STS CONSUSLTANTS, LIMITED NORTHBROOK, IL, National Technical
Information Service (NTIS). EEUU.

Sola, P., 2000. *Micropilotes España*, P. Sola/CEDEX.