

MICROPILOTES

USO EN RECALCES

Junio de 2003

MANUEL ROMANA RUIZ

Universidad Politécnica de Valencia

STM

*Conferencia en el “II Curso sobre Recalces, Inclusiones, Inyecciones y Jet-Grouting”
organizado por STM en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos de Valencia*

MICROPILOTES USO EN RECALCES

Manuel Romana Ruiz

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	3
2.	MÉTODOS DE EJECUCIÓN.....	6
3.	FASES DE EJECUCIÓN	15
3.1	PERFORACIÓN	15
3.2	LIMPIEZA	15
3.3	INTRODUCCIÓN DE LA ARMADURA	15
3.4	COLOCACIÓN DEL MORTERO	18
3.5	INYECCIÓN	19
4.	CÁLCULO DE LA CARGA ADMISIBLE A COMPRESIÓN	20
4.1	MÉTODO TRADICIONAL PARA “PALI RADICE”	20
4.2	MÉTODO DE BUSTAMANTE	20
4.3	MÉTODOS CONVENCIONALES	25
4.4	RESISTENCIAS ÚLTIMAS POR FUSTE SEGÚN LA GUÍA FHWA	27
4.5	MOVILIZACIÓN DE LA RESISTENCIA POR EL FUSTE	28
4.6	DISTRIBUCIÓN DE LA CARGA A LO LARGO DEL FUSTE DEL MICROPILOTE. CARGA POR LA PUNTA	32
4.7	TOPE ESTRUCTURAL DEL MICROPILOTE	32
4.8	PRUEBAS DE CARGA	33
5.	APLICACIONES A RECALCES.....	34
5.1	CONEXIÓN DEL MICROPILOTE A ENCEPADOS O ZAPATAS	34
5.2	CIMENTACIONES MEDIANTE MICROPILOTES	34
5.3	EJEMPLOS DE RECALCES CON MICROPILOTES	38
6.	MICROPILOTES COMO REFUERZO DE ESTRUCTURAS.....	47
7.	REFERENCIAS	50

1. INTRODUCCIÓN

El término “micropilote” es utilizado casi universalmente pero entendido como refiriéndose a pilotes ejecutados con técnicas diferentes. Hay una gran profusión de términos en diferentes idiomas:

- Italiano “Pali radice”. “Micropali” (en singular “Pali radice”. “Micropalo”).
- Francés “Pieux racines”. “Pieux aiguilles”, “Micro pieux”.
- Inglés “Micropile”. “Minipile”. “Root pile”. “Needle pile”.
- Alemán “Wurzelpfähle”. “Verpresspfähle”.
- Portugués “Estaca raiz”

La confusión procede de que inicialmente los micropilotes constituyeron un procedimiento de construcción específico, patentado en Italia (en 1950-52) y en muchos otros países por la empresa FONDEDILE, patentes que, en general expiraron en la década 1970-80.

La primera referencia que he encontrado a estos pilotes está en el libro de Sansoni (1963). Describe los “pali radice” como pilotes de pequeño diámetro, ejecutados con perforación a rotación y una tubería de entubación de unos 100 mm de diámetro; después se coloca una armadura central (de una o más barras) y se hormigona manteniendo la presión del mortero en cabeza con aire comprimido, mientras se extrae la tubería de entubación. Se utiliza una mezcla con una dosificación “elevada” de cemento y aditivos.

La primera aplicación documentada del sistema fue para el recalce de la Escuela A. Angiulli en Nápoles. Se utilizaron “pali radice” de 13 m de longitud, 100 mm de diámetro nominal y una armadura central de una barra de 12 mm. El terreno estaba constituido por arenas y, cenizas volcánicas y puzolanas. La figura 1 (Lizzi, 1985) presenta los resultados del primer ensayo de carga. Se alcanzaron 46 T de carga con algo menos de 4 mm de asiento y según Lizzi a ese nivel de carga se produjo la fracturación del pie del pilote a una tensión de compresión de 45 Mpa. En todo caso la curva carga-asiento denota un comportamiento elástico. El asiento remanente tras un ciclo carga-descarga hasta 20 T fue del orden de 0,3 mm.

Un comportamiento tan excelente causó sensación y el sistema se extendió rápidamente por toda Europa, siempre con resultados similares. Fondedile introdujo los “pali radice” en Inglaterra en 1962, en Alemania en 1965 y en USA en 1973 (mercado que abandonó en 1984 por razones económicas).

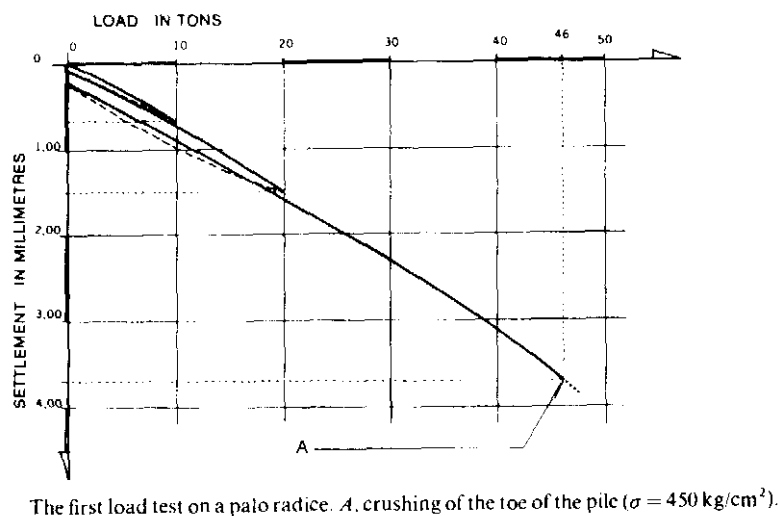
Durante la década 1960-1970 se usó el sistema en la construcción de algunas secciones del Metro de Milán y allí la Administración introdujo el término “micropali” para evitar el uso de un término que estaba patentado.

En 1967 RODIO patentó un sistema alternativo, denominado “Tubfix”, con inyección a través de tubos manguitos y armadura mediante un tubo metálico (Mascardi, 1968). El sistema sigue siendo ofertado por RODIO con el nombre comercial “Ropress”.

A partir de la década 1980-1990 prácticamente todas las empresas especializadas en cimentaciones ofrecen micropilotes de distinto nombre y con métodos de ejecución que, pueden tener diferencias acusadas.

En el mercado anglosajón a veces se diferencia entre “minipile” con diámetro entre 150 y 250 mm, y “micropile” con diámetro menor de 150 mm (Herbert, 1985). También en el N de Europa se usa a veces el término “minipile”. En España no es necesario establecer esta distinción y no se usa el término minipilote.

Parece razonable reservar el nombre de micropilote para todos los pilotes de menos de 250 mm de diámetro, diferenciándolos según el método de construcción y esa es la práctica española y la seguida por AETESS.*



The first load test on a pali radice. A. crushing of the toe of the pile ($\sigma = 450 \text{ kg/cm}^2$).

Figura 1. Prueba de “pali radice” en Nápoles (Lizzi, 1980)

* Asociación de empresas constructoras que agrupa las especializadas en cimentaciones y trabajos del subsuelo

Los micropilotes se usan cada vez más. Hay cuatro grandes áreas de utilización:

- Como cimentación y/o recalce de estructuras, trabajando básicamente a compresión.
- Constituyendo cortinas o muros discontinuos para contención de terrenos o excavaciones profundas.
- Trabajando a flexión, tracción o flexotracción en la corrección de corrimientos o deslizamientos.
- En “paraguas” de presostenimiento de túneles tanto en las bocas (es ya una práctica común en la mayoría de los túneles) como para el paso de terrenos muy difíciles o para la recuperación de tramos con hundimientos.

En esta conferencia nos vamos a referir sólo a su uso como recalce o cimentación, que es además su primer uso histórico. Sin embargo muchas de las cuestiones de ejecución tienen aspectos comunes en cualquiera de las cuatro áreas de utilización.

El uso de micropilotes en recalces tiene muchas ventajas:

- Los equipos son de tamaño reducido y pueden trabajar incluso dentro de un sótano.
- Pueden instalarse en cualquier tipo de terreno y atravesar, si es necesario, inclusiones duras (como por ejemplo elementos de cimentaciones antiguas de hormigón o mampostería).
- Su perforación es muy similar a la de un sondeo, lo que permite detectar eventuales cavidades (y en su caso rellenarlas a través de la perforación).
- Dada su esbeltez trabaja casi exclusivamente por fuste por lo que no es preciso que la punta se apoye en un estrato más compacto.
- Como se trata de un elemento de construcción sencilla el proyecto puede ser flexible y ajustarse a las posibles condiciones del terreno (y de la cimentación) si son cambiantes.

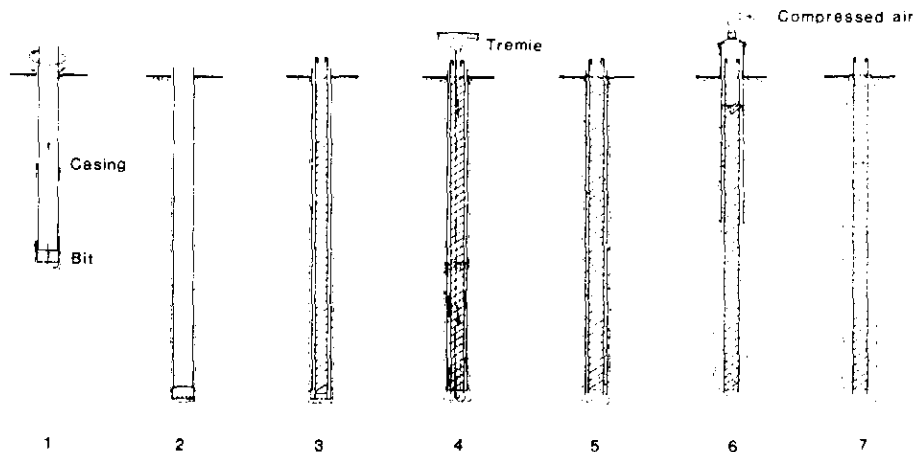
Tienen también algunos inconvenientes:

- La relación entre el coste y la carga admitida es mayor en un micropilote que es un pilote.
- Muchos procesos de cálculo son empíricos y sólo se pueden contrastar con pruebas de carga si se pretende aprovechar al máximo la resistencia del micropilote.
- La calidad depende mucho de que el proceso de ejecución sea riguroso.

2. MÉTODOS DE EJECUCIÓN

La figura 2 (tomada de Lizzi, 1985) reproduce el método de construcción de un “palo radice”. Las fases representadas son las siguientes:

- 1) Perforación
- 2) Perforación terminada
- 3) Colocación de la armadura
- 4) Puesta en obra del mortero mediante una tolva tremie
- 5) Hormigonado terminado
- 6) Extracción de la entubación manteniendo el mortero a presión mediante aire comprimido.
- 7) Terminación del “palo radice” añadiendo algo de mortero en cabeza.



Method of construction of a palo radice. (1) Drilling; (2) drilling completed; (3) placing of the reinforcement; (4) placing the grout via tremie pipe; (5) grouting completed; (6) extraction of the casing; (7) palo radice completed.

Figura 2. Método de ejecución de un “palo radice” (LIZZI, 1985)

La perforación se realiza a rotación. El residuo de perforación es lavado con agua o con fango bentonítico. La armadura es una barra para diámetros pequeños (10 cm), un tubo o una armadura compuesta para diámetros mayores (hasta 26 a 30).

El mortero tiene una dosificación muy alta. La presión aplicada al mortero durante la extracción de la entubación se realiza con aire comprimido y por lo tanto no excede de 6 a 8

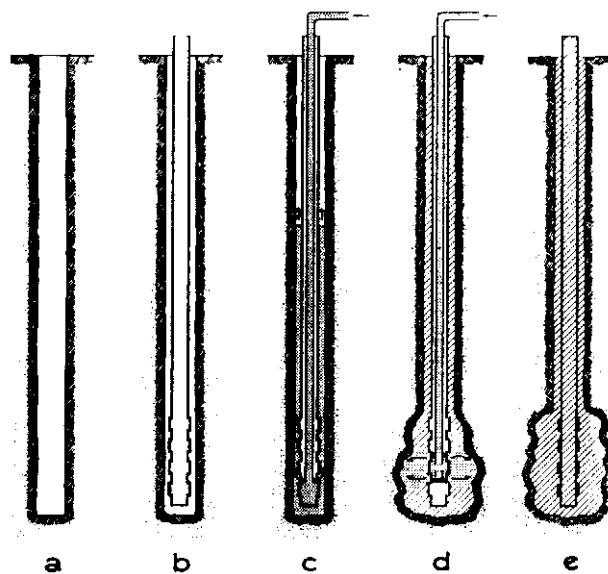
bares. El sistema hace que el mortero se adapte completamente al terreno y rellene cualquier irregularidad de perforación. El resultado es un diámetro efectivo mayor que el nominal.

Las longitudes de los “pali radice” dependen del tipo de terreno:

- Arenas y/o gravas compactas	6 a 10 m
- Arcilla media	10 a 15 m
- Suelos duros	10 a 15 m
- Arcilla blanda	hasta 20 m
- Suelos especialmente blandos	hasta 30 m

La figura 3 (tomada de Mascardi, 1985) reproduce el método de construcción de un micropilote tipo Tubfix (actualmente llamando Ropress):

- Perforación
- Colocación de la armadura tubular
- Inyección del relleno para formación de la vaina
- Inyección del relleno para formación del bulbo (en varias etapas).
- Pilote terminado

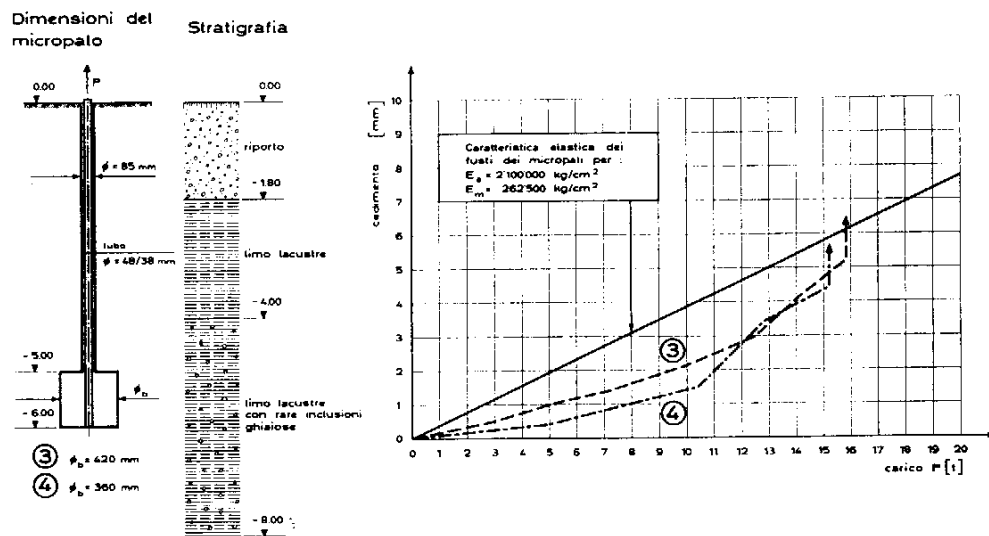


- Fasi esecutive di un micropalo Tubfix.
a) perforazione; b) posa dell'armatura tubolare; c) iniezione di guaina; d) iniezioni di ancoraggio (in più riprese).

Figura 3. Método de ejecución de un micropilote inyectado tipo “tubfix” (MASCARDI, 1985)

La perforación se hace a rotación con diámetros entre 10 y 20 cm y no se entuba. El tubo armadura tiene una serie de válvulas antiretorno (generalmente es un tubo-manguito). La inyección de relleno se hace a baja presión y la inyección a presión se hace por etapas, en la longitud más conveniente para conseguir el bulbo requerido. La primera aplicación documentada fue realizada por SWISSBORING en Walliseller (Suiza) en 1962-63. La figura 4 reproduce una prueba de carga de dos pilotes y el perfil del terreno. Además se extrajo el bulbo de un micropilote para comprobar su forma (que resultó muy irregular). El terreno era limo lacustre recubiertos por rellenos. A partir de los cuatro metros de profundidad el limo era algo arenoso y en esa capa se situó el bulbo. No he encontrado datos cuantitativos sobre el terreno del que se dice que tenía “características mecánicas decaídas”. Las dimensiones del pilote eran:

- diámetro de perforación	8,5 cm
- tubo de acero	4,8/3,8 cm
- diámetro del bulbo	30 a 40 cm



Dimensioni, stratigrafia e diagrammi di prova di due micropali a Wallisellen.
 (Docum. Swissboring).

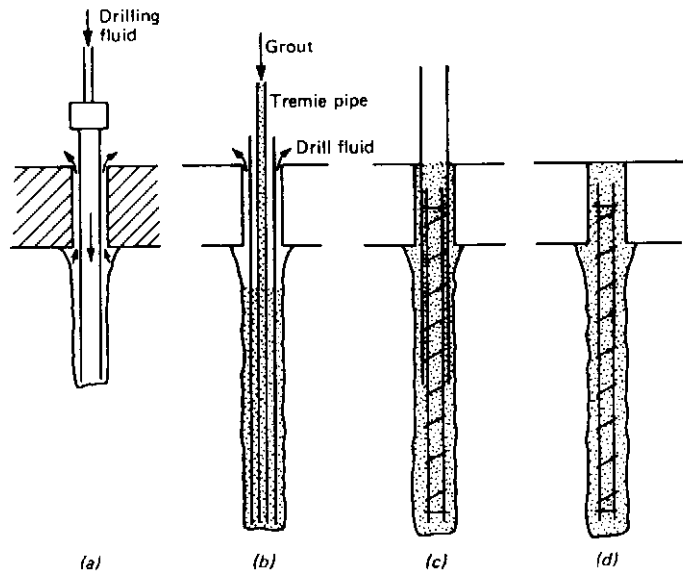


Aspetto del bulbo di un micropalo eseguito a Wallisellen e successivamente estratto dal terreno.
 (Docum. Swissboring)

Figura 4. Pruebas de carga de micropilotes tubfix en Wallisellen (Suiza) SWISSBORING
 (citado por MASCARDI, 1985).

En bastantes casos no se aplica presión ni inyección al micropilote. La figura 5 (Herbert, 1985) reproduce el proceso con relleno por gravedad.

- a) Perforación con lavado exterior mediante agua o aire.
- b) Con la entubación hasta el fondo se vierte el mortero mediante tolva y tubería.
- c) La armadura se ha colocado y se retira la entubación.
- d) Micropilote terminado



Method of installing typical drilled cast-in-place micro piles. (a) Drilling with external flushing; (b) casing drilled to full depth, grout being introduced via a tremie pipe and displacing drilling fluid; (c) reinforcement placed, and casing being withdrawn; (d) completed pile. Illustration courtesy of *Ground Engineering*, Foundation Publications Ltd., Brentwood.

Figura 5. Método de ejecución de un micropilote sin presión ni inyección (HERBERT, 1985)

La perforación puede realizarse a rotoperusión, a rotación o con barrena helicoidal, según la consistencia del terreno. El fluido de lavado puede ser aire, agua o una suspensión de bentonita. Se introduce por el interior de la perforación y sale por la cavidad anular entre el terreno y la entubación (circular inversa). Se aumenta así el diámetro real de perforación. El mortero es fluido y se introduce por el interior a baja presión hasta que sale por el anillo entre terreno y entubación. Puede o no añadirse presión de aire en esa fase pero muchas veces no se hace o se aplica con los valores bajos de la presión que pueden obtenerse en obra con un compresor.

Puede omitirse la entubación si las paredes del taladro son estables. La armadura puede sustituirse por un tubo o incluso por un perfil de acero.

Por lo tanto los métodos de instalación de un micropilote pueden ser muy distintos y es preciso clasificarlos de alguna manera a fin de definir en cada caso el tipo de micropilote obtenido.

AETESS (fig 6) ha propuesto una clasificación en tres categorías según el tipo de inyección:

- Tipo 1 Inyección única global (IU)
- Tipo 2 Inyección única repetitiva (IR)
- Tipo 3 Inyección repetitiva y selectiva (IRS)

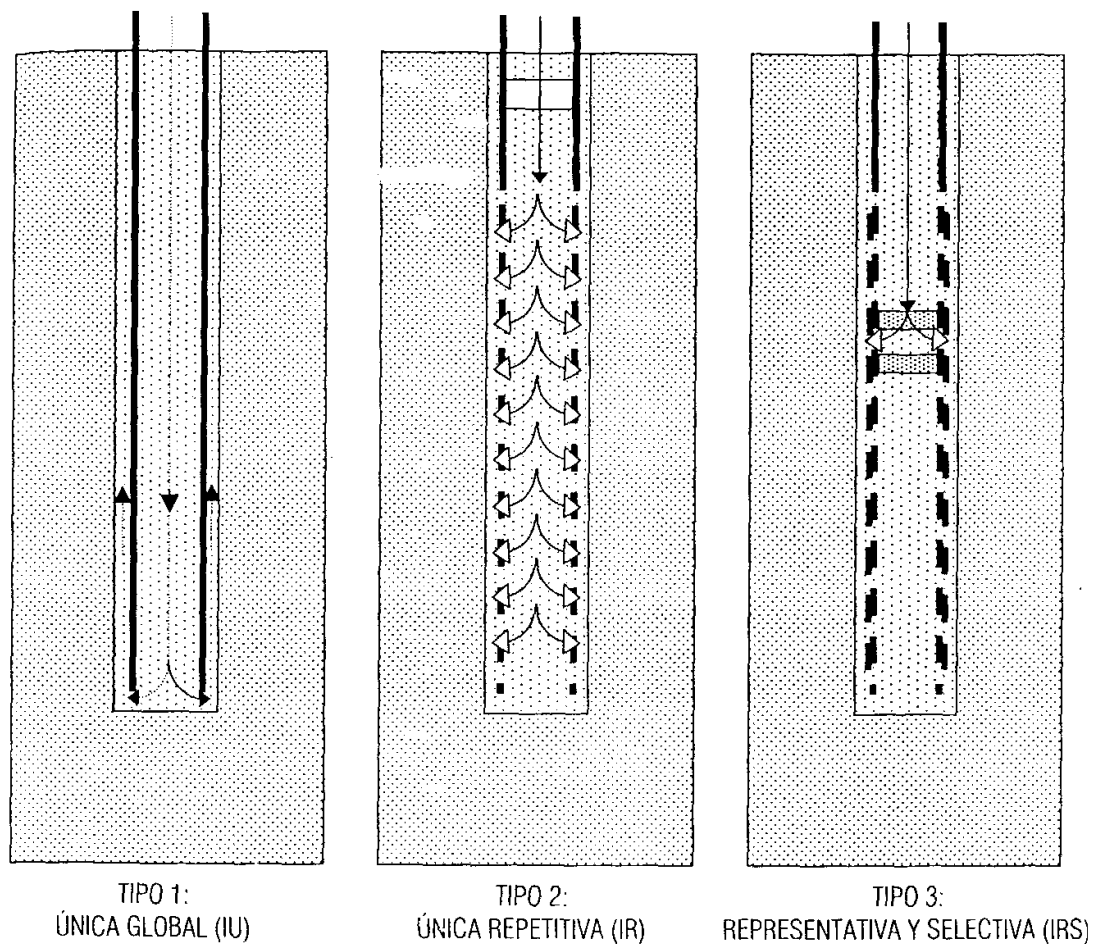


Figura 6. Clasificación de los micropilotes según AETESS (2000)

Esta clasificación da por supuesto que la armadura es un tubo, lo que es normal en España, y sigue la clasificación francesa (Bustamante, 1986):

- Inyección IGU en una pasada única (“injection globale et unitaire” en francés).
- Inyección IRS en un proceso repetitivo o selectivo, mediante la introducción de un doble obturador en el tubo manguito que permite seleccionar el intervalo de inyección al nivel deseado y repetir la operación varias veces (“injection repetitive et selective” en francés).

La figura 7 reproduce la clasificación de los micropilotes propuesta por Bruce et al (1995) en un estudio para la Federal Highway Administration (FHWA) de USA que la incluyó en su Guía publicada en 1997 y normativa en USA. Se diferencian cuatro tipos:

- Tipo A. Mortero inyectado por gravedad. Pueden usarse morteros y/o lechadas.
- Tipo B. Inyección a través de la entubación, mientras se retira. La presión típica está en el rango de 0,3-1 Mpa y se limita para evitar la hidrofracturación (“claquage”) del suelo y el consumo excesivo de lechada. El obturador se sitúa en la boca del micropilote.
- Tipo C. Inyección posterior de lechada (15 a 25 minutos después de la colocación del mortero) a través de la entubación (si se deja) o de una tubería específica. La presión es del orden de 1 Mpa. Es el sistema IGU francés. El obturador se sitúa en la boca del micropilote.
- Tipo D. Inyección de lechada en varias fases, con obturadores dentro del tubo. La presión es del orden de 2-8 Mpa y generalmente produce hidrofracturación. Es el sistema IRS francés. Son indispensables los manguitos.

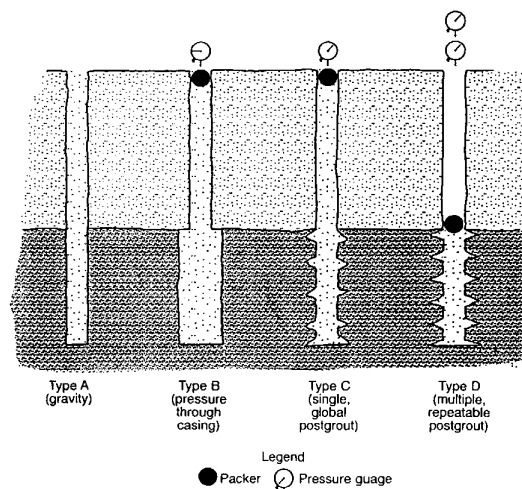


Figura 7. Clasificación de los micropilotes propuesta por BRUCE et al (1995)

La figura 8 (Armijo 2003) presenta la ejecución de un micropilote con inyecciones de compensación, técnica ligeramente diferente de las anteriores pero que también puede usarse.

- a) Perforación
- b) Colocación de armadura de barra.
- c) Inyección.
- d) Pilote terminado tras la retirada de la tubería de perforación.

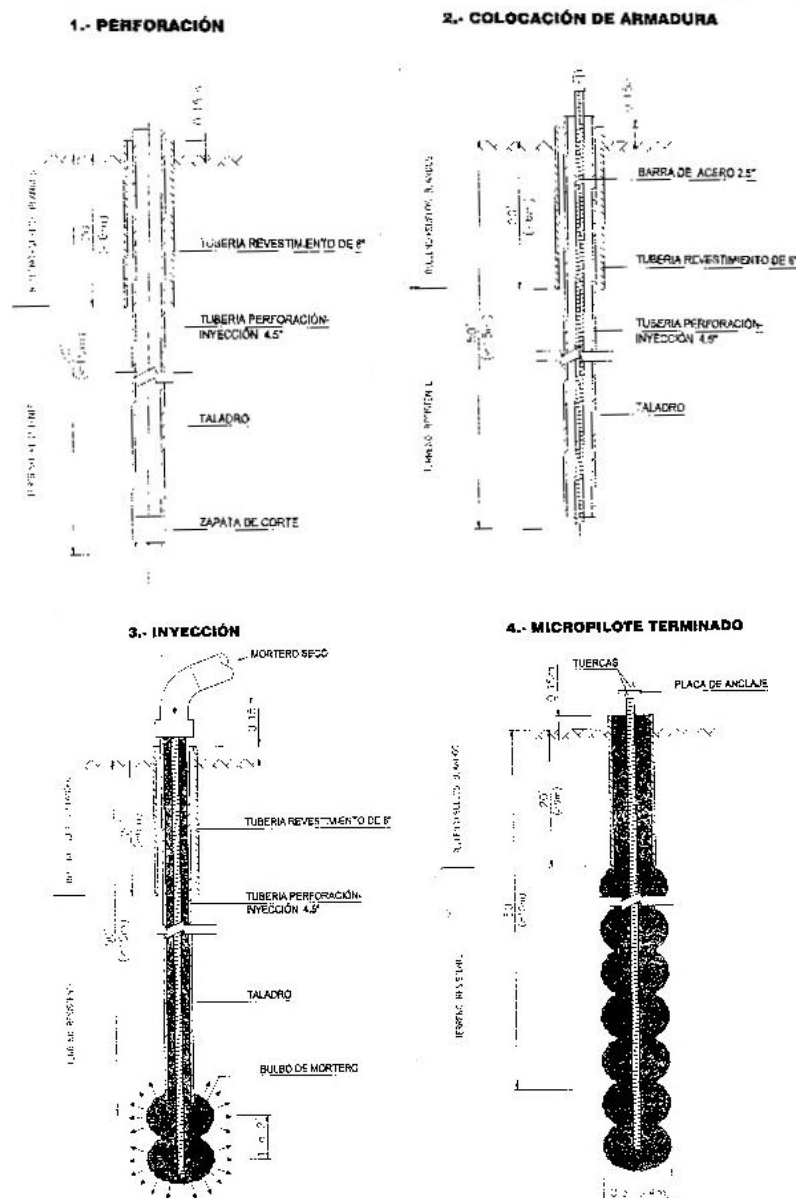


Figura 8. Método de ejecución de un micropilote combinado con inyecciones de compactación (Armijo, 2003)

Hay una tubería de revestimiento, en suelos flojos y rellenos, con un diámetro de 150 mm (6'') y la perforación se realiza con una tubería de 112 mm (4.5''). Se introdujo después una armadura de acero corrugado de 62 mm (2.5'') y se va retirando gradualmente la tubería de revestimiento de la perforación (con la ayuda de gatos hidráulicos) mientras que simultáneamente se inyecta a través de ella un mortero magro a gran presión (que puede llegar a 40-60 bares).

3. FASES DE EJECUCIÓN

Todos los métodos tienen las siguientes fases de ejecución:

3.1 PERFORACIÓN

Puede hacerse por diversos sistemas, según el tipo de terreno a atravesar: rotación con corona de widia o diamante o con tricono, retropercusión con martillo en fondo, o incluso hélice continua en terrenos flojos. Dependiendo de la estabilidad de la perforación esta puede hacerse en seco, con la ayuda de lodos bentoníticos o necesitan entubación, normalmente recuperable. El fluido de perforación puede ser aire o agua y se introduce por circulación inversa. Si es preciso atravesar primero capas de rellenos o suelos flojos se suele utilizar en ellas el sistema OD dejando la entubación exterior perdida.

3.2 LIMPIEZA

La perforación se lava con agua y/o aire a presión. Se trata de una operación imprescindible para conseguir una mejor calidad.

3.3 INTRODUCCIÓN DE LA ARMADURA

La armadura de un micropilote puede hacerse con barras, tubos o una combinación de ambas, como se indica en la figura 9 (Rodríguez Ortiz, 1984). En España la armadura habitual es el tubo de acero que además ha servido de entubación, y en su caso de guía de inyección. La figura 10 (Fernández Salso) es una sección tipo, muy habitual en España, apta para pilotes del tipo A (rellenos de mortero por gravedad, sin inyección). La figura 11 (de la empresa BACHY) presenta una serie de armaduras posibles tanto con barras como con tubo. La figura 12 (Agroman, 1992) presenta las secciones empleadas en el recalce (y sustentación del edificio) del Palacio de Linares en Madrid con armaduras de tubo (diámetro exterior 114 mm, espesor 4.5 mm), en la mayoría de los micropilotes; y dos UPN 100 soldados en cuadrado en los micropilotes de esquina. El diámetro de ambos tipos de micropilote fue de 220 mm.

Los tipos de acero a emplear dependen de las necesidades de resistencia (y de la forma de trabajo) del micropilote. Pueden usarse aceros de resistencia entre $f_{yk} = 250$ MPa y $f_{yk} = 800$ MPa aunque lo más normal es el uso de aceros de 560 MPa de límite elástico.

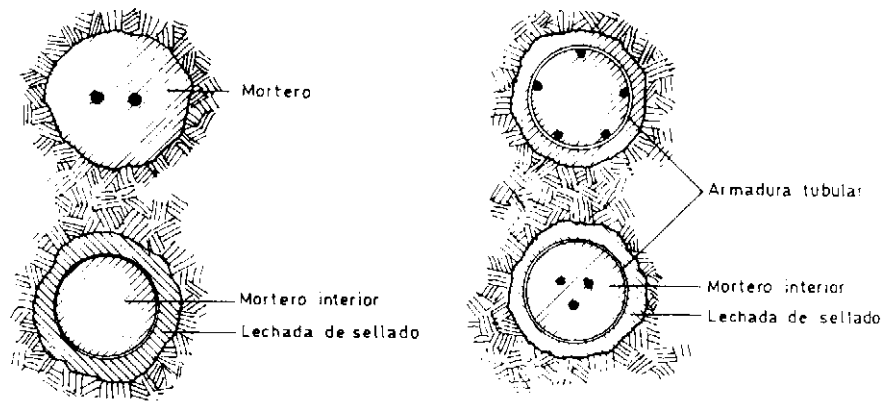
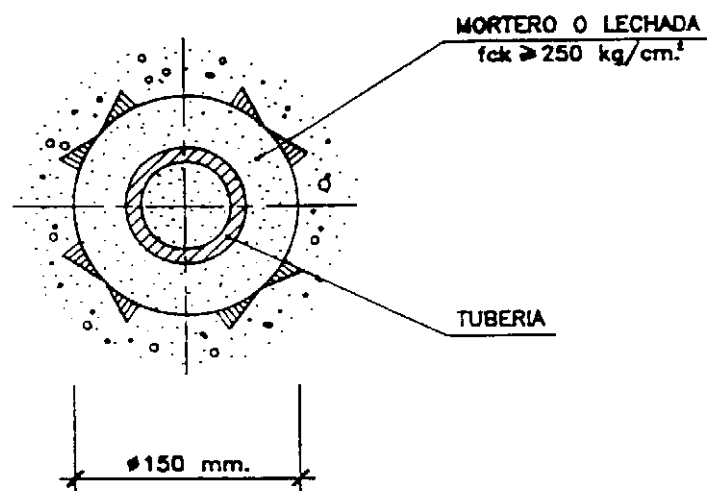


Figura 9. Distintos tipos de armadura de un micropilote (RODRÍGUEZ ORTIZ, 1984)



Ø mm.	TUBERIA mm.	CARACTERÍSTICAS DEL ACERO EN TUBERIAS
150	60 x 53	ST-35

Figura 10. Sección tipo de un micropilote armado con tubo de acero (FERNÁNDEZ SALSO, comunicación personal).

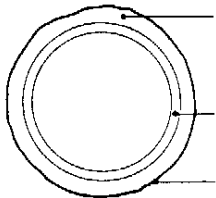
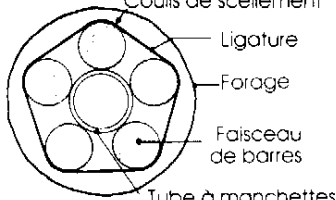
armature	Dimension unitaire mm	Limite élastique σ_e kg/mm ²	FORAGE Diamètre minimum en mm
TYPE TUBE 	Ø 89/70 Ø 95/114 Ø 109/127 Ø 121/140 Ø 147/168	56 39 56 39 56 39 56 39	120 145 160 170 200
TYPE BARRE 	Tor Ø 32 Tor Ø 40 Gewy Ø 50 Dywidag Ø 26,5 Dywidag Ø 32 Dywidag Ø 36	42 42 42 85 85 85	Fonction du nombre de barres dans le faisceau

Figura 11. Secciones tipo de micropilotes armados con tubo y con barra (BACHY)

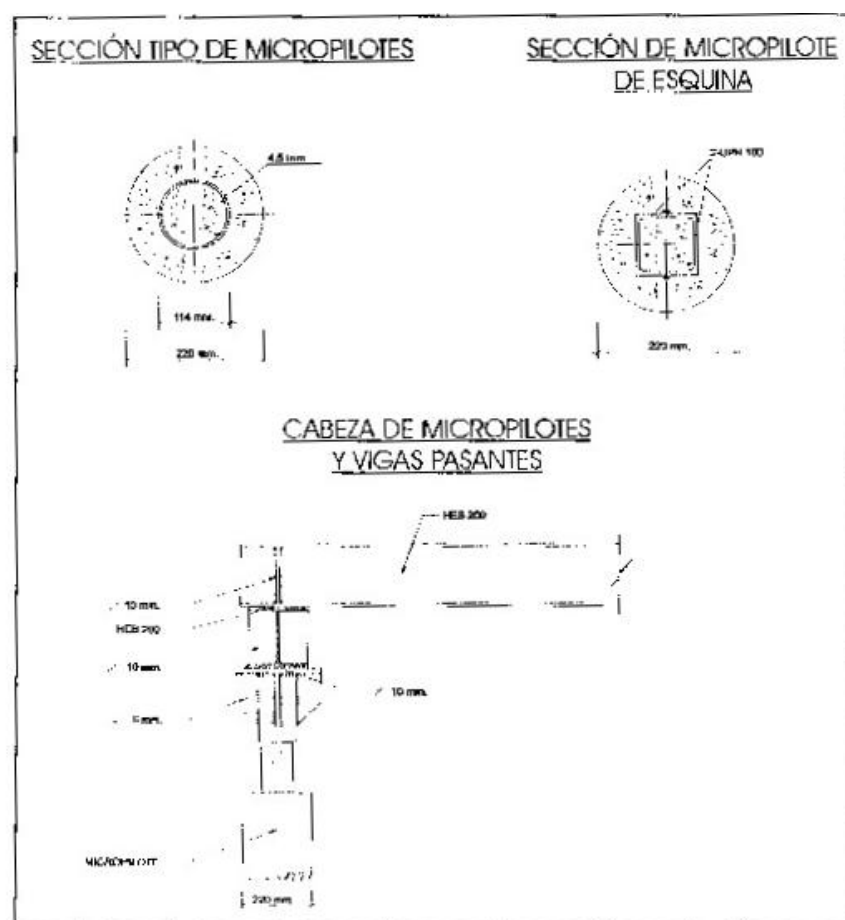


Figura 12. Armaduras utilizadas en el recalce del Palacio de Linares en Madrid (AGROMAN 199-)

La armadura de tubo garantiza la continuidad del micropilote en caso de corte del mortero (defecto que es muy frecuente en terrenos flojos) y además proporciona resistencia al corte y a flexión, necesarios cuando los micropilotes no trabajan solo a compresión. Además puede realizarse un pretensado del pilote mediante un cable o barra sujeto a la parte inferior del tubo y sujeto en cabeza con un pequeño gato (para cable) o una turca (para barra).

La longitud comercial máxima de los tubos suele ser de 9 m, para facilitar un transporte por medios convencionales. Si se desea construir micropilotes de más longitud (o en trozos más pequeños) la unión suele hacerse por rosca, lo que es cómodo, pero debilita la sección de acero, especialmente a flexión. En esos casos la unión correcta incluye un manguito exterior de refuerzo. Bermejo (2003) ha realizado ensayos, a flexión y a esfuerzo cortante, de tubos de diámetro exterior 88.9 mm y espesor 7 mm, comparando la resistencia de tubos continuos con la de tubos unidos con rosca macho-hembra y con la de tubos unidos con un manguito exterior de diámetro exterior 102 mm y espesor 7 mm. Los ensayos se realizaron con tubos huecos y con tubos rellenos con lechada de cemento de 50-60 MPa de resistencia compresión simple. Su conclusión es que las cargas de rotura (a flexión o a cortante) de los tubos con empalme por manguito es del mismo orden, o ligeramente superior, que la del tubo continuo, mientras que en el caso de los tubos con unión a rosca macho-hembra las cargas de rotura son del orden del 50% de las de los tubos con manguito.

3.4 COLOCACIÓN DEL MORTERO

Cuando se rellena con mortero este debe tener una resistencia $f_{ck} = 25$ MPa a 28 días. Se suelen utilizar relaciones agua/cemento bajas ($2/c = 0.5$) y arena como árido. Una dosificación típica es:

- agua (0.5), cemento (1), arena (0.5); (en peso).

Puede llegarse a valores de la relación agua/cemento algo mayores: La consistencia debe ser tal que se garantice el relleno total de la perforación, sin cortes. Pero si hay que rellenar huecos o realizar inyecciones de compensación conviene un mortero algo más magro.

El método de introducción del mortero variará según el tipo de pilote. Los volúmenes de mortero deben ser mayores que el teórico (un 40% a 80% superiores).

3.5 INYECCIÓN

La inyección se realiza con lechadas fluidas con resistencia característica a 28 días $f_{ck} = 25$ MPa y relaciones agua/cemento $w/c = 0.5$. A veces se añade una proporción reducida de bentonita para facilitar su fluidez.

Si se dispone de ensayos presiométricos se conoce la presión del límite del suelo p_l . En los micropilotes IGU (tipo IR de AETESS ó tipo C de Bruce) la presión de inyección debería ser:

$$0,5 p_l < p_i \leq p_l$$

En los micropilotes IRS (tipo IRS de AETESS o tipo D de Bruce) la presión de inyección debe exceder la presión límite:

$$p_i \geq p_l$$

y es normal llegar a presiones de 2-3 MPa (20 a 30 bares)

El número de fases de inyección en estos micropilotes debería ser al menos de 2 en areniscas o calizas poco fisuradas, al menos de 3 en suelos de compacidad media y 4 o más en aluviones y suelos blandos. Entre cada fase debe existir un intervalo de tiempo mínimo de 6 a 12 horas para permitir que la lechada alcance una primera resistencia. Los caudales máximos de inyección deberían ser (Bustamante, 1986):

0,3 a 0,6 m³/hora para suelos cohesivos

0,8 a 1,2 m³/hroa para suelos granulares

4. CÁLCULO DE LA CARGA ADMISIBLE A COMPRESIÓN

4.1 MÉTODO TRADICIONAL PARA “PALI RADICE”

El método de cálculo propuesto por Lizzi (1985) es el siguiente:

$$P_{ult} = \pi D L K I$$

Donde	P_{ult}	carga última del palo radice a compresión (no incluye coeficientes de seguridad)
	D	diámetro nominal (de perforación)
	L	Longitud
	K	coeficiente que representa el rozamiento por el fuste
	I	coeficiente adimensional que depende del diámetro

TABLA 1. COEFICIENTES DE LA FÓRMULA DE LIZZI (1985)

SUELO	K (Kpa)		DIÁMETRO (cm)	I
Blando	50		10	1.00
Suelto	100		15	0.90
De compacidad media	150		20	0.85
Muy compacto, grava, arena	200		25	0.80

Valor de la resistencia por el fuste K

Valor del coeficiente I

Con el método se desprecia la resistencia por la punta y la resistencia por el fuste utilizada puede exceder del valor máximo que suele admitirse para los pilotes convencionales, que es de 100 Kpa. La diferencia es achacada por Lizzi al contacto estrecho entre pilote y terreno y al diámetro real, mayor que el nominal. Con este método se ha calculado la inmensa mayoría de los “pali radice”

4.2 MÉTODO DE BUSTAMANTE

Bustamante (1980) ha propuesto un método “para el cálculo de los anclajes y micropilotes inyectados”. Seguiremos la referencia más fácil de encontrar en español (Bustamante, 1986), cuyos ábacos han sido confirmados nuevamente por Bustamante (2003).

El método se basó en el ensayo de numerosos anclajes y micropilotes y se refiere a las categorías de inyección IGU (una fase única) o IRS (varias fases).

La carga límite de un micropilote (como la de un pilote) a compresión vale:

$$Q_L = Q_P + Q_S$$

donde Q_L carga límite en cabeza (no incluye coeficientes de seguridad)

Q_P resistencia por la punta límite

Q_S resistencia límite por el fuste

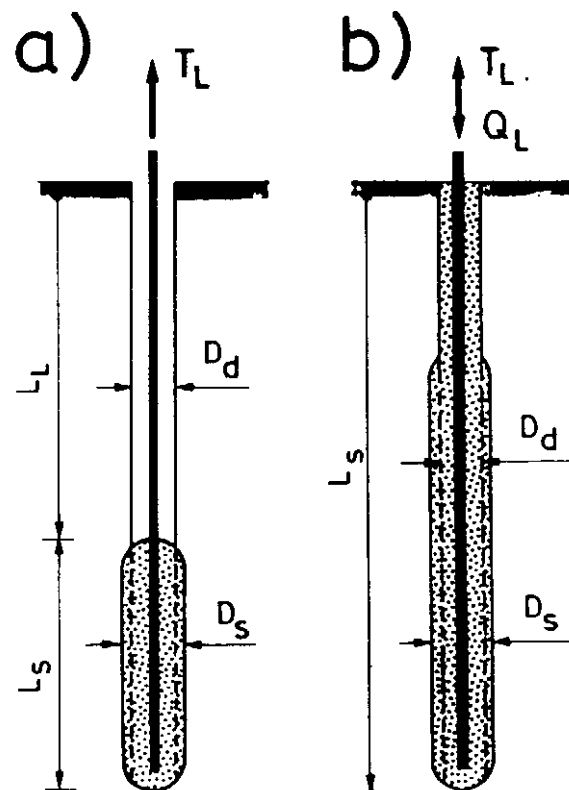
$$Q_S = \sum \pi D_i L_i q_{si}$$

donde para cada capa i (véase la figura 13)

D_{si} diámetro medio real ($D_{si} = \alpha D_{ni}$)

L_i longitud de la capa

q_{si} resistencia unitaria por el fuste



Representación esquemática de un anclaje a) y de un micropilote b)

Figura 13. Nomenclatura para el cálculo por el método de BUSTAMANTE (1986)

El diámetro real puede estimarse multiplicando el diámetro nominal de perforación por un coeficiente α que se reproduce en el cuadro de la figura 14. Los valores de la resistencia unitaria por el fuste q_s pueden tomarse de la figura 15 (para suelos) o de la figura 16 (para rocas blandas y/o alteradas).

Para poder aplicar el método de Bustamante es preciso que efectivamente se realice una inyección a presión y que los volúmenes de lechada inyectada V_i (que aparecen en la figura 2 para diferentes terrenos) excedan de los volúmenes teóricos del bulbo previsto V_s . Debe inyectarse entre un 50% un 100% más sobre el volumen teórico para compensar las pérdidas de lechada por exudación en el terreno, las “pérdidas ligadas a la técnica de inyección” y para poder “tratar el suelo en la inmediata periferia del bulbo”.

En cuanto a la resistencia por la punta puede calcularse por métodos convencionales o puede calcularse por la regla simplificada:

$$Q_p = 0.15 Q_s$$

El coeficiente de seguridad propuesto por Bustamante es 2 en todos los casos aunque puede admitirse una reducción del 10% en micropilotes provisionales sometidos a compresión.

La carga límite a tracción valdría $Q_L = Q_s$ (Que es la fórmula preconizada también para anclajes).

CUADRO IV

SUELOS	COEFICIENTE α		Cantidad mínima de lechada aconsejada V_i
	IRS *	IGU **	
Grava	1,8 a 1,8	1,3 a 1,4	1,5 V_s
Grava arenosa	1,6 a 1,8	1,2 a 1,4	1,5 V_s
Arena en grava	1,5 a 1,6	1,2 a 1,3	1,5 V_s
Arena gruesa	1,4 a 1,5	1,1 a 1,2	1,5 V_s
Arena mediana	1,4 a 1,5	1,1 a 1,2	1,5 V_s
Arena fina	1,4 a 1,5	1,1 a 1,2	1,5 V_s
Arena limosa	1,4 a 1,5	1,1 a 1,2	1,5 a 2,0 V_s para IRS 1,5 V_s para IGU
Lirio	1,4 a 1,6	1,1 a 1,2	2,0 V_s para IRS 1,5 V_s para IGU
Arcilla	1,8 a 2,0		2,5 a 3,0 V_s para IRS 1,5 a 2,0 V_s para IGU
Marga	1,8	1,1 a 1,2	1,5 a 2,0 V_s para capa compacta
Marga calcárea	1,8	1,1 a 1,2	
Creta alterada o fragmentada	1,8	1,1 a 1,2	2,0 a 6,0 V_s ó más si la capa está fracturada
Roca alterada o fragmentada	1,2 a 1,8	1,1	1,1 a 1,5 V_s si la capa está finamente fissurada 2,0 ó más si la capa está fracturada

V_s : Volumen del bulbo de sellado
IRS: Inyección Repetitiva y Selectiva
IGU: Inyección Global Unificada

Figura 14. Coeficiente α de incremento del diámetro nominal D_n ($D_s = \alpha D_n$) de un micropilote inyectado (BUSTAMANTE 1996).

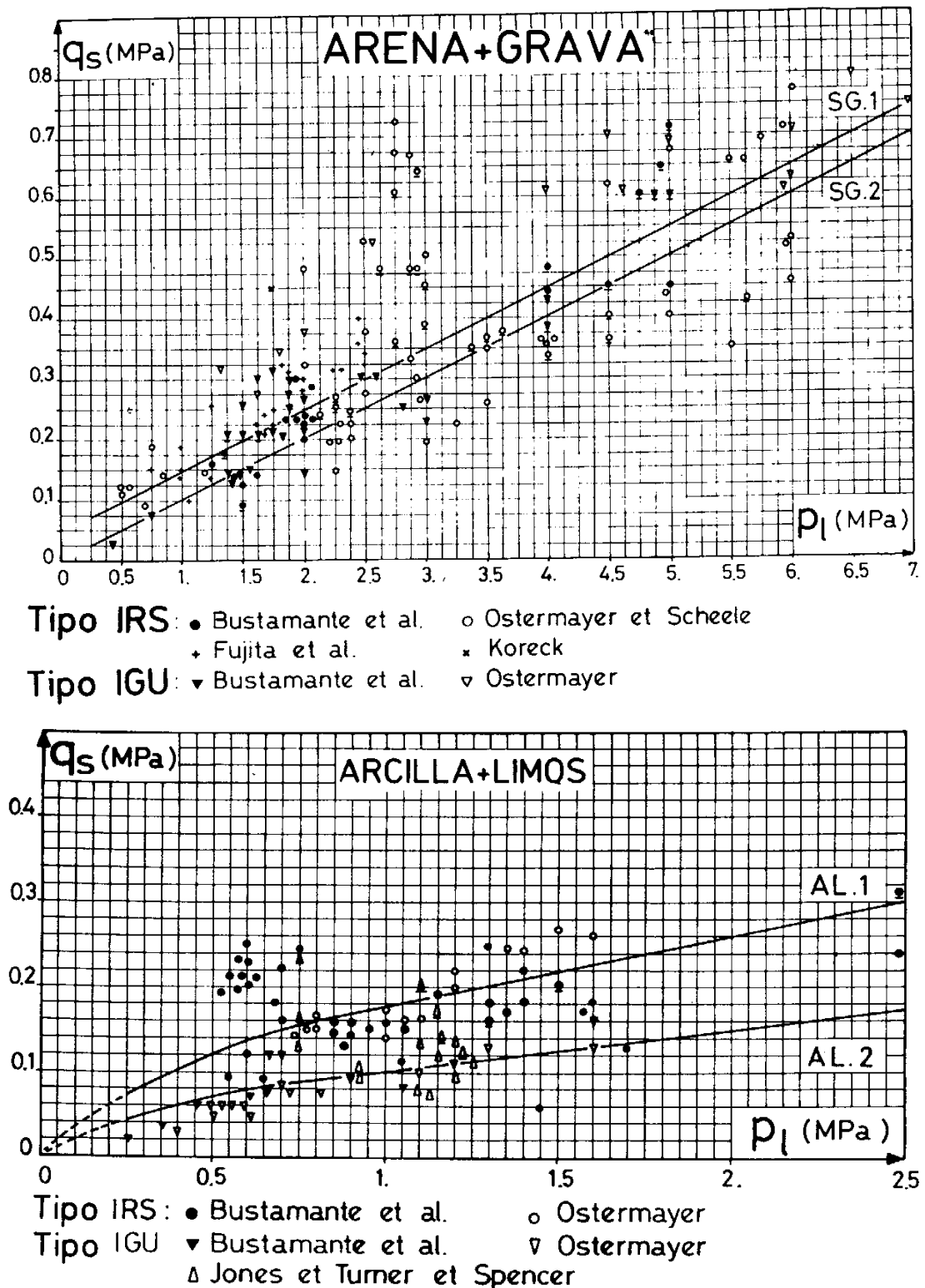
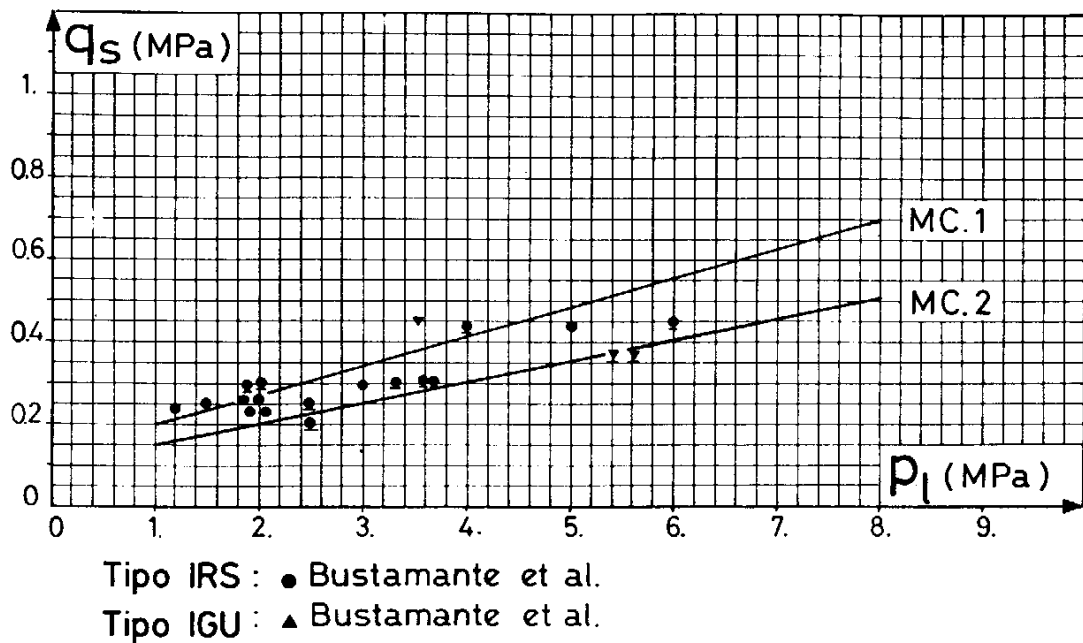


Figura 15. Abacos de BUSTAMANTE para la determinación de la resistencia unitaria por el fuste q_s en diversos suelos (IRS → 1, IGU → 2)

CRETA ALTERADA Y FRAGMENTADA MARGAS Y MARGO-CALCAREA



ROCA ALTERADA Y FRAGMENTADA

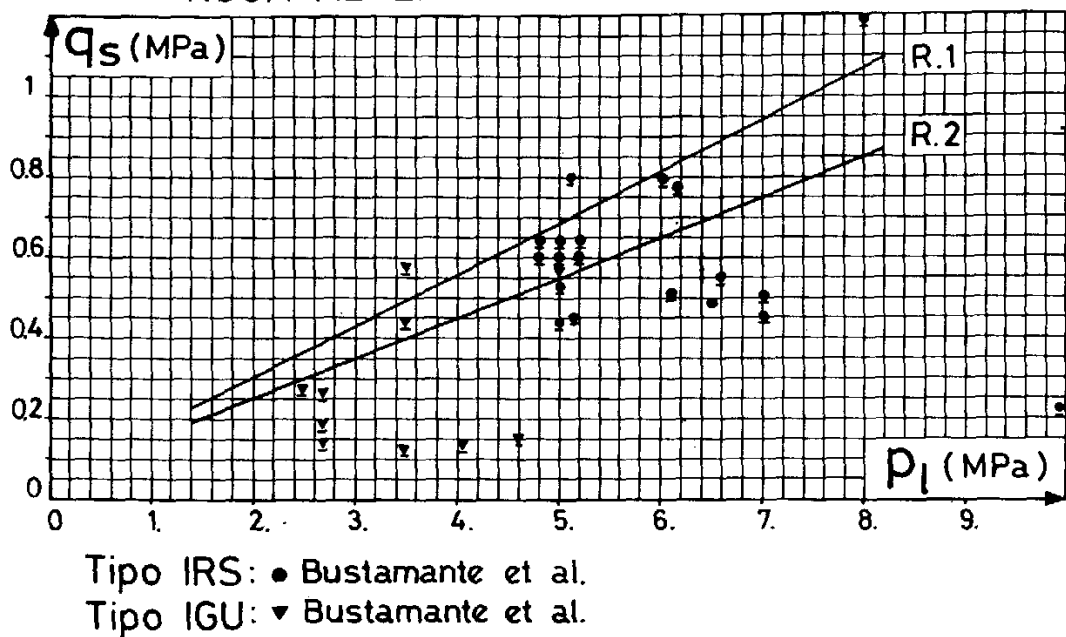


FIGURA 16. Ábacos de BUSTAMANTE para la determinación de la resistencia unitaria por el fuste q_s en algunas rocas.

(IRS → 1, IGU → 2)

4.3 MÉTODOS CONVENCIONALES

En rigor la resistencia de un micropilote vale:

$$P_N = \frac{1}{F_1} \left(\pi D L q_s \frac{1}{F_2} + \frac{\pi D^2}{4} q_p \frac{1}{F_3} \right)$$

donde P_N carga nominal admisible del micropilote

F_1 factor de mayoración de cargas

$F_2 F_3$ coeficientes de seguridad de minoración de resistencias, fuste y punta

D diámetro nominal (de perforación)

L Longitud

q_s rozamiento por el fuste

q_p carga de hundimiento por la punta

Los valores de los coeficientes de seguridad parciales propuestos por Oteo (2001) son:

TABLA 2. VALORES DEL COEFICIENTE F_1 (OTEO, 2001)

F_1	RESPONSABILIDAD	IMPORTANCIA ECONÓMICA
1.25	Poca	Poca
1.40	Poca	Bastante
1.50	Grande	Grande

Nota. La variación total de F_1 es 1.2 – 1.6.

$F_2 = 1.5$ a 2

$F_3 = 3$ a 4

En realidad la resistencia por la punta es mucho menor que la resistencia por el fuste y en pilotes largos puede no llegar a movilizarse (véase el apartado 4.6). Por lo tanto puede despreciarse.

La resistencia por el fuste admisible en cada estrato i vale:

$$q_{sia} = \frac{c'_i}{F_c} + \frac{(\sigma'_{vio} + \sigma_{iny}) \operatorname{tg} \varphi_i}{F_\varphi}$$

donde q_{sia} resistencia admisible en el estrato i
 c'_i cohesión efectiva en el estrato i
 σ'_{vio} presión vertical efectiva en el estrato i antes de la construcción del micropilote
 σ_{iny} sobrepresión de inyección efectiva en el estrato i .
 ϕ_i ángulo de rozamiento efectivo en el estrato i .
 F_ϕ coeficiente de seguridad parcial de minoración del rozamiento $tg\phi'$

y la resistencia del micropilote vale:

$$P_n = \frac{1}{F_1} \sum \Pi D L_i q_{sia}$$

En términos generales pueden adoptarse los siguientes valores de los coeficientes parciales de seguridad para cohesión y rozamiento (Oteo, 2003).

$$F_c = 1.25 \text{ a } 1.60 \quad F_\phi = 1.25 \text{ a } 1.35$$

En la práctica el valor de c' será muy bajo tanto en arenas como en arcillas normalmente consolidadas, y en cambio será el más significativo para los tramos de micropilote que atraviesen arcillas muy preconsolidadas y/o rocas.

Si no se dispone de información geotécnica precisa pueden utilizarse los ábacos de Bustamante para estimar q_{si} (que no incluye coeficientes parciales de seguridad).

4.4 RESISTENCIAS ÚLTIMAS POR FUSTE SEGÚN LA GUÍA FHWA

La Guía FHWA (1997) incluye una tabla con las resistencias por fuste según el método de ejecución (véase la clasificación de la FHWA en la figura 7 y su descripción en el apartado 2) se reproduce en la tabla 3 (traducción de Armijo, 2003).

TABLA 3. RESISTENCIAS ÚLTIMAS q_s POR FUSTE EN KPa (FHWA, 1997)

Descripción del terreno	Resistencia última por fuste q_s (Kpa)			
	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo D
Limo y arcilla (con algo de arena) (blando, plasticidad media)	35-70	35-95	50-120	50-145
Limo y arcilla (con algo de arena) (rígido, denso a muy denso)	50-120	70-190	95-190	95-190
Arena (con algo de limo) (fina, suelta a medio densa)	70-145	70-190	95-190	95-240
Arena (con algo de limo y grava) (fina a gruesa, medio densa a muy densa)	95-215	120-360	145-360	145-385
Grava (con algo de arena) (medio densa a muy densa)	95-265	120-360	145-360	145-385
“Till” glaciario (limo, arena y grava) (medio denso a denso, cementado)	95-190	95-310	120-310	120-335
Esquistos blandos (moderadamente fracturados, casi sin meteorización)	205-550	-	-	-
Pizarras y esquistos duros (moderadamente fracturados, casi sin meteorización)	515-1380	-	-	-
Calizas (moderadamente fracturados, casi sin meteorización)	1035-2070	-	-	-
Areniscas (moderadamente fracturados, casi sin meteorización)	520-1725	-	-	-
Granito y basalto (moderadamente fracturados, casi sin meteorización)	1380-4200	-	-	-

Tipo A: Inyección por gravedad solamente

Tipo B: Inyección a presión, en retirada

Tipo C: Inyección primaria por gravedad y una fase de inyección secundaria “global” a presión

Tipo D: Inyección primaria por gravedad y una o más fases de inyección secundaria “global” a presión

Debe observarse que es posible, y bastante corriente, utilizar el método B en rocas fracturadas en el tramo final de un micropilote que atravesase rellenos y/o suelos blandos. En ese caso el terreno tiene una resistencia última del orden del 50% más que la que correspondería a pilotes ejecutados por el método A.

Hay que ser muy prudente al utilizar esta tabla. En España no se aceptan para el cálculo valores de q_s superiores a 0.5 Mpa para rocas.

4.5 MOVILIZACIÓN DE LA RESISTENCIA POR EL FUSTE

Suele admitirse que la resistencia por el fuste de un pilote se moviliza totalmente con deformaciones verticales del orden del 0,5% al 1% del diámetro del pilote. Puesto que los micropilotes tienen diámetros inferiores a 25 cm los asientos necesarios para movilizar la resistencia por el fuste serían del orden de 2 mm. Las pruebas de carga confirman que los asientos necesarios para movilizar totalmente la resistencia pueden ser algo mayores, pero siempre de orden milimétrico.

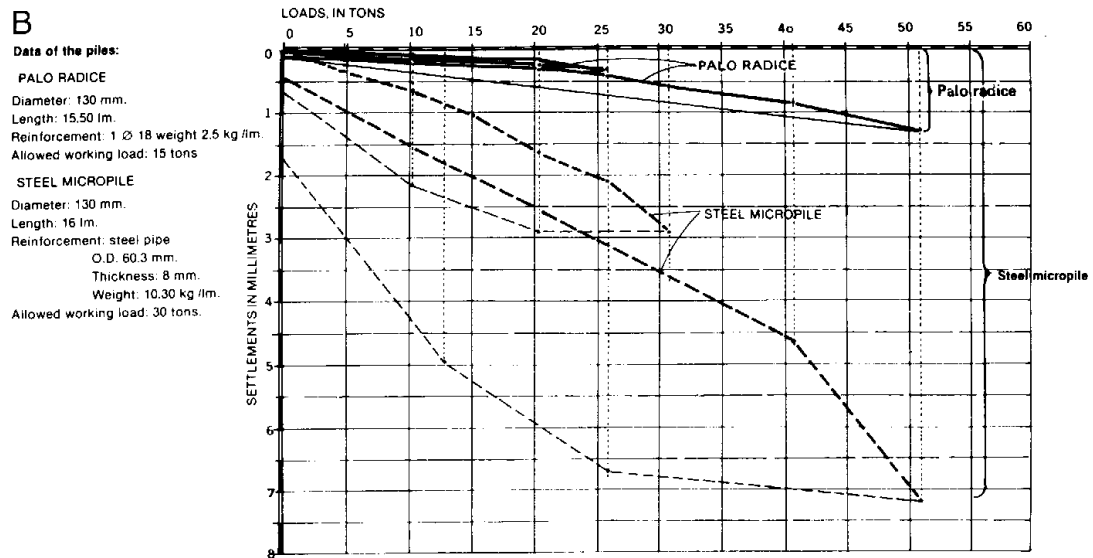
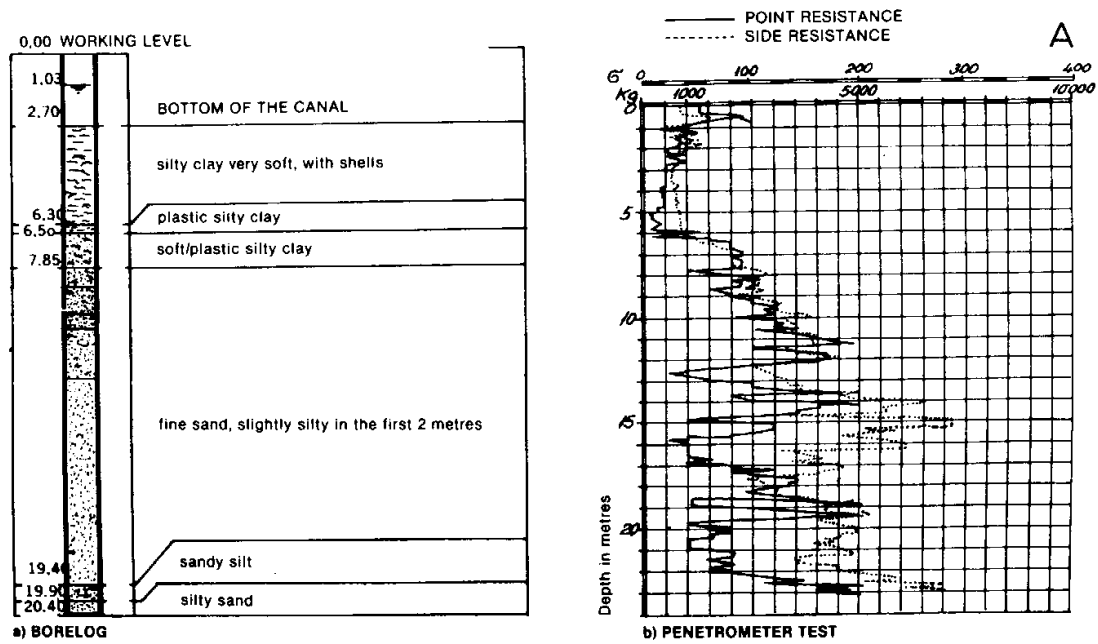
Los “pali radice” requieren asientos entre 1 y 4 mm (véase por ejemplo las figuras 1 y 17), lo que equivale como máximo al 2% del diámetro nominal de perforación y al 1-15% del diámetro real del bulbo obtenido.

Pero los micropilotes donde no se aplica presión de inyección importante pueden requerir asientos algo mayores. La figura 17 (Lizzi, 1980) compara dos micropilotes diferentes. El micropilote convencional de tubo (no se aclara si se inyectó) requirió un asiento de 7 mm, lo que equivale al 5% del diámetro nominal, que era de 13 cm.

La figura 18 resume un caso muy interesante (Uriel A., Ortuño L. y Puebla F.J., 1990) de micropilotaje en una zona kárstica de la costa SE de Mallorca. Se ensayó un micropilote de 22 cm de diámetro, relleno con presión por gravedad, y en los dos primeros ciclos, hasta una carga de 600 kN, el asiento fue de 2 mm (1% del diámetro) y el comportamiento fue elástico. En el 3^{er} ciclo se alcanzaron los 800 kN, el asiento se acercó a los 5 mm (más del 2% del diámetro) y el comportamiento dejó de ser elástico, con un asiento no recuperable de 2 mm. La figura ilustra también un dispositivo de prueba de carga muy habitual.

En la figura 19 (Oteo, 2001) se comparan varias pruebas de carga de micropilotes. Puede observarse que los asientos pueden llegar a ser del orden del 10% del diámetro. Los valores de la resistencia unitaria por el fuste superan siempre los 100 kN que es el tope marcado por las instrucciones y la práctica de los pilotes de desplazamiento. El incremento de resistencia por el fuste tiene dos causas:

- a) El diámetro real es mayor que el nominal y la resistencia por el fuste suele calcularse a partir del diámetro nominal.
- b) La presión/inyección consolidan el terreno en el perímetro de la zona del bulbo.



Load tests carried out on the same site on a palo radice and on a steel micropile. (A) the site investigation; (B) load/settlement charts.

Figura 17. Comparación entre dos ensayos de carga de micropilotes de 13 cm de diámetro (LIZZI, 1980).

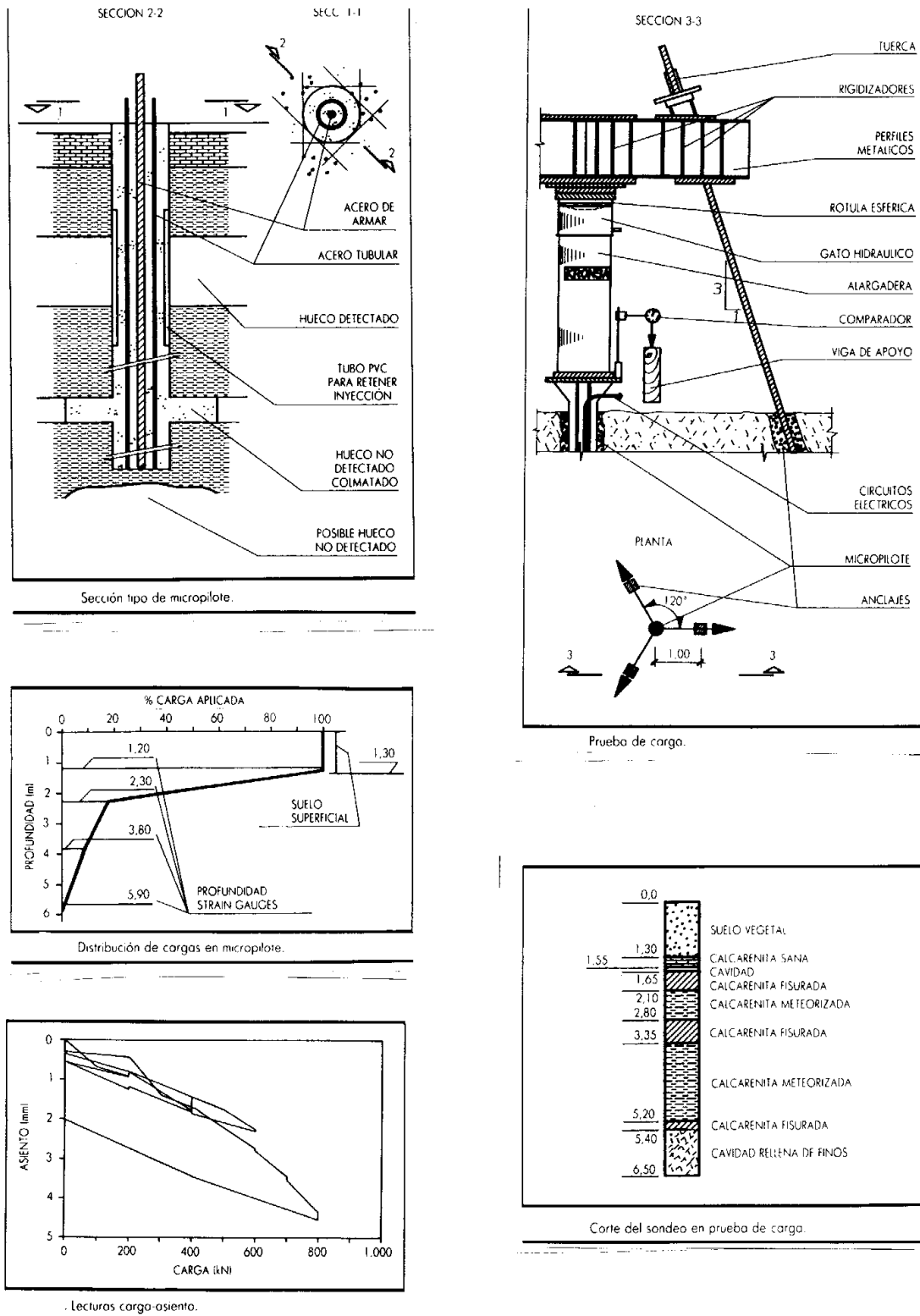


Figura 18. Resultados de un ensayo de micropilotes de 22 cm de diámetro en zonas kársticas (Uriel et al, 1990)

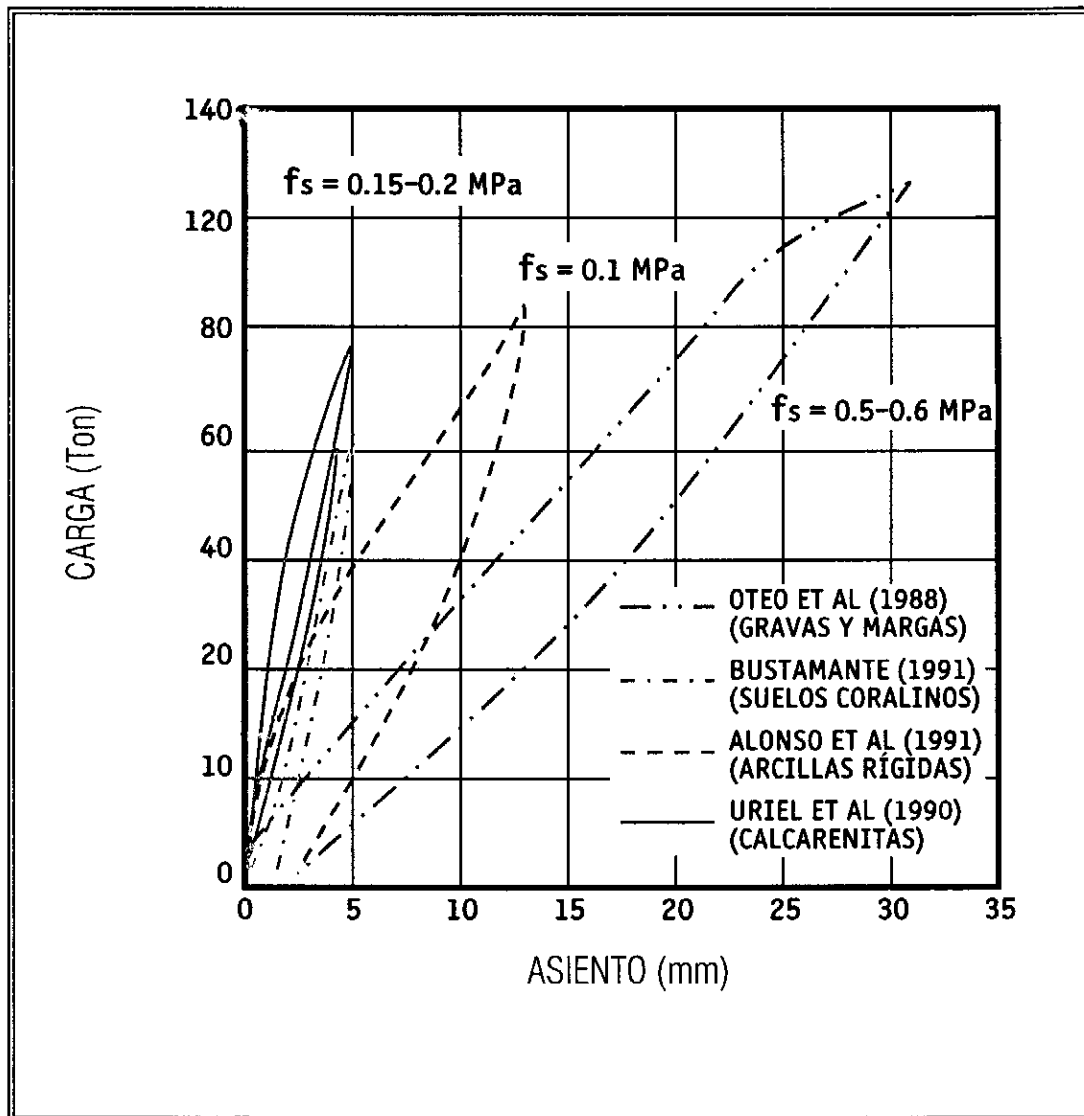


Figura 19. Comportamiento de micropilotes en varios tipos de suelos.

4.6 DISTRIBUCIÓN DE LA CARGA A LO LARGO DEL FUSTE DEL MICROPILETE. CARGA POR LA PUNTA

La figura 20 (Bustamante, 1986) muestra la distribución de la carga a lo largo del fuste del micropilote. No llega prácticamente ninguna carga a la punta. El pilote de Uriel et al tenía una esbeltez (cociente longitud/diámetro) de 27 y el de Bustamante de 45. Son bastante normales los micropilotes con esbelteces de 40 ó más. En esas condiciones es muy dudoso que un micropilote instalado en un terreno homogéneo llegue a transmitir carga a la punta. Por otra parte el área de la punta es muy reducida, del orden de 0,05 m² como máximo. Incluso con presiones por la punta de 2 Mpa la carga por la punta no superaría los 100 kN. Ello justifica la simplificación de Bustamante e incluso de no consideración de la carga por la punta.

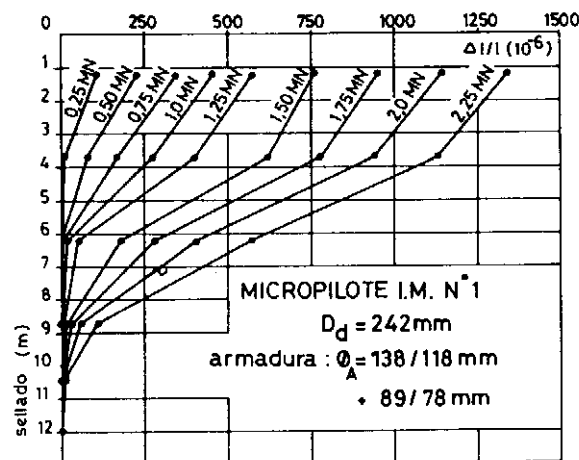


Figura 20. Variación de la carga a lo largo del fuste de un micropilote en función de la carga en cabeza (Bustamante, 1986)

4.7 TOPE ESTRUCTURAL DEL MICROPILETE

Rara vez se alcanza el tope estructural del micropilote, considerado como una barra en compresión. Jiménez Salas utilizaba la expresión:

$$T = 0,25 f_{ck} \times B + 0,4 f_{yk} \times A$$

donde	T	Tope estructural
	B	Sección teórica nominal de mortero
	A	Sección de acero

f_{ck}	Resistencia característica del hormigón $0,25 f_{ck} \leq 6 \text{ Mpa}$
f_{yk}	Resistencia característica del acero $0,40 f_{yk} \leq 140 \text{ Mpa}$

lo que implica coeficientes totales de seguridad de 4 y de 2.5 para el hormigón y el acero y resistencias máximas de cálculo de 24 MPa y 350 MPa respectivamente.

Muchos proyectistas utilizan la fórmula de la EH

$$T = \frac{1}{1.2 \times 1.8} (0.85 f_{ck} \times B + f_{yk} \times A)$$

con la condición $A > 0,2B$ y la misma notación lo que implica coeficientes de seguridad parciales de 1,2 y 1,8 y un coeficiente de seguridad global de 2,16.

Si se aplica la fórmula de la EHE para soportes el tope estructural vale:

$$T = \frac{1}{F_1} \left(\frac{0.85 B f_{ck}}{1.5} + \frac{A f_{yk}}{1.15} \right)$$

4.8 PRUEBAS DE CARGA

Puesto que la carga total de un micropilote no es muy elevada es más fácil realizar pruebas de carga que con los pilotes ordinarios de más diámetro. La figura 18, ya citada, muestra un posible dispositivo de prueba de carga.

La carga suele aplicarse por escalones del 25%, 50%, 75%, 100% y 125% de la carga de servicio prevista. Es posible, pero no usual, superar esta carga si se ensayan micropilotes que después deben trabajar en la cimentación. En todo caso no debe superarse en ellos la carga multiplicada por el coeficiente de seguridad parcial de mayoración. Cada escalón de carga debe mantenerse hasta que se estabiliza la deformación y al menos 30-45 minutos. Los criterios de aceptación del micropilote suelen basarse en los asientos totales con la carga máxima y dependerán del método de ejecución (asientos menores cuanto más completo haya sido el proceso de inyección). Dichos asientos totales límite deben ser los tolerables por la estructura, pero no inferiores al 0.5% del diámetro del micropilote.

5. APLICACIONES A RECALCES

5.1 CONEXIÓN DEL MICROPILOTE A ENCEPADOS O ZAPATAS

Una de las ventajas del micropilote es la facilidad de conexión a las cimentaciones existentes, lo que lo convierte en un método ideal de recalce ya que la puesta en carga se produce con deformaciones milimétricas.

La figura 21 (Lizzi, 1980) representa el método clásico de recalce de una cimentación corrida. La conexión no requiere ninguna operación especial. Basta perforar y hormigonar el micropilote a través de la zapata existente, tanto si ésta está construida con hormigón o con mampostería.

La figura 22 presenta dos métodos de conexión más seguros recomendados por AETESS. Se perfora la zapata existente y se sueldan al tubo varios redondos de conexión para aumentar la superficie de adherencia. Si se trata de un encepado a construir posteriormente basta con soldar unas aletas verticales al tubo de la longitud del encepado. El micropilote se hormigona solamente a partir de la base del futuro encepado.

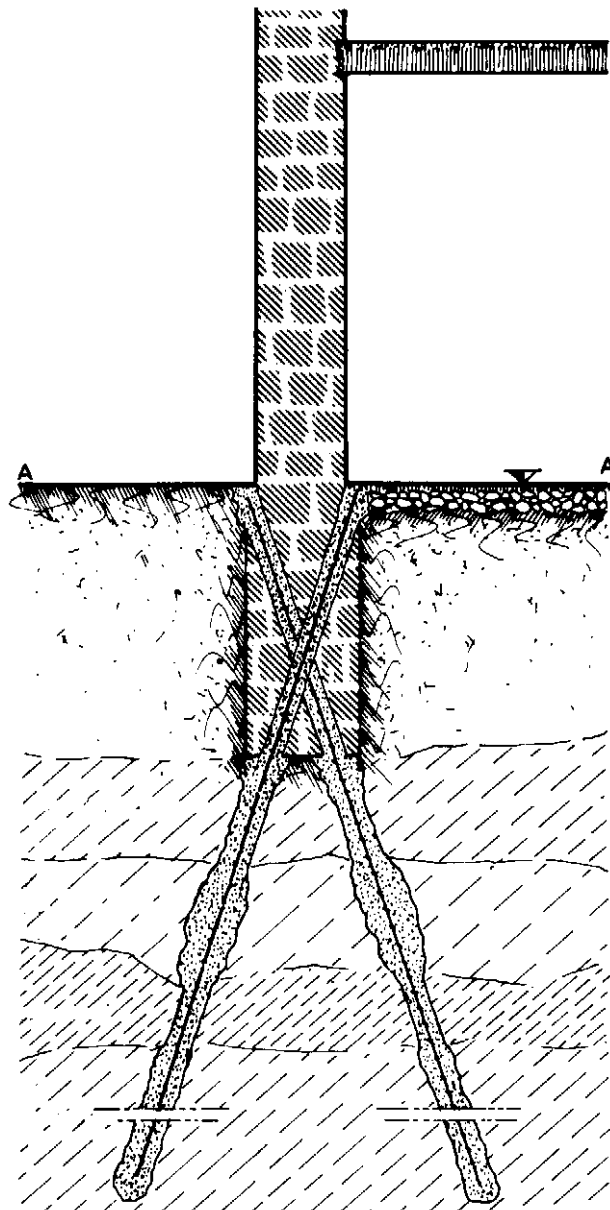
5.2 CIMENTACIONES MEDIANTE MICROPILOTES

Cuando las cargas son reducidas y/o el espacio disponible es escaso, es perfectamente factible realizar cimentaciones con micropilotes, aunque generalmente una cimentación por pilotaje será más barata cuanto mayor sea la capacidad de los pilotes seleccionados en relación con la carga total que deba transmitir la cimentación.

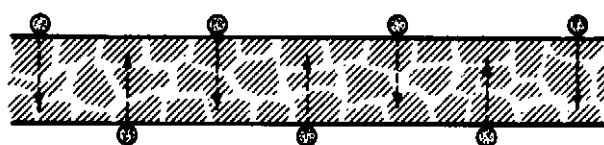
La figura 23 (Herbert 1985) ilustra el caso, frecuente, en que es necesario cimentar un pavimento industrial de una nave de almacén de un centro comercial mayorista, de un frigorífico, de un silo horizontal, etc; casos en los que la carga sobre el pavimento es elevada y no se pueden admitir asientos diferenciales. Los micropilotes de pequeño diámetro resultan muy adecuados.

La figura 24 (Herbert, 1985) muestra el caso en el que es preciso cimentar una máquina aislada, antes o después de la construcción de la nave. Los micropilotes son también un método adecuado.

a) VERTICAL CROSS-SECTION



b) HORIZONTAL CROSS-SECTION A-A



Typical scheme of a pali radice underpinning.

Figura 21. Ejemplo de conexión de micropilotes a una zapata corrida existente
(LIZZI, 1980, 1985)

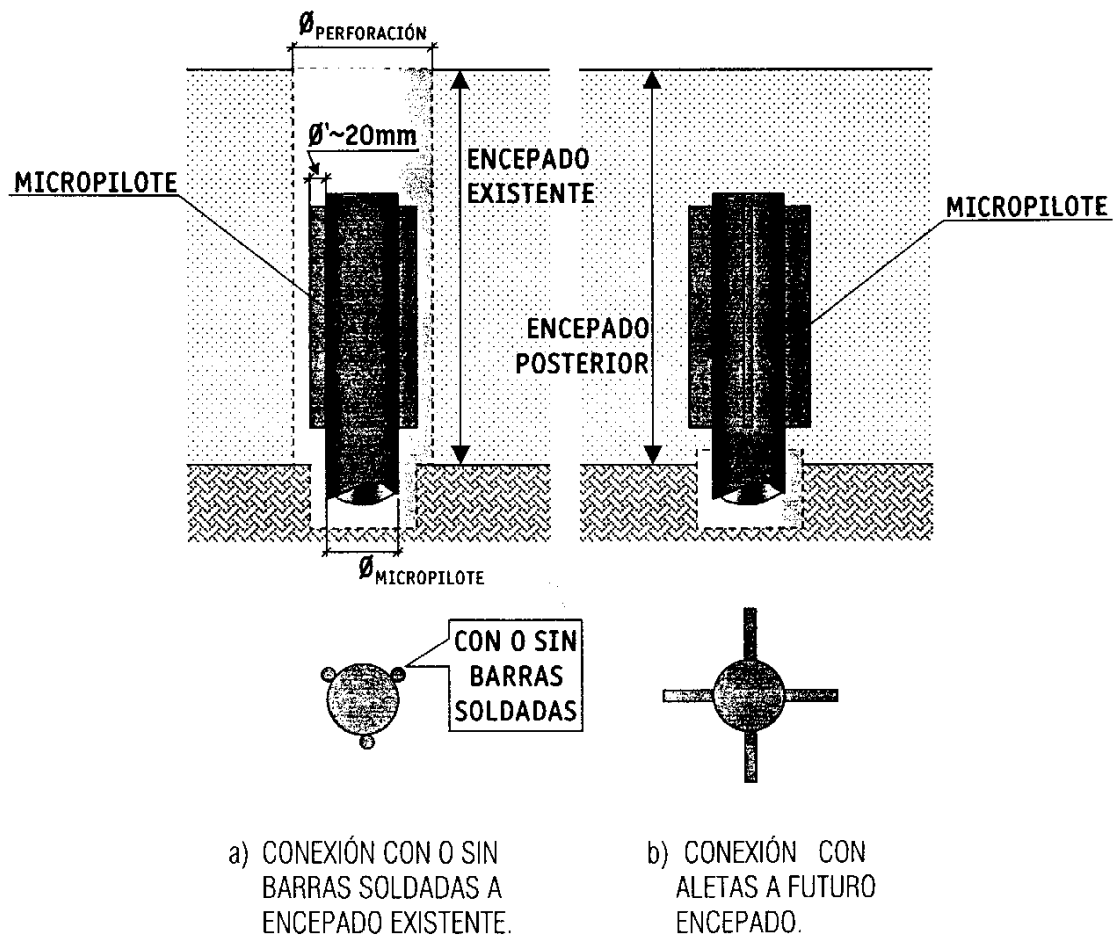
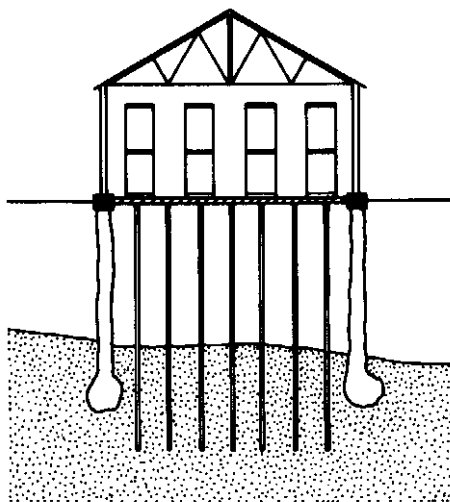
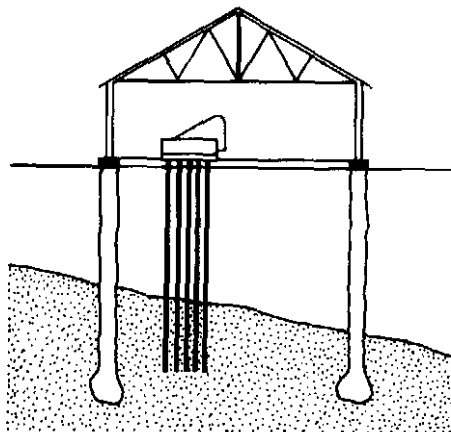


Figura 22. Ejemplo de conexiones de micropilotes a encepados (AETESS)



Support of floor slab with uniform load from storage racks, with micro piles.
Illustration courtesy of *Ground Engineering*, Foundation Publications Ltd., Brentwood

**Figura 23. Ejemplo de la cimentación de un pavimento industrial con cargas importantes
(HERBERT, 1985)**



Support of isolated machine base using micro piles. Illustration courtesy of *Ground Engineering*, Foundation Publications Ltd., Brentwood

**Figura 24. Ejemplo de cimentación aislada con micropilotes para una máquina aislada
(HERBERT, 1985)**

5.3 EJEMPLOS DE RECALCES CON MICROPILOTES

Se presentan varias figuras, que aparecen en la mayoría de las referencias y son relativamente antiguas, por lo que tienen ya menos interés desde el punto de vista comercial, aunque si lo siguen teniendo desde el punto de vista técnico.

La figura 25 presenta el recalce de la Iglesia de S. Andrés en Roma. Es interesante notar que se han utilizado también micropilotes para “armar” y reforzar los muros de mampostería existentes.

La figura 26 presenta el recalce del Castillo de Bootham en Inglaterra.

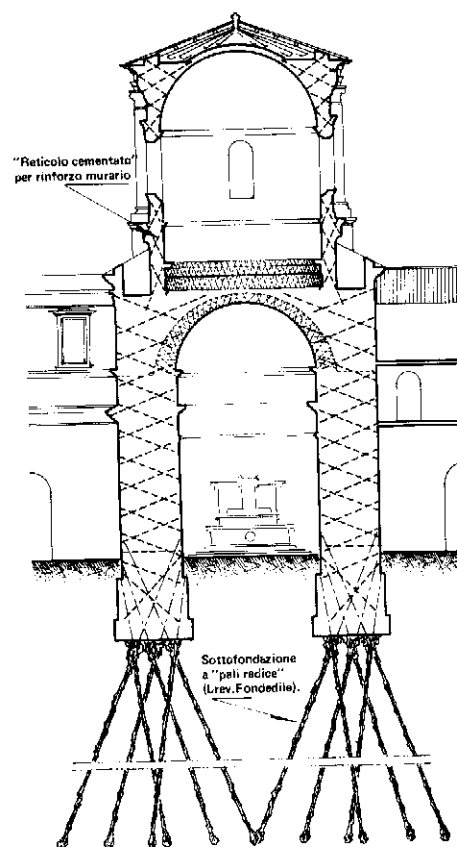
La figura 27 presenta el recalce del Viaducto de Teruel, que sigue en servicio, y donde también se utilizaron micropilotes para reforzar las zonas inferiores de mampostería.

La figura 28 ilustra el doble uso de los micropilotes en el recalce de la Catedral de Agrigento en Italia, donde existía un movimiento de ladera que había producido una grieta longitudinal. Los pilares centrales se recalzaron y la ladera se trató con un reticulado espacial de micropilotes.

La figura 29 presenta el intento de corrección de la ladera del Parador de Carmona en Sevilla. La plataforma superior es atravesada por una falla activa (produjo un terremoto en el siglo XVI) que agrieta el Parador en la zona del patio y pisos inferiores. La ladera quedó asegurada pero la falla activa se sigue desplazando y puede reabrir las grietas.

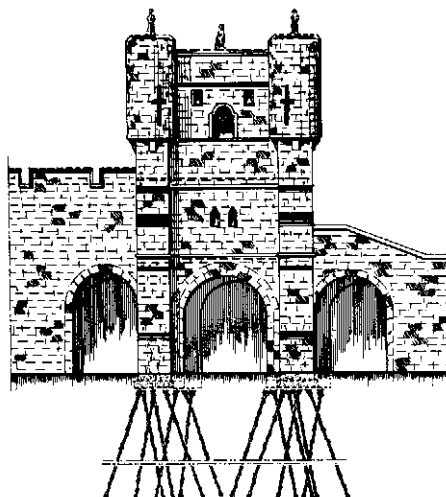
La figura 30 presenta el recalce de la Torre Campanil de Burano en Italia. La retícula de micropilotes moviliza una gran masa de terreno bajo la torre inclinada y como consecuencia el centro de gravedad del conjunto baja mucho, mejorando la estabilidad general.

Finalmente la figura 31 ilustra una aplicación típica para proteger edificios durante la construcción del Metro de Barcelona. Actualmente se utilizan también para este efecto las columnas de jet-grouting y las pantallas.



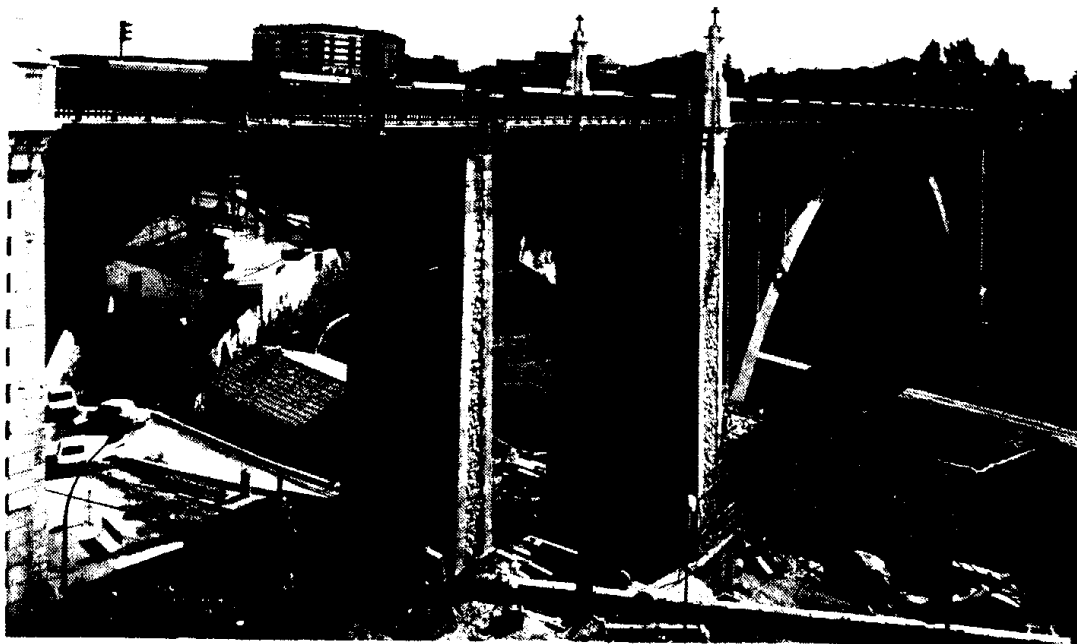
Strengthening of the Church of St. Andrea delle Fratte in Rome, in 1960.

Figura 25. Recalce y refuerzo de muros con micropilotes en la Iglesia de S. Andrés en Roma (Lizzi, 1980)



Underpinning of « Bootham Bar »,
York (England).

Figura 26. Recalce del Castillo de Boothan en York, Inglaterra (Lizzi, 1980)



TERUEL. Antiguo Viaducto

Recalce con «Pali Radice» de la pila estribo y refuerzo de la bóveda del Viaducto de acceso a Teruel en la CN-234.

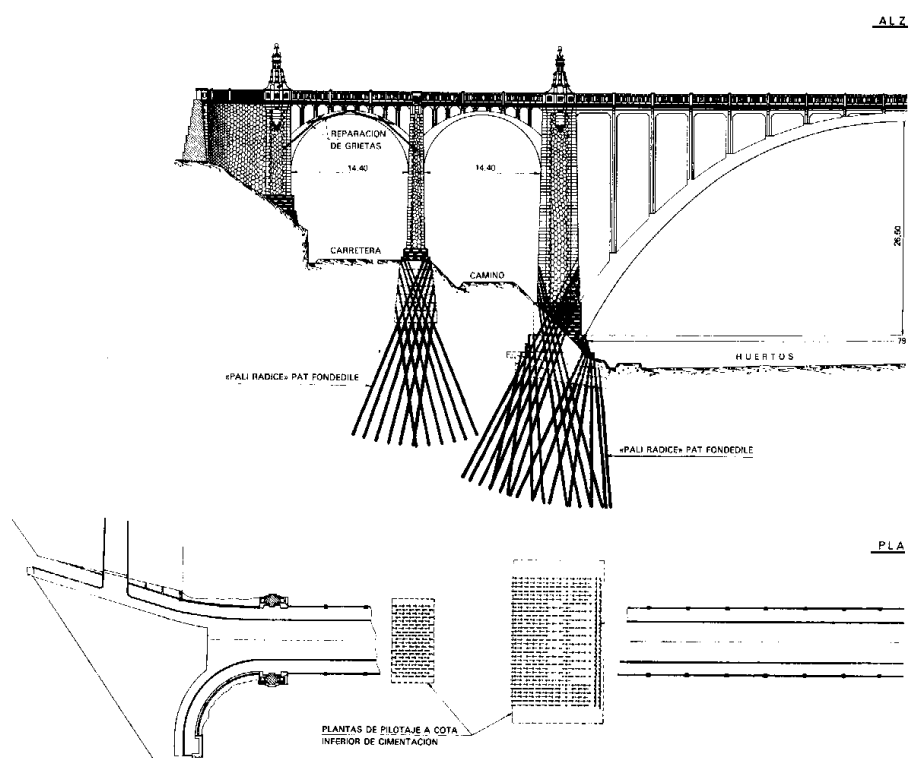
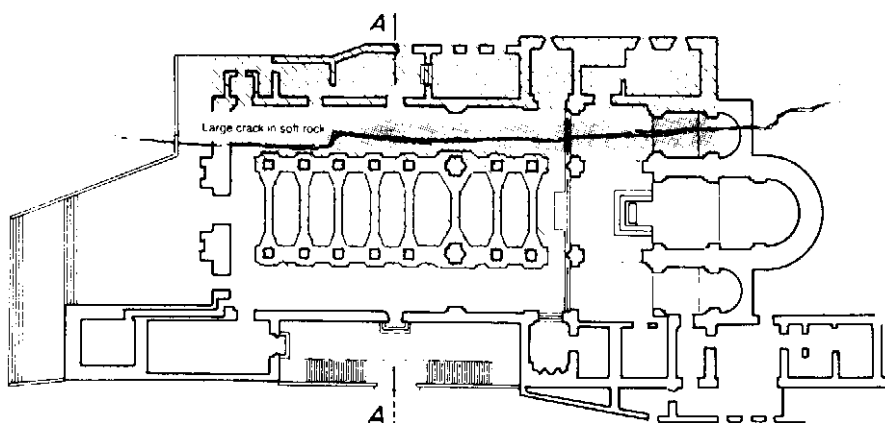
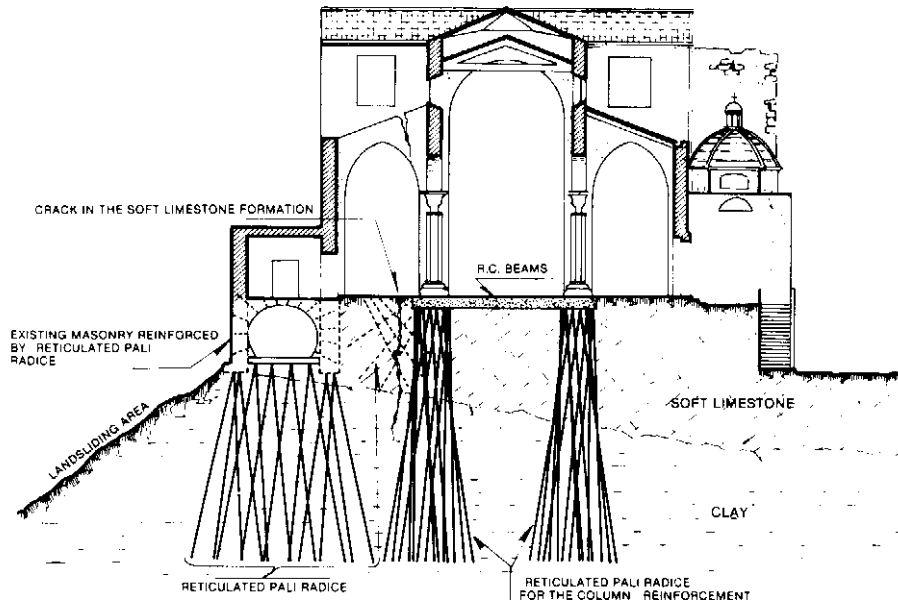


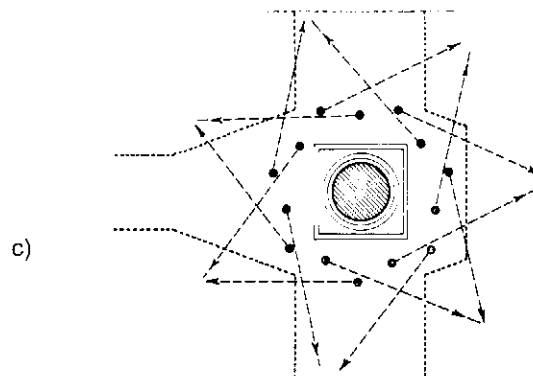
Figura 27. Recalce del Viaducto de Teruel (FONDEDILE)



· The Cathedral, Agrigento. Consolidation works. (*Top*) the entrance: (*bottom*) zone of intervention, in plan.



b)



c)

The Cathedral, Agrigento, Italy. (*Top*), consolidation works (*Bottom*) scheme, in plan, of the column underpinning.

Figura 28. Recalce y refuerzo de ladera en la Catedral de Agrigento, Italia (LIZZI, 1985).

- a) Planta de daños y foto
- b) Perfil transversal
- c) Recalce de un Pilar

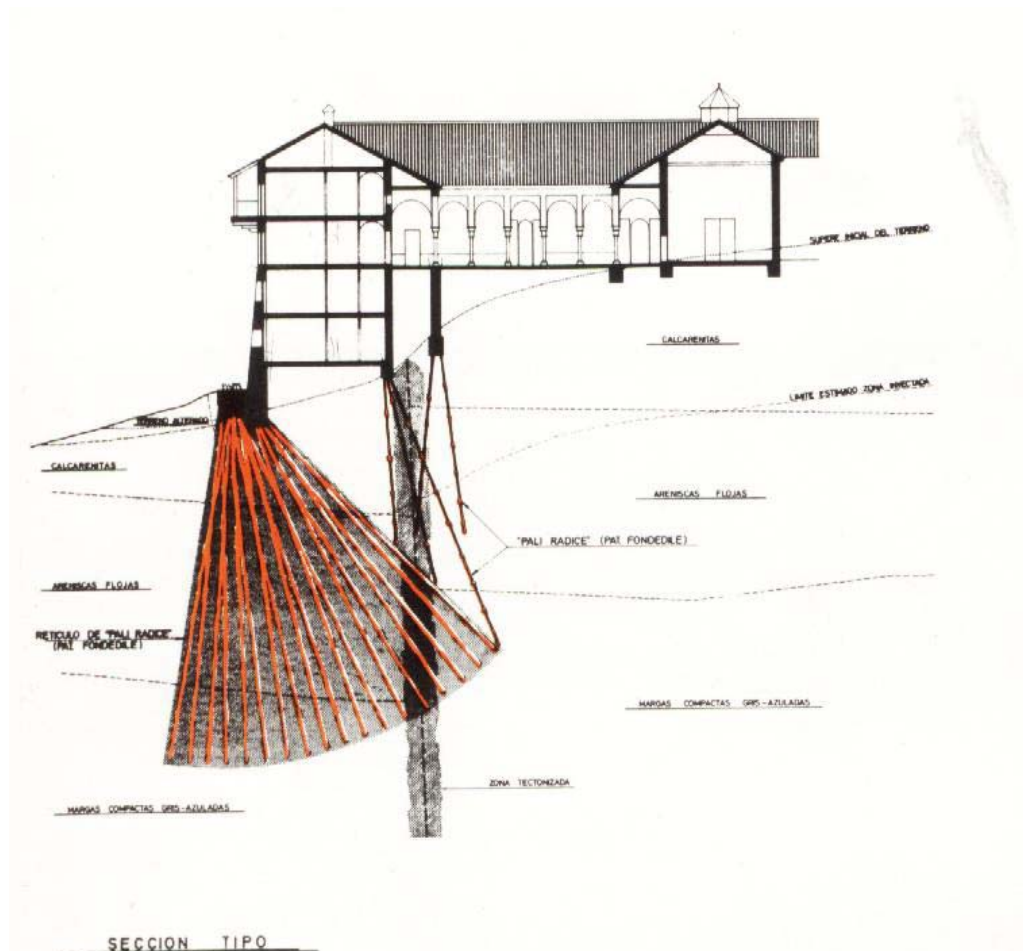
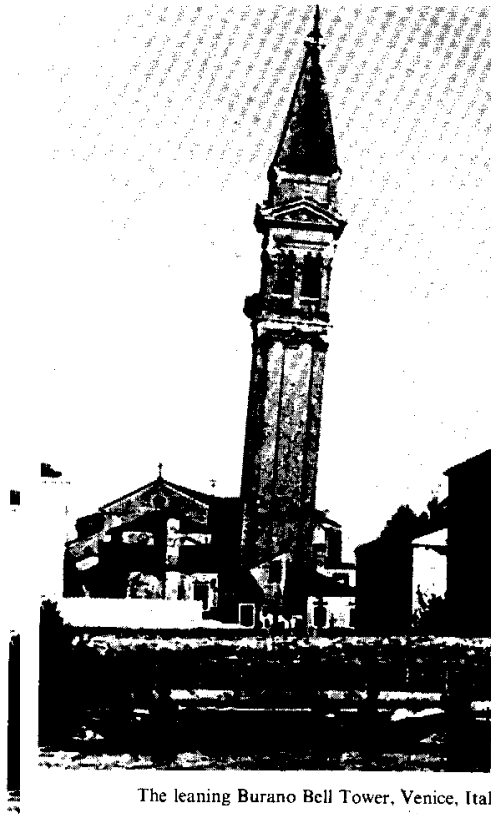


Figura 29. Primer refuerzo de la ladera en el Parador de Carmona



The leaning Burano Bell Tower, Venice, Italy.

The leaning Burano Bell Tower, Venice, Italy.

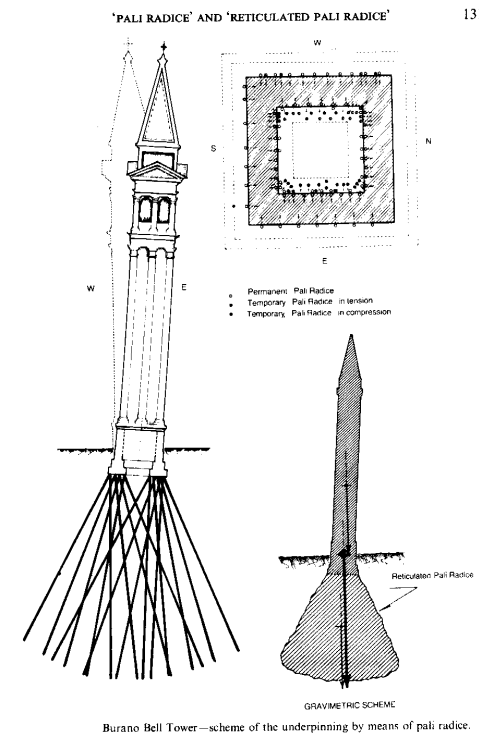


Figura 30. Recalce de la torre campanil de Burano (Lizzi, 1985)

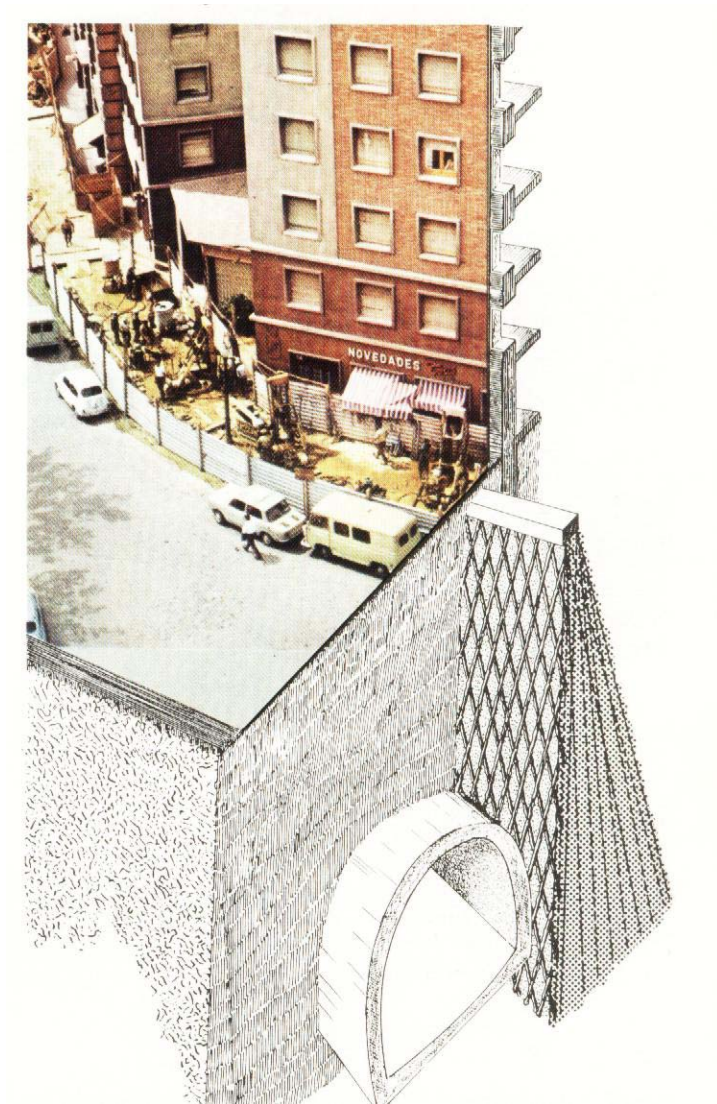


Figura 31. Protección de edificios en el Metro de Barcelona

6. MICROPILOTES COMO REFUERZO DE ESTRUCTURAS

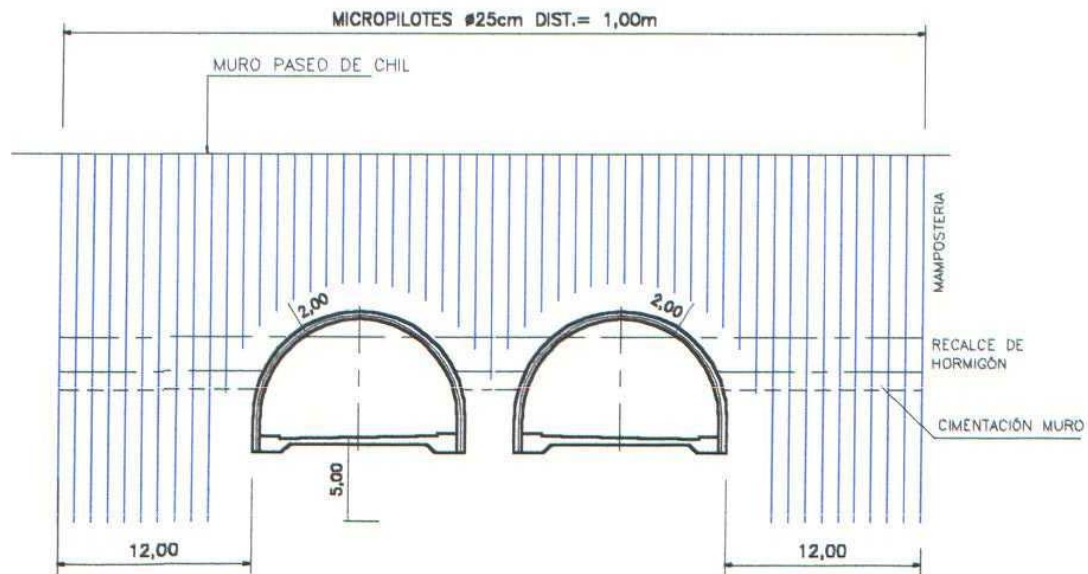
Los micropilotes, que se perforan prácticamente con una sonda, admiten una gran variedad de colocaciones y orientaciones. Por eso son muy adecuadas para el refuerzo de estructuras antiguas. Normalmente se utilizan micropilotes de pequeño diámetro y armados con una sola barra.

Ya se ha presentado el caso de la Iglesia de S. Andrés en Roma donde se “armaron” con micropilotes los pilares góticos (año 1960) (figura 25).

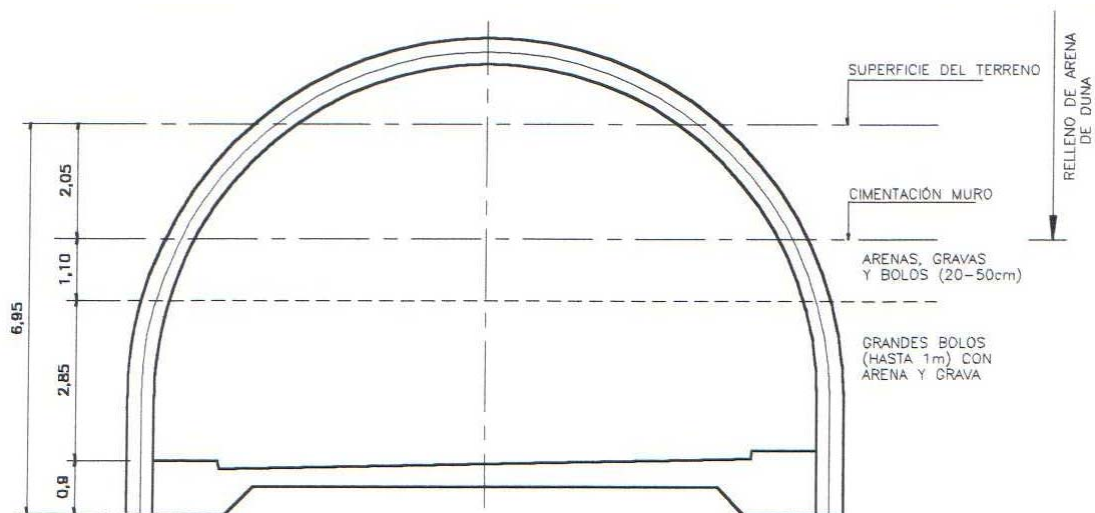
Las mamposterías en seco se refuerzan bien con los micropilotes de recalce que las atraviesan. Ese fue el caso de la Catedral de S. Pedro en Ginebra.

En los recalces de viaductos y puentes es frecuente prolongar los micropilotes a través de las fábricas antiguas con objeto de reforzarlas. Ejemplos españoles son el Viaducto de Teruel, ya presentado (figura 27) y el Puente de Onteniente. Y en Venecia el Puente de los Tres Arcos sobre el Cannareggio.

Finalmente a veces la intervención tiene como principal objeto el refuerzo de las viejas fábricas de mampostería. Ese fue el caso de los muros de la “orquestra” del Teatro Romano de Mérida o de los muros de mampostería del Paseo de Chil (de cuatro carriles) en Las Palmas de Gran Canaria, que se situaban sobre la boca E. de los túneles Ingeniero Julio Luengo, próxima al Estudio Insular, donde termina la Autovía de Acceso N. a las Palmas. Allí se armaron los muros, de 25 m de altura (y de mampostería poco trabada) antes de excavar bajo ellos las boquillas de los túneles. La armadura permitió que los muros resistieran sin roturas las presiones al construir los paragüas de presostenimiento mediante jet-grouting armado a través de la arena de duna del relleno de los muros. (INGEOTEC, 1990). (Figura 32)



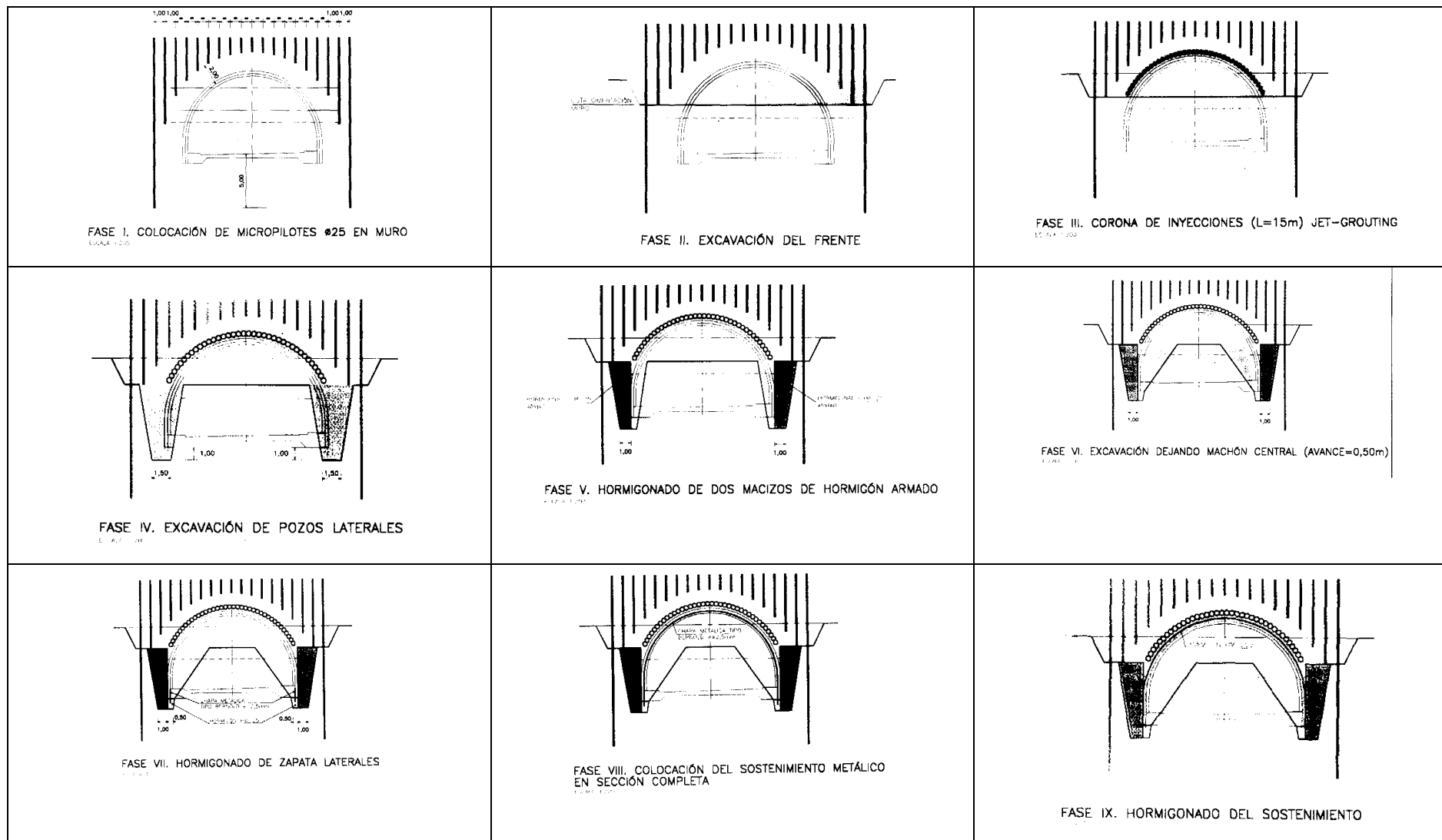
a)



b)

Figura 32. Tratamiento con micropilotes del muro de mampostería de contención del Paseo del Chil (Las Palmas de Gran Canaria) bajo el cual se situaron las boquillas E de los Túneles Ingeniero Julio Luengo en la Autovía de Acceso N a Las Palmas (INGEOTEC, 1995)

- a) Sección longitudinal del Muro y vista de conjunto.
- b) Corte del terreno en cada boca.
- c) Fases de construcción



7. REFERENCIAS

- AETESS (2000) "Borrador de Manual de Diseño y Construcción de Micropilotes". No publicado.
- ARMIJO G. (2003) "Micropilotes con inyecciones de desplazamiento" Jornadas técnicas SEMSIG-AETESS. 3ª Sesión. 27 Febrero 2003. CEDES, Madrid.
- BERMEJO P. (2003) "Ensayos sobre sistemas de unión de armaduras tubulares en los micropilotes". INGEOTER 2. Ed. Carlos Gimeno.
- BRUCE D.A., DIMILLIO A.F. y JURAN I. (1995). "A primer on micropiles". Civil Engineering. Ed. ASCE December 1995. Pp 51-54.
- BUSTAMANTE M. (1980) "Capacité d'ancrage et comportement des tirants injectés scellés dans une argile plastique". Tesis doctoral. Ecole Nationale de Ponts et Chaussées. Paris.
- BUSTAMANTE M. (1986) "Un método para el cálculo de los anclajes y de los micropilotes inyectados" Boletín de Información del Laboratorio de Carreteras. CEDEX N° 174. Mayo-Junio y Julio-Agosto. Pp 3-23.
- BUSTAMANTE M. (2003) "Últimos avances en proyecto". Jornadas técnicas SEMSIG-AETESS. 3ª Sesión. 27 Febrero 2003. CEDES, Madrid.
- FELLENIOUS B.H. (1991) "Pile foundations" Cap. 13 en "Foundation Engineering Hand book". Ed. HSAI-YANG FANG. Ed. Van Nostrand. Nueva York. Pp 511-536.
- FERNÁNDEZ SALSO (1998). Comunicación personal.
- HERBERT S.M. (1985) "Micropiles" sección 3.6 del libro "Piling Engineering" de FLEMING W., WELTMAN K.J., RANDOLPH M.F. y ELSON W.K. Ed. WILEY Pp 79-89.
- INGEOTEC (1990) "Proyecto de los Túneles Ingeniero Julio Luengo en la Autovía de Acceso Norte a Las Palmas de Gran Canaria" Por encargo del Gobierno Canario. No publicado.
- LIZZI F. (1980) "The use of "pali radice" (root pattern piles) in the underpinning of monuments and old buildings and in the consolidation of historic centers". FONDEDILE Napoles. (versión inglesa de un artículo publicado en "L'industrie delle costruzioni" N° 110, Diciembre 1980).
- LIZZI F. (1985) "Pali radice" (root piles) and reticulated pali radice", "Micropiling" Cap. 4 y 5 de "Underpinning". Ed. THORBURN S. y HUTCHINSON J.F. Surrey University Press Glasgow y Londres. Pp 84-151 y 152-159.
- MASCARDI C. (1968) "Micropali di elevate capacità portante" Rivista italiana di geotecnica. 1968 n° 4.
- OTEO C. (2001) "Diseño de pilotes de extracción". "Jornada sobre pilotes de baja capacidad de carga" SEMSIG-AETESS, 28 Febrero 2001. CEDEX, Madrid.
- OTEO C. (2003) "Criterios para el diseño de micropilotes". Jornadas técnicas SEMSIG-AETESS. 3ª Sesión. 27 Febrero 2003. CEDES, Madrid.
- RODRÍGUEZ ORTIZ J.M. (1984) "La cimentación". Curso de Rehabilitación. COAM. Pp 62-69.
- ROMANA M. (2000). "Apuntes sobre pilotes" Colección de transparencias de clase. No editado.
- SANSONI R. (1963) "Pali e fondazione su pali". Ed. Ulrico Hoepli. Milan. Pp 81-82

URIEL A., ORTUÑO L. Y PUEBLA F.J. (1990) “Cimentaciones por medio de micropilotes en zonas kársticas” Ingeniería Civil nº 74, pp 17-22. Traducción de la comunicación presentada al Cong. Internacional de Mecánica del Suelo y Cimentaciones de Río de Janeiro. Agosto 1989.

Para la realización de este artículo se han utilizado datos contenidos en folletos de información técnica de las empresas BACHY, DYWIDAG, ELSE, FONDEDILE, GEOCISA, GKN HAYWARD-BAKER, GUSTAVSBERG, KRONSA, PIRESA, RODIO, SITE, SMEDJEBACKEN, SWISSBORING y TERRATEST. En general estos folletos no tienen fecha. Aunque se ha hecho un esfuerzo para usar las últimas ediciones de los folletos no se puede garantizar que alguno de los procedimientos de ejecución descritos no puedan haberse modificado y no estén totalmente en uso.