3-2

Master Universitario en Túneles y Obras Subterráneas

ÁREA: C2
MÓDULO: CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES

MICROPILOTES Y PARAGUAS PARA TÚNELES (CONSTRUCCIÓN)

PONENTES: José Santos Sánchez
I.C.C.P.
SITE, S.A.

Día: 18/05/07
Hora: 18:15 A 20:15

MICROPILOTES Y PARAGUAS PARA TÚNELES

José Santos Sánchez

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

SITE, S.A.

Ésta clase pertenece al Máster en Túneles y Obras Subterráneas dentro del Área de Construcción.

La misma pretende dar un repaso a la utilización de micropilotes en la construcción de túneles, desde el punto de vista constructivo.

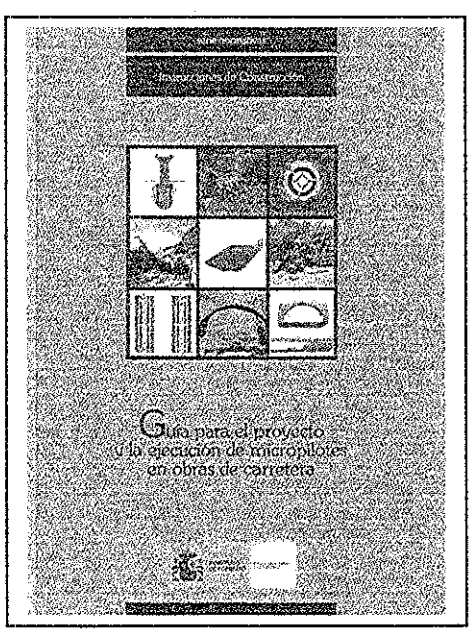
1.- MICROPILOTES

1.1.- Definición y forma de trabajo

Llamamos micropilote a un elemento de una pequeña sección circular, con un diámetro inferior a 300 mm, perforado "in situ", armado con tubería, reforzada a veces con un redondo, e inyectado con lechada o mortero de cemento en una o varias fases.

Es por tanto, un elemento resistente donde como en los pilotes, predomina claramente la longitud sobre el diámetro, y que puede ser ejecutado en condiciones muy difíciles de gálibo y espacio.

Recientemente se ha publicado la "Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera" perteneciente al Ministerio de Fomento y la cuál nos servirá de guía a lo largo de esta clase.



Según ésta guía, los micropilotes se pueden clasificar atendiendo a los siguientes aspectos:

A. Por la forma de transmitir los esfuerzos al terreno:

A.1. Puntualmente cada uno de los micropilotes a través de su fuste, y de su punta, a modo de cimentación.

A.2. En conjunto mejorando una zona determinada del terreno (inyecciones armadas).

B. Por el tipo de solicitación dominante a la que son sometidos:

B.1. Esfuerzos axiales a compresión o tracción (cimentaciones y recalces).

B.2. Momentos flectores y esfuerzos cortantes (estabilización de laderas, contención de excavaciones, etc.).

C. Por el sistema de inyección de la lechada o mortero de cemento:

C.1. Los inyectados en una sola fase a baja presión (que puede llegar a ser solamente la gravitatoria), llamados de Inyección Única Global (IU).

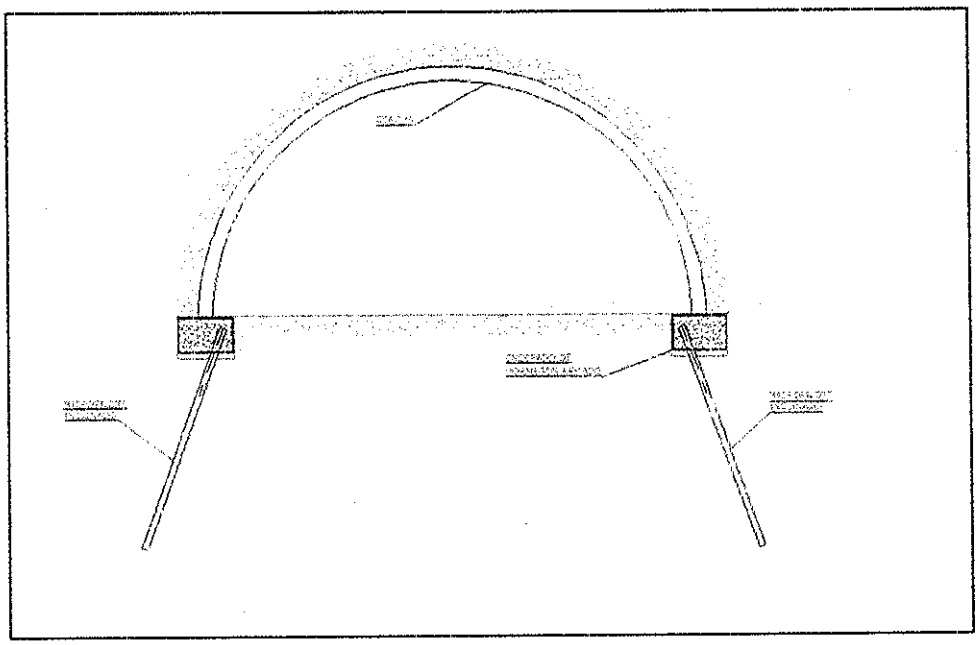
C.2. Los reinyectados hasta dos veces a través de circuitos con válvulas antirretorno, llamados de Inyección Repetitiva (IR).

C.3. Los reinyectados varias veces a través de tubos manguitos desde el interior de la tubería, en toda la longitud del micropilote o en parte, llamados Inyección Repetitiva Selectiva (IRS).

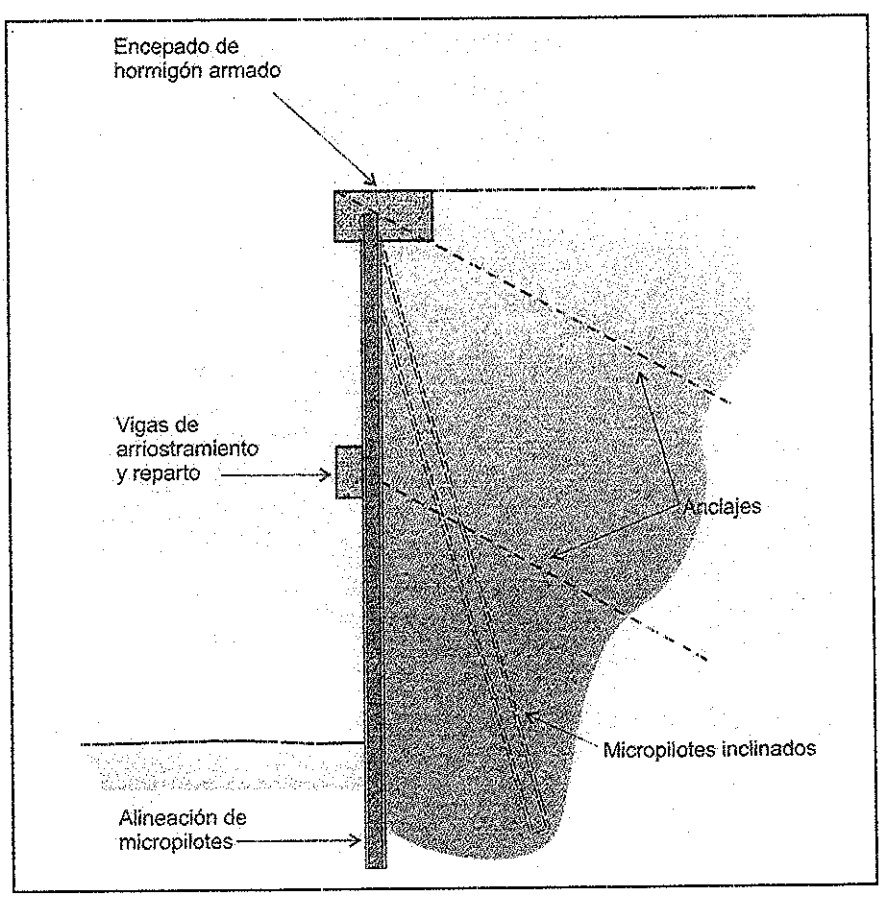
1.2.- Aplicación de los micropilotes en la construcción de túneles

Las aplicaciones usuales de los micropilotes en la construcción de túneles, se refieren básicamente a los siguientes grandes grupos:

A) **Como estructuras de cimentación**, aplicados en el recalce de cerchas previo a la realización de la destroza, con la finalidad de evitar descalces de las mismas, trabajando a compresión y flexión.

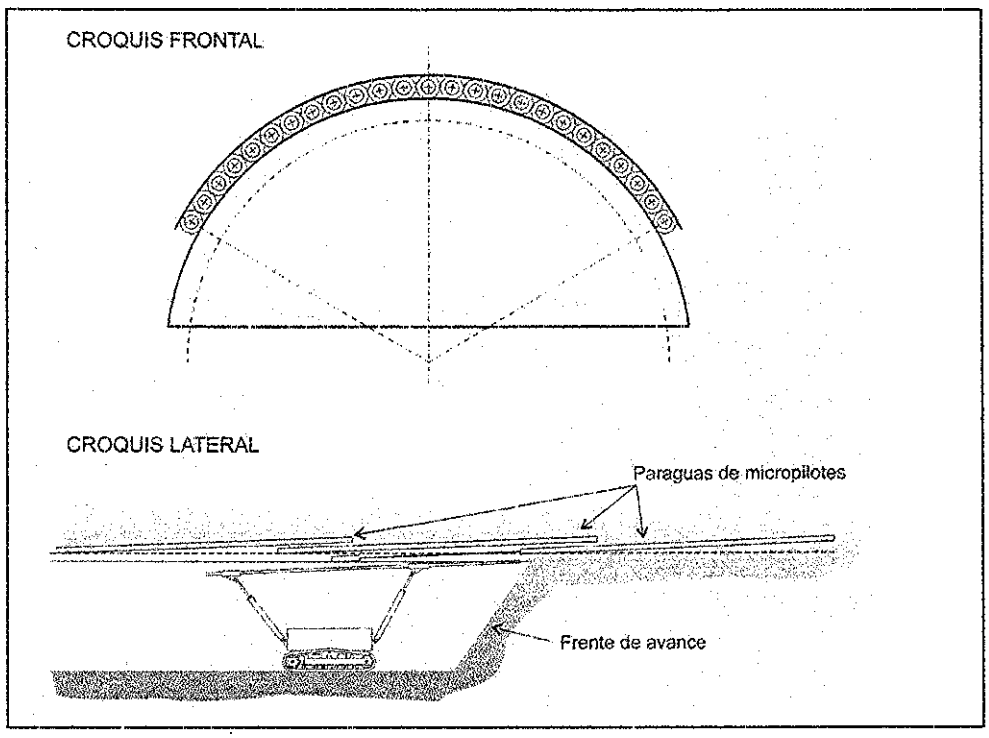


B) En estructuras de contención en la boquilla, aplicados, solos o habitualmente con anclajes, en la contención del terreno en excavaciones. Se sitúan en línea o formando abanico, utilizados principalmente en la estabilización de los taludes frontal y laterales de la boquilla del túnel.

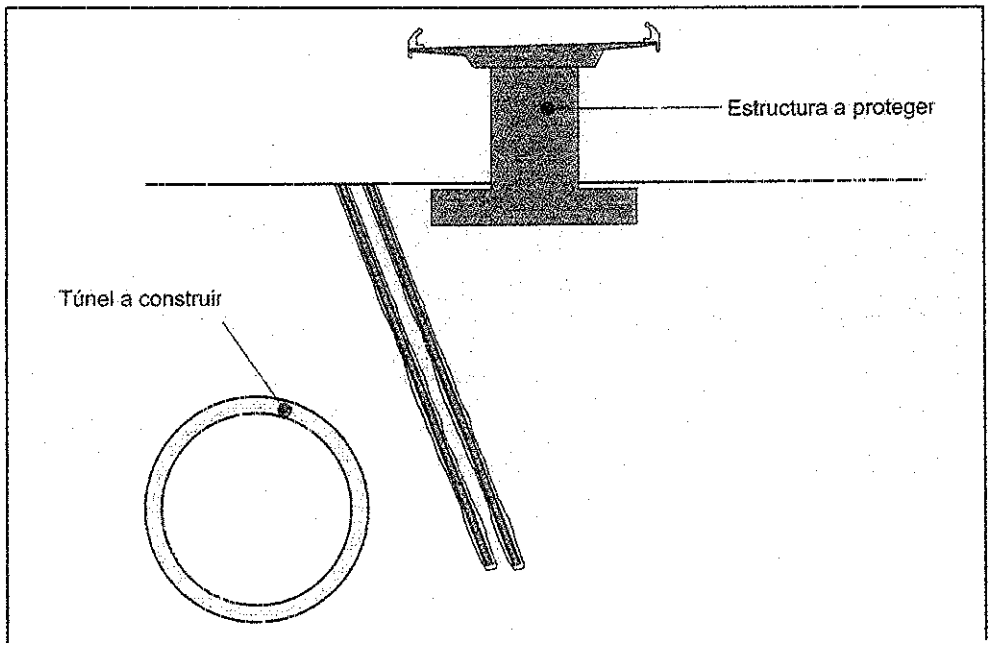


C) En paraguas de micropilotes, ejecutados como contención del terreno en excavaciones de túneles, que pueden ser:

- Exteriores: en emboquille.
- Interiores: para atravesar zonas de gran dificultad.



D) Disposición de **pantallas de micropilotes,** ejecutados como defensa de construcciones preexistentes cercanas para evitar asientos ocasionados por la perforación del túnel.



Dado que ésta clase pertenece a la Subárea de Emboquilles y Pozos de acceso, únicamente nos vamos a tratar la utilización de los micropilotes en estructuras de contención en la boquilla y paraguas de micropilotes.

1.3.- Materiales o productos constituyentes de los micropilotes

A efectos de este documento los micropilotes se consideran validos si sus materiales constituyentes cumplen los requisitos que se citan a continuación.

Armaduras

Se corresponde con el artículo 2.1. de la Guía.

Las armadura de los micropilotes estará constituida por un tubo de acero estructural que puede estar complementado por una o varias barras corrugadas interiores o exteriores al mismo. Igualmente puede estar constituido solamente por una barra de acero corrugado de tipo convencional o barras especiales tipo Gewi , Dywidag o barra roscada.

Los micropilotes más usuales en las obras de túneles son los correspondientes a armaduras tubulares por ser predominante su uso y fácil su unión.

Dentro de las armaduras tubulares se puede distinguir:

Aceros Convencionales

Denominamos aceros convencionales a aquellos de uso habitual en estructuras metálicas, fabricados en perfiles y tuberías según las especificaciones UNE, EN, DIN etc.

Se resumen los habituales en el cuadro siguiente:

CARACTERÍSTICAS DE LOS ACEROS CO						
Tipo de acero	Norma	Límite Elástico (MPa)	Resistencia a rotura (MPa)	Alargamiento (%)	C %máx	Mı %m
S 235	EN	235	360	26	0 17	1 :
A 37	UNE					
Fe 360	UNI					
ST 37-2	DIN					
E 24-2	AFNOR					
S 275	EN					
Fe 430	UNI					

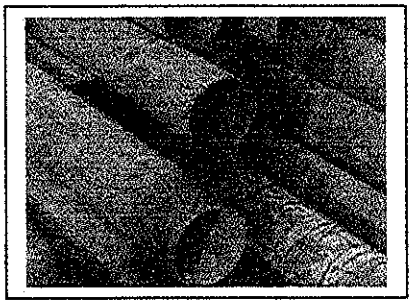
Aceros Reutilizados de la Industria Petrolífera

Denominamos así a los aceros normalizados por el American Petroleum Institute, que componen las tuberías de perforación-extracción en la industria petrolífera que habitualmente son aprovechadas en micropilotes. Se resumen a continuación los más habituales. Cualquiera de ellos tiene mayor capacidad mecánica que los anteriores.

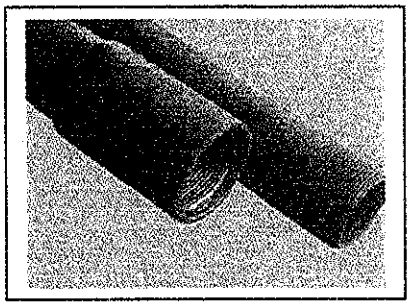
po de acero	Especificación	Aplicación Original	Límite Elástico (MPa)		Resistencia Mín rotura (MPa)	Alargamiento (%)	Composición Química							
			Mín	Máx			C %máx	Mn %mín	Mn %máx	P %máx	S %máx	Cr %máx	N %máx	Mo %m
J55	API 5 series	Casing, Tubing	379	552	517	24				0.040	0.060			
K55	API 5 series	Casing	379	552	655	19.5				0.040	0.060			
E	API 5 series	Drill Pipe	517	724	689	16				0.040	0.060			
N80	API 5 series	Casing, Tubing	552	758	689	18.5				0.040	0.060			
P105	API 5 series	Tubing	724	931	827					0.040	0.060			
P110	API 5 series	Casing, Tubing	758	965	862	12				0.040	0.060			
X95	API 5 series	Drill Pipe	655	862	724					0.040	0.060			

Según la función para la que fue fabricada la tubería se pueden agrupar, aunque no de forma exhaustiva sí práctica, para conocer las tuberías más habituales del siguiente modo.

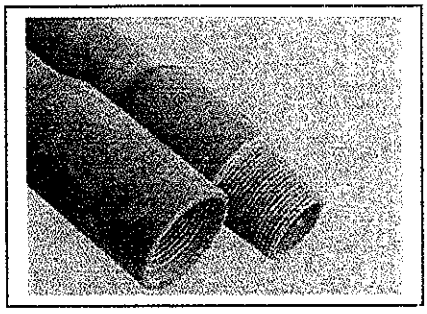
- CASING. Tubería de Revestimiento
  Seamlees tube (fabricado en una pieza, sin costuras)
  Especificaciones API 5A (American Petroleum Institute)
  Terminales macho-macho con manguito exterior
  Tipos de acero J55, N80, P105, P110



- TUBING. Tubería de extracción
  Seamlees tube (fabricado en una pieza, sin costuras)
  Especificaciones API 5A (American Petroleum Institute)
  Terminales macho-macho con ligero ensanche de sección con manguito exterior grueso
  Tipos de acero J55, N80, P105, P110



- DRILL PIPE. Varillaje de Perforación
  Seamlees tube o Welded tube
  Especificaciones API 5A, 5D (American Petroleum Institute)
  Terminales macho-hembra tipo manguito exterior incorporado
  En un extremo con ensanche progresivo de sección en ambos terminales (macho y hembra) y rosca cónica
  Tipos de acero E, X95



Los diámetros más usuales de tubería utilizada en micropilotes son:

Diámetro mm	Espesor mm	Sección mm2
60,30	3,50	624,00
73,00	5,50	1160,00
88,90	6,30	1630,00
88,90	7,00	1800,00
88,90	9,00	2250,00
101,60	9,00	2610,00
114,30	7,00	2350,00
114,30	9,00	2970,00
127,00	9,00	3330,00
127,00	13,50	4810,00
139,70	9,50	3880,00
139,70	12,50	4990,00
177,80	10,00	5270,00

Dentro de éstos diámetros, para la ejecución de pantallas y paraguas pesados los más utilizados son:

- 88,9 - 7 mm
- 88,9 - 9 mm
- 114,3 -7 mm
- 114,3 - 9 mm
- 127 - 9 mm
- 177,8 - 10 mm

Lechadas y morteros de cemento

Se corresponde con el artículo 2.2 de la Guía.

La planta de fabricación de mezcla está constituida básicamente por:

- una batidora vertical de alta turbulencia para el amasado de la mezcla, que puede ser eléctrica o neumática,

- una batidora de bajas revoluciones para el mantenimiento de la mezcla, normalmente neumática,
- una bomba de inyección para enviar la mezcla hasta el tajo.

El equipo de inyección propiamente dicho consta de una batidora de baja de mantenimiento y una bomba de alta presión para inyección

Lechadas de cemento.

Como puntos más importantes

- Dosificación, relación agua-cemento entre 0,4-0,55.
- Resistencia a 28 días mayor de 25 MPa.
- Resistencia a 7 días mayor del 60 % de los 28 días.
- Cementos adecuados al tipo de terreno.
- Se pueden añadir aditivos.

Morteros de cemento.

Como puntos más importantes

- Dosificación, relación agua-cemento en torno a 0,6.
- Contenido en cemento mayor de 375 Kg/m3.
- Resistencia a 28 días mayor de 25 MPa.
- Resistencia a 7 días mayor del 60 % de los 28 días.
- Cementos adecuados al tipo de terreno.
- Se pueden añadir aditivos.

Protección contra la corrosión.

Se corresponde con el artículo 2.3 de la Guía.

Las armaduras de los micropilotes, y el resto de los elementos metálicos como los elementos de unión, estarán protegidas frente a la corrosión durante su vida útil.

El sistema de protección aquí considerado viene dado por el espesor de lechada o mortero de cemento que rodea a la armadura a lo largo de toda su longitud, y que debe ser garantizado por la colocación del número de centradores necesarios.

Los recubrimientos mínimos de la armadura serán:

Lechada:

Compresión: 20 mm.
Tracción: 25 mm.

Mortero:

Compresión: 30 mm.
Tracción: 35 mm.

1.4.- Diseño de los micropilotes

1.4.1.- Introducción.

El diseño de un micropilote requiere conocer en primer lugar los esfuerzos actuantes transmitidos por el macizo de terreno a estabilizar, denominados esfuerzos nominales (de compresión, tracción, flexión o cortante), para poder en segundo lugar dimensionar el micropilote (diámetro, longitud y armadura).

Será por tanto misión del Proyectista el considerar todos los estados límites (últimos y de servicio) para obtener los esfuerzos más desfavorables.

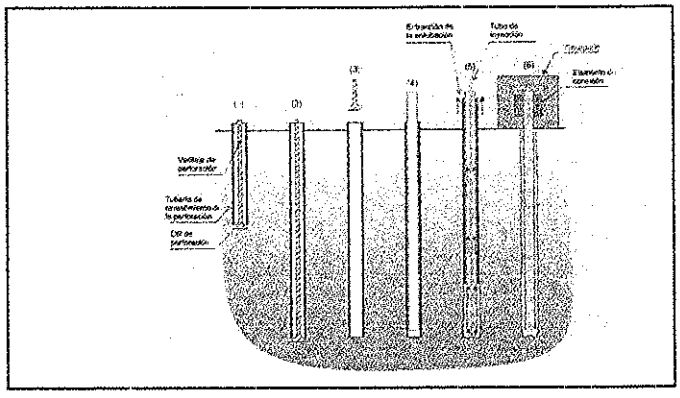
En túneles De acuerdo con las dos aplicaciones de los micropilotes anteriormente citadas, los esfuerzos predominantes sobre cada uno de los micropilotes, y frente a los que deben ser dimensionados, son esfuerzos de flexión y cortante, y según la disposición, a veces, esfuerzos de tracción.

En epígrafes posteriores se tratarán con más detalle el diseño de pantallas de micropilotes y paraguas de micropilotes.

1.5.- Ejecución de micropilotes

La ejecución de un micropilote comprende la realización de las siguientes operaciones:

- Perforación del taladro.
- Colocación de la armadura.
- Inyección del micropilote.
- Conexión con la estructura o resto de micropilotes mediante un encepado.



1.5.1. Perforación del taladro

La perforación se realizará respetando las posiciones, diámetros, longitudes, inclinaciones... de los planos del proyecto.

Tal como se indica en la Guía para el diseño de micropilotes en las obras de carreteras, *"El diámetro del taladro debe garantizar el recubrimiento mínimo de la armadura a lo largo de todo el micropilote"*, siendo dichos recubrimientos mínimos:

Los diámetros de perforación más habituales son 120 mm, 160 mm, 185 mm, 200 mm, 225 mm y 250 mm.

SISTEMAS DE PERFORACIÓN

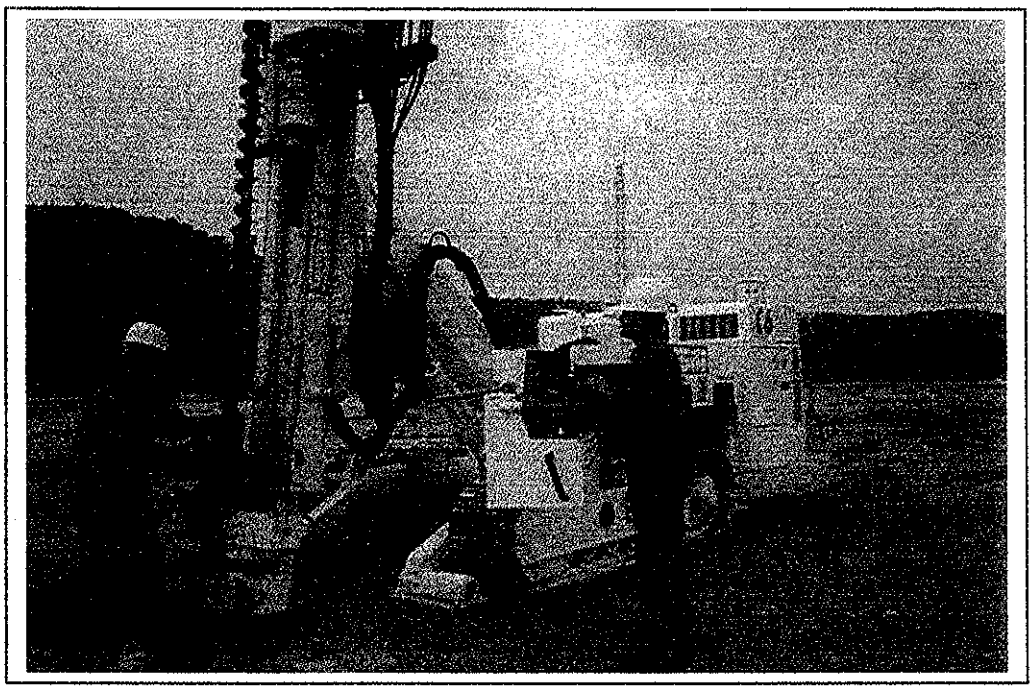
El sistema de perforación adecuado será el que afecte lo menos posible al terreno a perforar.

Los sistemas de perforación a utilizar pueden ser:

- Perforación a **rotación**, que provoca la rotura del terreno por fricción y es recomendable en terrenos blandos mediante baterías de sondeos, barrenas helicoidales o tricono.

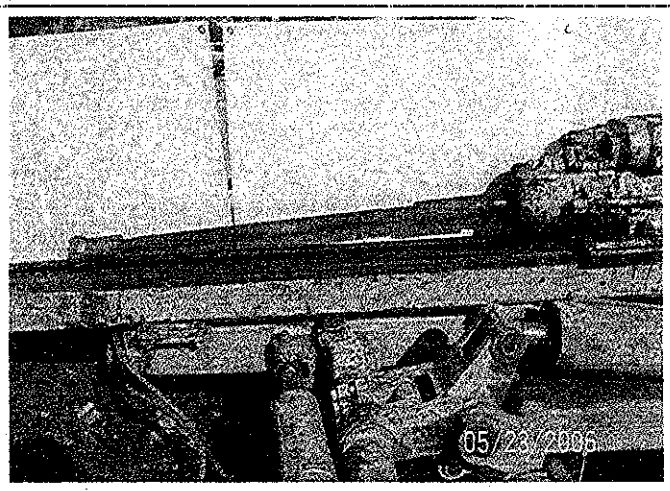
La maquinaria de perforación transmite solamente movimiento de rotación al varillaje. Ésta maquinarioa consiste básicamente en un vagón perforador que lleva incorporado una cabeza de rotación, la cuál transmite dicha rotación al varillaje de perforación, el cuál lleva en la punta una trialeta, un tricono o simplemente una corona dentada de perforación de widia. Dichos útiles tienen siempre salidas para el fluido de refrigeración y evacuación de detritus que puede ser agua o aire comprimido. Éste fluido pasa por el interior del varillaje, sale al fondo del taladro por la boca de perforación y sale al exterior habiendo refrigerado la boca y extrayendo el detritus de perforación.

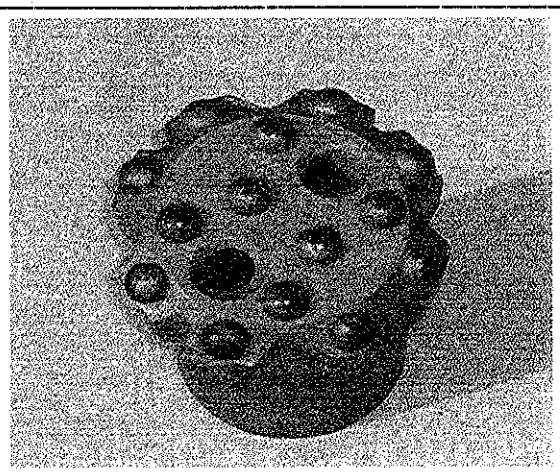
Otro sistema de perforación a rotación es la utilización de hélices contínuas para la ejecución del taladro. Este sistema consiste básicamente en varillas que llevan adosadas unas pletinas helicoidales y en el extremo una trialeta y que se clavan en el material a perforar extrayendo el mismo a la vez que la hélice penetra en el terreno.



Perforación a **rotopercusión mediante martillo en cabeza,** provoca la trituración de los materiales por fricción y percusión conjunta. Este sistema es adecuado para taladros de poco diámetro y poca longitud en terrenos de consistencia dura.

La maquinaria de perforación transmite movimiento de rotación y percusión al varillaje. Ésta maquinaria consiste básicamente en un vagón perforador que lleva incorporado un martillo de percusión que golpea al varillaje de perforación a la par que le transmite un movimiento de rotación. El mismo lleva en la punta una boca con botones de widea y unas salidas para el fluido de refrigeración y evacuación de detritus que puede ser agua o aire comprimido. Éste fluido pasa por el interior del varillaje, sale al fondo del taladro por la boca de perforación y sale al exterior habiendo refrigerado la boca y extrayendo el detritus de perforación

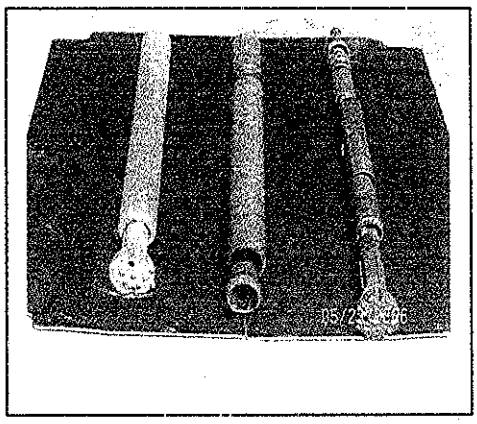


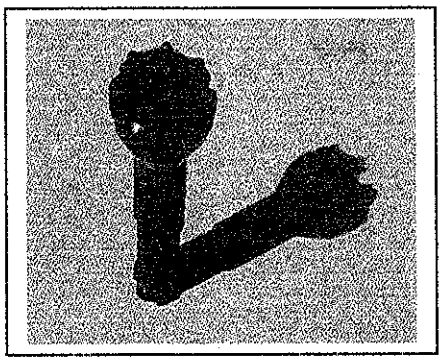


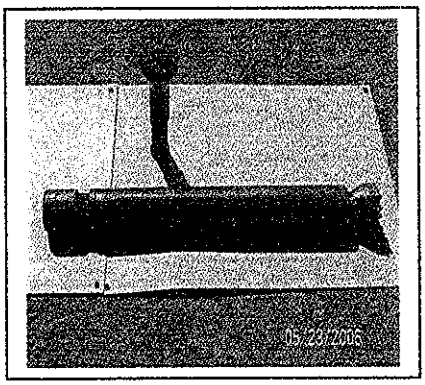
Perforación a **rotopercusión mediante martillo de fondo,** provoca la trituración de los materiales por fricción y percusión conjunta. Este sistema es adecuado para taladros de cualquier diámetro y longitud.

La maquinaria de perforación tan sólo transmite movimiento de rotación al varillaje; la percusión se logra mediante la incorporación en la punta del varillaje de perforación de un elemento llamado martillo de fondo, en el que al pasar el aire comprimido a través de él hace que la punta del mismo (llamada tallante) percuta contra el terreno. El esquema del tallante es muy similar al de la boca de perforación en el caso de martillo en cabeza.

El fluido de perforación ha de ser siempre aire o aire mezclado con agua, dado que el aire es necesario para el funcionamiento del martillo de fondo. El fluido de refrigeración y evacuación de detritus pasa por el interior del varillaje, hace funcionar el martillo de fondo y sale al fondo del taladro por el tallante, refrigerándolo y sale al exterior extrayendo el detritus de perforación.







En caso necesario

En estos tres sistemas de perforación y en función de la consistencia del terreno la perforación se puede realizar al amparo de una entubación metálica recuperable.

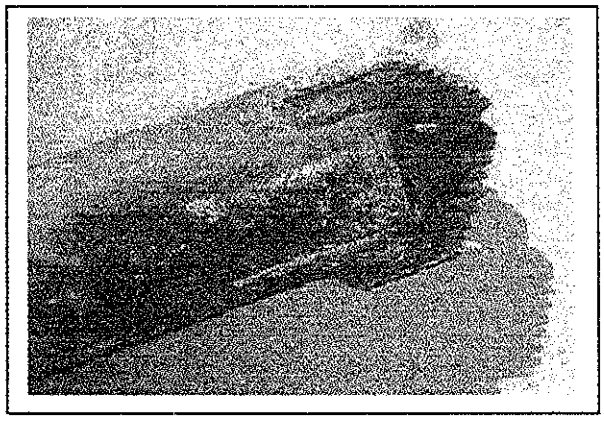
En el caso de su utilización el sistema de perforación descrito en cada caso acompaña la introducción de una tubería de revestimiento de diámetro interior ligeramente superior al tallante de perforación que va equipada en su extremo con una corona de corte. La introducción de éste revestimiento se hace a la par que el varillaje de perforación, introduciendo el fluido de refrigeración por el interior del varillaje de perforación, refrigerando la corona de corte del revestimiento y el tallante de perforación y saliendo al exterior por el espacio comprendido entre dicha tubería y el varillaje de perforación.

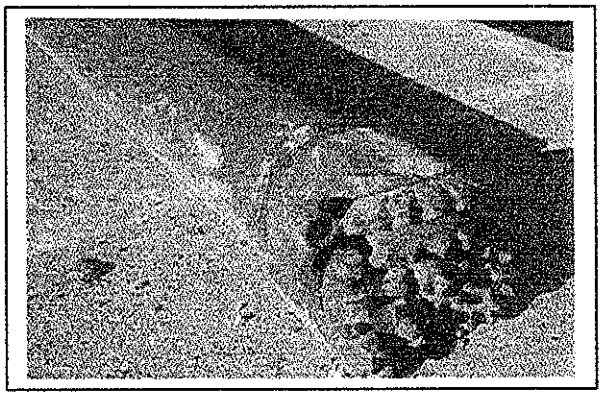
Finalizada la perforación, se extrae el varillaje interior de perforación, quedando el taladro encamisado, sin posibilidad de hundimiento para poder proceder a la introducción de la armadura.

Para evitar la utilización de revestimiento en terrenos de poca consistencia se recurre a sistemas especiales que denominamos:

Sistemas autoperforantes. Aunque propiamente no es un sistema de perforación, dadas sus especiales características, lo hemos incluido en ésta clasificación.

Se corresponde con sistemas de perforación a rotación o a rotopercusión con martillo en cabeza, con la singularidad de que el taladro se realiza utilizando como varillaje de perforación la propia armadura del micropilote dotada en la punta de una herramienta de corte (tricono, trialeta para el caso de rotación y boca de perforación para el caso de rotopercusión). Ésta herramienta queda perdida formando parte de la armadura del micropilote., la cuál queda perdida en el micropilote.





El sistema autoperforante no puede garantizar el recubrimiento mínimo recomendado por la norma, por lo que no queda garantizada la protección de la armadura frente a la corrosión. Es por esto por lo que los micropilotes ejecutados con éste sistema sólo deben de utilizarse en el caso de micropilotes provisionales y cuando éstos tengan que trabajar exclusivamente a flexión o cortante y nunca a compresión o tracción.

Las tolerancias admisibles en cuanto a la ejecución del taladro son las siguientes:

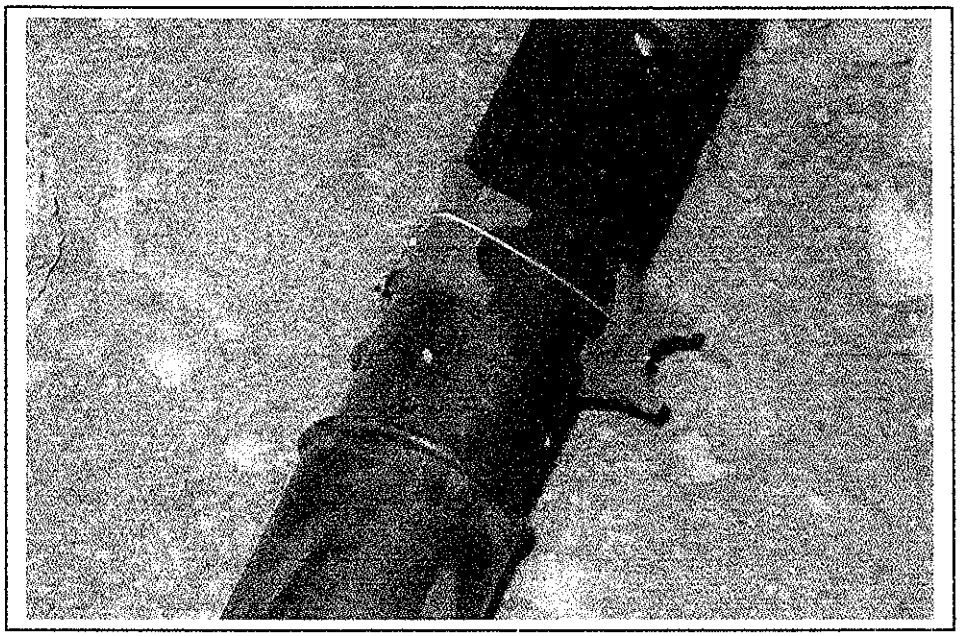
- Respecto a la posición: 50 mm.
- Respecto al diámetro nominal: 2 mm.
- Respecto al longitud: 20 cm.
- Respecto a la inclinación: 2° sexagesimales

1.6.- Introducción de armadura

Una vez comprobada la profundidad del taladro y que la perforación realizada está libre de obstáculos se procederá a la introducción de la armadura.

La colocación de la armadura se efectuará de una forma controlada para no alterar la posición de ninguno de sus elementos (centradores, manguitos...).

Los centradores deben de ir solidarios a la armadura y garantizarán el recubrimiento mínimo. Su separación no será superior a 3 metros.



El tiempo transcurrido entre la instalación de la armadura y la inyección debe ser el menor posible (en ningún caso será superior a las 24 horas).

Es una recomendación de la Guía el que la armadura tubular quede a una distancia mínima de diez centímetros del fondo del taladro.

Se deberá comprobar el estado de las uniones de las armaduras tubulares.

Armaduras sin manipulación

Como se vio en el epígrafe correspondiente, cualquiera de los tipos de tubería mostrados (casing, tubing, y drill pipe) están dotados de uniones de fabricación original con la propia tubería diseñadas para soportar altos esfuerzos dinámicos y estáticos sin disminución de resistencia respecto a la sección nominal de la tubería.

Lo óptimo es aprovechar esta cualidad y por tanto utilizar dichas tuberías sin manipulación en loss paraguas y en otras estructuras sometidas a flexión. Ello obliga al empleo de maquinaria especial de grandes dimensiones para introducir la armadura en los taladros perforados. Con estos equipos se consigue además otro efecto favorable, como es minimizar el número de uniones por micropilote.

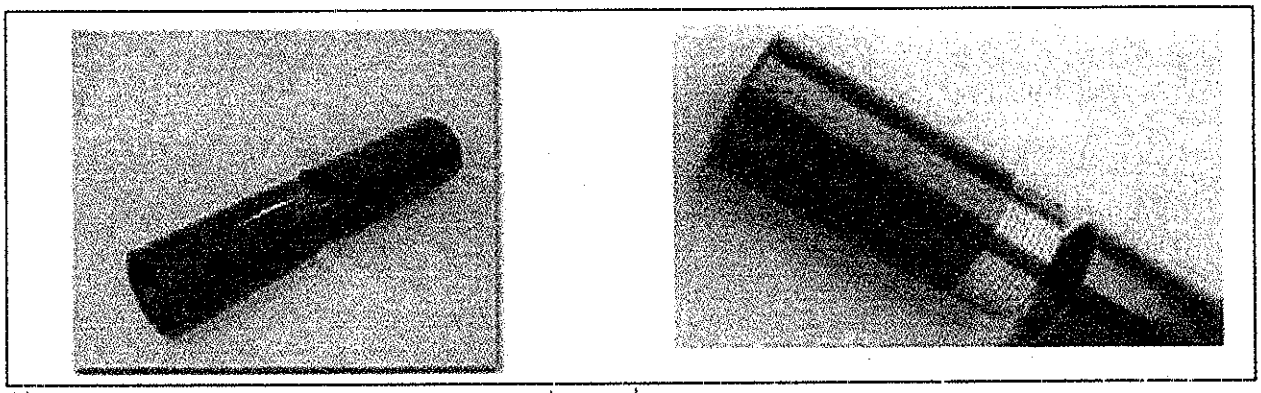
Armaduras con unión mecanizada en taller.

Los tipos de unión que se describen a continuación tienen un factor en su mecanización que afecta a la sección nominal de la tubería reduciendo la misma. En todos los casos sxe produce pérdida de resistencia a tracción debido al pequeño paso de rosca, siendo variable el comportamiento a flexión dependiendo del tipo de unión mecanizada.

Tras la descripción de los distintos tipos se muestran de nuevo los resultados de un ensayo sobre tuberías con distinto tipo de unión.

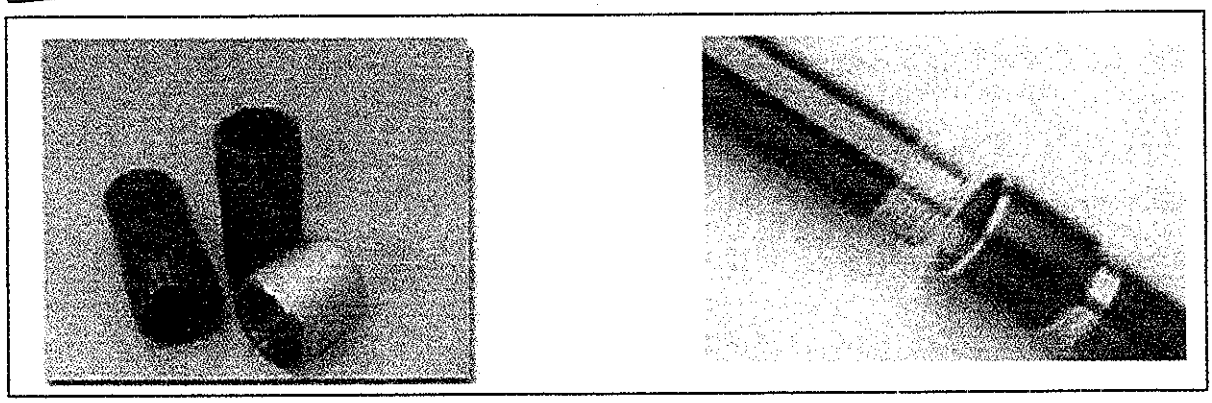
Unión macho-hembra

Este tipo de unión reduce la sección nominal de la armadura tubular. Se produce una pérdida de resistencia a flexión del 50% respecto a la tubería sin unión. Se produce la rotura sin grandes deformaciones.



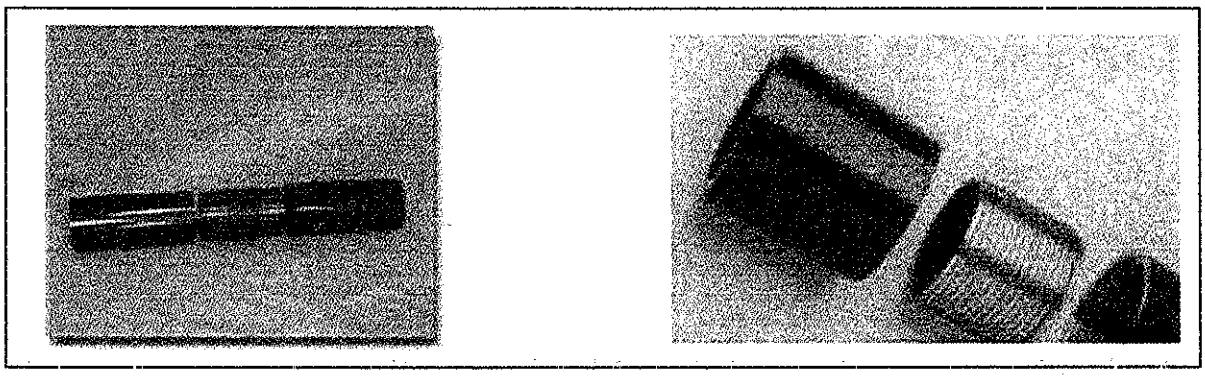
Unión macho-macho con manguito exterior.

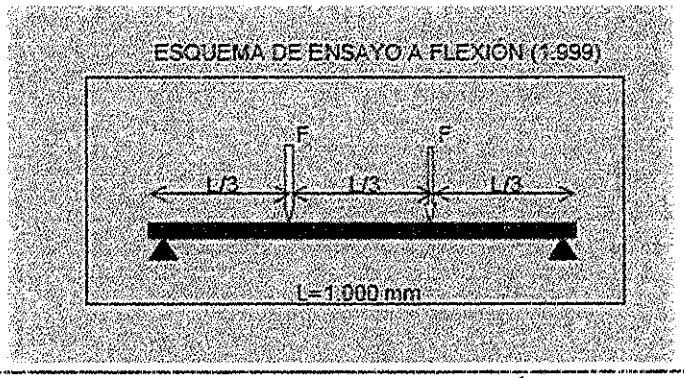
Aunque reduce la sección nominal de la tubería al labrar los extremos macho, la sección total puede incrementarse al elaborar el manguito exterior con tuberías de diámetro y espesor superiores, siendo conveniente que dicho espesor sea superior al nominal de la tubería por su mejor comportamiento en la parte plástica del diagrama carga-flecha. Es además conveniente que el manguito sea largo, entendiendo por tal aquel cuya generatriz es mayor que el diámetro.

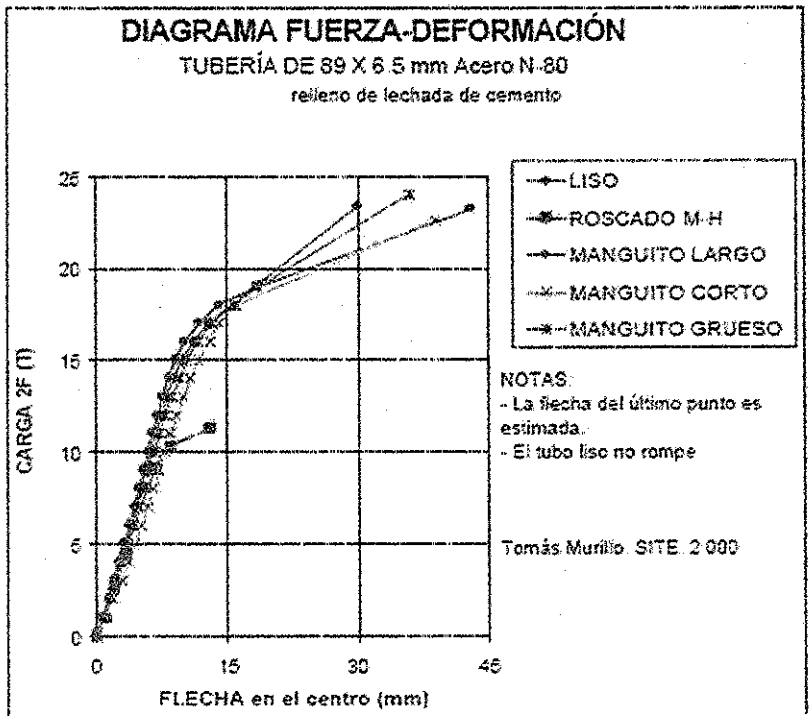


Unión hembra-hembra con manguito interior

Este tipo de unión reduce la sección nominal de la armadura tubular. Si bien puede parecer una ventaja el manguito interior por no producir incremento de diámetro en la unión y no condicionar el de la tubería de revestimiento, presenta el inconveniente de que lejos de confinar las secciones debilitadas por la labra de la rosca como en el caso del manguito exterior, constituye un elemento muy rígido en el interior que favorece la abolladura y rotura de la unión. No parece aconsejable su empleo frente al del manguito exterior.







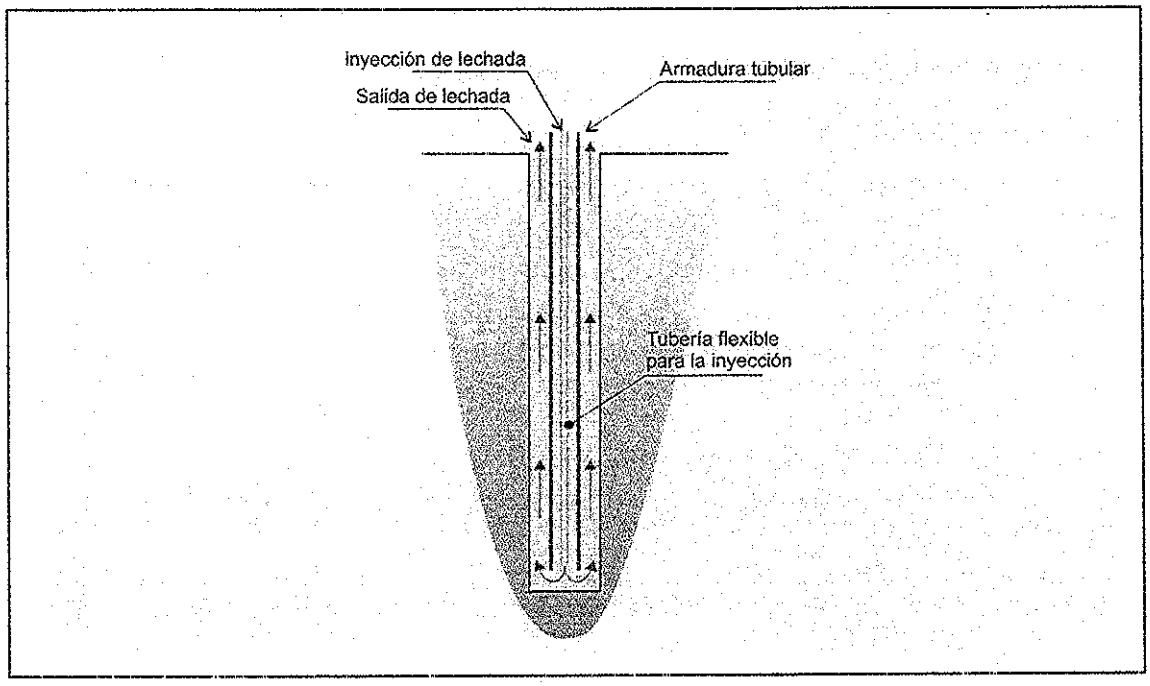
Como se observa, el comportamiento de la unión con manguito exterior es similar al de la tubería sin unión.
Se comprueba también el mal comportamiento de la unión roscada macho-hembra mecanizada en taller.

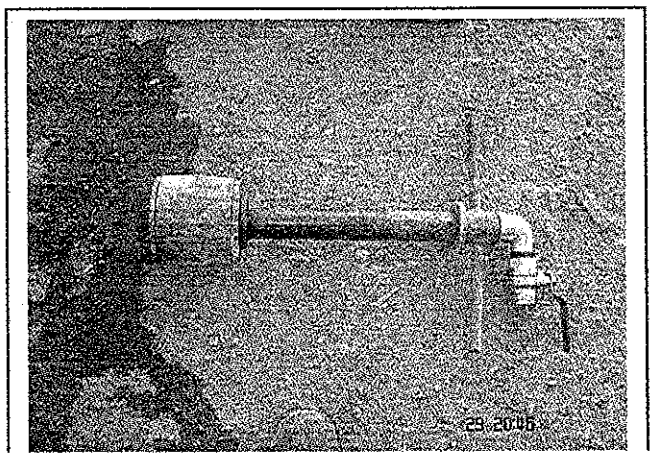
1.7.- Inyección del micropilote

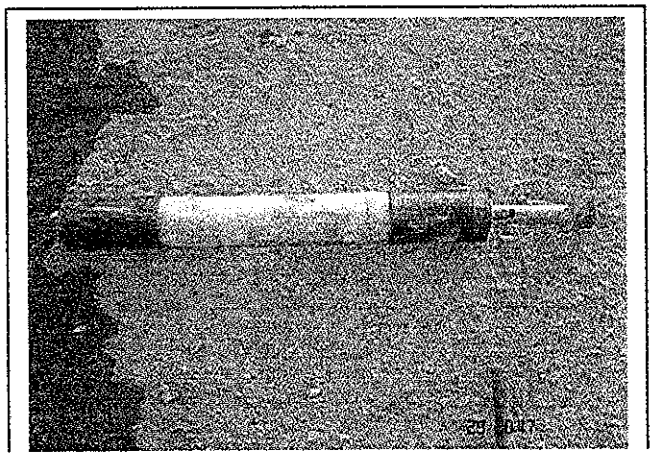
En España es habitual, clasificar los micropilotes por el sistema de inyección con que se realiza el relleno del taladro de perforación, frente a otro tipo de clasificaciones que tengan en cuenta los componentes del micropilote, el tipo de perforación o incluso las características del conjunto de la cimentación, contención o estabilización.

Se clasifican según el tipo de inyección en:

Micropilotes I.U.: Son los ejecutados mediante una **Inyección Global Unificada** del taladro de la perforación, de una lechada o un mortero de cemento.



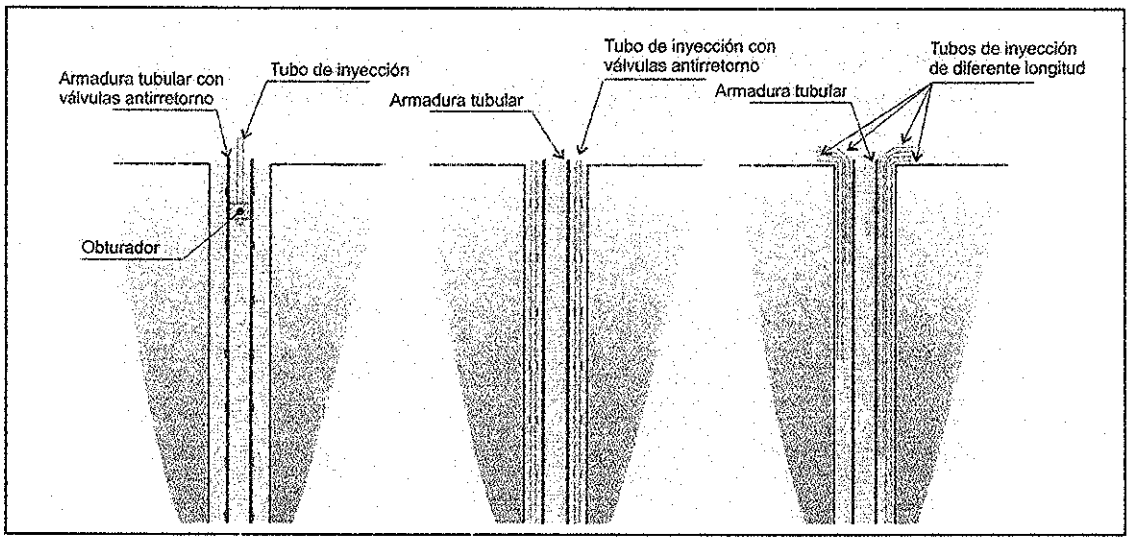




Se realiza la inyección a través de la armadura tubular del micropilote, o a través de un tubo flexible solidario a la armadura, de abajo a arriba del micropilote y a baja presión (menor de 500 KPa).

Micropilotes I.R.: Son los ejecutados mediante una **Inyección Repetitiva** de las válvulas antiretorno existentes en la armadura, inyectadas de forma global mediante obturador en boca.

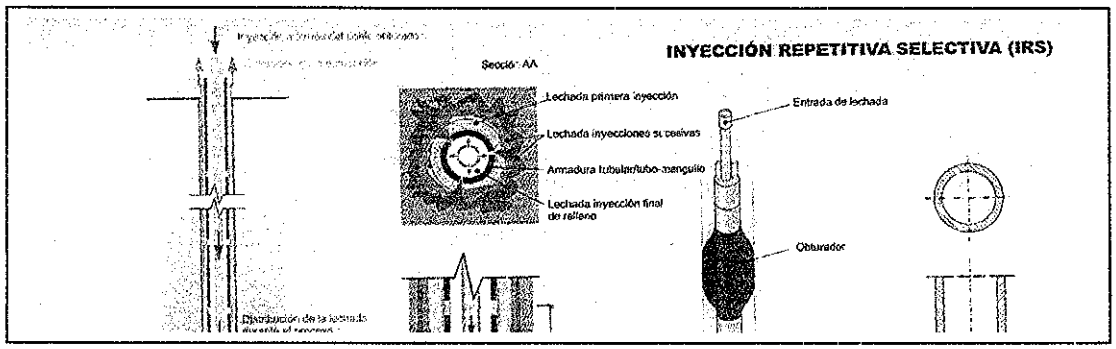
Las válvulas antirretorno pueden estar constituidas por manguitos de caucho (tubos manguito), válvulas insertas o macarrones de inyección a distinta profundidad exteriores al tubo.

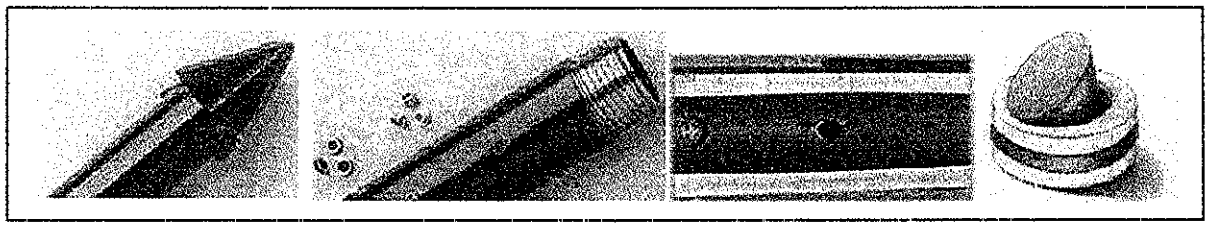


Micropilotes IRS: Son los realizados mediante una **Inyección Repetitiva y Selectiva (IRS)**, del taladro de la perforación.

Se realiza la inyección normalmente a través de manguitos de caucho instalados en la tubería de armadura, separados no más de 1 metro entre sí, con un número de reinyecciones superior a dos, y presiones situadas entre 1 Mpa (10 kg/cm2) y la presión límite del terreno.

La inyección se realiza siempre mediante un obturador doble de fondo.





2.- PANTALLAS DE MICROPILOTES

2.1.- Definición

Una pantalla de micropilotes es un conjunto de elementos lineales verticales e inclinados, perforados en el terreno armados e inyectados, que forman una estructura, cuya misión es contener el terreno existente en el trasdós de la misma.

Las pantallas de micropilotes en emboquille de túneles surgen por la necesidad la contención del talud, cuando por problemas de accesos, de espacio en el lugar de trabajo o

dureza de la roca en la perforación no sea posible realizar otro tipo de contención como podría ser pantalla continua o de pilotes.

Son un sistema rápido, seguro y que compite económicamente en determinadas ocasiones con otro tipo de soluciones.

2.2.- Cálculo

En las **estructuras de contención** de los taludes de la boquilla, y contando con la ayuda habitualmente de anclajes se suelen situar en línea o formando abanico. En estos casos los micropilotes están sometidos fundamentalmente a esfuerzos de flexión (F) y cortante (Q), y según la disposición a veces a esfuerzos de tracción (T).

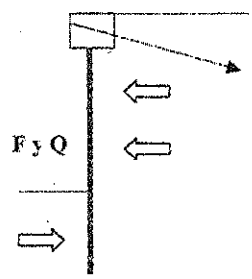


Fig. 3.2.a

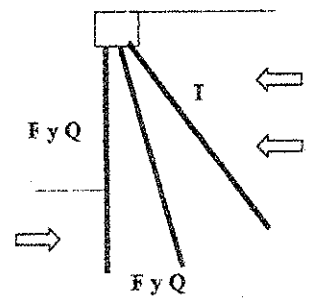


Fig. 3.2.b

Una vez calculada la pantalla con alguno de los métodos o programas habituales y obtenidos los esfuerzos tanto flectores como cortantes, se elegirá la armadura del micropilote para resistir dichos esfuerzos y se distribuirán los anclajes en la pantalla.

- Resistencia Estructural a Flexión:

Teniendo en cuenta las separaciones entre micropilotes, el momento flector de cálculo M_{ED}, en cada sección deberá cumplir la condición:

$$\mathbf{M_{c,Rd} \geq M_{ED}}$$

M_{ED} : Momento flector de cálculo, obetenido a partir de acciones mayoradas.
$M_{c,Rd}$: Resistencia de cálculo de la sección a flexión. Se determinará de acuerdo a la siguiente expresión:

Si $(d_e/t) \leq (16.450/f_y)$ ..... $M_{c,Rd} = W_{pl} * (f_y/1,1) * Fu$
Si $(16.450/f_y) \leq (d_e/t) \leq (21.150/f_y)$ ..... $M_{c,Rd} = W_{el} * (f_y/1,1) * Fu$

d_e : Diámetro exterior nominal de la armadura tubular
t: espesor de la armadura.

f_y: Límite elástico del acero de la armadura tubular.
W_{pl} : Momento plástico de la sección:

$$W_{pl}= (d_e^3 - d_i^3)/6$$

W_{el} : Momento elástico de la sección:

$$W_{el}= \pi * (d_e^4 - d_i^4)/(32*d_e)$$

Fu: Factor que tiene en cuenta el tipo de unión

- ***Resistencia Estructural a Cortante:***

El valor de cálculo del esfuerzo cortante V_{ED}, en cada sección deberá cumplir la condición:

$$V_{ED} \leq V_{c,Rd}$$

V_{ED} : esfuerzo cortante de cálculo, obtenido a partir de acciones mayoradas.
$V_{c,Rd}$: Resistencia de cálculo de la sección a esfuerzo cortante.
Se adoptará $V_{c,Rd}= V_{pl,Rd}$
$V_{pl,Rd}$: Valor de cálculo de la resistencias plástica de la sección a esfuerzo cortante:

$$V_{pl,Rd}= (2*A_{pr}*f_y)/(\pi*raiz(3)*1,1)$$

Siendo A_{pr} : $(\pi/4)*(d_e^2 - d_i^2)$

- ***Resistencia Estructural a esfuerzos combinados:***

En secciones sometidas simultáneamente a esfuerzos de flexión y cortante, la resistencia estructural se reduce.

Si $V_{Ed} \leq 0,5* V_{pl,Rd}$ ..... $M_{v,Rd} = M_{c,Rd}$
Si $V_{Ed} > 0,5* V_{pl,Rd}$ ..... $M_{v,Rd} = (1-\rho)*M_{c,Rd}$

$M_{v,Rd}$: Resistencia de cálculo dela sección a flexión, teniendo en cuenta la interacción del esfuerzo cortante.
ρ : Factor de reducción que se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$\rho : ((2* V_{Ed}/ V_{pl,Rd})-1)^2$$

2.3.- Fases de ejecución

Las diferentes fases constructivas son:

- ***REPLANTEO:***

Comprobación en planta y alzado de la geometría de la pantalla, y preparación de la plataforma de trabajo.

- ***PERFORACIÓN:***

La perforación se realizará con los diámetros y sistemas anteriormente explicados.

- ***INYECCIÓN:***

Una vez realizada la perforación, e introducida la armadura del micropilote, el siguiente paso es proceder a la inyección d el taladro.

En función del tipo de terreno y buscando el efecto arco entre los micropilotes se realizará una inyección IU, IR o IRS para asegurar así una correcta inyección del conjunto de la pantalla.

- ***DESCABEZADO DE LOS MICROPILOTES Y COLOCACIÓN DE CONECTORES:***

Una vez inyectado el micropilote, y tras haber pasado varios días se procede al descabezado del mismo, en el cual se pican unos 30-50 cm de la lechada o mortero.

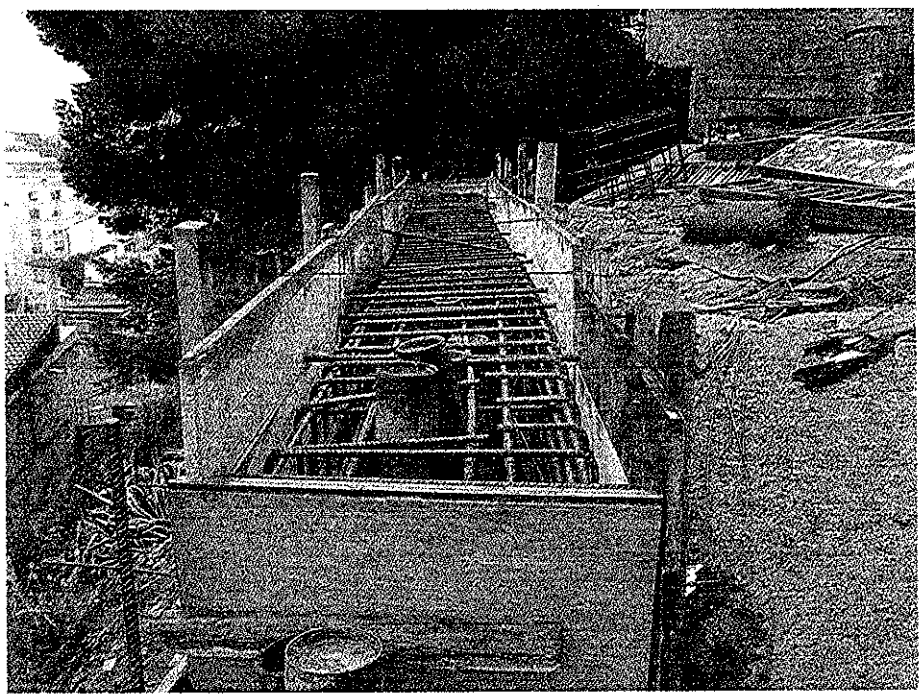
Conectores Para asegurar la adherencia entre los micropilotes y el hormigón de la viga riostra, se necesita dotar de una rugosidad adicional a los micros, mediante una serie de conectores.

Estos conectores entre micropilotes y viga de atado, pueden ser de dos tipos, bien soldando 4 redondos F20 mm, a la armadura tubular del micropilote de aproximadamente 50 cm; o bien dejando embutidos 4 conectores F20 mm de 200 cm, dentro de la lechada del micropilote cuando se procede a su inyección en una longitud de 150 cm, y 50 cm libres, que después se doblan quedando dentro del interior de la viga.

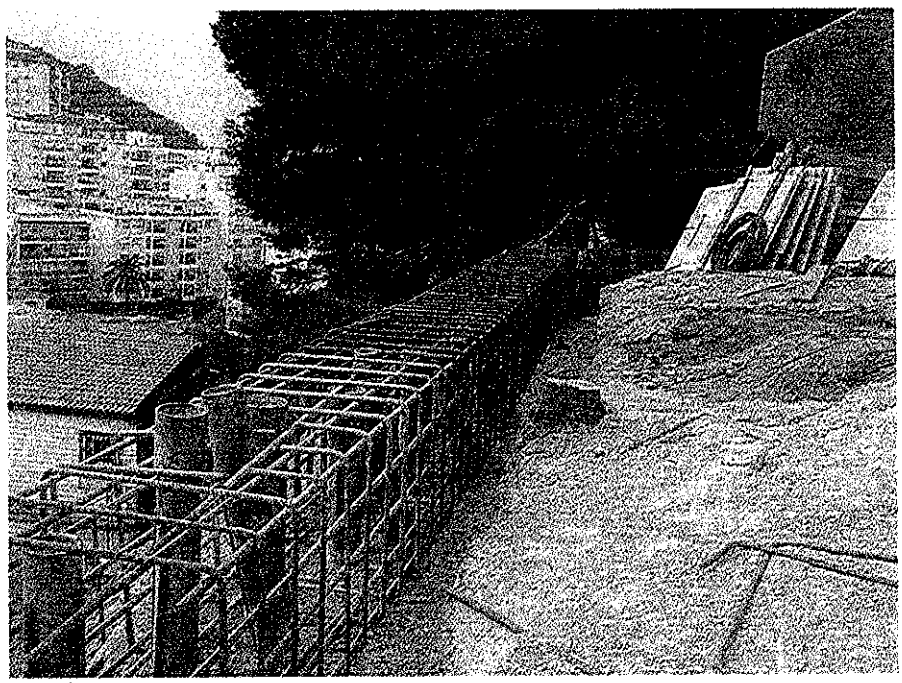
Conectores soldados a la armadura tubular

- ***EJECUCIÓN DE LA VIGA DE ATADO.***

En el caso de pantalla de contención generalmente suele ser una viga horizontal, o adaptada al terreno, con el fin de que los micropilotes trabajen en conjunto y servir de unión entre los micropilotes verticales e inclinados



Viga de atado preparada para su hormigonado.



- ***EXCAVACIÓN HASTA LA PRIMERA FILA DE ANCLAJES***

- ***EJECUCIÓN DE ANCLAJES***

Pueden ser de cables o de barra, en el caso de que sean de barra se asimilan a micropilotes trabajando a tracción.

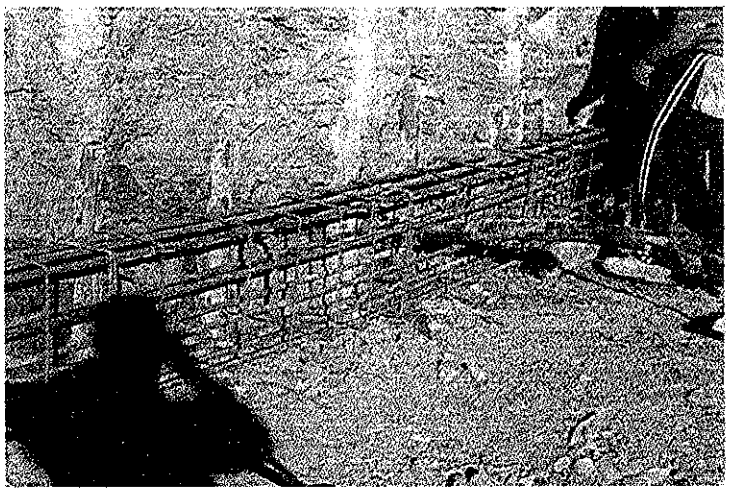
Perforación de la 2ª fila de anclajes en la pantalla.

- ***COLOCACIÓN DE VIGAS DE REPARTO.***

Para distribuir la fuerza de anclaje de una manera uniforme a lo largo de la pantalla, ya que los anclajes introducen cargas puntuales, la fila de anclajes se equipa con una viga de reparto, que puede ser de hormigón armado, o compuesta por perfiles laminados de suficiente inercia.

Antes del tensado de los anclajes, es importante rellenar el trasdós de la viga para homogeneizar la carga y que se transmita a todos los micropilotes.

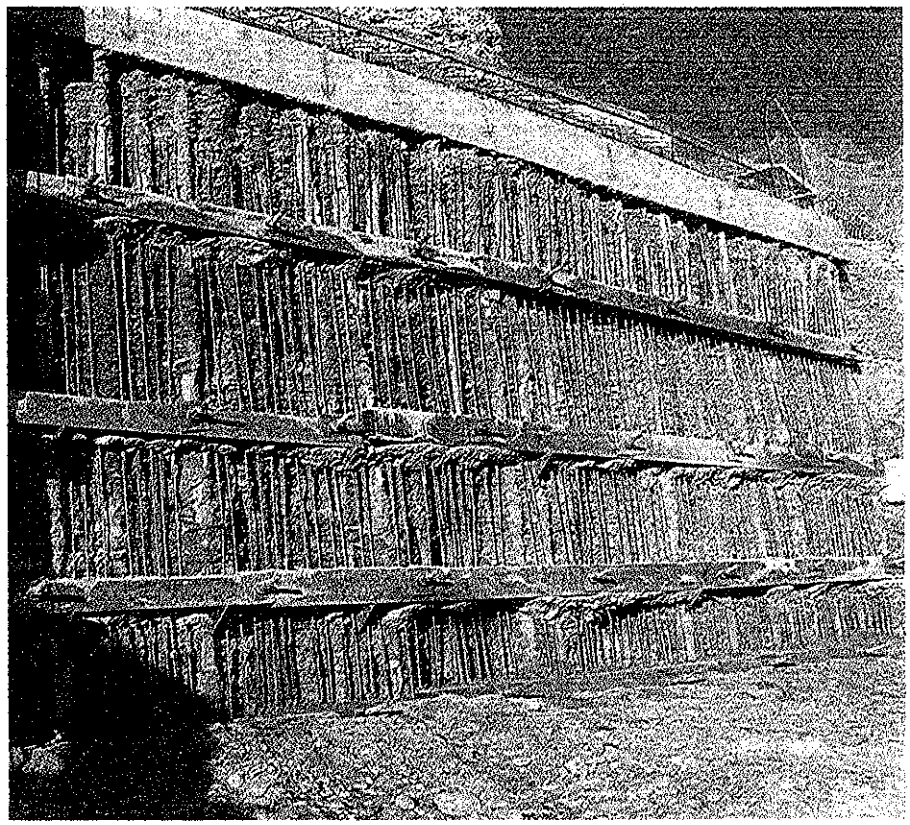
Conectores soldados a los micropilotes para la ejecución de viga de reparto de hormigón.



- ***TENSADO DE LOS ANCLAJES.***

En esta fase, se procede a la puesta en tensión de los diferentes anclajes, de acuerdo con las tensiones de cálculo.

Una vez tensada la fila de anclajes, se continúa excavando hasta la cota de la siguiente fila, repitiendo todo el proceso hasta llegar a la cota final de excavación.



Pantalla de micropilotes, con anclajes de barra y viga 2-UPN soldados por las alas.

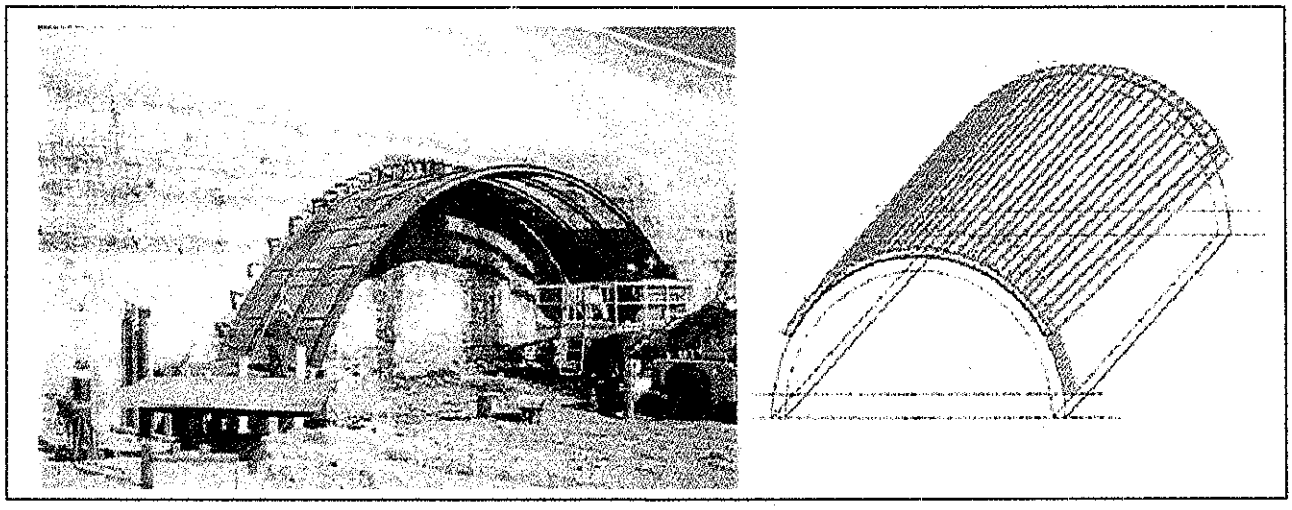
Pantalla de micropilotes gunitada, con anclajes de cable y vigas de reparto de hormigón.

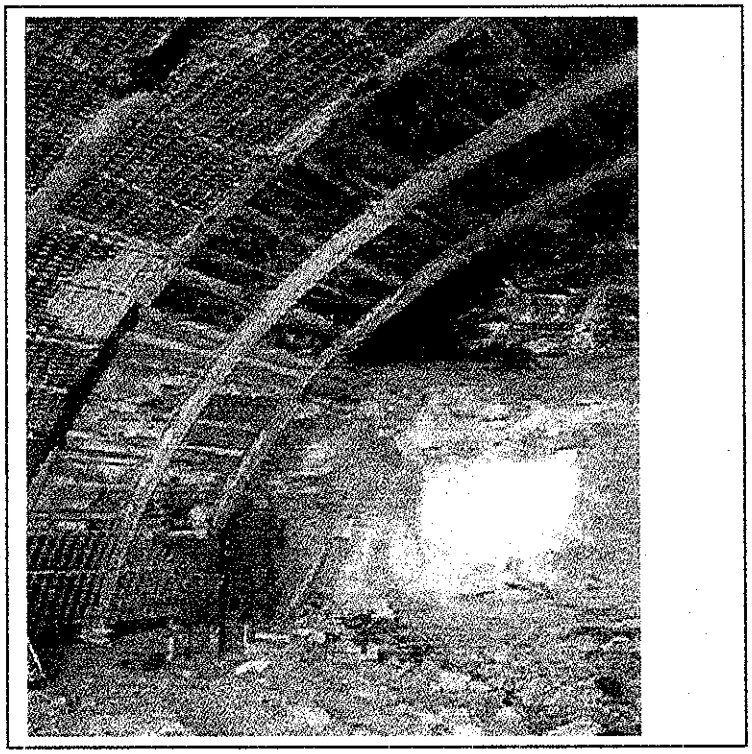
Pantalla de micropilotes anclada para Túnel del Espartal, Línea Ferroviaria de Alta Velocidad Córdoba- Málaga

3.- PARAGUAS DE MICROPILOTES

3.1.- Definición

Un paraguas de micropilotes es un conjunto discreto de elementos lineales subhorizontales perforados en el terreno armados e inyectados, que forman una prebóveda resistente envolvente de la cavidad a excavar, cuya misión es sostener el terreno existente por encima, así como minimizar las deformaciones del mismo para evitar daños en estructuras o infraestructuras viarias existentes durante la excavación.



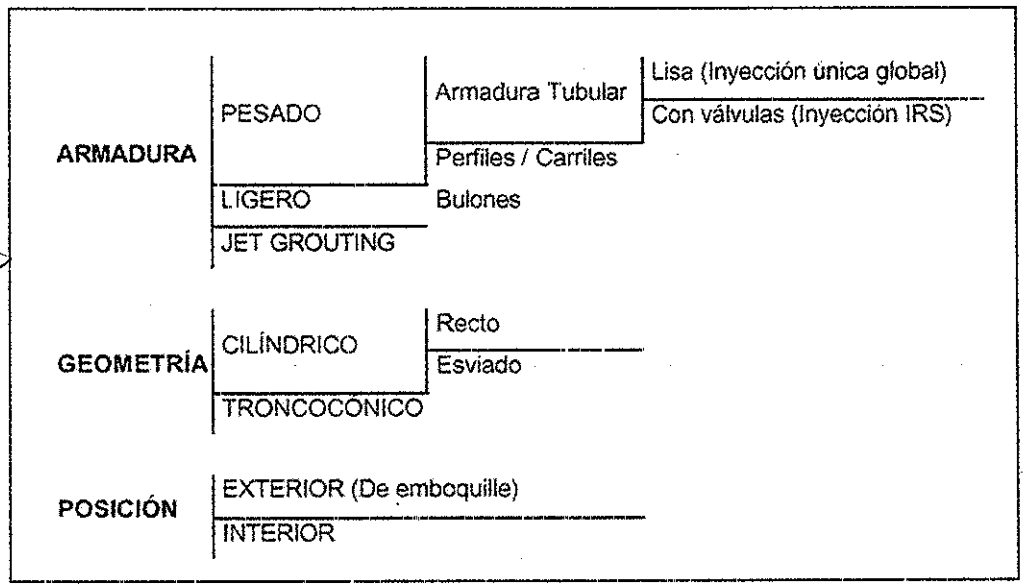


3.2.- Clasificación

Se puede realizar la siguiente clasificación, en función de tres criterios básicos:

- tipo de armadura constituyente
- geometría
- posición.

Se resumen en el cuadro siguiente:



3.3.- Consideraciones generales

Con carácter general conviene tener en cuenta una serie de factores para el diseño de un paraguas de micropilotes:

- No deben coincidir en un plano más del 20% de las uniones.
- La longitud en general no será superior a 25 metros.
- El solape entre micropilotes de dos avances sucesivos será superior a 3 metros.
- La separación entre micropilotes en una misma sección será inferior a 60 cm.

3.4.- Cálculo

El cálculo de los paraguas se puede realizar considerando los micropilotes como vigas sometidas al peso de las tierras que soportan, aplicándoles los principios de resistencia de materiales.

La longitud de cálculo L_d es:

$$L_d = L_a + L_f + 1{,}2 \cdot L_e$$

donde:

L_a : longitud del avance (separación de cerchas)

L_f : longitud del frente de excavación en planta:

$$L_f = H \cdot \text{cotg}\ \alpha$$

L_e : longitud elástica del micropilote considerandolo empotrado en el terreno:

$$L_e = ((3 \cdot Ep \cdot Ip)/ E)^{1/4}$$

$Ep \cdot Ip$: Rigidez a flexión del micropilote que equivale a:

$$Ep \cdot Ip = Ec \cdot Ic + Ea \cdot Ia$$

La carga del terreno sobre cada micropilote será:

$$q = \gamma_a \cdot h \cdot S$$

h varía entre 0,5 D y D, siendo D el diámetro del túnel.

Se obtienen unos valores de cálculo:

$$M_{ed} = q_d \cdot L_d^2 / 10$$

$$V_{ed} = q_d \cdot L_d / 2$$

3.5.- Fases de ejecución

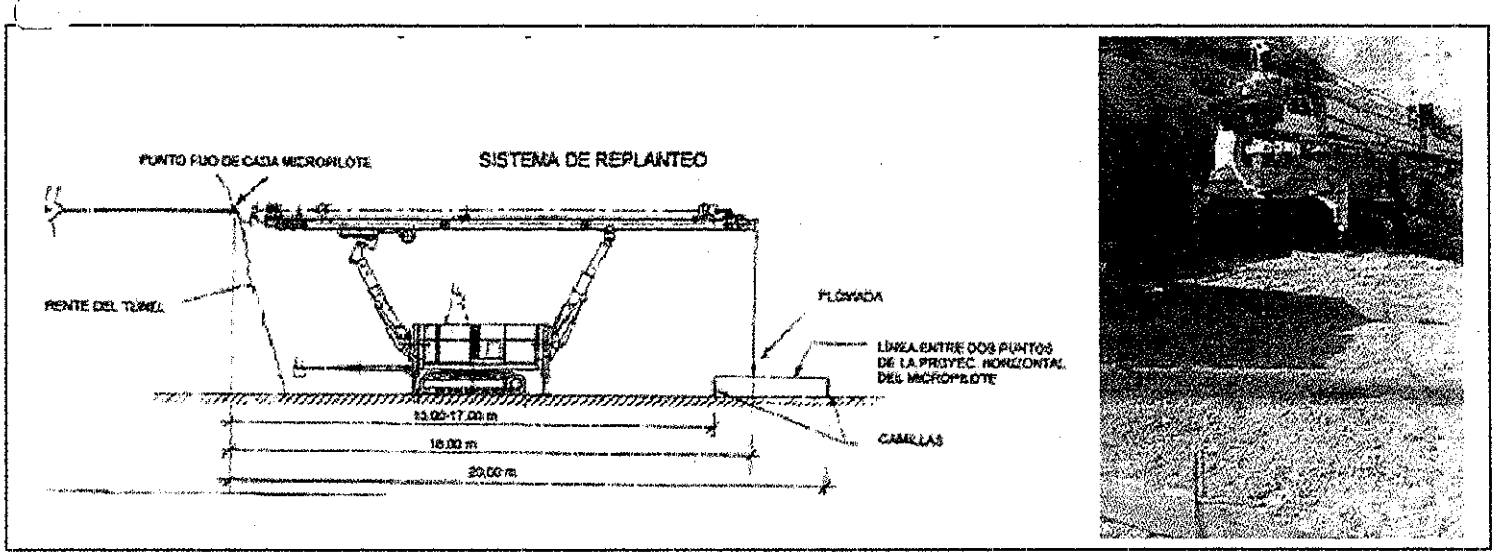
Se distinguen cuatro fases principales: replanteo, perforación, introducción de la armadura e inyección.

Describimos a continuación la fase de replanteo, y después agrupamos perforación-armadura-inyección en función de los tipos de terreno y sus condicionantes.

REPLANTEO

Es una fase fundamental para la buena ejecución del paraguas. De no realizarse correctamente los micropilotes pueden cruzarse en el espacio, terminar dentro de la sección del túnel a excavar o cortarse entre sí debiendo abandonar el micropilote que corta a otro al producirse tal circunstancia. El sistema de replanteo debe ser preciso, fiable y fácil de realizar.

En las siguientes figuras se observa el método a seguir:



Dado que los micropilotes son generatrices de una superficie reglada, se pueden replantear del siguiente modo:

- Se marca un punto fijo en el frente (punto de emboquille de cada micropilote). Con éste punto se consigue fijar un extremo de la perforadora.
- Se marcan dos puntos de la proyección sobre la plataforma de trabajo de la generatriz correspondiente (micropilote). Con ello se fija la perforadora en le plano vertical.
- Se fija la inclinación del mástil de la perforadora (y por tanto del micropilote) mediante un nivel de ángulos.

PERFORACIÓN-ARMADURA-INYECCIÓN

Se sintetizan a continuación los criterios generales seguidos dependiendo del terreno a perforar.

a) En roca competente.

· Perforación: rotopercusión con martillo de fondo.

· Inyección: por el interior de la armadura. Se obtura en boca del taladro, dejándose dos conductos, uno para la inyección y otro de purga y control de llenado.

b) En suelos.

b.1) Suelos con cohesión.

· Perforación: rotación con trialeta.

· Inyección: por el interior de la armadura. Se obtura la boca del taladro, dejándose los conductos, uno para la inyección y otro de purga y control de llenado.

b.2) Suelos con baja o nula cohesión.

Se trata de terrenos arenosos; zonas de rellenos, vertederos, etc... en los que se pueden producir desprendimientos entre micropilotes adyacentes al excavar el túnel al abrigo de los mismos. En estos casos se realizan paraguas con armadura equipada con válvulas para inyección IRS, con el fin de solapar la inyección de los micropilotes formando una superficie resistente más contínua. Se distinguen básicamente dos formas de realizar el proceso descrito.

- Armaduras con manguitos de caucho (tubo-manguito)
  - Perforación: rotación con trialeta y tubería de revestimiento recuperable.
  - Inyección: mediante obturador simple o doble seleccionando cada válvula.

- Armaduras con válvulas insertas
  - Perforación: rotación con trialeta no recuperable dispuesta sobre la propia armadura, actuando ésta como varillaje de perforación, sin tubería de revestimiento.
  - Inyección: mediante obturador simple o doble seleccionando cada válvula

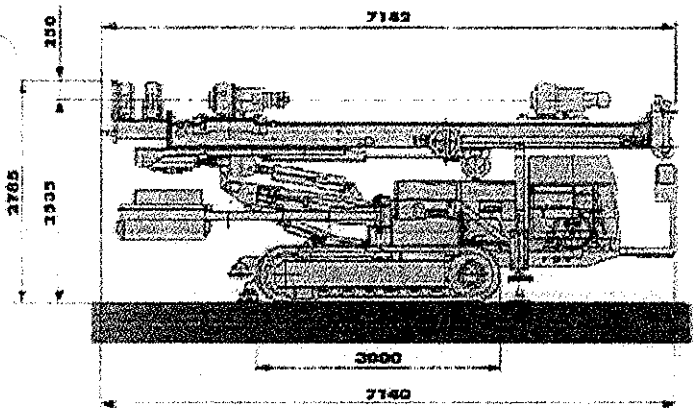
b.3) En roca muy meteorizada y disgregada.

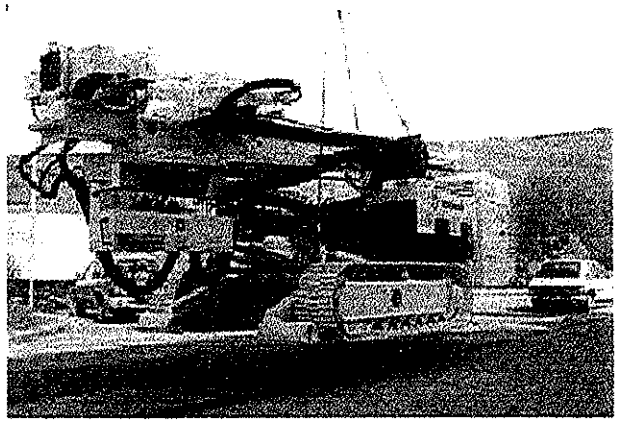
También en éste caso se puede utilizar armadura equipada con válvulas insertas, pero el método de ejecución es distinto en lo que se refiere a la perforación.

- Perforación: rotación con trialeta si el terreno lo permite o rotopercusión con martillo de fondo. En éste caso no es viable desde el punto de vista económico utilizar la armadura como varillaje de perforación, con martillo de fondo perdido. Por ello, se equipa la armadura con corona de corte no recuperable y constituye la tubería de revestimiento durante la perforación, empleándose varillaje convencional de perforación a rotopercusión con martillo de fondo por el interior.
- Inyección: finalizada la perforación, se retira el varillaje interior con el martillo y se procede a inyectar a través de las válvulas.

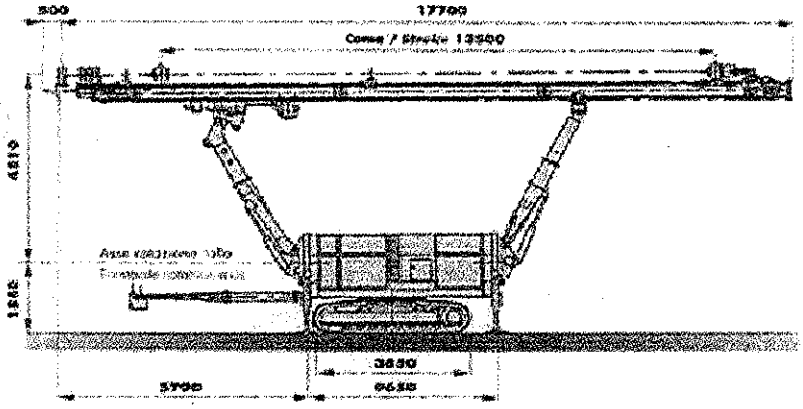
3.6.- Exigencias de los paraguas de micropilotes. Equipos.

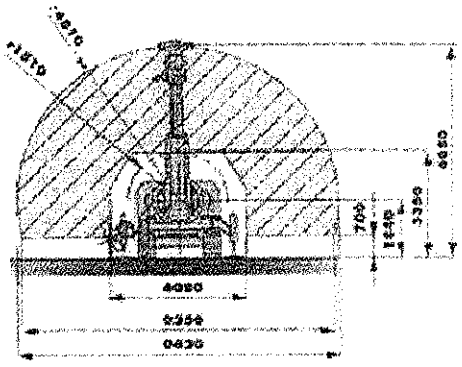
A continuación se describen los condicionantes más importantes para ejecutar paraguas de micropilotes contrastando las diferencias entre el empleo de equipos convencionales de perforación (ECP) y equipos específicos de perforación subhorizontal (EEPS).

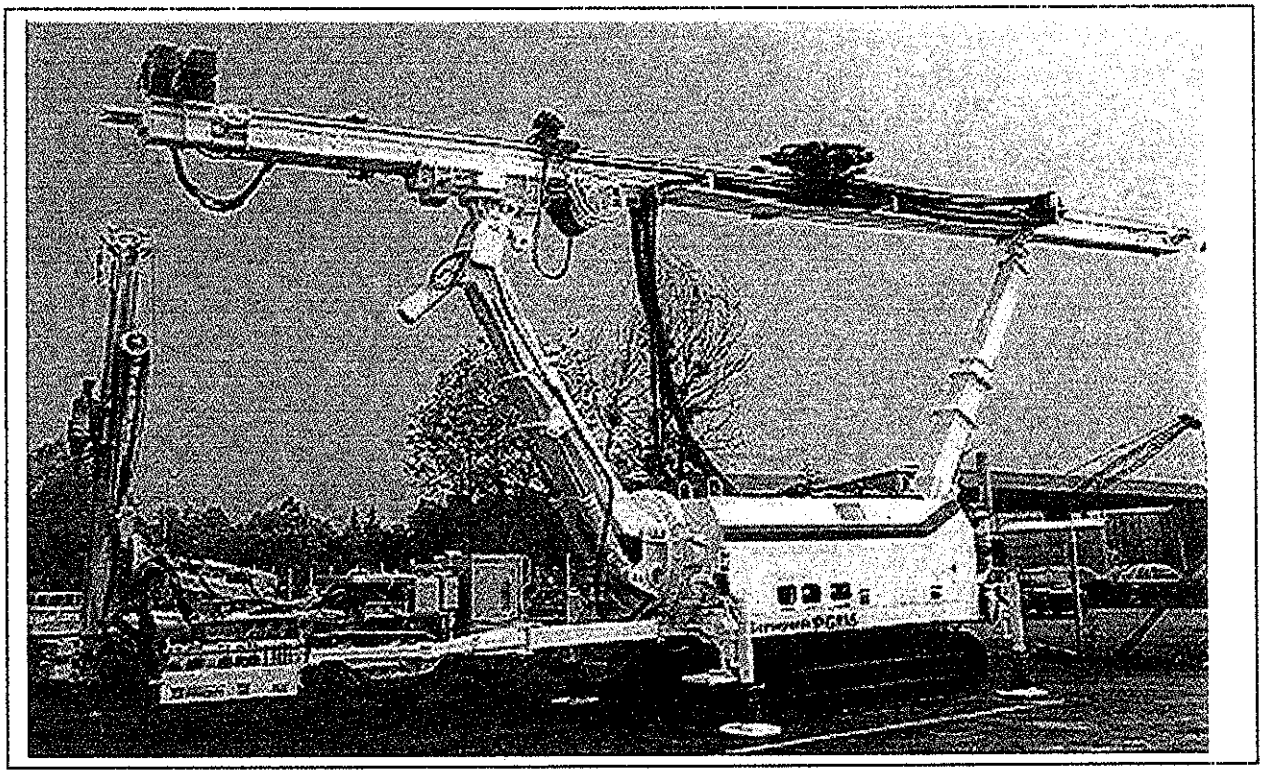




ECP







3.6.1.- Replanteo

ECP necesita varios replanteos, tantos como rebajes de excavación para la ejecución completa del paraguas.

EEPS necesita un único replanteo para la ejecución completa del paraguas.

3.6.2.- Precisión

Estabilidad de la perforadora.

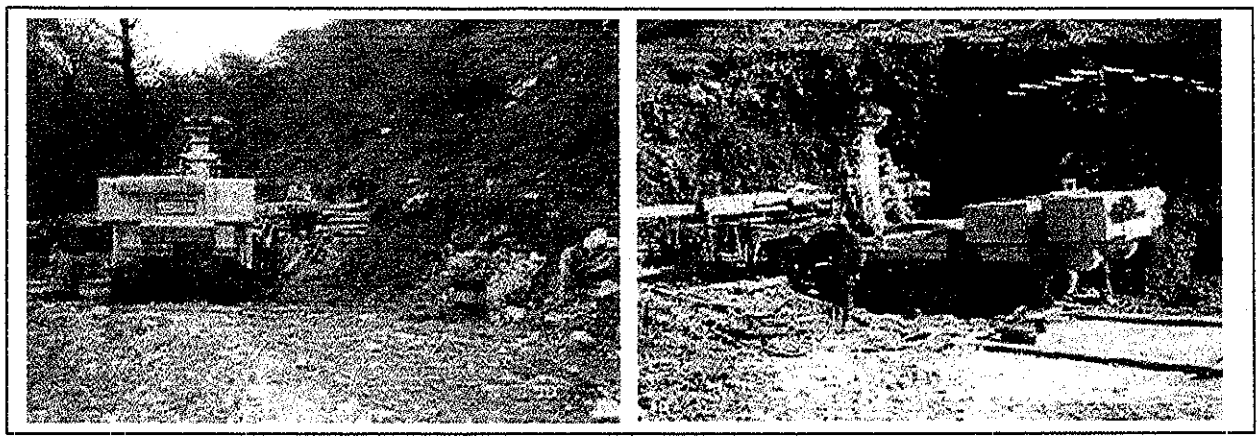
ECP	EEPS
- Un solo apoyo del mástil. Susceptible de balanceo durante la perforación. - Peso ≈ 12.000 kg. Según modelos. - Distancia entre gatos de apoyo: Long ≈ 3,20 – 4,30 m. Transv. ≈ 1,60 m.	- Mástil con dos apoyos. - Peso ≈ 33.000 kg. - Distancia entre gatos de apoyo: Long ≈ 4,60 m. Transv. ≈ 3,50 – 4,00 m.

Varillajes de perforación.
ECP utiliza varillas de 2 – 3 m.
EEPS utiliza varillas de 11 m, reduciendo el número de uniones y por tanto disminuyendo el riesgo de cabeceo de la perforación y el riesgo de terminar la perforación dentro de la sección del túnel.

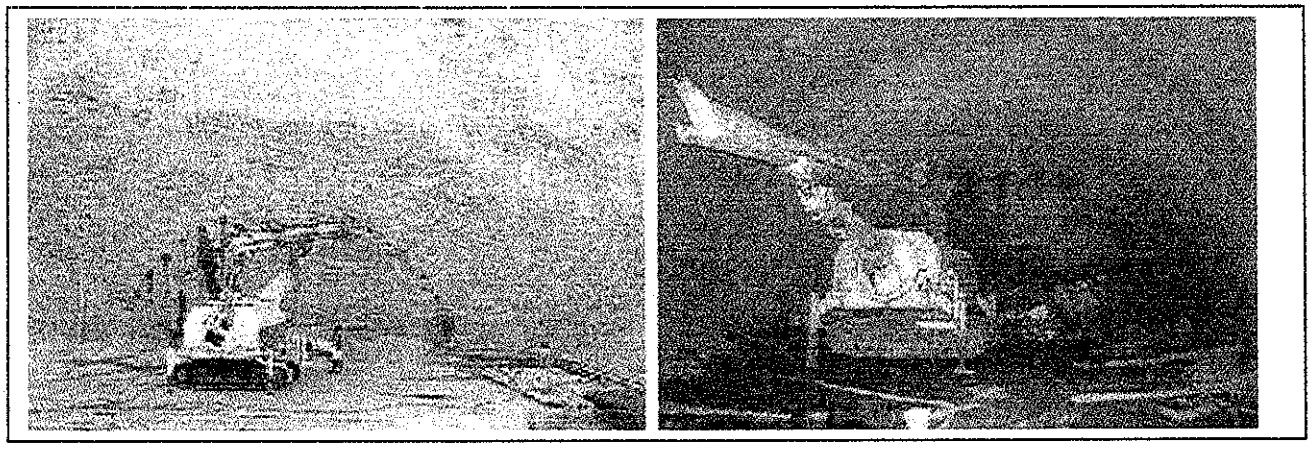
Replanteo
ECP tiene un mástil de ≈ 7m según modelos.
EEPS tiene un mástil de 18 m.
Tal diferencia de longitud impone la misma diferencia en la distancia al frente del replanteo trasero de la perforadora. Un error de la misma cuantía de un operario en la fijación trasera de la máquina en planta (colocación de la plomada) respecto al punto teórico, suponiendo correctamente colocado el punto de emboquille, supone una desviación del taladro 2,57 veces mayor en los equipos ECP frente a los EEPS.

3.6.3.-Rapidez

Alcances.
ECP alcanza una altura aproximada de 2,5 m. Ejecuta el paraguas en tres ciclos de excavación – perforación con las consiguientes interferencias de los equipos de una y otra labor. No resulta útil en paraguas interiores por el tiempo de paralización que impone a los equipos de excavación de túnel.



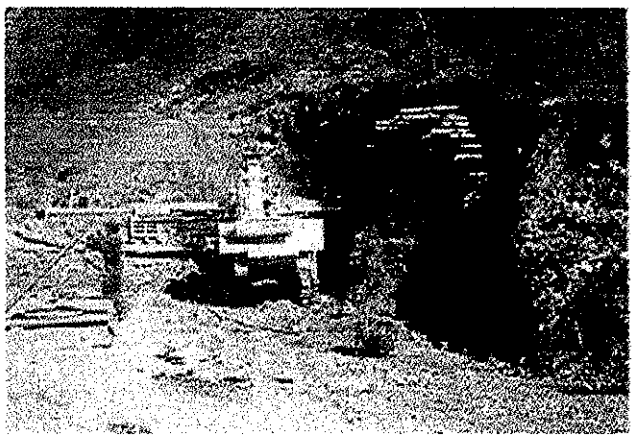
EEPS alcanza una altura superior a 6,5 m. Ejecuta el paraguas en una sola fase. Produce mínima interferencia con los equipos de excavación de túnel. Ante hundimientos de túneles en ejecución se ha simultaneado la perforación por una boca con la excavación por la otra superando los rendimientos de los equipos de excavación en paraguas de 15 m. con solape de 3m, o en infraestructuras con túneles dobles alternándose en uno y otro.

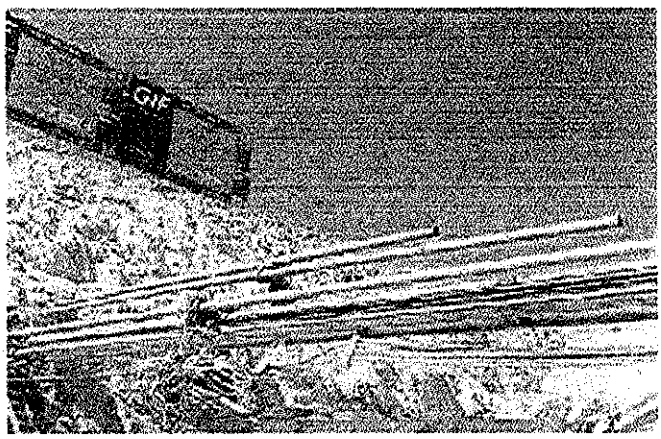


Cambios de varillaje

ECP, por utilizar varillas de 2-3 m, necesita de 5 a 8 varillas para perforar longitudes unitarias de paraguas de 15 m, y los mismos cambios de varilla tanto al perforar como al extraer.

EEPS utiliza varillas de hasta 11 m. El recorrido útil de la cabeza de rotación es de 13 m. Puede realizar paraguas de 12-13 m, sin realizar cambio alguno de varillaje. Admite hasta 32 m de varillas cargadas simultáneamente pudiendo perforar de esa longitud con sólo dos cambios automáticos de varilla por micropilote.





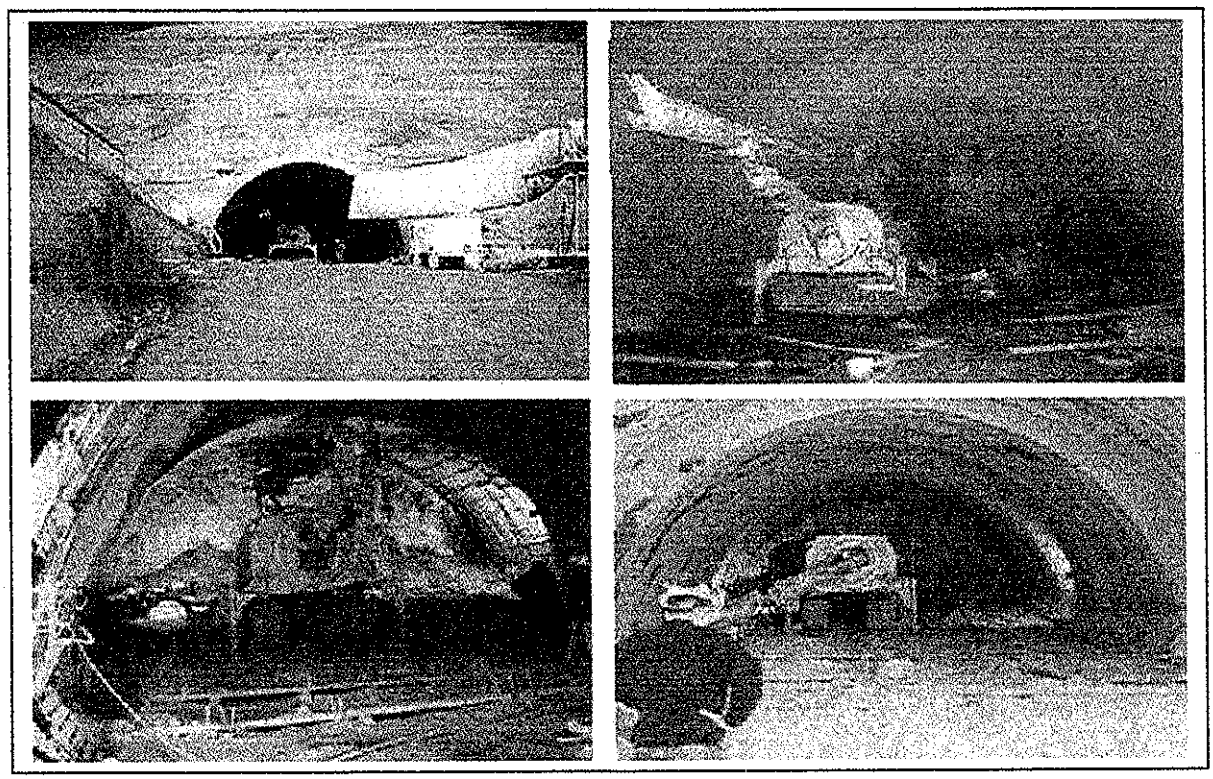
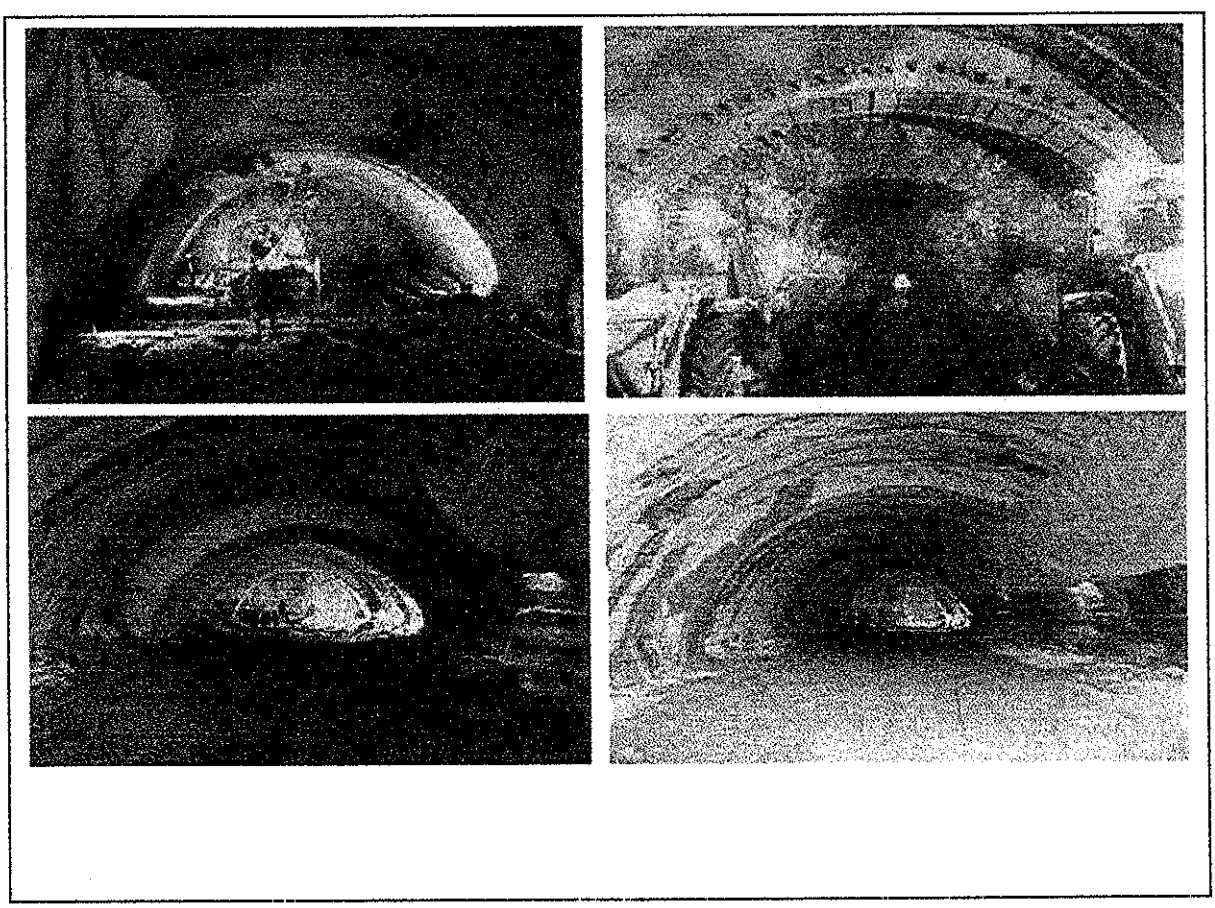
Continuidad de armaduras

ECP puede introducir tramos de armadura de hasta 4 m. utilizando el mástil. Por tanto, no puede utilizar armaduras sin manipulación.

EEPS tiene un mástil de 18 m., pudiendo introducir armaduras en su longitud original, aprovechando sus cualidades, y minimizando el número de uniones por micropilote, y con ello la probabilidad de coincidencia de uniones de micropilotes distintos en una misma sección transversal de túnel.

Seguridad.

ECP requiere manipulación manual de varillas de perforación y de armaduras, así como empleo de medios auxiliares (andamios, etc...) para su colocación sin variar el replanteo de la perforadora.

EEPS introduce la armadura de modo automático. Se coloca desde la plataforma de trabajo en los cargadores y la máquina eleva, carga e introduce la armadura en la perforación. Debe observarse que la utilización de armaduras en su longitud original supone manipular unidades de armadura de entre 125 y 250 kg. En las armaduras comúnmente utilizadas en paraguas (de 13 a 26 kg/ml). Para evitar cualquier manipulación de cargas por parte de los operarios a favor de su seguridad, resulta conveniente el empleo auxiliar de camión grúa para colocación de armaduras en el mástil. En unas 5 horas se introduce la armadura correspondiente a 4 jornadas de perforación (400 – 500 m).

3.7.- PARAGUAS DE MICROPILOTES INTERIORES