

Auscultación y corrección de inestabilidad de taludes de carreteras y ferrocarriles

Madrid, 10 de junio de 2010

Anclajes y bulonajes

Tomás Murillo
Uriel y Asociados, S.A.

Luis Ortuño
Uriel y Asociados, S.A.
Profesor Asociado ETSICCP; UPM

ÍNDICE

Pag.

1.- INTRODUCCIÓN. DEFINICIÓN Y PARTES DE UN ANCLAJE	1
2.- PROCESO DE EJECUCIÓN.....	3
3.- APLICACIONES.....	4
4.- TIPOS DE ANCLAJE	8
4.1.- SEGÚN LA ARMADURA O TIRANTE	8
4.1.1.- Anclajes de barra.	8
4.1.2.- Anclajes de cable.	11
4.1.3.- Otros tipos de tirantes	16
4.2.- SEGÚN SU VIDA ÚTIL.....	21
4.3.- SEGÚN SU PUESTA EN CARGA.....	24
4.4.- SEGÚN EL PROCEDIMIENTO DE FORMACIÓN DEL BULBO	24
4.5.- SEGÚN LA CAPACIDAD DE MODIFICAR LA CARGA ACTUANTE	25
5.- ASPECTOS PRÁCTICOS SOBRE LA EJECUCIÓN	27
5.1.- FABRICACIÓN DEL ANCLAJE (MONTAJE DE TIRANTE Y ACCESORIOS).....	28
5.2.- PERFORACIÓN.....	29
5.3.- INTRODUCCIÓN DEL TIRANTE.....	31
5.4.- INYECCIÓN.....	31
5.4.1.- Inyección IU.....	32
5.4.2.- Inyección IR.....	33
5.4.3.- Inyección IRS	34

5.4.4.- Preparación de la lechada.....	40
5.5.- COLOCACIÓN DE CABEZA Y TESADO	40
5.6.- ACABADOS	43
6.- DISEÑO DE ANCLAJES	44
6.1.- INCLINACIÓN Y SEPARACIÓN ENTRE ANCLAJES. ESTRUCTURAS DE REPARTO.	45
6.1.1.- Inclinación	45
6.1.2.- Separación	46
6.1.3.- Estructuras de reparto.....	47
6.2.- MATERIAL Y SECCIÓN DEL TIRANTE	48
6.3.- TIPO DE ANCLAJE	51
6.3.1.- Elección de tirante: barra o cables	51
6.3.2.- Elección del sistema de inyección.....	52
6.4.- LONGITUD Y DIÁMETRO DEL BULBO.....	53
6.4.1.- Procedimiento habitual de cálculo.....	53
6.4.2.- Adherencia admisible en el contacto lechada terreno.....	54
6.4.3.- Valores máximos y mínimos de la longitud de bulbo	62
6.4.4.- Comportamiento de los bulbos de anclaje	63
6.5.- LONGITUD LIBRE	68
6.6.- CARGA DE BLOQUEO	69
7.- PRUEBAS DE CARGA	69
7.1.- INTRODUCCIÓN.....	69
7.2.- TIPOS DE PRUEBAS	70

7.3.- ENSAYOS Y CRITERIOS DE ACEPTACIÓN	71
7.4.- EQUIPO NECESARIO. REQUISITOS.....	75
8.- DURABILIDAD. CORROSIÓN	79
8.1.- INTRODUCCIÓN.....	79
8.2.- CONCEPTOS PREVIOS	80
8.2.1.- Tipos de corrosión.....	80
8.2.2.- Agresividad del terreno	80
8.3.- INFORME DE LA FEDÉRATION INTERNACIONALE DE LA PRÉCONTRAINTE (FIP).....	81
8.4.- CONCLUSIONES SOBRE LA PROTECCIÓN FRENTE A LA CORROSIÓN.....	83
9.- NORMATIVA APLICABLE	84
10.- BIBLIOGRAFÍA.	85

ANCLAJES AL TERRENO

1.- INTRODUCCIÓN. DEFINICIÓN Y PARTES DE UN ANCLAJE

Los anclajes al terreno son dispositivos muy empleados y conocidos en la construcción. De hecho, existe una gran variedad de ellos dependiendo de los materiales empleados para su fabricación y puesta en obra, de su forma de instalación o, incluso, de su forma de trabajo.

Desde un punto de vista funcional la norma europea y española (UNE-EN 1537:2001. Ejecución de trabajos especiales. Anclajes) define un anclaje al terreno como un *“dispositivo capaz de transmitir las fuerzas de tracción que le son aplicadas, a un lecho de terreno resistente”*.

Desde un punto de vista material, un anclaje consiste en un elemento longitudinal (tirante) diseñado para funcionar a tracción, generalmente una armadura de acero, ya sea una barra o un conjunto de cables. Dicho elemento se introduce en el terreno a través de una perforación de pequeño diámetro (varios centímetros), y mediante algún sistema se deja fijado (anclado), tanto al interior del terreno como a la estructura o superficie exterior entre los que se quiere transmitir una carga de tracción.

La zona donde el tirante se fija o sella al terreno se denomina longitud de bulbo, longitud de anclaje, longitud adherente o simplemente bulbo. El elemento que sirve para fijarlo a la estructura o superficie exterior se denomina cabeza. Entre ambos puede disponerse de una determinada longitud de tirante sin fijar, y que por tanto puede elongarse libremente por la tracción recibida. Esta zona se denomina longitud libre.

En la figura 1 se representa el esquema básico de un anclaje. En este caso particular el tirante estaría formado por una simple barra de acero. La fijación exterior se ha supuesto referida a una pantalla como elemento de reparto (dependiendo de las circunstancias puede ser un simple dado de hormigón, una viga, una placa, etc), sobre la que se dispone la cabeza de anclaje. La fijación en el interior del terreno se ha supuesto ejecutada por medio de una lechada de cemento inyectada en una zona suficientemente alejada de la excavación, y por lo tanto estable.

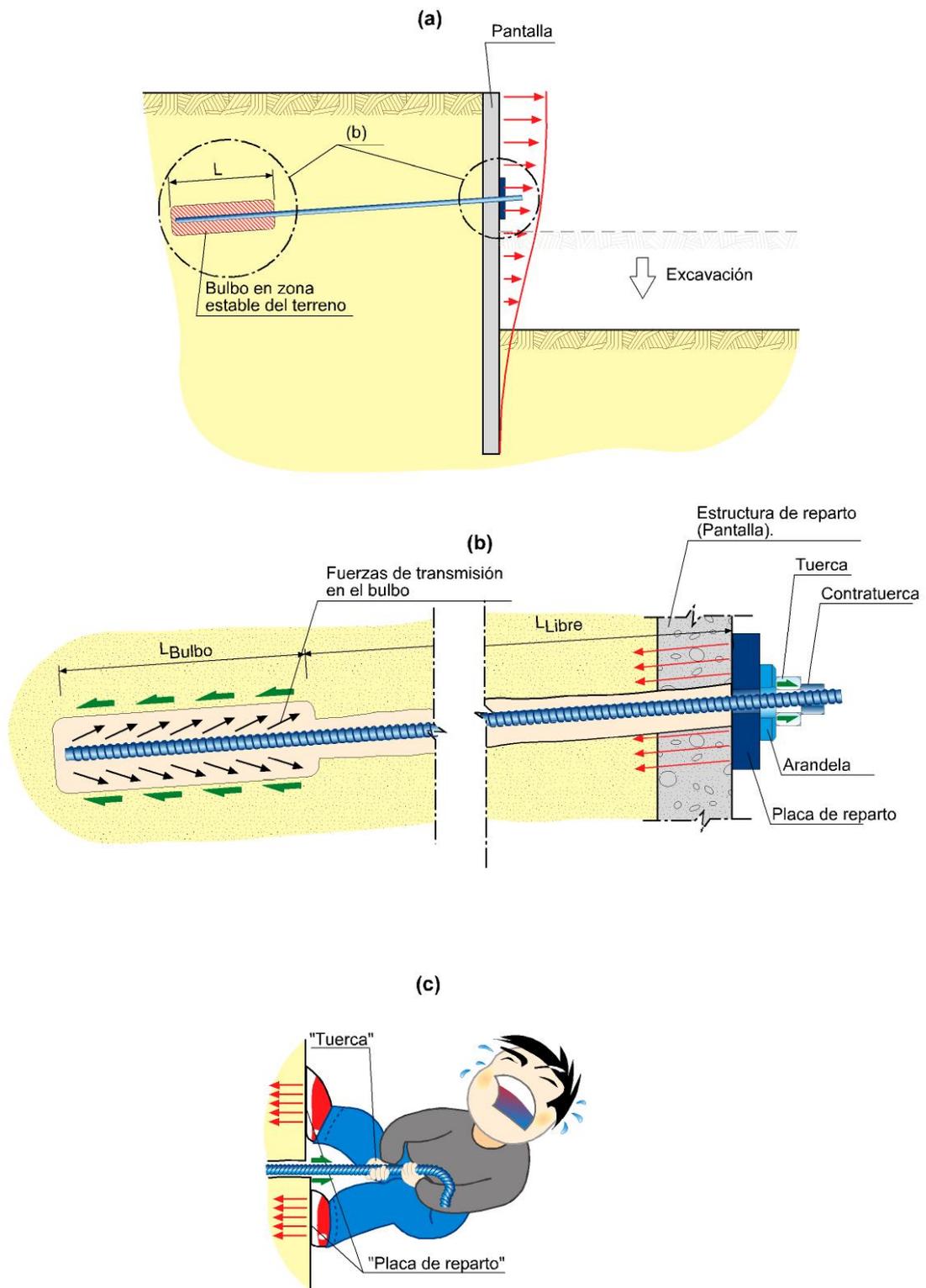


Figura 1: Esquema básico de un anclaje de barra.

Una posible forma de trabajo para el anclaje representado podría ser la siguiente:

Por efecto de la excavación, el terreno empujaría a la pantalla, que tendería a moverse hacia el exterior llevándose lógicamente consigo la cabeza del anclaje. El tirante de anclaje, al estar fijado a una zona alejada y estable (sin movimiento) del terreno, se opondría al movimiento entrando en carga, esto es, traccionándose. Dicha tracción se transmitiría a la cabeza de anclaje y a su placa de reparto, que sujetarían el tirante ejerciendo en definitiva una compresión estabilizadora sobre la pantalla.

Esta forma de trabajo correspondería a un anclaje de tipo **pasivo**, que como se ha descrito entra en carga a medida que se producen deformaciones en el terreno.

Otra forma posible de trabajo, en general más interesante, consistiría en que el anclaje transmitiera una carga estabilizadora a la estructura de reparto (pantalla) antes incluso de que ésta tienda a moverse bajo el empuje del terreno, esto es, como acción “directa”, y no sólo como una “reacción”. Esto se consigue poniendo en carga o tesando el anclaje tras su ejecución mediante un gato hidráulico, fijándolo posteriormente a la cabeza y a la pantalla. En estas circunstancias, desde el mismo instante en que se produce el tesado se puede transmitir una carga estabilizadora a la pantalla.

Esta forma de trabajo corresponde a la de un anclaje **activo**.

2.- PROCESO DE EJECUCIÓN

La ejecución de un anclaje consta en principio de varias fases, reproducidas esquemáticamente en la figura 2 (se ha exagerado el diámetro de la perforación para mayor claridad).

- fabricación del anclaje,
- perforación del taladro,
- introducción del anclaje,
- inyección del taladro para fijar el anclaje al terreno, y
- colocación de la cabeza, tesado si procede, y conexión a la estructura de reparto.

Las diversas variables implicadas en todo el proceso, especialmente las relativas a los

sistemas de perforación e inyección, de gran influencia en el resultado y comportamiento final del anclaje, hacen que éste sea difícil de tipificar.

De hecho, estas singularidades específicas dan lugar a que, en la práctica, la ejecución de anclajes pueda ser un aspecto poco conocido por los técnicos que intervienen en el proyecto de un sistema anclado. Por ello frecuentemente se confía en una empresa especializada en la ejecución de este tipo de elementos que, en función de su experiencia y medios, suele proponer el sistema a seguir.

Esta forma de proceder puede ser razonable, pero es preciso resaltar que el buen funcionamiento de un anclaje, sobre todo en lo que respecta al bulbo y su fijación (su capacidad de resistir), depende enormemente de los procedimientos de perforación e inyección. Esto puede dar lugar a que una buena parte del éxito del proyecto dependa de la experiencia y buen hacer de uno de los subcontratistas, quizás no elegido por el autor del proyecto.

Habida cuenta de la relevancia de estas observaciones, en un apartado posterior se ahondará algo más en algunos aspectos relativos a la ejecución que pueden resultar de interés.

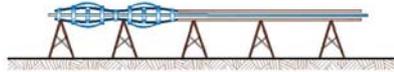
3.- APLICACIONES

Las aplicaciones de los anclajes son numerosas, y suelen agruparse tradicionalmente en cuatro categorías:

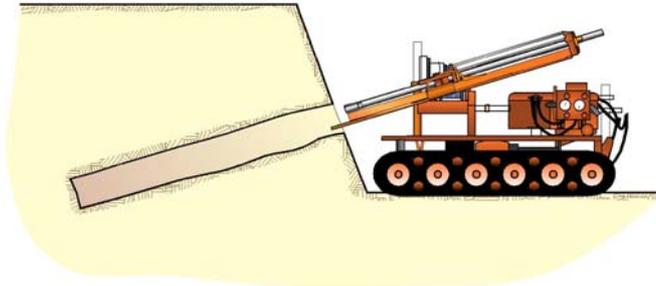
- Estabilización de taludes
- Arriostramiento de estructuras de contención
- Absorción de esfuerzos en cimentaciones
- Refuerzo de estructuras

Ejemplos de estas aplicaciones se muestran de forma esquemática en las figuras 3 a 6, tomadas de la bibliografía más habitual.

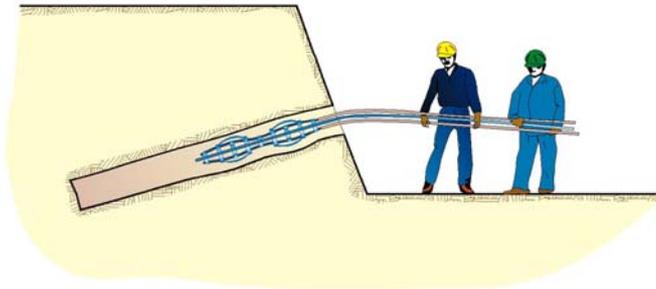
1. FABRICACIÓN DEL ANCLAJE



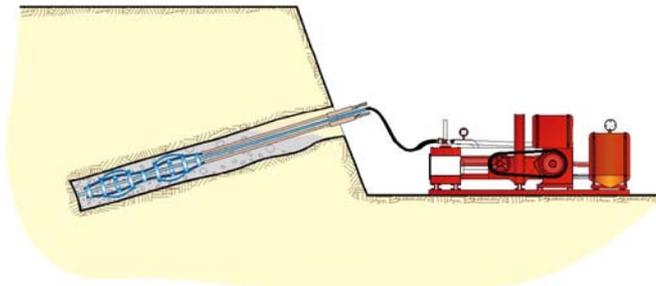
2. PERFORACIÓN



3. COLOCACION DEL ANCLAJE



4. INYECCIÓN



5. COLOCACIÓN DE CABEZA Y TESADO

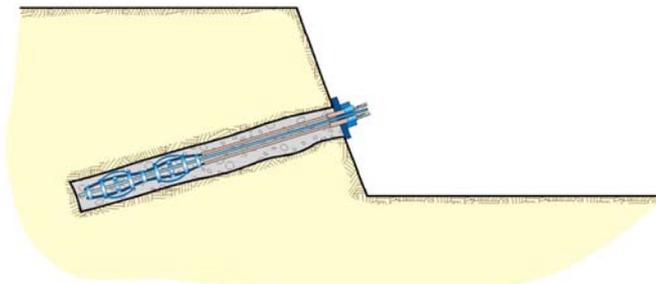


Figura 2: Proceso esquemático de ejecución de un anclaje

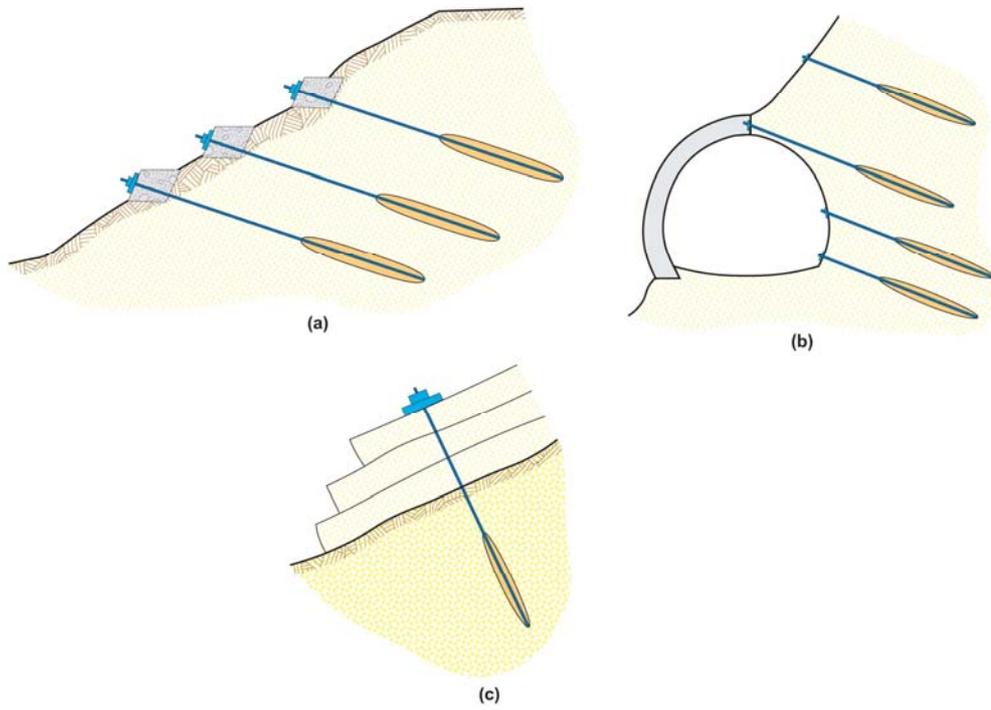


Figura 3: Estabilización de taludes

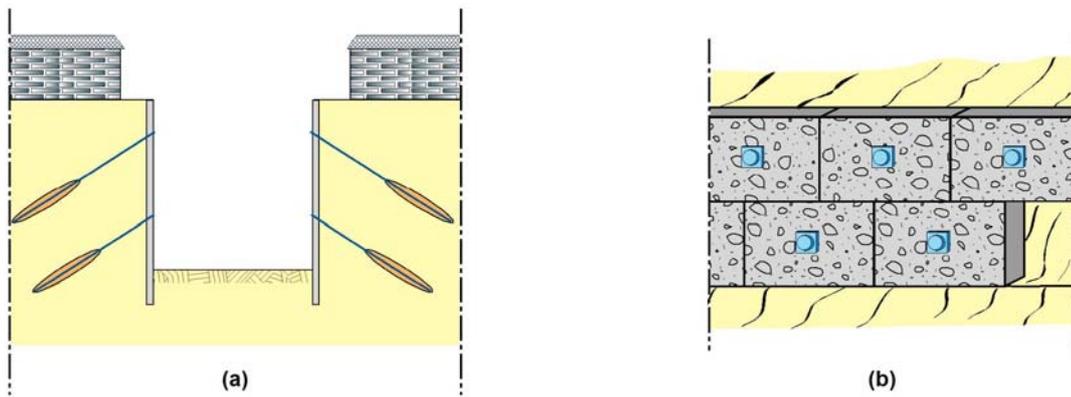


Figura 4: Arriostamiento de estructuras de contención

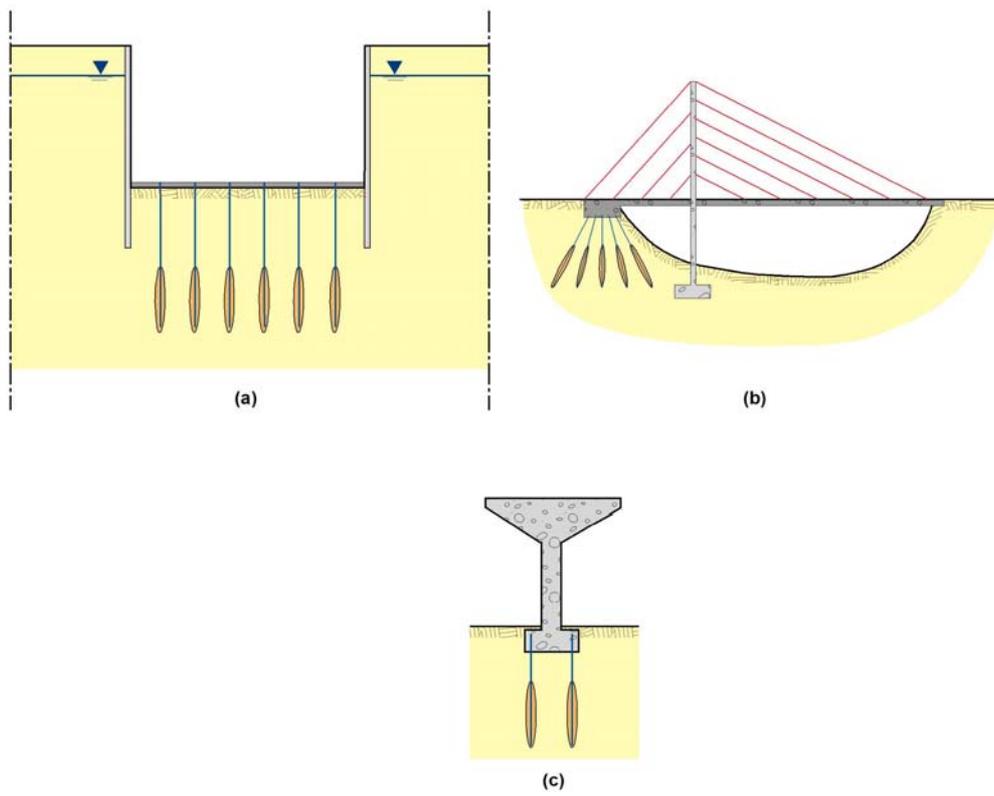


Figura 5: Absorción de esfuerzos en cimentaciones

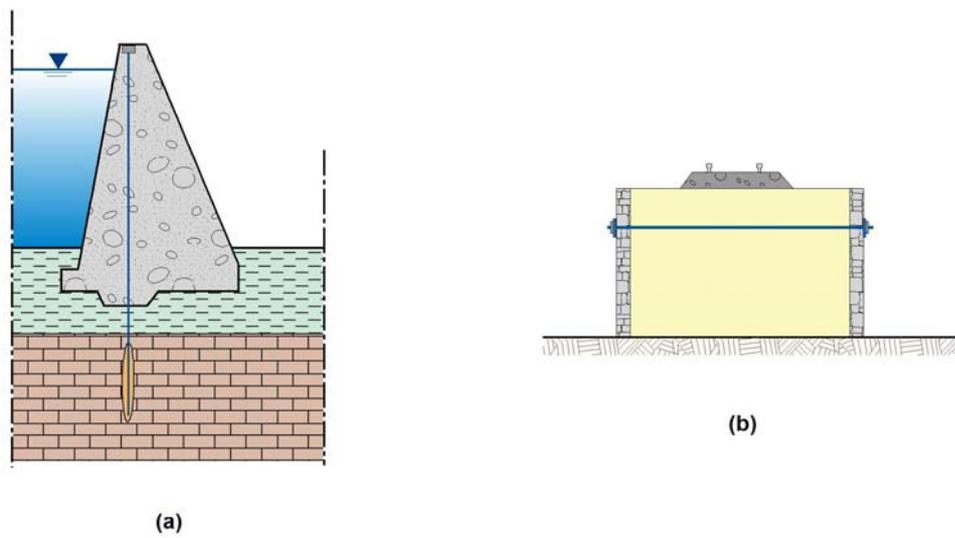


Figura 6: Refuerzo de estructuras

4.- TIPOS DE ANCLAJE

Como se ha indicado en la introducción, existen muchos tipos de anclajes al terreno. A continuación se muestran algunos, quizás los principales, atendiendo a diversos criterios de clasificación.

4.1.- Según la armadura o tirante

La armadura o tirante es el elemento longitudinal que se tracciona y que constituye principalmente el anclaje.

La gran mayoría de los tirantes consisten, bien en una barra, bien en un conjunto de cables, ambos de acero. Por este motivo, en muchas ocasiones cuando se habla de anclajes se sobreentiende que se trata de anclajes de barra o anclajes de cable (o de cordones) de acero, pero existen otros tipos armadura.

A los anclajes de barra también se les denomina bulones.

4.1.1.- Anclajes de barra.

El esquema básico de un bulón con tirante de barra de acero se muestra en la figura 7¹, en la que pueden observarse las tres partes principales del mismo: longitud adherente o de bulbo, longitud libre y cabeza.

Como puede apreciarse, la cabeza está compuesta básicamente por una placa y una tuerca (hexagonal y de base esférica en el caso representado), que permite la fijación exterior del anclaje a la superficie del terreno o a la estructura de reparto, y por consiguiente cumple la función de transmitir las fuerzas de tracción generadas.

La barra se introduce en el terreno a lo largo del eje el taladro con la ayuda de separadores o centradores de material plástico (PVC), lo que permite que la lechada de inyección la rodee completamente.

¹ El caso representado corresponde específicamente a un bulón provisional Dywidag de barra roscada y de fijación mediante inyección de lechada de cemento. Otros anclajes de barra pueden presentar diferencias en cuanto al tipo de cabeza o tuerca, tipo de separador, etc., pero responden básicamente al mismo esquema funcional.

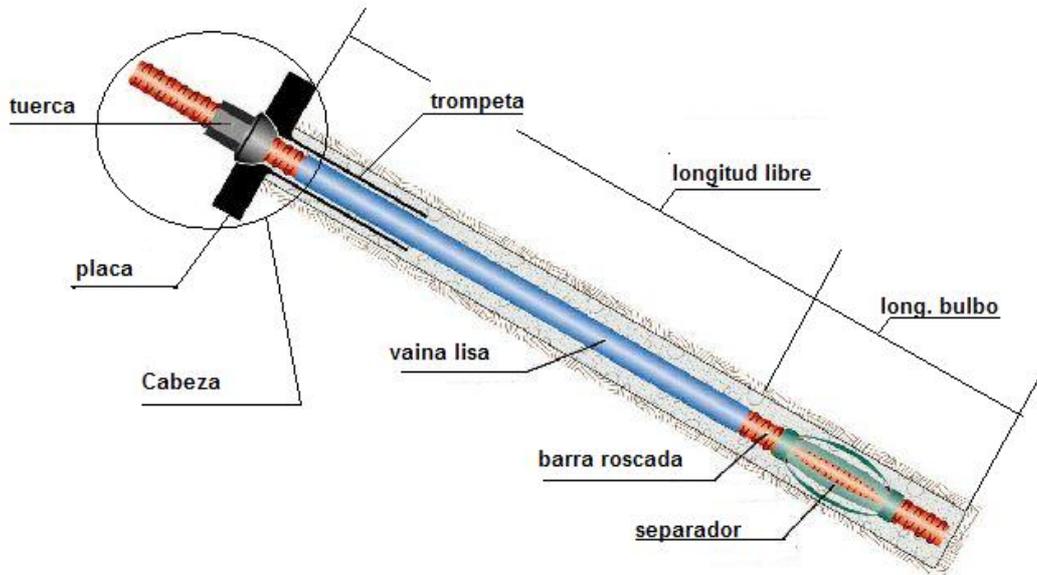


Figura 7: Anclaje de barra (tipo provisional de DSI)

A lo largo de su longitud libre, la barra se encuentra protegida mediante una vaina lisa, permitiendo así inyectar el taladro en toda su longitud sin riesgo de fijación al terreno en esta zona. A lo largo de la longitud adherente o de bulbo, la barra se encuentra lógicamente en contacto directo con la lechada de inyección, que la envuelve y la fija al terreno circundante.

Aunque en la figura anterior se ha representado una barra roscada, en general se pueden emplear tanto barras roscadas como corrugadas (figura 8).

Las primeras se fabrican con rosca continua, lo que facilita tanto el empalme entre barras sucesivas para anclajes de cierta longitud como el bloqueo o fijación del bulón y la cabeza mediante la correspondiente tuerca (figura 9).

Ejemplos comerciales de estas barras son las tipo Gewi, Dywidag, Mekano4, etc.

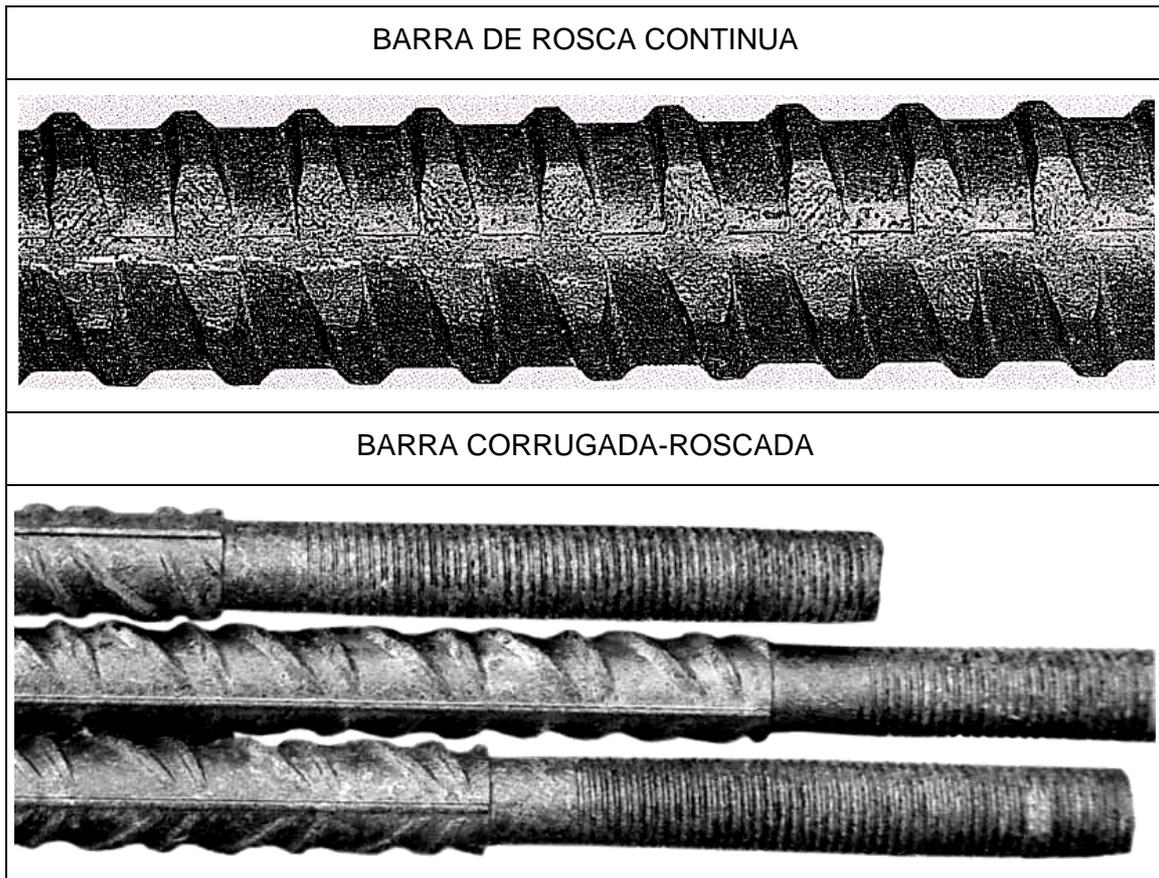


Figura 8: Fotografía de los tipos de barra más usuales

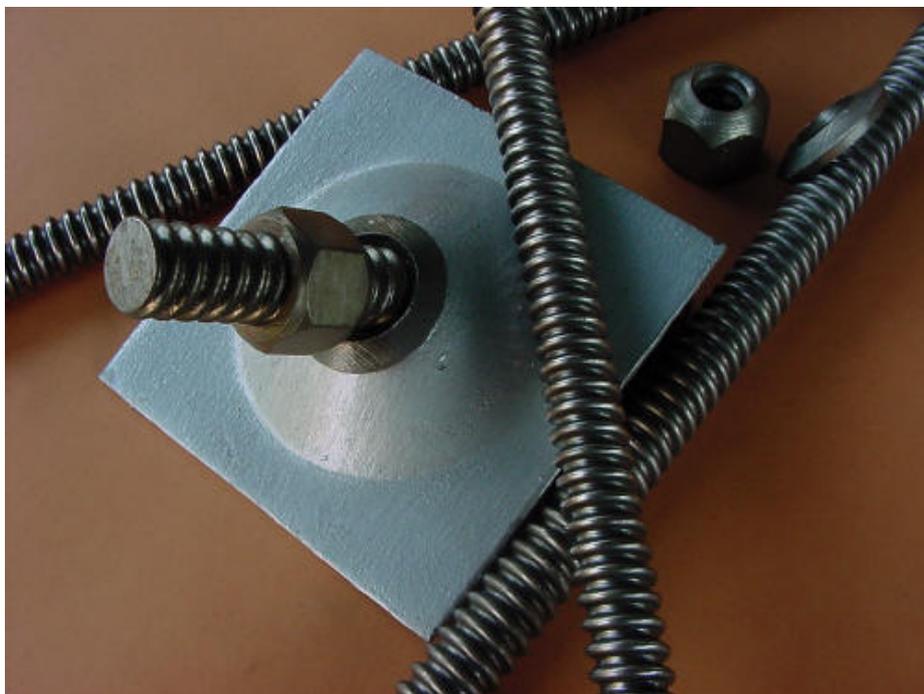


Figura 9: Detalle de una barra roscada, placa, arandela y tuerca.

En cuanto a las barras corrugadas, se trata de los mismos “redondos” convencionales de armado del hormigón, en los cuales se tornea una rosca de unos 20 cm de longitud para instalar la cabeza del anclaje. Pueden incluso roscarse en ambos extremos para empalmar barras en caso necesario.

La calidad de las barras corrugadas es inferior a las de rosca continua. Así, al tener que tornearlas se pierde sección de barra y, además, la rosca creada y la tuerca empleada suelen constituir puntos más débiles. Por otra parte la oxidación en la rosca torneada es mucho más rápida.

Los diámetros de barra más habituales son 25, 32 y 40 mm. Menos comunes son los diámetros de 50 y 63 mm, que en cualquier caso también pueden conseguirse.

En la tabla siguiente se recogen datos de la calidad del acero de las barras de anclaje más frecuentes:

TABLA 1: Características de las barras de anclaje más habituales.

Tipo de barra	Límite elástico (MPa)	Carga de rotura (MPa)
Corrugada, Gewi o similar	500	550
Dywidag	850	1.050

Para finalizar, además de las barras de acero pueden emplearse barras de fibra de vidrio. Éstas se utilizan principalmente para la estabilización de frentes de excavación de túnel, al presentar la ventaja de que pueden ser fácilmente eliminadas con las rozadoras o martillos de excavación.

4.1.2.- Anclajes de cable.

En este tipo de anclaje la armadura o tirante está constituida por cables (también llamados cordones o torones) análogos a los empleados en el postesado de estructuras. Cada cable se encuentra compuesto a su vez por un conjunto de alambres de acero (habitualmente 7). Dependiendo de la carga de trabajo necesaria, frecuentemente cada anclaje cuenta con cables, al igual que un tendón de postesado de hormigón. En la figura 10 se muestran un par de imágenes de este tipo de cables.



Figura 10: Detalles de un cable de anclaje convencional de 7 alambres trenzados.

Las características que han de cumplir los cables de anclaje se recogen en la norma UNE 36-094-97 (ó prEN 10138), siendo también posible acudir a las especificaciones de la EHE.

En la tabla 2 se muestran las características del tipo de cable más empleado actualmente, que corresponde a la denominación Y 1860 S7 15.20.

TABLA 2: Características de los cables más empleados actualmente

Límite elástico (MPa)	1670
Carga de rotura (MPa)	1860
Nº de alambres	7
Diámetro nominal (pulgadas - milímetros)	0.6 – 15.2
Área (mm ²)	140
Límite elástico unitario (kN)	229
Carga de rotura unitaria (kN)	260
Módulo de deformación (N/mm ²)	200.000

El esquema básico de un anclaje de cables de tipo provisional se muestra en la figura 11², en la que de nuevo pueden observarse las tres partes principales del mismo: longitud adherente o de bulbo, longitud libre y cabeza.

Como puede observarse, a lo largo de la longitud adherente los cables se encuentran centrados en el eje taladro y separados entre sí mediante centradores y separadores, lo que facilita que la lechada de inyección los rodee completamente.

Por otra parte, para evitar el contacto con la lechada pero al mismo tiempo permitir la inyección global de la perforación, a lo largo de la longitud libre cada uno de los cables se encuentra recubierto por una vaina de protección.

² El caso representado corresponde específicamente a un anclaje provisional Dywidag. De nuevo, otros anclajes de barra pueden presentar diferencias en cuanto al tipo de cabeza, tipo de separador, etc., pero responden básicamente al mismo esquema funcional

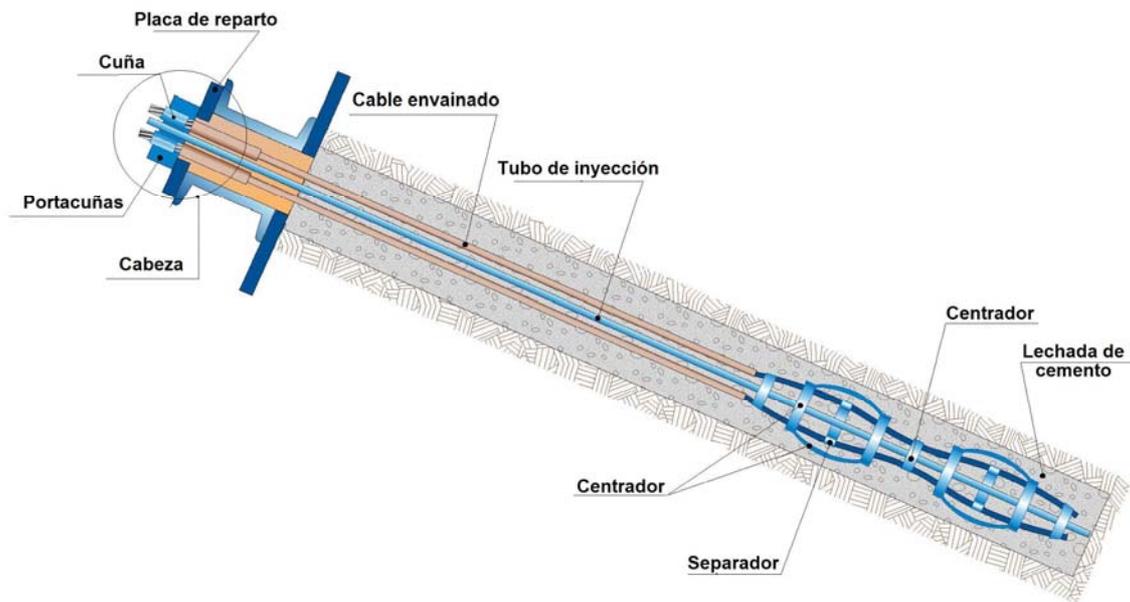


Figura 11: Anclaje de cables (tipo provisional de DSI)

Finalmente, la cabeza se compone de una placa de reparto, un portacuñas y un conjunto de cuñas que aprisionan cada uno de los cables. En el caso dibujado la placa de reparto apoya a su vez sobre una viga metálica (dos perfiles UPN), que harían las veces de estructura de reparto.

En la figura 12 se muestran de forma esquemática un portacuñas y sus cuñas, y en la figura 13 se recoge una fotografía de una cabeza con su portacuñas colocado (sin cuñas) junto con un gato de tesado.

Los anclajes de cable son siempre del tipo activo, esto es, se tesan previamente a su fijación a la cabeza, ya que requieren una elongación considerable para traccionarse debidamente. Como puede deducirse de las figuras anteriores, el funcionamiento de la fijación de la cabeza resulta muy sencillo gracias a la forma del portacuñas y las cuñas, que aprisionan con mayor intensidad los cables al aumentar la tracción en ellos.

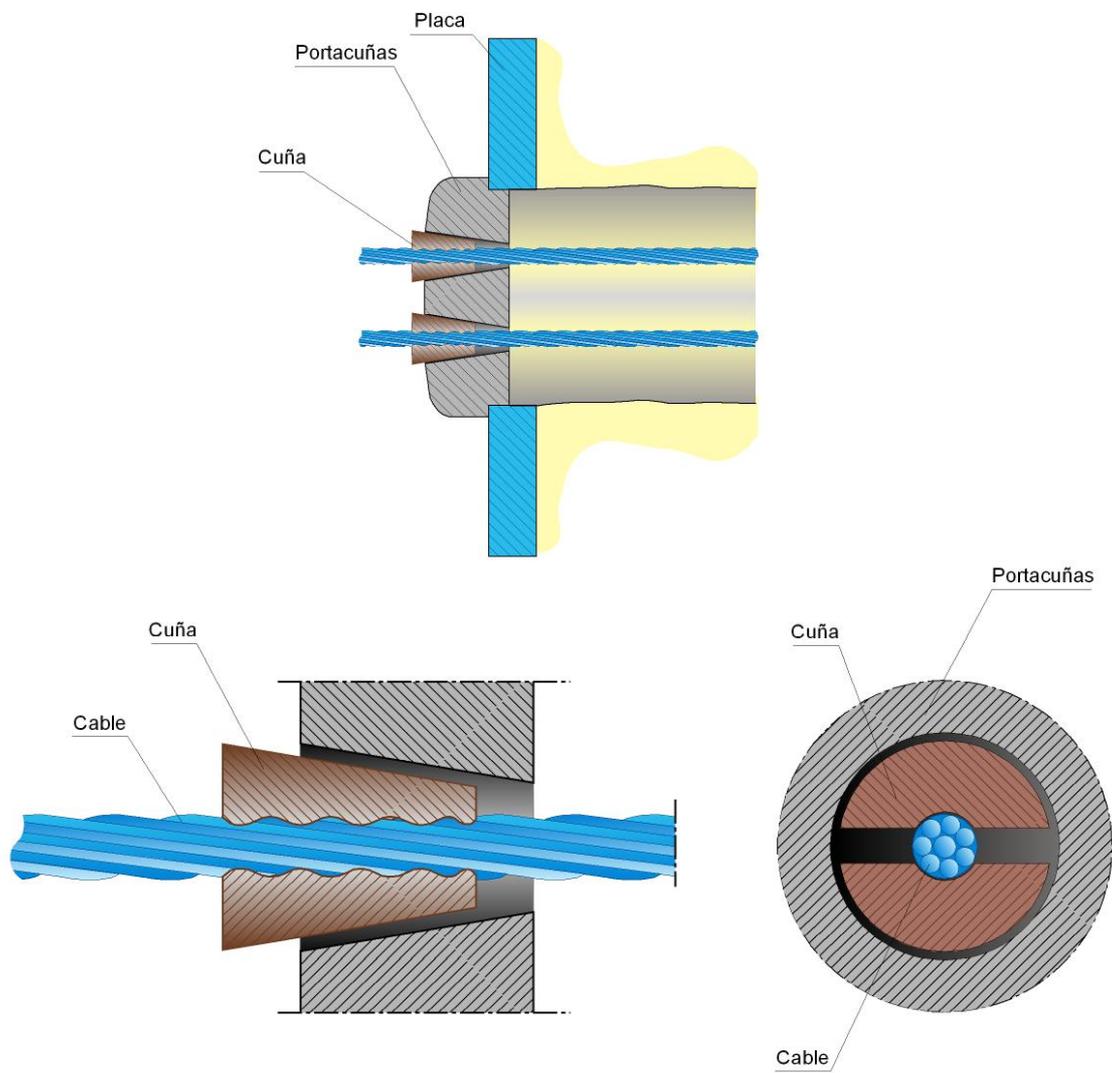


Figura 12: Geometría básica de las cuñas y portacúñas.



Figura 13: Fotografía de un anclaje de 7 cables en la coronación de una pantalla. Se observa la placa de reparto mecanizada para conseguir la inclinación deseada, y el portacables. En la parte superior, un gato hidráulico para el tesado (U&A).

4.1.3.- Otros tipos de tirantes

Además de los habituales anclajes de barra o cables, existen otros muchos tipos de tirantes, que pueden llevar asociadas técnicas de ejecución específicas, en ocasiones novedosas, por lo que en general quedan al margen de las normativas y publicaciones.

En la norma europea, por ejemplo, se excluyen expresamente de su ámbito de aplicación los anclajes helicoidales, mecánicos, de expansión, los pilotes en tracción y el claveteado.

Los amplios objetivos de estas jornadas no permiten ahondar sobre este tipo especial de anclajes, si bien a continuación se describen someramente algunos de ellos:

- Autoperforante. Es un tipo de anclaje relativamente extendido, existiendo varias empresas suministradoras con diferentes denominaciones (Titan, Mai, etc.). Se trata de armaduras formadas por tuberías de acero que se utilizan directamente como varillaje de perforación, para lo cuál se coloca una boca de perforación en su extremo. Al finalizar la perforación el tirante ya está colocado, y se puede proceder a inyectarlo por el interior de la tubería, retornando la inyección por el exterior. También puede utilizarse lechada de cemento como fluido de perforación, garantizando un mejor resultado. Pueden incluso tener longitud libre. Su principal ventaja radica en la posibilidad de perforar suelos poco estables sin necesidad de revestimiento, consiguiendo una buena formación del bulbo (figura 14).

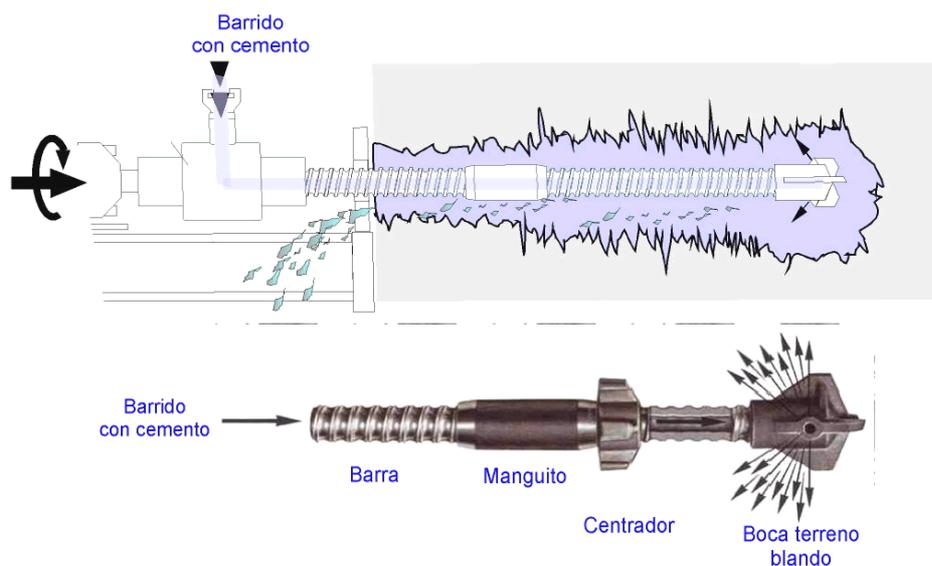


Figura 14: Esquema y fotografía de un anclaje autoperforante (tomada de Ischebeck).

Bulones de fricción: Son aquellos en los que la formación de la zona de bulbo o anclaje no se realiza con la inyección o la introducción de otros productos, sino que se hace directamente por rozamiento del tirante con el terreno. Dentro de los bulones de fricción se pueden citar los bulones de casquillo expansivo, poco empleados en ingeniería civil o edificación, y los de tipo Swellex, ya comercializados con otras marcas, muy empleados en túneles (figura 15).

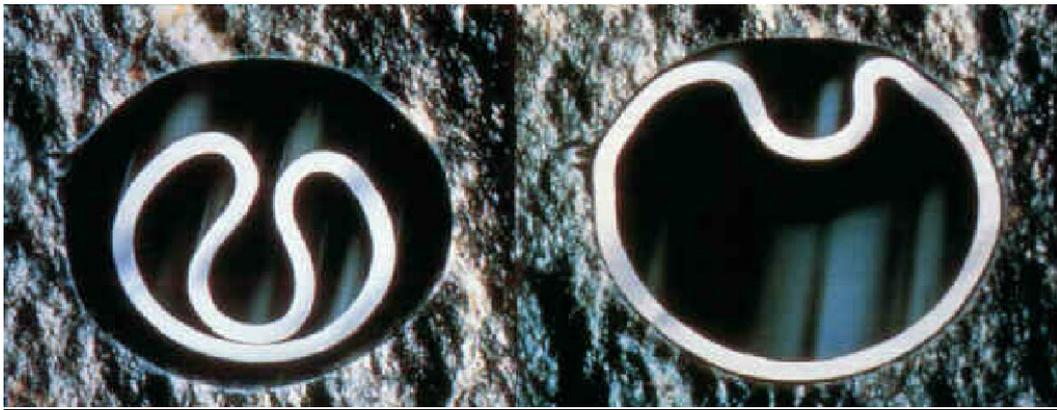


Figura 15: Detalle de bulón tipo Swellex

- Anclajes Manta o Manta-Ray: El nombre de estos anclajes proviene de su primer fabricante, y de la forma que tiene su extremo distal, con el que forma la zona de anclaje con el terreno. La colocación se realiza hincando la barra en el terreno. El extremo de la barra presenta una especie de pala, inicialmente en prolongación de la barra. Una vez hincada en su posición, se tira de la barra hasta que la pala se coloca perpendicular a la barra, actuando como una placa en oposición al arrancamiento. Este anclaje está pensado para suelos blandos. Su uso está extendido en el continente americano. (figura 16).

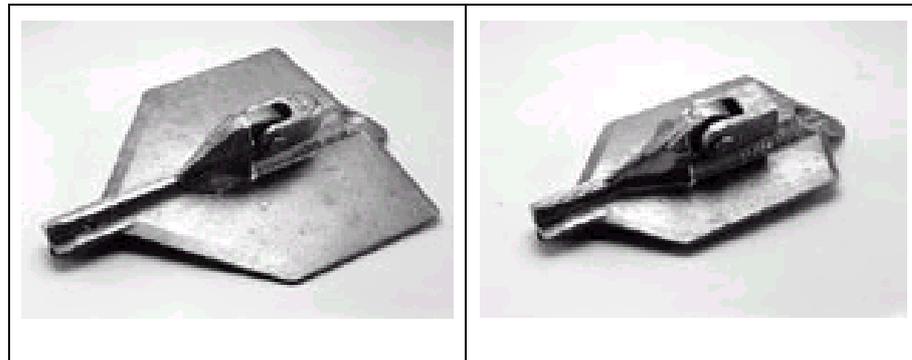
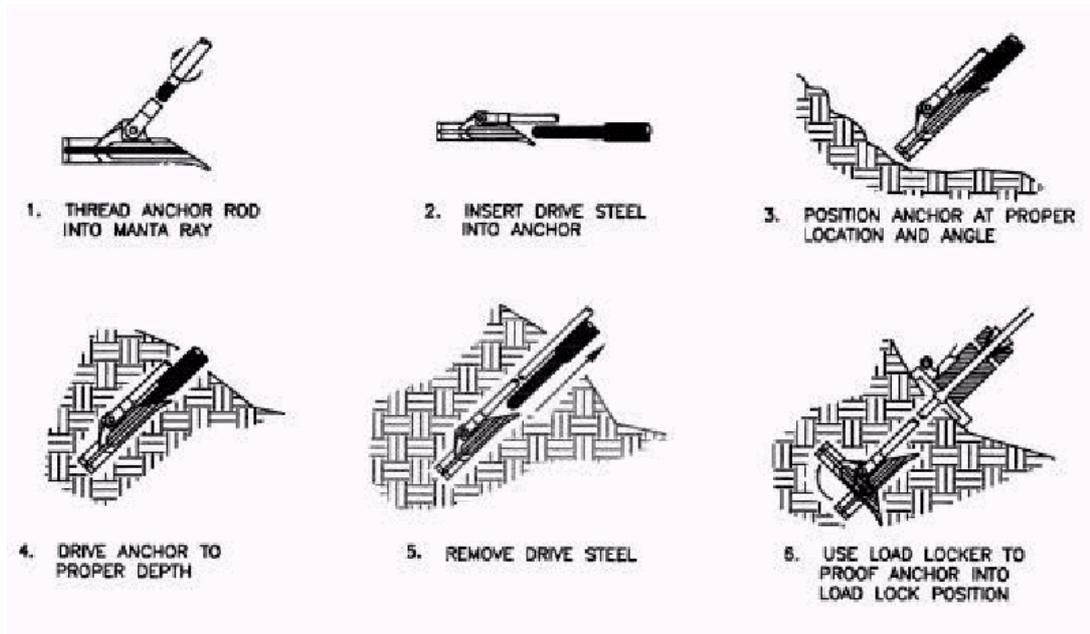


Figura 16: Ejemplos del elemento de fijación y del proceso de instalación de un anclaje tipo Manta-Ray

- Jack-in: Este tipo de anclaje, bastante reciente, consiste en una tubería de acero, como la de un micropilote, hincada en el terreno mediante un gato hidráulico que se va apoyando en una guía de acero fijada previamente a la estructura a arristrar. Son anclajes de fricción. Se emplea en el continente asiático en suelos blandos (figura 17).



Figura 17: Trabajos de ejecución de anclajes tipo “jack-in”.
(Tomada de www.plaxis.nl)

- Micropilotes: Pueden emplearse tuberías de micropilotes como anclajes, con lo que se obtiene gran resistencia a cortante y gran rigidez axial. Con una cabeza adecuada, y dotándolos de una zona libre, pueden tesarse.

4.2.- Según su vida útil.

Atendiendo a su periodo de servicio, los anclajes suelen dividirse en provisionales y permanentes (o definitivos). La mayoría de las normas señalan una frontera de 2 años para distinguir unos de otros. Las recomendaciones de la ATEP hablan incluso de 9 meses.

En la práctica habitual suelen considerarse provisionales los anclajes estrictamente necesarios durante la fase de construcción (por ejemplo, los anclajes de arriostramiento de pantallas en excavaciones, cuando posteriormente dicho arriostramiento pueda resolverse con forjados). Con este criterio, serían anclajes permanentes los que resulte preciso mantener en funcionamiento durante la vida útil de la obra, ya finalizada y en servicio.

La importancia de esta clasificación deriva, entre otras cosas, de que los anclajes permanentes deben dotarse con sistemas especiales anticorrosión, que suelen encarecerlos. Además, por razones obvias, los anclajes permanentes se han de diseñar con mayores coeficientes de seguridad, y su ejecución exige un mayor control.

Las figuras 18 y 19 recogen ejemplos ya mostrados en figuras anteriores de anclajes provisionales de barra y cable, junto con sus correspondientes disposiciones para soluciones permanentes.

En un apartado posterior se tratará el problema de la corrosión y las protecciones a emplear.

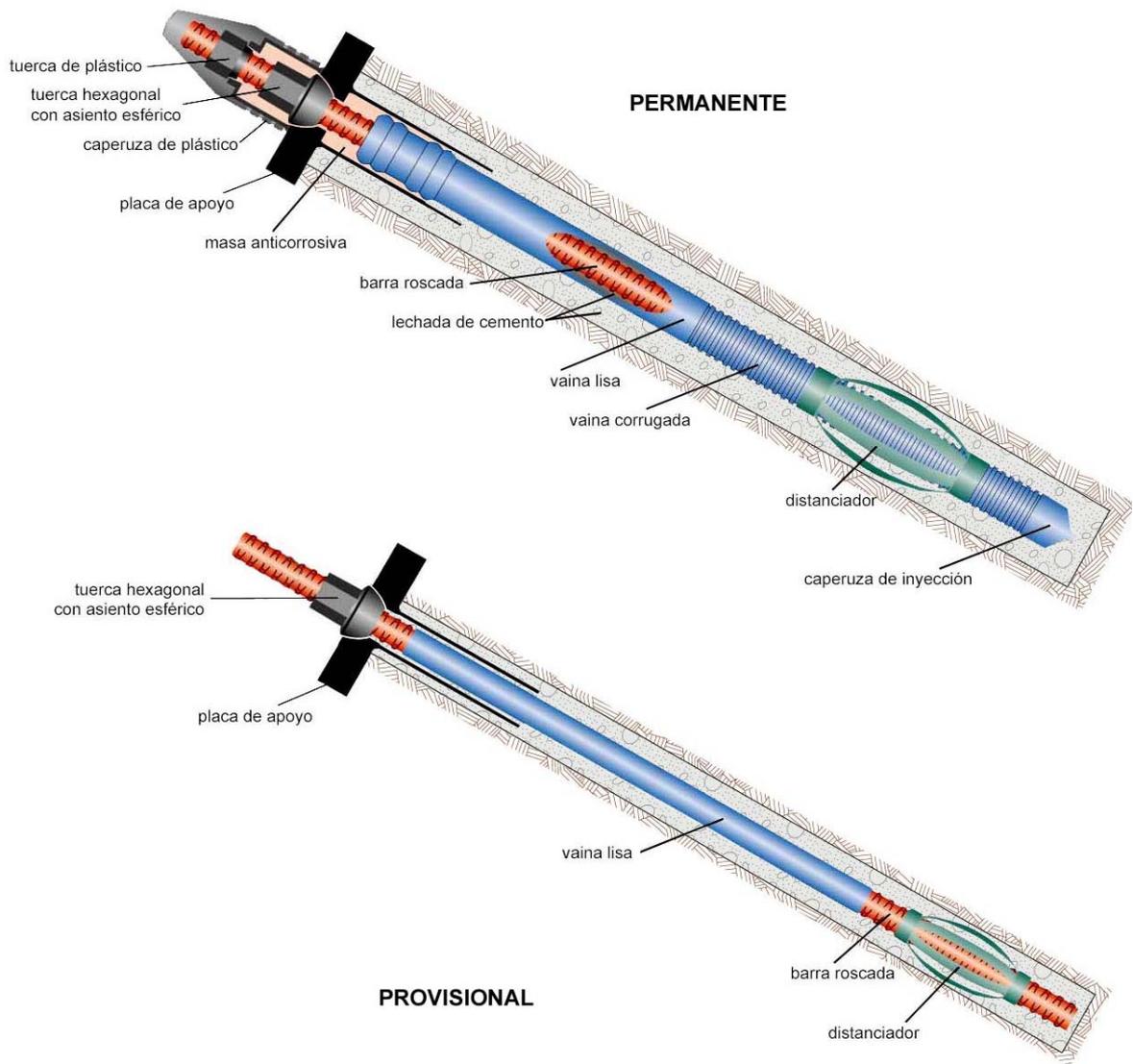


Figura 18: Esquemas de anclajes de barra, provisional y permanente (tomada de DSI)

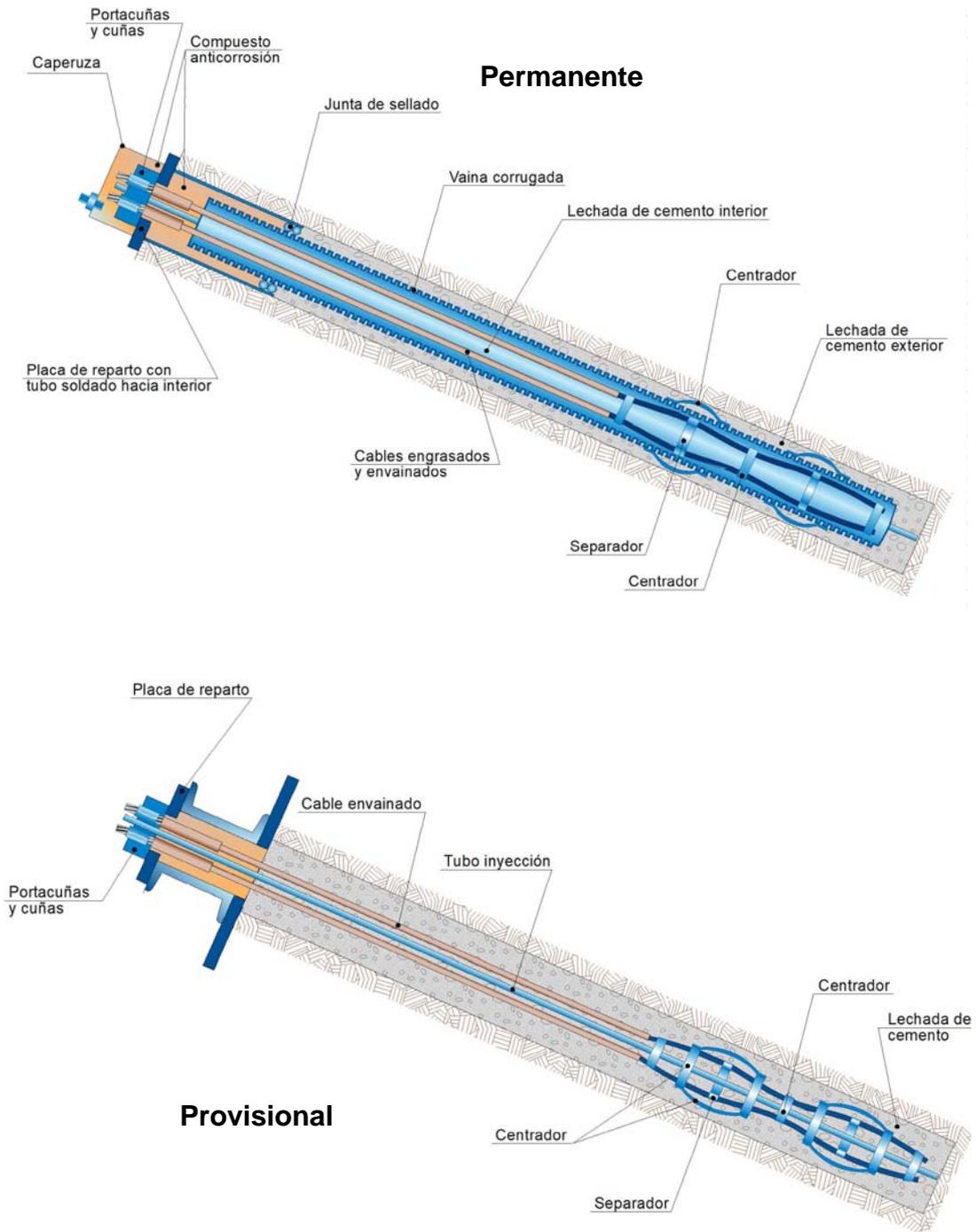


Figura 19: Esquemas de anclajes de cables, provisional y permanente (tomada de DSI)

4.3.- Según su puesta en carga

Aunque ya comentado en el apartado de introducción, según este criterio cabe distinguir entre:

- Anclajes pasivos. Son aquéllos que no se tesan inicialmente (al menos significativamente) y que requieren la producción de movimientos relativos entre las fijaciones de la cabeza y bulbo para traccionarse.
- Anclajes activos. Son aquéllos que durante la instalación se ponen en carga mediante un procedimiento de tesado, tras lo cual se fijan a la cabeza. La carga de tesado suele ser similar a la máxima tracción de trabajo prevista para el anclaje.

La categoría de anclajes mixtos, que hacía referencia a anclajes tesados a una carga de trabajo menor que la máxima prevista, ha entrado en desuso, y no se emplea en las nuevas normativas o publicaciones oficiales.

Como ya se ha mencionado, los anclajes de cable son siempre activos, ya que al tener menor rigidez, tanto axial como transversal, necesitarían de una excesiva deformación (elongación) para movilizar toda su capacidad de carga.

4.4.- Según el procedimiento de formación del bulbo

El sistema de fijación del tirante de anclaje en el terreno para formar el bulbo se consigue en la mayoría de los casos mediante una inyección de lechada de cemento.

Puede hacerse una sola operación de inyección, o inyectar repetidamente en fases sucesivas, con el fin de aumentar la adherencia de la lechada y el terreno en la zona de bulbo.

Según el número de fases de inyección y la forma de hacerlas, los anclajes se clasifican habitualmente como:

- Anclajes con inyección única global (IU) ó (IGU): la inyección se realiza de una sola vez, rellenando el taladro a baja presión mediante un conducto que llega hasta el fondo del anclaje.

- Anclajes con inyección repetitiva (IR): la inyección se hace en varias fases y a través de varios puntos. Para ello se emplean varios conductos o se usa un circuito con retorno en el que hay colocadas varias válvulas de inyección.
- Anclajes con inyección repetitiva selectiva (IRS): la inyección se ejecuta en varias fases y a través de varios puntos, pudiendo controlar en cada uno de ellos la presión y volumen alcanzado en cada fase de inyección. Dentro de este grupo, la técnica más extendida en España consiste en usar tubos-manguito, dentro de los cuales quedan alojados posteriormente los anclajes.

En un apartado posterior sobre ejecución se darán más detalles sobre cada técnica.

Cabe mencionar también los anclajes de bulbo múltiple. Se trata de anclajes IU o IR, en los que se introducen de 4 a 6 tirantes formados por 2 ó 3 cables cada uno. Cada uno de estos tirantes tiene una longitud libre distinta, de forma que los bulbos de cada tirante quedan dispuestos en serie, uno detrás de otro.

Además de por medio de una inyección, los anclajes de barra pueden quedar también fijados mediante cartuchos de resina o de cemento. Se suelen emplear en anclajes ascendentes, como los habitualmente usados en el sostenimiento de excavaciones subterráneas.

Por otro lado, para otros tipos de tirantes distintos de las barras y los cables, como los que se indicaron en el apartado 4.1.3, la formación del bulbo, o mejor dicho, la forma de fijación puede ser muy específica (salvo para los autoperforantes).

4.5.- Según la capacidad de modificar la carga actuante

Esta última clasificación no es habitual y de hecho no suele considerarse en los textos convencionales. No obstante puede ser muy relevante, sobre todo cuando se trata de anclajes permanentes.

Así por ejemplo, en la estabilización de taludes a veces ocurre que tras realizar unos anclajes y tesarlos, la ladera continua sufriendo movimientos hacia la excavación, sobrecargando los anclajes existentes, que no son capaces de limitar el movimiento. En este caso puede ser conveniente destesar los anclajes para volver a tesarlos a una

carga inferior, evitando su rotura, a pesar de disminuir la seguridad de la ladera mientras se aplican otras medidas de estabilización.

Cabe pues distinguir entre anclajes retesables y no retesables, según se puedan realizar o no sucesivos procesos de tesado sobre ellos.

Como aspectos de interés sobre esta característica, se puede indicar:

- Tanto los anclajes de barra como los de cable son en principio retesables, si bien pueden dejar de serlo si tras el primer tesado se procede a cortar el sobrante (llamado “rabo”) de la barra o cables que queda por fuera de la cabeza.
- Para los bulones es suficiente dejar unos 5 cm de barra para roscar un manguito de empalme y poder retesar.
- Para los anclajes de cable se necesita algo más de longitud, al menos unos 40 cm (dependiendo del gato de tesado), lo que da lugar a que, salvo que se indique expresamente lo contrario, sean cortados en obra de forma sistemática. No obstante, bastaría tener en cuenta y asumir en el proyecto el mayor espacio que ocupan los rabos y prever caperuzas de protección más largas para disponer de anclajes retesables sin prácticamente incremento de coste³.
- Por último, para los anclajes de cable existen las denominadas “cabezas retesables”, en las que se tesa tirando del portacúñas en lugar de los cables. Este tipo de solución presenta dos ventajas. La primera es que, al no tener que tirar de los cables, no se “muerden” o arañan continuamente con cada operación de tesado⁴. La segunda es que las cabezas pueden tener dimensiones reducidas, ya que permiten cortar los rabos.

³ En bastantes ocasiones, cuando se producen movimientos en pantallas o taludes anclados, se piensa en la posibilidad de determinar la carga de los anclajes con un gato (lift-off) o estudiar su eventual retesado. No obstante y por desgracia, estas actuaciones son imposibles casi siempre por encontrarse todos los cables cortados.

⁴ Cuando se produce la fijación de los cables, las cúñas “muerden” los cables produciéndoles un cierto deterioro. Por ello, cuando se realiza un retesado en los cables, lo que supone desacuñar y acuñar de

Como resumen de la descripción anterior, en la figura 20 se muestran las 3 posibilidades descritas para las cabezas de anclaje de cable, en función de su retesabilidad.

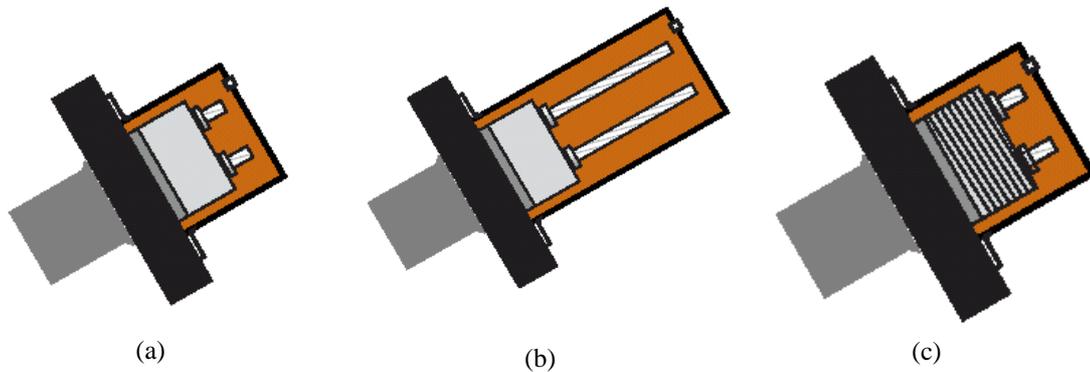


Figura 20 : (a) Cabeza no retesable. (b) Cabeza retesable con rabos largos. (c) Cabeza retesable con portacúñas con rosca exterior. (Tomada de DSI)

5.- ASPECTOS PRÁCTICOS SOBRE LA EJECUCIÓN

Como se ha señalado en apartados anteriores, la ejecución de un anclaje se puede dividir en las siguientes fases:

- Fabricación del anclaje (montaje de tirante y accesorios)
- Perforación
- Introducción del tirante
- Inyección
- Colocación de cabeza y tesado
- Acabados

nuevo, es deseable que las nuevas cúñas “muerdan” en la zona interior y sana del cable (lo que en principio supone una mayor carga), con el fin de evitar que la zona anteriormente “mordida” y deteriorada quede en la longitud donde los cables se encuentran traccionados.

5.1.- Fabricación del anclaje (montaje de tirante y accesorios)

Los anclajes permanentes con doble protección frente a la corrosión se montan siempre en un taller especializado.

El montaje del resto de los anclajes, más sencillos, puede realizarse en obra, si bien esta práctica se va perdiendo. No obstante, una ventaja de montar los anclajes en obra es la de permitir una mayor agilidad cuando resulta conveniente modificar las longitudes del anclaje inicialmente previstas para adaptarlas al terreno realmente perforado (por ejemplo, cuando la distancia a la que se encuentra el terreno resistente en donde se han de alojar los bulbos resulta muy variable).

En figuras anteriores se han podido apreciar los numerosos accesorios de montaje que forman un anclaje, además del propio tirante. Cada fabricante presenta variaciones a la hora de materializar las distintas partes de que consta uno de estos elementos. Así por ejemplo, la zona libre en los anclajes de cable puede formarse por una vaina conjunta para todos los cables, o bien por vainas individuales para cada cable.

No es esta una fase crítica para el funcionamiento posterior del anclaje. Sin embargo, pueden apuntarse algunos detalles de interés a tener en cuenta:

- Debe observarse la existencia y correcto posicionamiento de centradores, sin los cuales la protección frente a la corrosión disminuye, al disminuir el recubrimiento de lechada de cemento. Además, en la zona de bulbo un centrado inadecuado puede reducir también la adherencia del anclaje con el terreno.
- Los conductos de inyección, si existen, deben llegar al final del anclaje.
- Los anclajes de cable deben llevar centradores y separadores suficientes para unir los cables (generalmente uno cada metro), de forma que el anclaje sea consistente y no se desarme parcialmente al manejarlo, ni flecte demasiado.
- En los anclajes de barra deben cuidarse las uniones con manguitos, empleando contratuercas para que no tiendan a aflojarse, recubriéndolos posteriormente para evitar su corrosión de igual forma que las barras. Para

ello suelen usarse materiales termorretráctiles.

- Se debe asegurar que las vainas, especialmente las de los sistemas de protección frente a la corrosión, no presenten roturas como consecuencia de su manipulación.

5.2.- Perforación

La perforación de un anclaje presenta un gran número de variables. De hecho, a igualdad del resto de circunstancias, dependiendo de la maquinaria empleada e incluso del maquinista, las maniobras de avance y barrido o limpieza del taladro pueden diferir, dando lugar a taladros o perforaciones diferentes.

Las técnicas de perforación de anclajes corresponden a las denominadas de “agujero pequeño” en el argot de las cimentaciones especiales, y son análogas a las empleadas para micropilotes e inyecciones. Los diámetros de perforación varían desde 68 mm para bulones con barras de 25 mm, hasta más de 200 mm para anclajes más complejos.

Para la selección del diámetro de perforación puede consultarse la *“Guía para el diseño y la ejecución de anclajes al terreno en obras de carreteras”*, de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento (en adelante guía de la D.G.C.).

Los sistemas de perforación (a destroza) que se emplean pueden ser:

- Mediante rotación o rotopercusión. Adicionalmente, dentro del sistema de rotopercusión, la percusión puede ser en cabeza o en fondo.
- Con o sin revestimiento
- Con aire o agua como fluido de barrido (para eliminar el detritus)

Dentro de cada una de las posibilidades anteriores, intervienen otras variables, tales como:

- La velocidad de avance y de rotación
- La combinación empleada de rotación y percusión, tanto para el revestimiento como para la maniobra interior

- La presión y caudal del fluido de barrido
- Las secuencias de barrido del taladro

Se comprende que estas últimas variables son necesariamente controladas por la empresa especializada que realiza los trabajos. Sin embargo, la elección del sistema de perforación puede, y en muchos casos debe, estar definida en el diseño (al igual que en muchos diseños de pilotes se especifica el tipo de pilote a emplear). Lo mismo puede decirse sobre el diámetro de perforación.

Así, con el empleo simultáneo de revestimiento y maniobra interior se consigue una menor afección tanto al terreno como a las estructuras próximas a la perforación. En este sentido, el revestimiento limita la deformación y los desprendimientos del terreno hacia el taladro, así como la entrada del fluido de perforación a puntos alejados de la ésta.

Abundando en los efectos del fluido de perforación, un aspecto sujeto a cierta controversia radica en cuál de ellos, aire comprimido o agua a presión, es más o menos perjudicial para el terreno y para las posibles cimentaciones circundantes. Estas “controversias” a menudo se encuentran condicionadas por los procedimientos empleados por cada empresa, que en función de sus medios suele decantarse por uno u otro método. Desde un punto de vista práctico se puede decir que está más extendido el uso del agua, aunque sólo por motivos de producción.

Como ideas generales en este sentido pueden aportarse las siguientes:

- El aire penetra más por los huecos intergranulares y las fisuras del terreno. Además, no está sometido a la gravedad, por lo que tiene más facilidad para ascender hacia la superficie, donde suelen situarse las cimentaciones próximas.
- El agua es menos penetrante, pero plantea el problema de introducir agua donde posiblemente antes no había, o no había en tanta cantidad. En general, la alteración de las paredes del taladro es mayor cuando se emplea agua.
- El efecto nocivo del fluido empleado depende también del trabajo del maquinista, que puede actuar controlando la presión y el caudal, y evitando

“tapones” durante la perforación, que hacen que el fluido en vez de retornar hacia la boca del taladro intente salir hacia el terreno.

- El empleo de aire no está recomendado en suelos en los que exista nivel freático, o suelos cohesivos “húmedos”, ya que su eficacia al barrer disminuye, la perforación queda menos limpia de detritus, y por tanto el bulbo puede tener menos adherencia.
- Ambos fluidos presentan inconvenientes al entorno de la obra, que pueden no ser despreciables. La perforación con aire puede provocar abundante polvo. Por otra parte, el agua que sale por la boca del taladro debe ser conducida y desaguada.

Por último, con respecto a la rotación o la rotopercusión y sus posibles combinaciones, la elección de uno u otro método depende sobre todo de las posibilidades de perforación en un terreno dado. Por ejemplo, las rocas se perforan a rotopercusión. Los suelos con cierta cohesión se perforan a rotación, empleando un útil de corte denominado trialeta.

5.3.- Introducción del tirante

Finalizada la perforación y las maniobras de limpieza del taladro, se procede lo antes posible a la introducción del anclaje, que debe llegar sin problemas hasta su posición prevista.

Los anclajes de barra se van empalmando a medida que se van introduciendo. Para los empalmes se emplean manguitos con contratuercas.

Conviene mantener los anclajes limpios, evitando que se arrastren por el suelo al introducirlos.

5.4.- Inyección.

Junto con la perforación, es otra fase decisiva en la ejecución, y también cuenta con numerosas variables.

La misión de la lechada es doble:

- Por un lado sirve de elemento de transferencia de carga entre el tirante y el terreno en la zona de bulbo.
- Por otro, sirve de barrera frente a la corrosión del tirante.

La inyección se debe hacer también lo antes posible, con el fin de minimizar la alteración y decompresión de las paredes del terreno. Algunas normativas, como la de la FHWA recomiendan no sobrepasar más de 8 a 12 horas tras la perforación. En realidad, este tiempo debería depender del tipo de terreno perforado.

A efectos prácticos puede recomendarse que solamente las perforaciones en roca sin agua se dejen hasta 24 horas, lo que significa que se puede inyectar al día siguiente.

En el extremo opuesto, cuando se perfora en suelos y hay agua o excesiva humedad, debe inyectarse cada anclaje antes de perforar el siguiente.

Para los casos intermedios puede ser suficiente con inyectar al final de la jornada los anclajes perforados en ella⁵.

5.4.1.- Inyección IU

Con respecto al proceso de inyección en sí, el más simple y común suele ser el denominado (IU), en el que la inyección se hace de una sola vez. Sus características y detalles principales son los siguientes:

- La lechada se introduce siempre desde el fondo de la perforación. Al inyectar de “abajo a arriba”, la lechada desaloja tanto el agua como el detritus, e incluso puede arrastrar parte del que haya quedado en las paredes del taladro Si no se hace así, se corre el riesgo de que quede agua en el fondo el taladro, o bien se acumule más detritus.
- Siempre se inyecta toda la longitud del anclaje. La creencia de que la longitud libre no queda inyectada no se corresponde con la práctica actual. Antiguamente sí se empleaban obturadores en el montaje del anclaje,

⁵ También existe la posibilidad de inyectar primero el taladro y luego introducir el anclaje. En estos casos se debe introducir un latiguillo de inyección hasta el fondo del taladro, retirándolo antes de introducir el anclaje.

dejando sin inyectar la zona libre, lo que ha dado lugar a que se mantenga esta idea.

- El proceso de inyección suele acabar cuando la lechada sale por la boca del taladro con el mismo color y consistencia que la lechada inyectada. Así pues, esta forma de proceder sirve para controlar que el taladro se ha rellenado satisfactoriamente.
- A menudo se cree que con este procedimiento (inyección única IU), el bulbo se inyecta a presión, pero obviamente no es cierto. Efectivamente se emplea presión para bombear o inyectar la lechada, pero en cuanto ésta sale por la boca del conducto, pierde su presión y no vuelve a tener otra distinta de la hidrostática (que en todo caso puede ser de entre 100 y 300 kPa, dependiendo de la longitud e inclinación del taladro).

5.4.2.- Inyección IR.

Un segundo procedimiento sería el denominado de inyección repetitiva (IR). El primer paso en este procedimiento consiste en realizar una inyección global tipo (IU) desde el fondo del taladro, tras la cuál y a las pocas horas se vuelve a inyectar en varias fases y a través de varios puntos. Dependiendo de los tubos “extra” de inyección con que se haya equipado al anclaje, se pueden distinguir a su vez dos variantes.

La primera consiste en colocar tubos de inyección de varias longitudes, finalizando a distintas profundidades dentro de la zona de bulbo. Los conductos se inyectan uno tras otro. Este método resulta muy sencillo y se puede implementar fácilmente en obra simplemente añadiendo conductos de polietileno adicionales, de unos 2 cm de diámetro, a los anclajes acopiados (figura 18).



Figura 18: Conductos para inyección repetitiva IR.

La segunda variante de la inyección (IR) consiste en emplear un único conducto de inyección, dotado de varias válvulas en la zona de bulbo. Al inyectar por el interior del conducto, las válvulas se abren de forma más o menos simultánea, en función de la resistencia que encuentre cada una.

Con la inyección tipo (IR) no se inyectan grandes volúmenes de lechada, pero se consiguen introducir pequeñas cantidades de ésta a elevada presión, dando lugar a mayores resistencias del bulbo (adherencia) que con el sistema (IU).

5.4.3.- Inyección IRS

Este tercer sistema de inyección supone un salto cualitativo respecto al anterior, dado que también permite inyectar en varias fases y a través de varios puntos, pero controlando la presión alcanzada y el volumen inyectado en cada una de ellos.

El proceso de inyección del terreno finaliza cuando se alcanza presión suficiente en cada válvula, limitándose también el volumen en cada válvula por cada fase de inyección. El número de fases de inyección suele ser de al menos dos.

El volumen que se inyecta en cada fase no suele ser superior a unos 50 litros por cada válvula. Las presiones de cierre a alcanzar tras la última fase son siempre mayores de 1 MPa⁶.

La técnica más extendida para estas inyecciones IRS consiste en emplear una tubería de acero equipada con válvulas antirretorno (tubos-manguito), situadas en general cada metro de longitud. Dichas válvulas pueden mecanizarse de forma sencilla, pudiendo consistir en simples manguitos de goma atados exteriormente a la tubería, de forma que “tapen” algunos agujeros practicados previamente en la misma (figura 19).

Una vez realizada la perforación, se introduce la tubería en el taladro y se realiza una inyección global tipo IU del espacio anular comprendido entre ésta y las paredes de perforación.

Días u horas después, por el interior de la tubería se introduce un varillaje o conducto de inyección dotado de un obturador doble en su extremo, que permite aislar una determinada válvula antirretorno o manguito, e inyectar a presión de forma localizada a través de la misma (figura 19). Al recibir la lechada a presión, el manguito se dilata y deja salir la lechada de forma localizada. Cuando finaliza la operación, el manguito vuelve a cerrarse e impide el retorno de la lechada.

⁶ La Dirección General de Carreteras recomienda alcanzar presiones mayores que la presión límite del terreno según ensayos presiométricos.



Figura 19: a) Detalle de una tubería de micropilote dotada con tubos-manguito, y obturador hinchable doble a emplear. b) Esquema de obturador deshinchado e hinchado.

Este proceso se puede repetir las veces que sea preciso, dando lugar a un bulbo de inyección de gran calidad en cuanto a su imbricación con el terreno circundante, y por lo tanto de elevada resistencia.

Como fase final se introduce el anclaje dentro de la tubería, y se inyecta por su interior (nuevamente desde abajo). En la siguiente figura se muestra de forma resumida el proceso descrito.

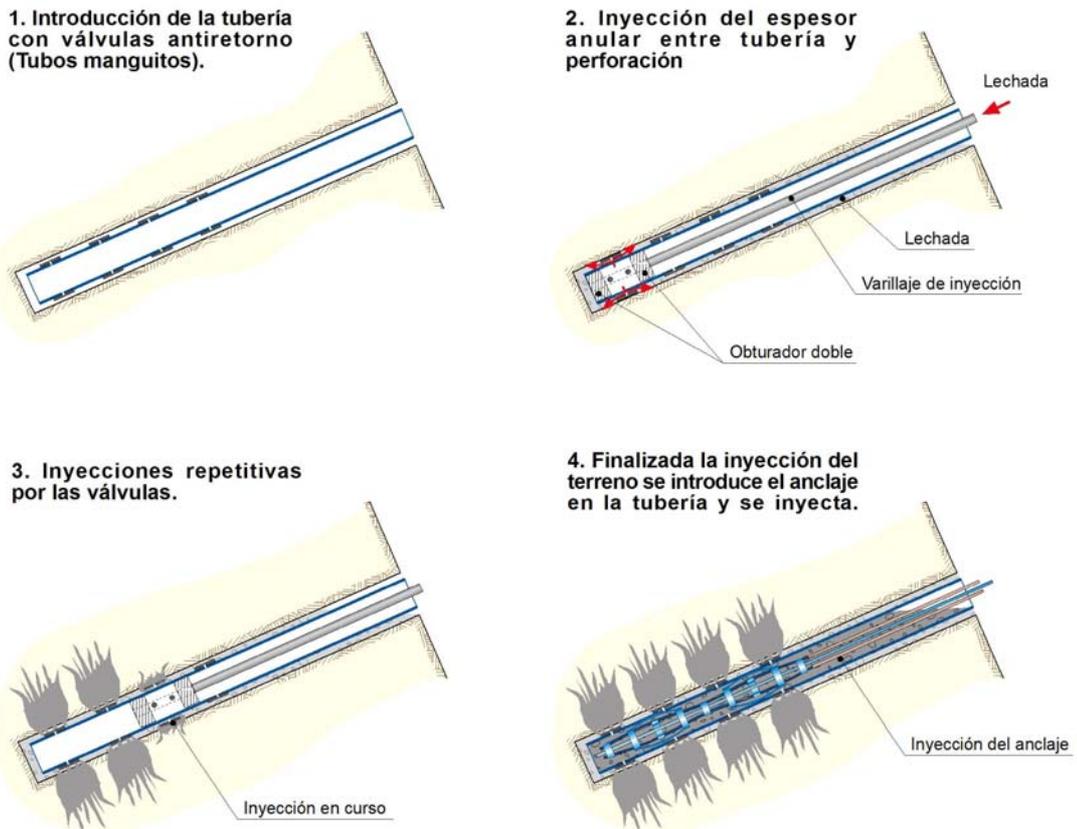


Figura 20: Proceso de ejecución de anclajes con inyección repetitiva selectiva (IRS)

Otra técnica para conseguir un anclaje IRS, consiste en introducir junto a los cables o barra, una tubería flexible equipada con válvulas antirretorno (figuras 21 y 22). El procedimiento de ejecución es similar al de la técnica anteriormente descrita: se inyecta el taladro empleando para ello por ejemplo la válvula más profunda, y en una fase posterior se inyectan las válvulas.

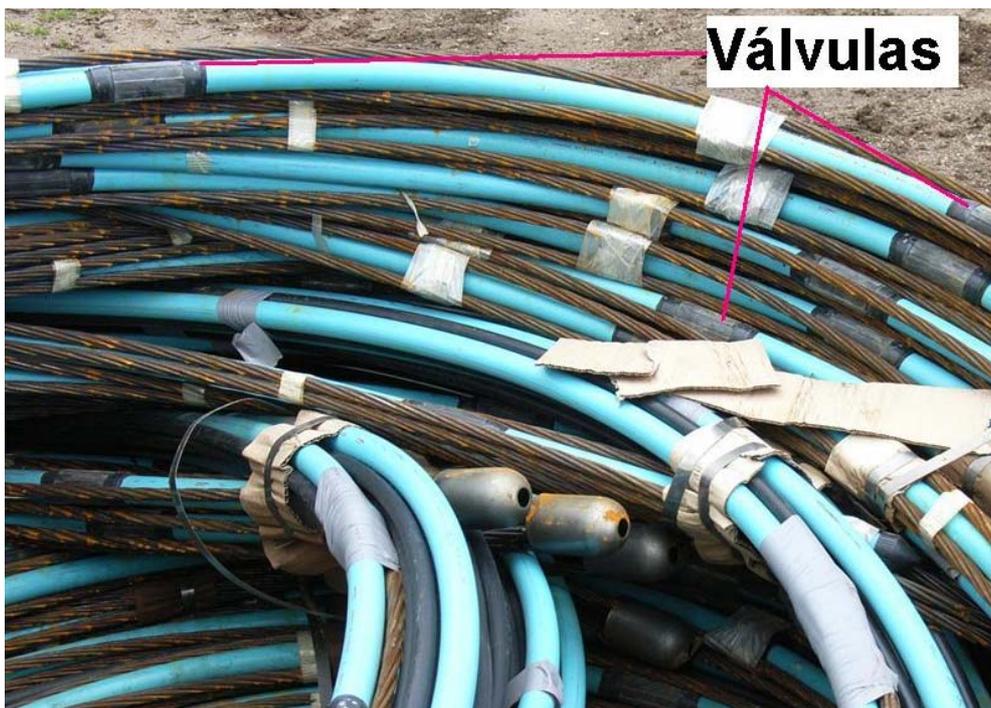


Figura 21: Anclajes provisionales con tubería flexible para inyección repetitiva selectiva (U&A).

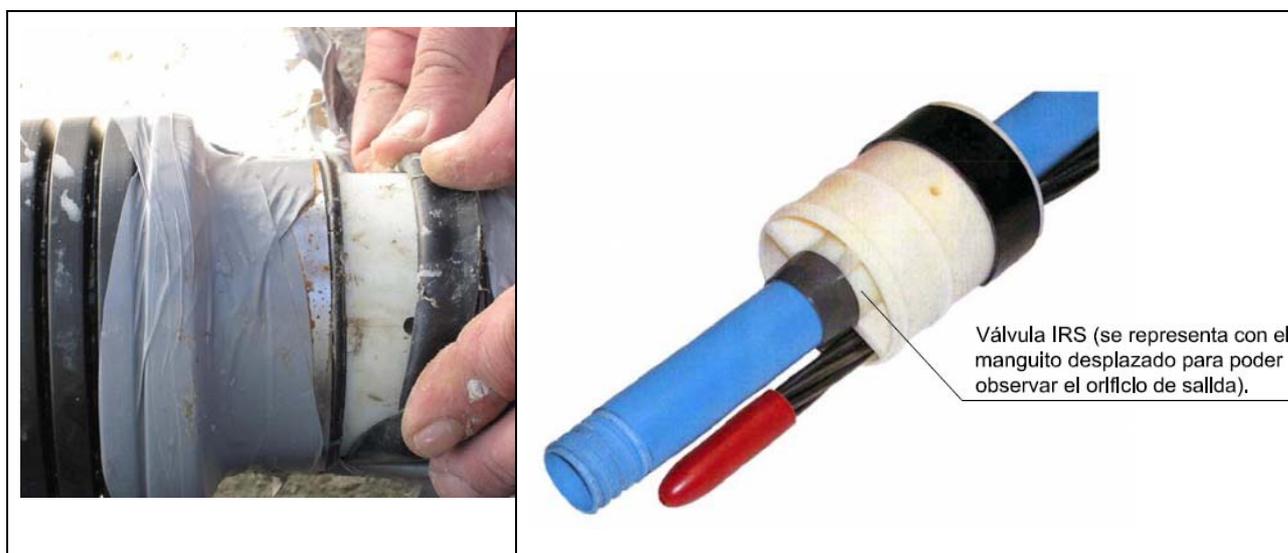


Figura 22: Detalle de válvula antirretorno en anclajes definitivo con tubería flexible para inyección repetitiva selectiva (U&A).

Para esta segunda técnica es necesario emplear conductos de inyección y obturadores cuyo diámetro es de entre 3 y 4 cm. Los obturadores son por tanto de membrana (“vasos”) como los que se emplean habitualmente en inyecciones. Algunos fabricantes resuelven la salida de la mezcla con un tramo en espiral, en lugar de

practicar orificios (figura 23).



Figura 23: Ejemplo de obturador doble de membrana para inyección IRS por el interior de tuberías de poco diámetro (U&A).

La ventaja más importante de este último sistema, es que se evitan los problemas asociados a la tubería de acero, que al ser rígida, trasmite su carga del bulbo hacia la zona libre, mediante compresión, resultando por tanto que el anclaje al terreno no se realiza únicamente en la zona teórica de bulbo, sino también más hacia la superficie. La disminución de la longitud libre por este motivo no puede medirse mediante el tesado.

5.4.4.- Preparación de la lechada

Las relaciones agua/cemento en peso prescritas en la normativa española se sitúan entre 0.4 y 0.6, siendo de 0.4 para las lechadas a emplear en el sellado entre la armadura y las vainas anticorrosión.

En la práctica, para conseguir estas dosificaciones es necesario el uso de aditivos, por lo que la ejecución no suele ser muy estricta en este sentido. Sin embargo, la importancia de conseguir lechadas tan espesas radica en la protección frente a la corrosión. Cuanto más resistente sea la lechada, menor será su fisuración cuando se tracciona en el bulbo, y por tanto mejor la protección de las armaduras.

Las lechadas para las reinyecciones en los métodos (IR) e (IRS) son más fluidas. Para ellas se emplean dosificaciones agua/cemento del orden de 1.

Pueden emplearse también morteros, que pueden ser útiles para evitar pérdidas de lechada en los taladros.

Salvo en bulbos muy cortos en rocas duras, el fallo del bulbo se producirá por el terreno, y no por la lechada, por lo que en este sentido la resistencia de la lechada no es decisiva.

5.5.- Colocación de cabeza y tesado

Tras el fraguado de la lechada, que puede tardar entre 3 y 7 días en función del cemento, aditivos y dosificación empleada, se procede a la colocación de la cabeza del anclaje y a su tesado.

En los anclajes de barra pasivos se aprieta con una llave la tuerca contra la placa, de forma que la armadura quede tensa desde el primer momento.

Para los anclajes activos se emplean gatos hidráulicos (figura 24).



Figura 24: Detalle de gato de tesado (U&A).

En cada anclaje activo la operación de tesado supone una prueba de carga, aunque sea algo limitada. El procedimiento de tesado se muestra en la figura 25.

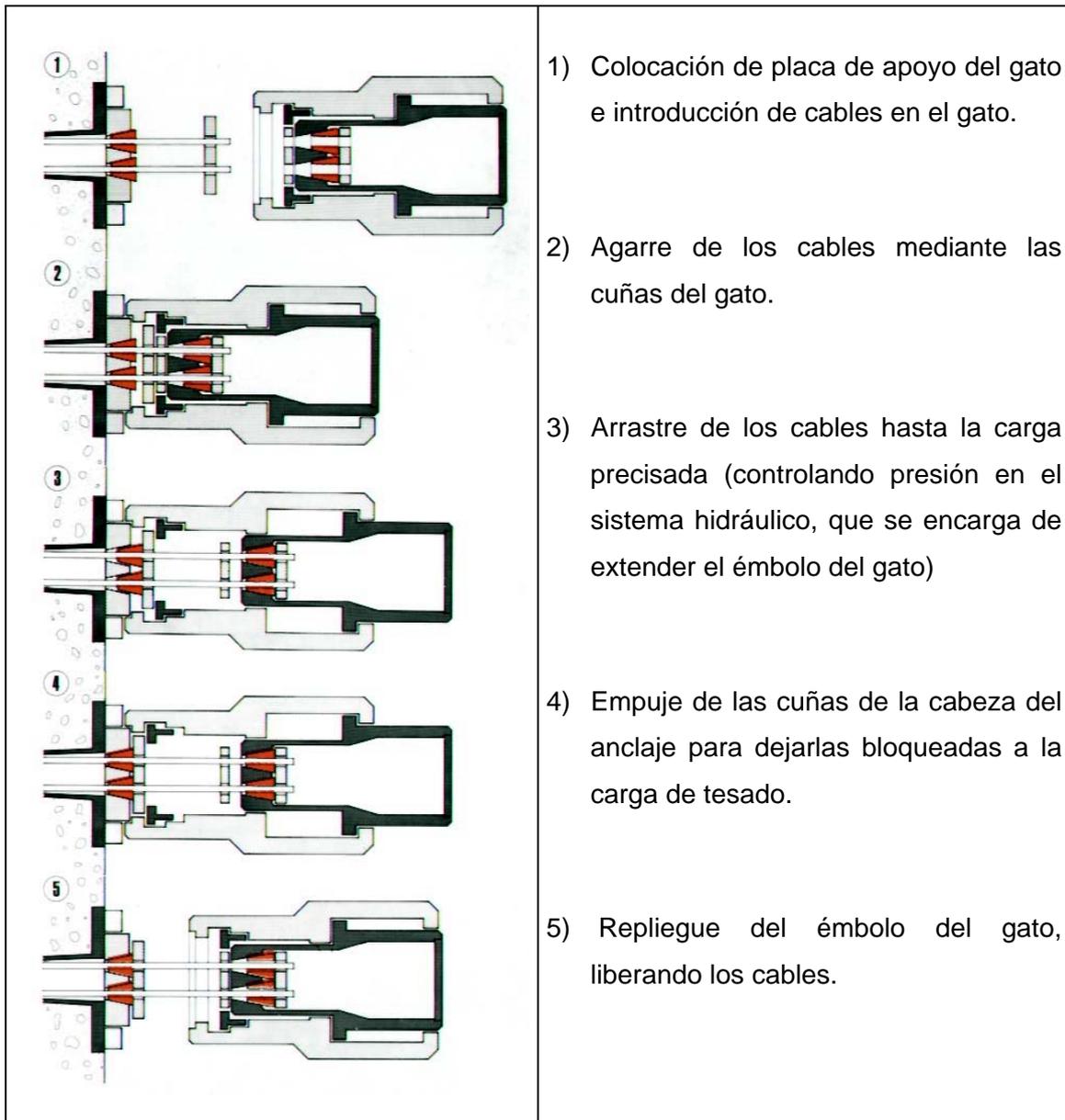


Figura 25: Esquema de tesado de anclaje de cables (tomada de Stronghold)

Por su parte, en la figura 26 se muestra una fotografía del montaje necesario para el tesado de un anclaje de barra. En este caso se emplea un “puente de tesado”, que permite mantener la barra en tensión y apretar manualmente la tuerca contra la placa.

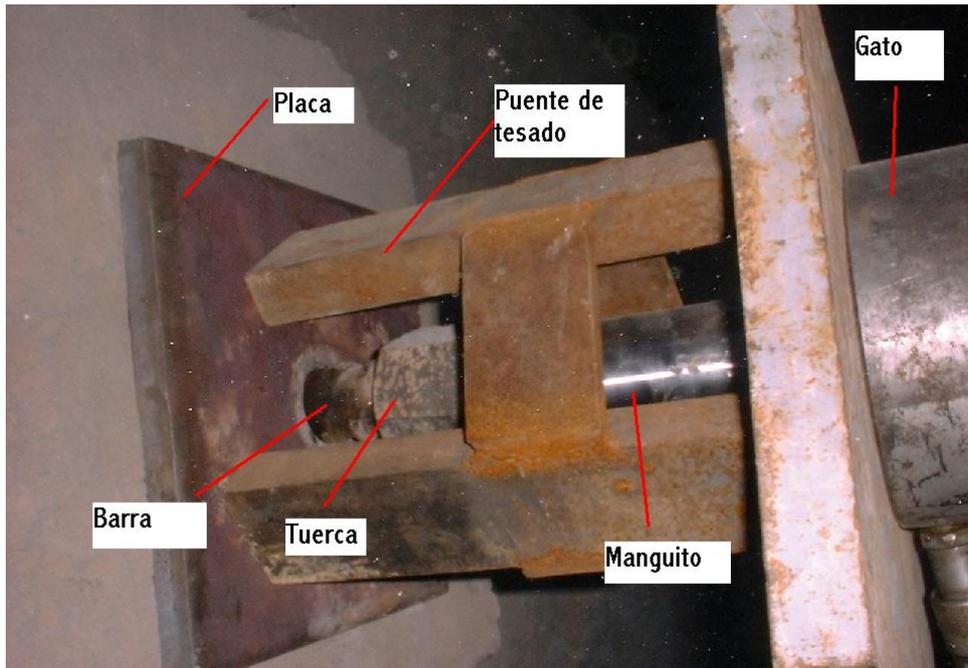


Figura 26: Montaje para tesado de un anclaje de barra (U&A).

Finalmente, en la siguiente figura se muestra un equipo de tesado para anclajes de bulbo múltiple. Concretamente, corresponde a un anclaje de 4 tirantes de 3 cables cada uno.



Figura 27: Montaje para tesado de un anclaje de bulbo múltiple. Cada uno de los gatos tesa un tirante (U&A).

5.6.- Acabados

Los acabados son de la mayor importancia en los anclajes permanentes.

Además de cortar los rabos si es preciso, en los anclajes permanentes se procede a

rellenar con lechada o con un producto anticorrosivo la parte de taladro que pudiera quedar hueca bajo el apoyo de la placa, se coloca la caperuza de protección y sus elementos, y se rellena ésta con algún producto anticorrosión.

6.- DISEÑO DE ANCLAJES

El diseño de anclajes forma parte del cálculo de la estructura o sistema de contención sobre el que se pretenda utilizarlos. De dicho cálculo se obtendrán las fuerzas que los anclajes deberán proporcionar en cada fase de ejecución de la obra o de su vida útil.

En estas líneas se considerará principalmente el diseño de los anclajes a partir de las fuerzas obtenidas en dicho cálculo. No obstante, algunos aspectos del diseño están relacionados con el resto del problema. En los casos en que esto sea así se irán exponiendo las consideraciones a tener en cuenta.

Una vez determinadas las cargas de anclaje necesarias, las variables a definir son al menos las siguientes:

- a) Inclinación y separación entre anclajes. Estructura de reparto.
- b) Tipo de anclaje
- c) Material y sección del tirante
- d) Longitud y diámetro del bulbo
- e) Longitud libre
- f) Otros (condiciones de perforación)

Nuevamente, algunos de estos aspectos están relacionados entre sí y la solución a un determinado problema no suele ser única, por lo que el cálculo es habitualmente iterativo⁷. La solución final deberá compaginar lo mejor posible estas variables tanto desde un punto de vista técnico como económico.

⁷ Por ejemplo, partiendo de la fuerza necesaria, que suele obtenerse por metro lineal de talud o muro, la carga unitaria en cada anclaje, la resistencia de su tirante y la longitud de bulbo serán función de la separación seleccionada.

6.1.- Inclinación y separación entre anclajes. Estructuras de reparto.

6.1.1.- Inclinación

Salvo en aplicaciones particulares como el sostenimiento de excavaciones subterráneas, los anclajes se perforan habitualmente con una cierta inclinación descendente. Los motivos principales son:

- Alcanzar niveles de terreno más profundos, normalmente más resistentes, suficientemente alejados de la estructura y del volumen de terreno a contener, para alojar el bulbo en ellos con la menor longitud de anclaje posible.
- Facilitar el proceso de inyección, evitando la necesidad de obturar la boca del taladro y colocar tubos de salida del aire.
- Alejar la perforación de cimentaciones o estructuras enterradas cercanas.

Resulta inapropiado establecer a priori inclinaciones tipo para los anclajes, dado que éstas dependen de cada problema en particular (estabilización de taludes, arriostramiento de estructuras de contención, contrarrestación de empujes ascensionales de subpresión, etc). Tan sólo en algunas circunstancias simples es posible establecer inclinaciones óptimas teóricas, como es el caso de los deslizamientos en bloque a favor de planos determinados.

No obstante, para los problemas más habituales de contención de laderas y arriostramiento de estructuras de contención, la inclinación quizás más habitual sería de 30°, oscilando normalmente entre 15 y 35°.

En general, sobrepasar en estos casos los 45° de inclinación con la horizontal puede resultar poco efectivo, dado que la componente horizontal de la fuerza de anclaje, habitualmente la de mayor relevancia, se reduce sustancialmente y hace necesario aumentar el número de anclajes. Evidentemente de nuevo, todo ello dependerá de las condiciones particulares del problema en estudio (localización del nivel de terreno en donde se han de alojar los bulbos, cercanía de estructuras, etc).

6.1.2.- Separación

Las separaciones entre anclajes, tanto en horizontal como en vertical, deben analizarse detalladamente en el proyecto.

En lo que respecta a su límite superior (separaciones máximas), se debe considerar que:

- A medida que aumenta la separación disminuye el número total de anclajes necesarios, pero aumenta la carga de trabajo de cada uno de ellos (y su armadura, longitud de bulbo, etc).
- Cuanto más separados se dispongan los anclajes, mayor será la concentración de cargas en la estructura de reparto o en la superficie del talud. Así por ejemplo, si entre los anclajes se disponen vigas de reparto, al aumentar las luces entre apoyos (anclajes) las vigas deberán ser más rígidas y resistentes. Esto mismo es aplicable a todo tipo de muros.
- En el caso de estabilización de taludes, cuando los anclajes se concentran en varias filas muy separadas respecto a la altura del talud, será necesario estudiar las condiciones de estabilidad de posibles superficies de rotura que puedan desarrollarse entre alineaciones de anclajes, tanto en vertical como en horizontal, o por encima de éstas si se colocan sólo próximas al pie del talud.

En cuanto al límite inferior de la separación entre anclajes, el problema principal deriva, además del mayor número de anclajes necesario, de posibles problemas asociados a la interacción entre bulbos. En este sentido, en la práctica suelen adoptarse separaciones mínimas razonables del orden de 1.5 ó 2 metros⁸.

Estas separaciones deberían en principio aumentarse en anclajes de longitud considerable (por ejemplo de más de 25 metros), ya que es frecuente que las perforaciones se desvíen con respecto a la teórica prevista, aumentando lógicamente dicha desviación a medida que aumenta la longitud de la perforación.

También debería aumentarse la separación cuando se empleen anclajes con inyección

⁸ La Norma BS-8081 especifica una distancia mínima entre bulbos de anclaje de 1 m.

repetitiva selectiva, dadas las mayores posibilidades de afección entre bulbos.

Existen no obstante algunas opciones claramente intuitivas para aumentar la separación entre bulbos manteniendo la separación entre las cabezas de anclaje, lo que puede ser especialmente útil en pantallas o muros que requieran una gran fuerza de estabilización y por tanto una gran densidad de anclajes de alta capacidad de carga (figura 28).

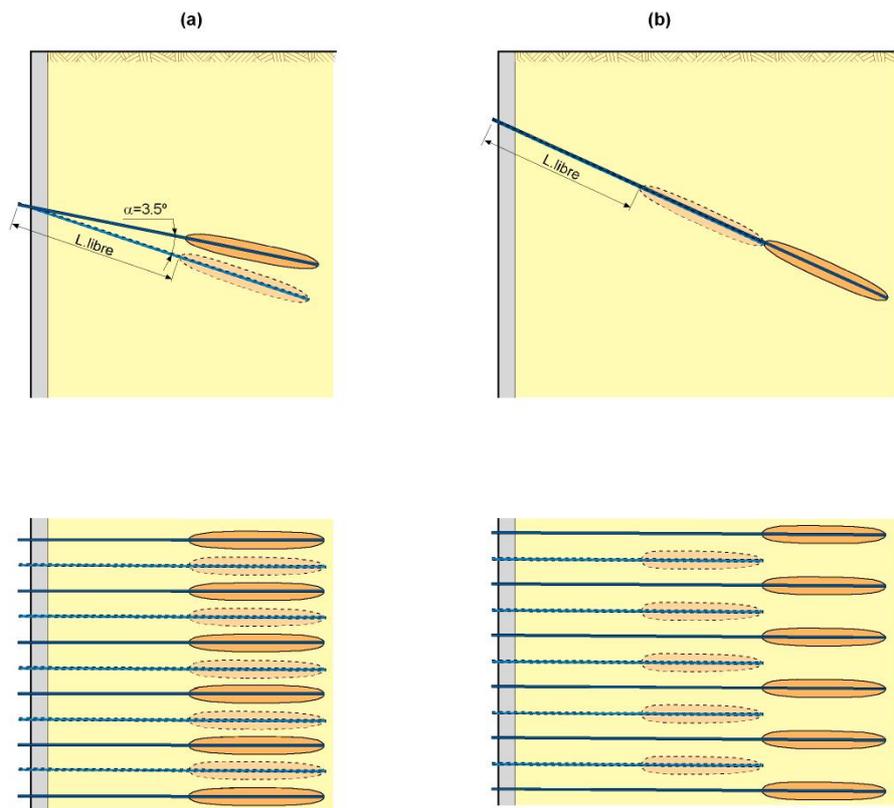


Figura 28: Posibilidades de separación de bulbos (Modificada de Ostermayer (1977))

6.1.3.- Estructuras de reparto

En lo que respecta a la estructuras de reparto en superficie, aunque en la mayoría de los ejemplos anteriores se ha supuesto por simplicidad una pantalla continua, obviamente su configuración y diseño final será función de varios factores, tales como el tipo de terreno, las cargas de anclaje seleccionadas, la separación entre tirantes, el proceso constructivo, etc. Así, dichas estructuras de reparto podrán variar entre unos simples dados de hormigón en el caso de un talud en roca hasta vigas continuas,

paneles o pantallas. En la figura 29 se muestran algunas disposiciones habituales en este sentido, aparte de las pantallas ya comentadas.

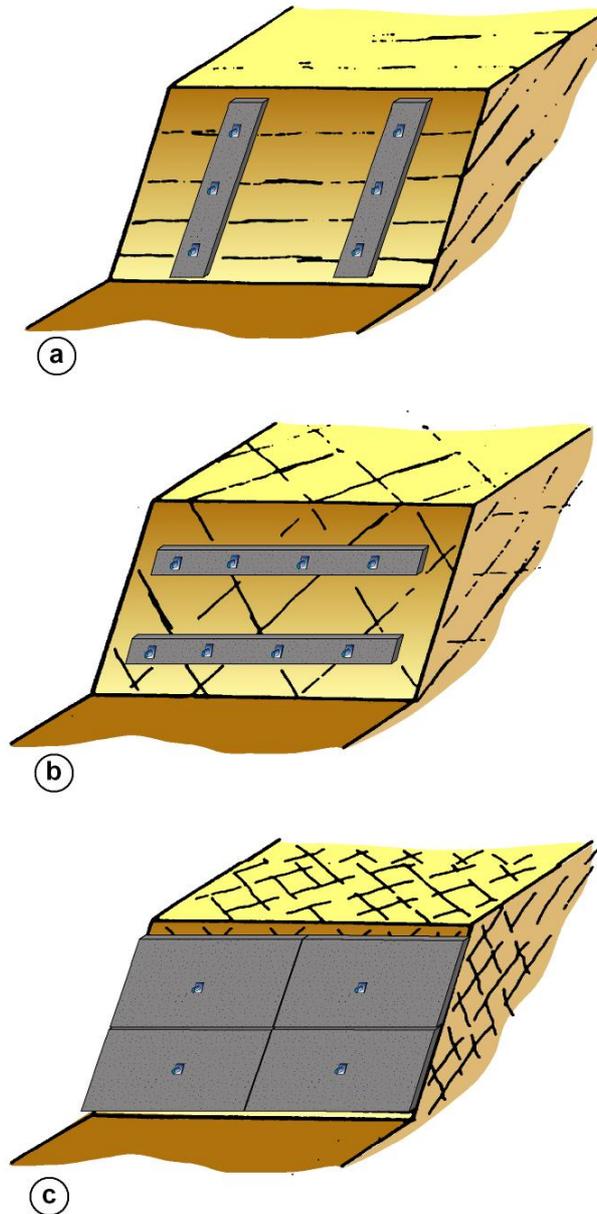


Figura 29: Estructuras de reparto en superficie

6.2.- Material y sección del tirante

Partiendo de la carga de trabajo que debe aportar el anclaje (carga nominal) y del tipo de tirante elegido, es necesario determinar el diámetro de la barra o el número de cables a emplear, para lo cual se adoptan ciertos coeficientes de seguridad respecto al

límite elástico y la carga de rotura del tirante.

Tradicionalmente durante muchos años se acudió a un criterio muy sencillo para determinar el área de acero necesaria, que obedecía a las siguientes premisas:

- En anclajes provisionales, la carga de trabajo no superaría el 75 % del límite elástico. (Factor de seguridad de 1.33).
- En anclajes permanentes, la carga de trabajo no podría superar el 60 % del límite elástico. (Factor de seguridad de 1.66).

En la actualidad se ha abandonado el criterio anterior, quizás en exceso simplista, y se ha pasado al empleo de coeficientes de seguridad parciales, mayorando las acciones (fuerzas) y minorando la resistencia de los materiales. Este procedimiento permite definir los coeficientes de seguridad a adoptar teniendo en cuenta no sólo la duración del anclaje, sino también el tipo y responsabilidad de la obra a ejecutar, así como las posibles consecuencias de un posible fallo del sistema anclado (ver por ejemplo las recomendaciones H.P.9-96).

Para el caso particular de las obras lineales, objeto de estas Jornadas, parece razonable acudir al empleo de los coeficientes propuestos por la Dirección General de Carreteras en su guía de anclajes al terreno, que se aplican de la siguiente forma:

- a) Se mayor la carga nominal del anclaje por un factor de seguridad:

$$P_{Nd} = F_1 P_N$$

Siendo F_1 igual a 1.5 y 1.2 para anclajes permanentes y provisionales respectivamente.

- b) Se comprueba simultáneamente que:

En anclajes provisionales: $P_{Nd} / A_T \leq f_{pk} / 1.25$

$$P_{Nd} / A_T \leq f_{yk} / 1.10$$

En anclajes permanentes: $P_{Nd} / A_T \leq f_{pk} / 1.30$

$$P_{Nd} / A_T \leq f_{yk} / 1.15$$

Siendo: A_T = área del tirante

F_{pk} = límite de rotura

F_{yk} = límite elástico

Se puede comprobar que según estos criterios los tirantes han de trabajar como máximo al 75 y 58 % de su límite elástico para situaciones provisionales y permanentes respectivamente (coeficientes de seguridad de 1,33 y 1,72), de manera prácticamente coinciden con el criterio tradicional.

En lo que respecta a las recomendaciones H.P.9-96, los coeficientes de seguridad varían aproximadamente, dependiendo de la situación, entre 1,4 a 1,8 para anclajes provisionales, y entre 1,6 y 2,0 para permanentes, evidentemente más conservadores que los anteriores.

A título orientativo, aplicando los coeficientes de seguridad de la Dirección General de Carreteras, las tablas 3 y 4 recogen las capacidades de carga de los anclajes de barras y cable más habituales tanto para situación provisional como permanente.

TABLA 3: Cargas en servicio para algunas barras habituales (expresadas en kN)

Diámetro (mm)	Acero convencional (500/550)		Acero tipo 900/1030	
	Provisional	Permanente	Provisional	Permanente
25	184	142		
26.5			372	288
32	302	233	543	420
36			687	531
40	471	364		
50	737	570		

TABLA 4: Cargas en servicio para anclajes de cable (expresadas en kN)

nº de cables	Provisional	Permanente
2	344	266
3	515	398
4	687	531
5	859	664
6	1031	797
7	1202	930
8	1374	1063
9	1546	1195
10	1718	1328
11	1889	1461
12	2061	1594

NOTA: Cables tipo 1860 S7 15.20 (0.6 pulgadas)

6.3.- Tipo de anclaje

6.3.1.- Elección de tirante: barra o cables

Existen algunas diferencias básicas entre ambos tipos de anclaje, que para cada problema a estudiar podrán presentar ventajas o inconvenientes específicos y podrán por tanto decantar la elección por un tipo u otro:

- Las barras presentan mayor rigidez axial. Dado que el límite elástico de las barras es 2 a 3 veces inferior al de los cables, (según el tipo de barra utilizada), la sección de acero necesaria para una misma capacidad de carga es entre 2 y 3 veces superior en las barras que en los cables.
- Las barras poseen una cierta rigidez transversal, lo que les permite soportar esfuerzos de cortante y flexión, mientras que los cables son muy flexibles y se deforman transversalmente sin apenas recibir carga.
- La carga alcanzable con anclajes de cable es sustancialmente superior a la de los bulones (ver figuras anteriores).
- La ejecución de los anclajes de barra es algo más sencilla, ya que los diámetros de perforación son menores y el montaje del anclaje más simple.

A efectos prácticos, puede indicarse que:

- Para anclajes pasivos se emplean barras, ya que por su mayor rigidez axial requieren menor deformación para entrar en carga. Además, en muchas de las aplicaciones de los anclajes pasivos se suele requerir la posibilidad de resistir esfuerzos cortantes y momentos flectores (cosido del terreno o cosido de cuñas), por lo que también en estos casos están más indicadas las barras.
- Por el contrario, en aplicaciones en las que el terreno pueda sufrir movimientos importantes se deben emplear anclajes de cables.
- Para cargas de más de 400 ó 450 kN suele ser más económico el empleo de cables que el empleo de las barras de mayor diámetro. La economía es aún mayor si la longitud necesaria de anclaje supera los 10 ó 12 metros, ya que el coste de la cabeza, que repercute en el coste por metro de anclaje, es mayor en los anclajes de cable.
- Si la capacidad de carga lo permite, las barras pueden ser más económicas para longitudes de anclaje hasta 10 ó 12 m.

6.3.2.- Elección del sistema de inyección

La selección del método de inyección depende en primer lugar del tipo de terreno donde se fije el bulbo, y en segundo lugar de la capacidad de carga requerida para el anclaje.

El uso de inyecciones repetitivas tipo (IR) o (IRS) mejora la adherencia del bulbo con el terreno, por lo que están indicadas en los suelos de peores características geotécnicas, en los que la adherencia de un bulbo “convencional” conseguido mediante inyección única (IU) puede no ser suficiente.

El término “suficiente” se refiere, como se describe adelante, a que la longitud de bulbo necesaria para transmitir las cargas resulte demasiado larga, ya que a medida que ésta aumenta puede disminuir su eficiencia, pudiendo llegar a una situación en la que apenas se consiga aumento de carga transferida al aumentar la longitud de bulbo.

Los terrenos que menor adherencia aportan en la formación de un bulbo son los

suelos cohesivos de consistencia media o baja. Es en este tipo de suelos en los que se emplea más habitualmente el sistema (IRS).

También son convenientes los sistemas de reinyección en terrenos que no presenten garantías de que la inyección rellene la zona de bulbo en toda su longitud. Tal es el caso de los suelos granulares flojos o de las rocas con fracturas abiertas u oquedades. Para estos casos suele ser suficiente emplear el método de inyección repetitiva (IR).

Hay que indicar que la mejora conseguida al emplear las inyecciones repetitivas es menor en suelos más duros o densos, por lo que pueden no ser un buen método si se pretende reducir longitudes de bulbo pensando en aumentos de la adherencia.

6.4.- Longitud y diámetro del bulbo

6.4.1.- Procedimiento habitual de cálculo

Las dimensiones geométricas del bulbo han de garantizar una superficie de contacto lechada-terreno suficiente para transmitir las cargas desde el anclaje al terreno con un adecuado coeficiente de seguridad (más adelante se matizará este concepto). Es decir, las dimensiones del bulbo se determinan para que se verifique el estado límite último de arrancamiento del anclaje.

Para ello, el método de cálculo más extendido consiste en suponer una tensión de transferencia, tensión tangencial o simplemente adherencia, uniforme en toda la superficie lateral de contacto bulbo-terreno, que se opone al arrancamiento del anclaje cuando éste se pone en carga.

Con este criterio, los métodos de cálculo para obtener las dimensiones del bulbo se basan en formulaciones del tipo siguiente (se utiliza la nomenclatura de la guía de la D.G.C.):

$$P_{Nd} / (\pi D_N L_b) \leq a_{adm}$$

Siendo: P_{Nd} : carga nominal mayorada (introducida en el apartado 6.2.-)

D_N : Diámetro nominal o de perforación del bulbo

L_b : Longitud del bulbo

a_{adm} : adherencia o tensión de transferencia admisible en el contacto lechada-terreno.

El diámetro del bulbo se selecciona de forma que el anclaje pueda ser alojado en la perforación, con el recubrimiento suficiente. Como ya se ha indicado, para una estimación de los diámetros de perforación habitualmente empleados, puede consultarse la guía de anclajes de la Dirección General de Carreteras.

Es importante resaltar que el diámetro de perforación (o diámetro nominal) puede ser menor en la zona de bulbo que en el comienzo de la perforación. Esto ocurre cuando se perfora con revestimiento una parte del anclaje, y al llegar a un terreno más estable (roca por ejemplo) se continua la perforación sin revestimiento. Conviene pues prever esta circunstancia, que puede dar origen a indefiniciones en la ejecución.

Establecido el diámetro nominal del bulbo, queda por determinar la longitud del bulbo, para lo cual es necesario estimar un valor de la tensión admisible de transferencia.

6.4.2.- Adherencia admisible en el contacto lechada terreno

La adherencia en el contacto lechada terreno es un parámetro difícil de estimar a priori, ya que depende no sólo del terreno, sino de la técnica de ejecución, principalmente del sistema de inyección, pero también de la técnica de perforación. El diámetro y la longitud del bulbo influyen también en la adherencia “efectiva” que se obtenga.

Así pues, los métodos de estimación de la adherencia bulbo-terreno son por necesidad empíricos.

Se puede hablar de tres métodos para la obtención de este parámetro, ordenados según su idoneidad:

- a) Obtención “directa” mediante “ensayos de investigación” en anclajes ejecutados para ser ensayados a escala real mediante su puesta en carga.
- b) Uso de valores empíricos existentes en la bibliografía técnica.
- c) Uso de formulaciones que emplean parámetros del suelo (ángulo de rozamiento, cohesión, presión efectiva,) y de la ejecución (presión de inyección).

El primer método suele llevarse a cabo sólo en fase de obra, siendo lo más habitual acudir al segundo en fase de proyecto, dejando en todo caso indicada la conveniencia u obligación de realizar en obra ensayos previos para confirmar las hipótesis de diseño.

Numerosas publicaciones contienen listados más o menos completos de los valores empíricos de la adherencia a emplear en este tipo de diseño en función del tipo de terreno. En este sentido resulta especialmente destacable la aportación de Bustamante, M (1981), que presentó un método de cálculo basado en los resultados de 120 ensayos de arrancamiento a escala real ejecutados sobre anclajes, micropilotes y pilotes inyectados. A partir de dichos resultados, Bustamante (op. cit.) propuso un total de cuatro ábacos con valores de la adherencia última (sin coeficiente de seguridad) para distintos tipos de terreno, dependiendo del sistema de inyección y de la resistencia del terreno. Este método es el que recoge la norma francesa.

Otros ábacos disponibles en la actualidad son los recogidos en la guía de la D.G.C., que aunque sin duda habrán sido establecidos teniendo en cuenta los de Bustamante, presentan algunas diferencias.

Con el fin de comparar ambos criterios, se han representado en un mismo gráfico los ábacos de Bustamante y los de la D.G.C. Hay que resaltar sin embargo que la comparación no es inmediata, ya que:

- Bustamante emplea un “diámetro medio de bulbo”, cuyo valor es el diámetro de la perforación multiplicado por un factor (α) que depende del terreno y de la técnica de inyección. En otros métodos esta corrección no se introduce, sino que se incorpora directamente en el valor de la adherencia.
- Bustamante propone rangos para el factor (α) distintos para una misma curva de un mismo ábaco. Por este motivo se han representado los valores máximos y mínimos que se obtendrían aplicando los factores propuestos.
- Los coeficientes de seguridad aplicados posteriormente al pasar del valor último o límite al valor admisible son diferentes en cada método. Estos coeficientes no son tenidos en cuenta en la comparación, sino que se comparan las adherencias últimas propuestas. Los coeficientes de

seguridad son los siguientes en cada método:

	Método Bustamante	Método D.G.C.
Anclajes provisionales	1,800	1,740
Anclajes permanentes	2,000	2,475

Nota: los valores de la D.G.C. son el producto del coeficiente de mayoración de cargas y el de minoración de la adherencia.

- Los procedimientos de inyección denominados por Bustamante (IGU) e (IRS) se corresponden con los que en estas líneas y en la publicación de la D.G.C., se han denominado (IU) e (IRS).
- No se han representado las curvas correspondientes al sistema de inyección (IR), que se recoge en la guía de la D.G.C. Estas curvas dan un valor de adherencia intermedio entre los otros sistemas de inyección.
- Las correlaciones entre la presión límite del ensayo presiométrico, y el SPT o la resistencia a compresión simple, son las dadas por la D.G.C.

Teniendo en cuenta las apreciaciones anteriores, las figuras 30 a 33 recogen la comparación realizada.

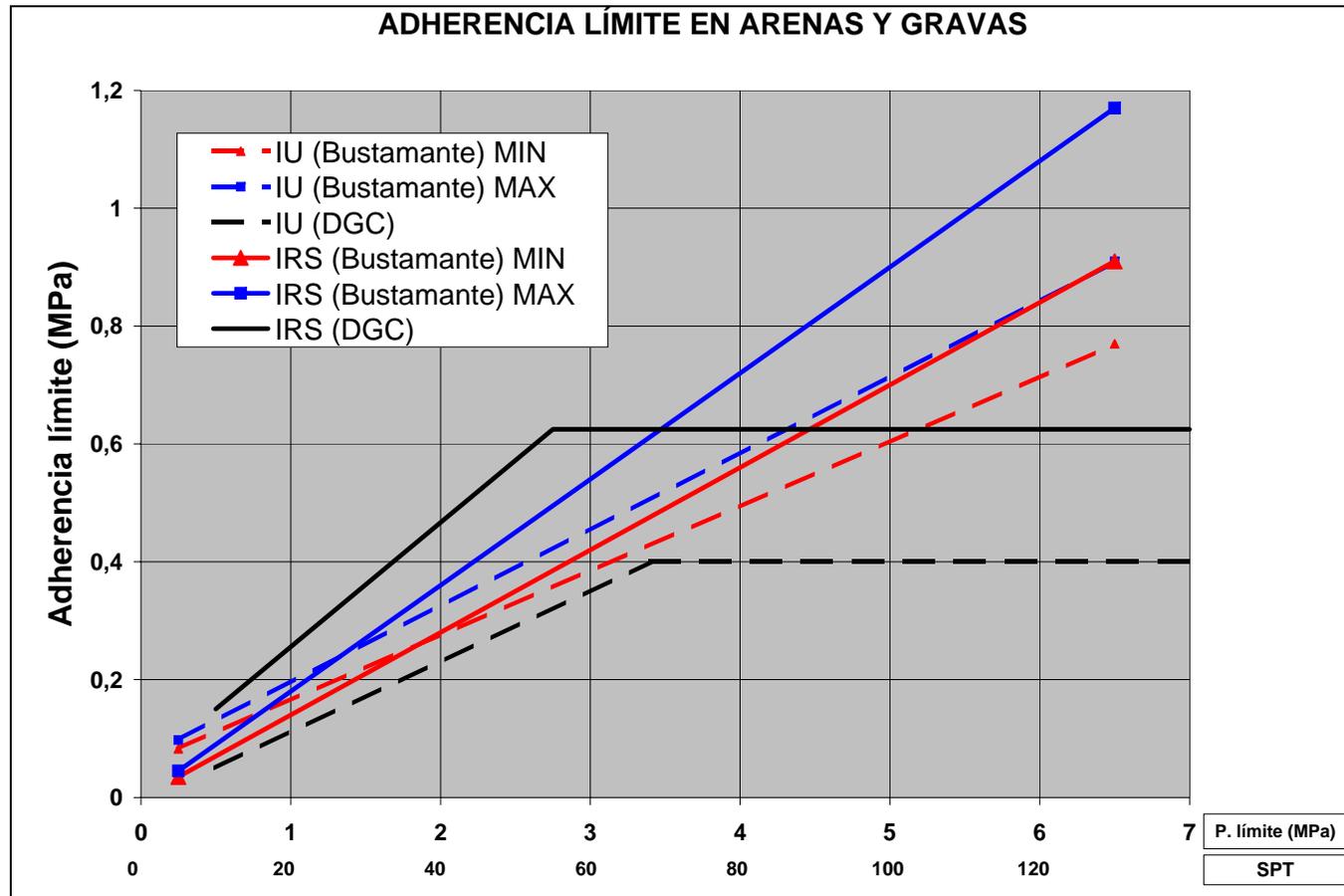


Figura 30: Adherencia límite en arenas y gravas según Bustamante y la D.G.C.

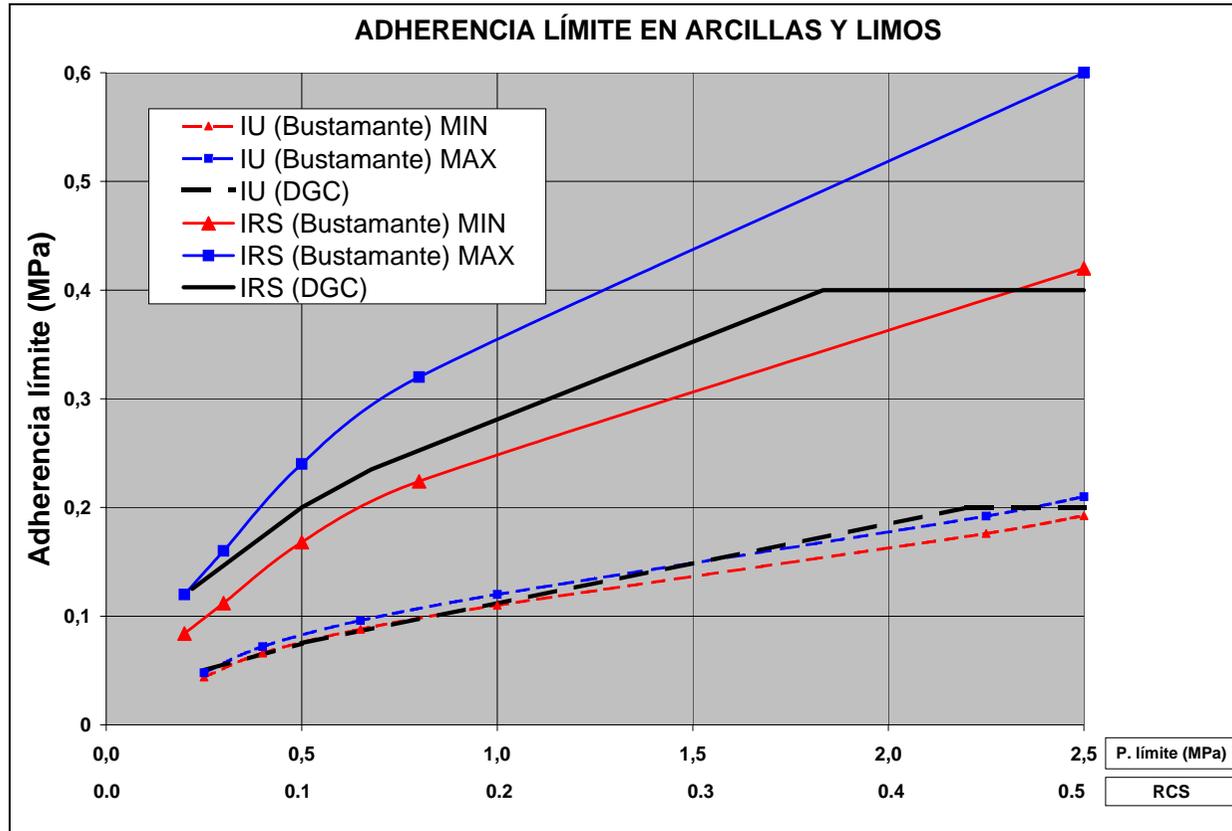


Figura 31: Adherencia límite en arcillas y limos según Bustamante y la D.G.C.

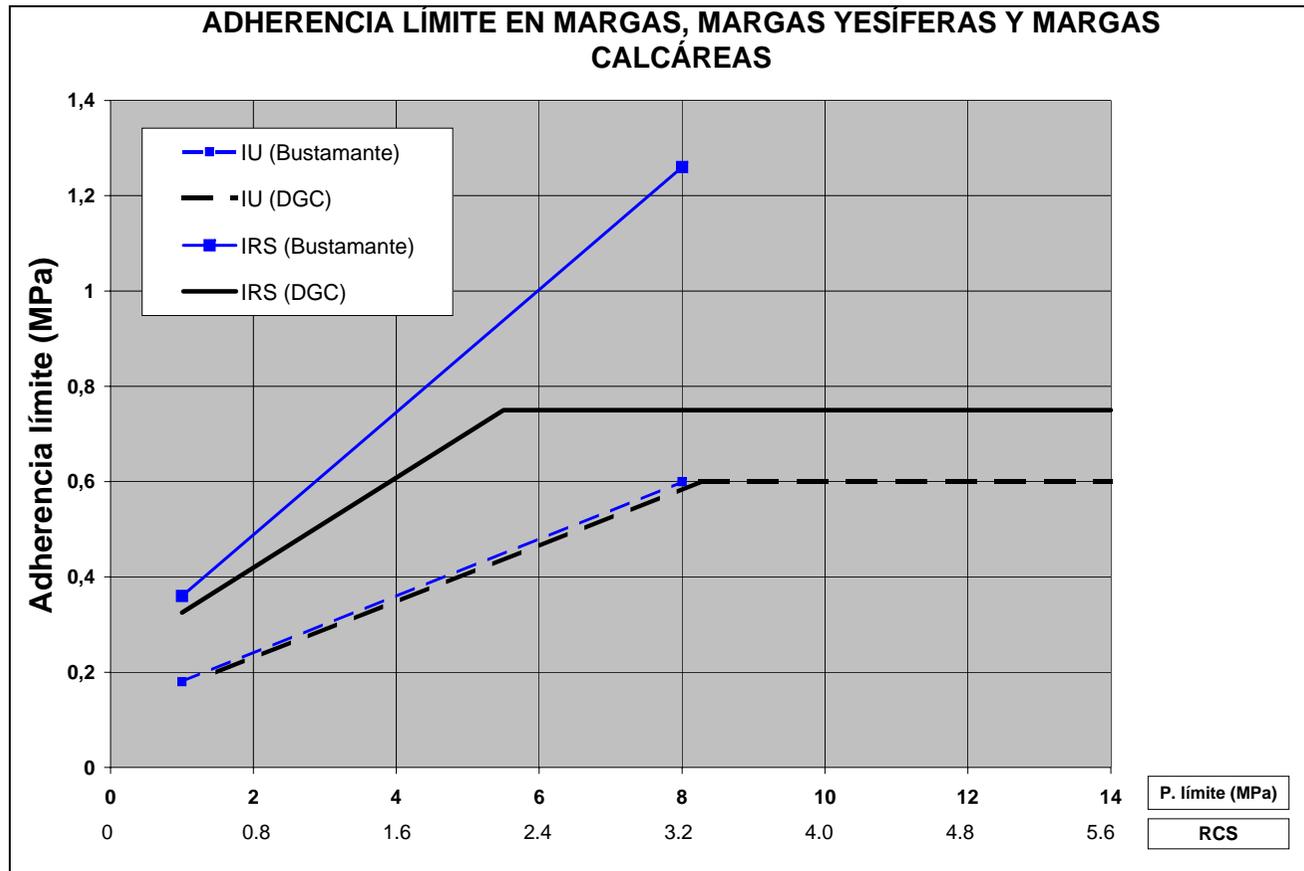


Figura 32: Adherencia límite en margas según Bustamante y según la D.G.C.

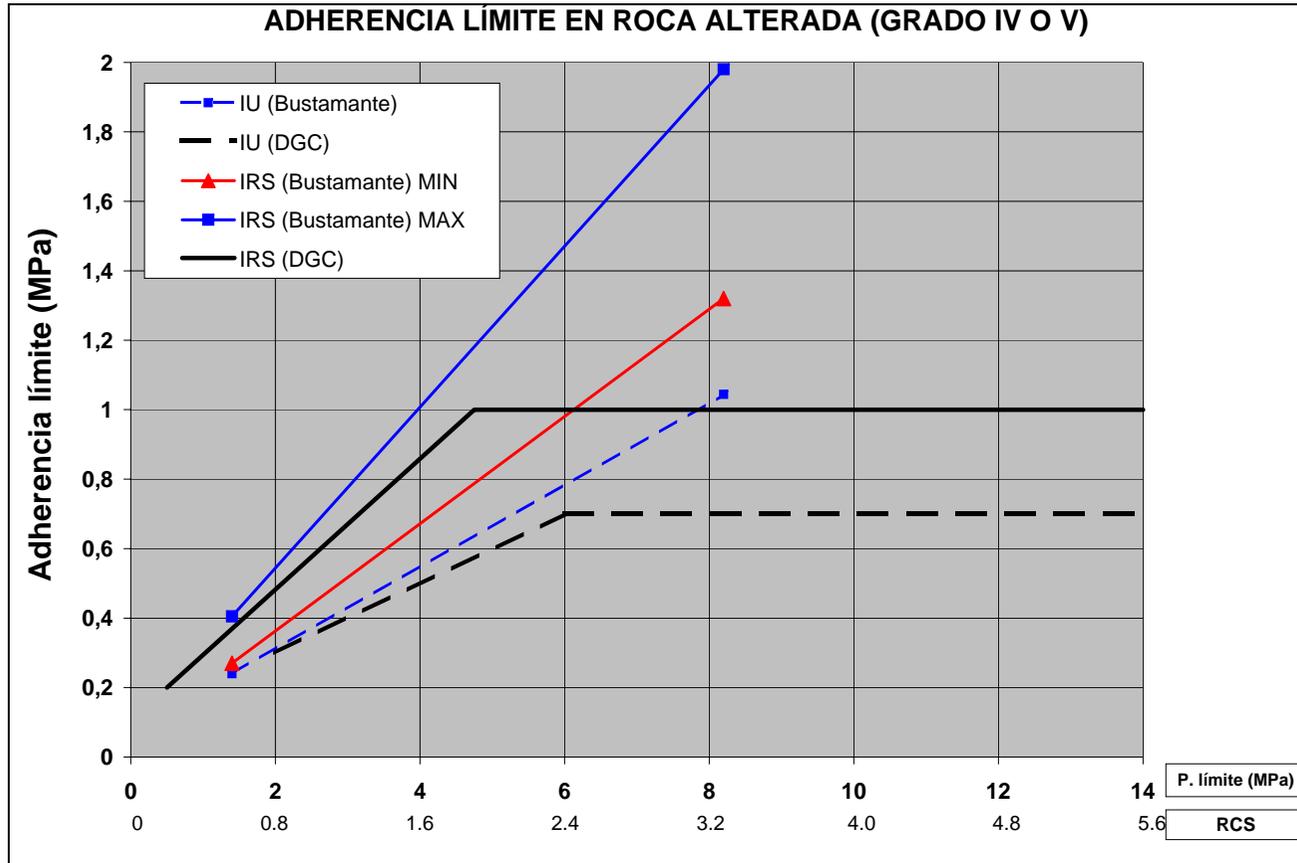


Figura 33: Adherencia límite en roca alterada según Bustamante y según la D.G.C.

A la vista de los gráficos anteriores se pueden realizar los siguientes comentarios:

- Los valores propuestos para anclajes con inyección (IU) resultan similares con ambos criterios para los primeros rangos de resistencia del terreno. Para resistencias elevadas el criterio de la D.G.C. adopta un valor límite.
- En el caso de anclajes con inyección (IRS) los dos criterios difieren algo más. En principio, parece razonable emplear a efectos prácticos los valores propuestos por la D.G.C., basados en las técnicas de inyección empleadas en nuestro país y en la experiencia de las empresas de A.E.T.E.S.S.
- En general las adherencias establecidas por ambos criterios son conservadoras, ya que se trata simplemente de cifras orientativas. Ello quiere decir que mediante la ejecución de pruebas de carga en obra pueden, en general, conseguirse economías en el diseño de los bulbos.
- Las adherencias en gravas y en arenas se incluyen en un solo grupo y ábaco. Sin embargo es conocido que, en general, en gravas las adherencias reales suelen ser mayores que en arenas, por lo que se encuentran penalizadas en los ábacos. A modo de ejemplo, la A.T.E.P. propone adherencias últimas en gravas entre 0.6 y 1.0 MPa (inyección única), siempre muy por encima del tope de 0.4 MPa propuesto por la D.G.C.
- Las adherencias para inyección (IRS) en arcillas o limos de baja plasticidad pueden resultar conservadoras con ambos criterios, pues en la práctica no es infrecuente sobrepasar considerablemente las que se conseguirían con inyección única.
- En suelos cohesivos, incluyendo materiales preconsolidados, la plasticidad juega un papel importante en las adherencias, siendo menores cuanto mayor es la plasticidad y cuanto menor es el índice de consistencia. Este aspecto singular no se contempla en los gráficos anteriores. Así, en materiales como las Peñuelas de Madrid, o las Arcillas Azules del Guadalquivir los valores de los ábacos podrían estar más ajustados con la experiencia habitual, e incluso no ser conservadores.

Para completar el escenario de referencia, quedarían por analizar las rocas relativamente sanas, con grado de alteración III o inferior, si bien son los terrenos que menos problemas suelen presentar, pues proporcionan adherencias muy elevadas. En estas rocas la correlación más extendida obedece a la siguiente expresión:

$$\text{Adherencia límite} = 0.1 q_u \quad (\text{donde } q_u \text{ es la compresión simple})$$

Debe tenerse en cuenta que si la roca es muy dura, el factor limitativo puede recaer en la resistencia a compresión simple de la lechada, que no suele superar los 20 MPa.

Otros valores proporcionados por publicaciones españolas para la adherencia límite en rocas son los siguientes (en MPa):

- Según la D.G.C.:
 - Granitos, basalto, calizas: 1.0 – 5.0
 - Areniscas, esquistos, pizarras: 0.7 – 2.5
- Según la A.T.E.P.:
 - Roca dura (granito, gneis, calizas, etc) 1.0 – 2.5
 - Roca blanda (margas, esquistos, pizarras, etc) 0.3 – 1.0

6.4.3.- Valores máximos y mínimos de la longitud de bulbo

La longitud mínima de bulbo se limita en la mayoría de las publicaciones especializadas a unos 3 m.

A efectos prácticos, longitudes tan cortas son sólo posibles en anclajes de poca capacidad de carga (barras de 25 o 32 mm) perforados en roca. Aun así pueden plantear problemas en algunos casos, ya que cualquier anomalía que afecte a un tramo pequeño del bulbo (proceso de ejecución, características previstas del terreno, etc.), puede suponer una reducción importante de la carga de trabajo prevista, esto es, puede afectar a un porcentaje considerable de la longitud total del bulbo.

Finalmente, en lo que respecta a la longitud máxima de bulbo, ésta se encuentra limitada en algunas publicaciones, como la normativa británica, que la establece en 10 metros. El motivo de esta limitación se describe en el siguiente apartado.

6.4.4.- Comportamiento de los bulbos de anclaje

Como se ha indicado anteriormente, a efectos de cálculo es habitual realizar la hipótesis de que la tensión de transferencia es uniforme a lo largo del bulbo, por lo que la carga última frente al arrancamiento se considera proporcional a la longitud de éste (figura 34).

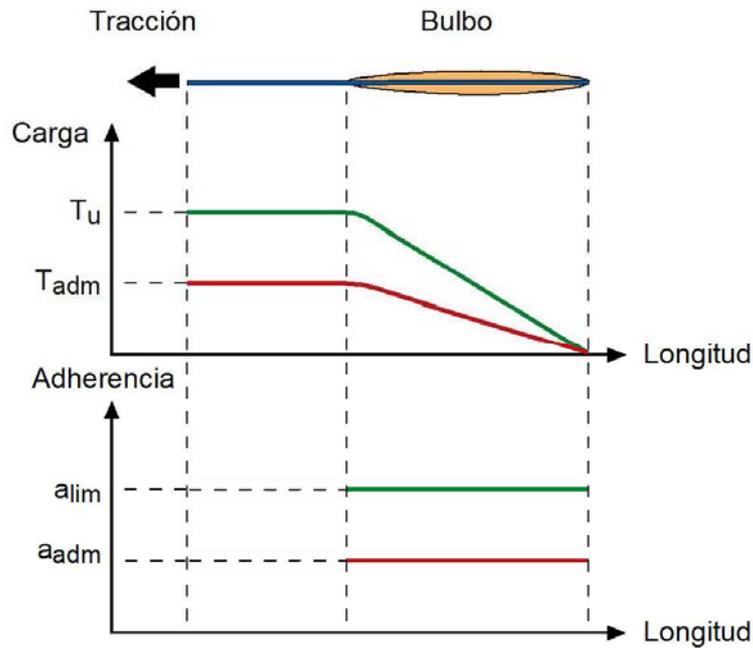


Figura 34: Distribuciones empleadas para la transferencia de la carga al terreno

Sin embargo, esta hipótesis simplificadora puede no ser cierta, salvo en el caso de terrenos flojos o blandos.

Así por ejemplo, Ostermayer (1974) indica que el incremento de capacidad de carga de un anclaje se reduce a medida que la longitud de bulbo aumenta, llegando a la conclusión de que las longitudes de bulbo más económicas se encuentran entre 6 y 7 m.

Ahondando en este aspecto, en la figura 35 se muestra en ábaco de Ostermayer y Scheele (1977) para la determinación de la carga última de anclajes embutidos en arenas y gravas en función de la longitud del bulbo.

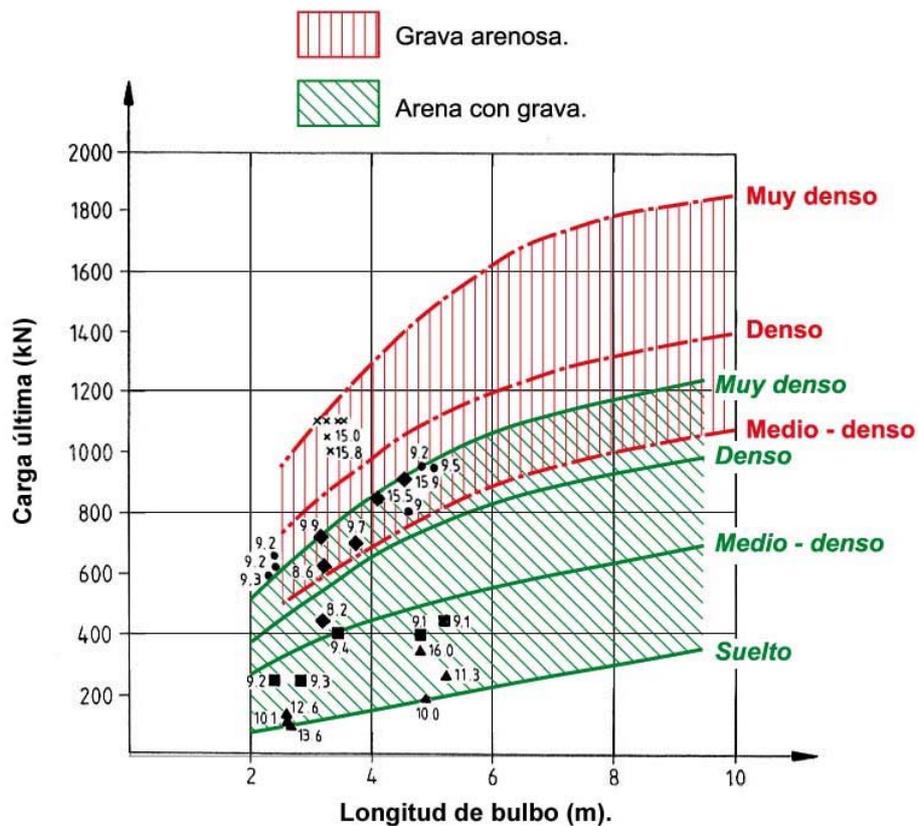


Figura 35: Carga última de adherencia según longitudes de bulbo (Ostermayer y Scheele, 1977)

Como puede apreciarse en la figura, en los terrenos de mayor densidad relativa los autores citados proponen una reducción paulatina del incremento de resistencia con la longitud de bulbo, que tiende finalmente a una asíntota horizontal. Es preciso observar no obstante que, en realidad, los datos reales incluidos en el gráfico corresponden a ensayos con bulbos menores de 6 m, y que la tendencia de dichos datos no refleja realmente la disminución propuesta en la relación capacidad de carga/longitud de bulbo.

En contraste, Bustamante (1981) señala que en los 120 los ensayos por él analizados no se observaron caídas particulares en la adherencia incluso para las mayores longitudes de bulbo ensayadas (18 m), razón por la cuál no propone reducciones de la misma.

El problema planteado resulta ciertamente complejo, dado que la adherencia terreno-bulbo depende numerosos factores, tales como la relación entre los módulos de deformación de la armadura, la lechada y el terreno, así como del diámetro del anclaje.

Hay que considerar además los posibles movimientos relativos entre el bulbo y el terreno, y su distribución. En este sentido, para cargas de tracción habituales en los anclajes de cable, el alargamiento viene a ser de unos 5 mm por cada metro de longitud de cable. Si la adherencia límite a lo largo del bulbo fuese uniforme, la carga total recibida por el cable en la zona de bulbo adoptaría la forma lineal mostrada en la figura 30 anterior, reduciéndose progresivamente desde el extremo proximal hacia el distal, en donde se anularía. En estas condiciones, en un bulbo de 6 m el alargamiento medio del cable sería de 15 mm. Obviamente esta deformación puede producir deslizamiento o rotura en la superficie del bulbo.

Hay que señalar por último que, añadiendo algo más de complejidad al problema y consideraciones teóricas aparte, en realidad no se conoce bien qué ocurre exactamente en el terreno circundante a un bulbo de anclaje, cuál es su alteración al perforar, el recorrido de tensiones al que se somete, la influencia de la rugosidad de la perforación, de la presión de inyección, etc.

De forma general e intuitiva, el proceso de carga de un bulbo podría ser el siguiente:

- Al iniciar la carga, la parte más próxima del bulbo (proximal) recibe y concentra la carga, mientras que la parte distal permanece sin recibir carga, pues no llega a deformarse.
- A medida que la carga aumenta, mayor es la longitud de bulbo que trabaja, pero se siguen concentrando las cargas en la proximal.
- Con mayores aumentos de carga, la tensión última puede alcanzarse (tanto en el contacto lechada-terreno como en el contacto armadura-lechada), produciéndose deslizamiento en la zona proximal, que a su vez podría dar lugar a una disminución de la tensión de transferencia hacia un valor que podríamos llamar residual. Al ocurrir esto, se moviliza algo más la parte más alejada, recibiendo el exceso de carga que no ha podido ser absorbida en la zona proximal.
- Siguiendo con el proceso, nuevos aumentos de carga producirían nuevos deslizamientos (deslizamiento progresivo) y mayor redistribución de carga hacia la zona distal del bulbo.

A modo de ejemplo, la figura 36 (Müller, 1966) muestra un ensayo de carga en un

anclaje en roca que cuenta con su armadura instrumentada en varios puntos mediante bandas extensométricas (strain-gauges), a través de las cuáles puede estimarse la distribución de carga a lo largo del bulbo.

La figura muestra en el lado izquierdo el bulbo de anclaje y la situación de las bandas de medida, situadas como puede apreciarse con separaciones de 1,85 m. La zona proximal del bulbo se sitúa en la zona superior de la figura. En el gráfico se representa la deformación de cada banda (proporcional a la tracción en el cable) para 4 escalones sucesivos de carga de 50, 100, 150 y 185 toneladas.

Como puede observarse, en los 3 primeros escalones de carga se movilizan sólo los 5.5 primeros metros de bulbo (sólo las tres primeras bandas). Además, en los escalones de 100 y 150 toneladas se puede observar que la distribución de tracciones no es lineal. Ambas observaciones muestran que la adherencia movilizada no resulta uniforme.

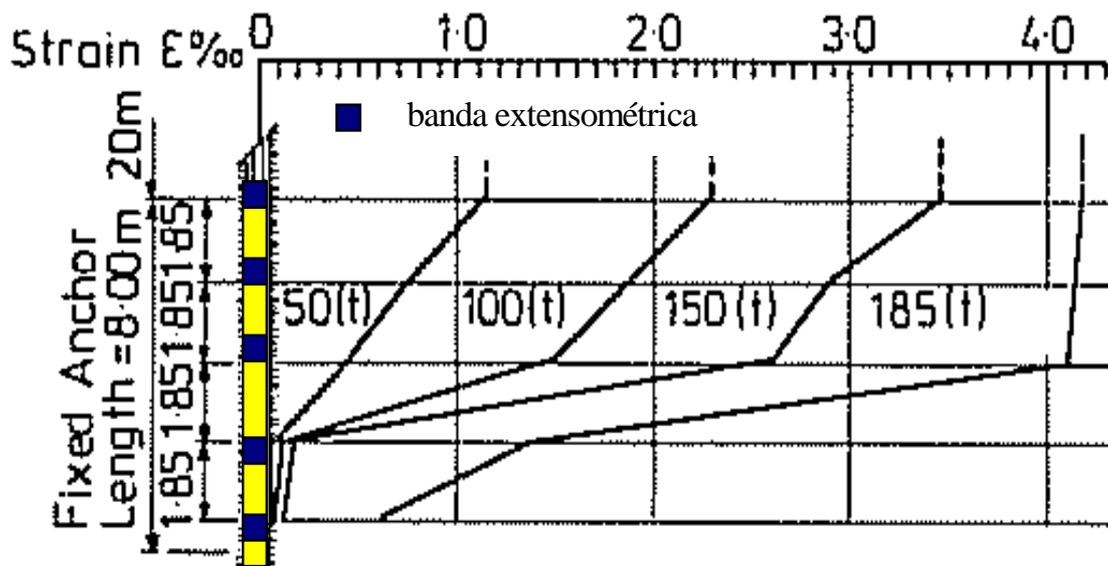


Figura 36: Deformación en bulbo en roca para ensayo con varios escalones de carga Müller. 1966: Tomado de Hanna, T.H.)

En el último escalón, de 185 toneladas, la transmisión de carga bulbo-terreno se concentra en la mitad distal, mientras que la mitad proximal parece haber “despegado”, esto es, haber deslizado completamente y perdido su adherencia con el terreno (su deformación unitaria (carga) es uniforme e igual a la de la longitud libre).

Un segundo ejemplo de distribución de tensiones y cargas a lo largo de un bulbo de

anclaje se recoge en la figura 37 (Alonso,E. et al, 1996). En este caso se trata de un ensayo de carga sobre un micropilote vertical trabajando a tracción, cuyo bulbo se sitúa entre 15 y 27,50 m de profundidad. (longitud de 12,50 m).

En el gráfico de la derecha se representa la tensión de transferencia medida a lo largo del bulbo para diversos escalones de carga, obtenida también a partir de las deformaciones de una serie de bandas extensométricas. En el gráfico de la izquierda se muestra la distribución de las cargas de tracción resultantes.

Como puede comprobarse, en todos los escalones de carga realizados apenas se moviliza poco más que la mitad proximal del bulbo, esto es, unos 7,50 m. Se observa claramente la no uniformidad de la adherencia, cuyos valores máximos se concentran en la zona proximal. Finalmente, en este caso no se aprecia “despegue” del bulbo.

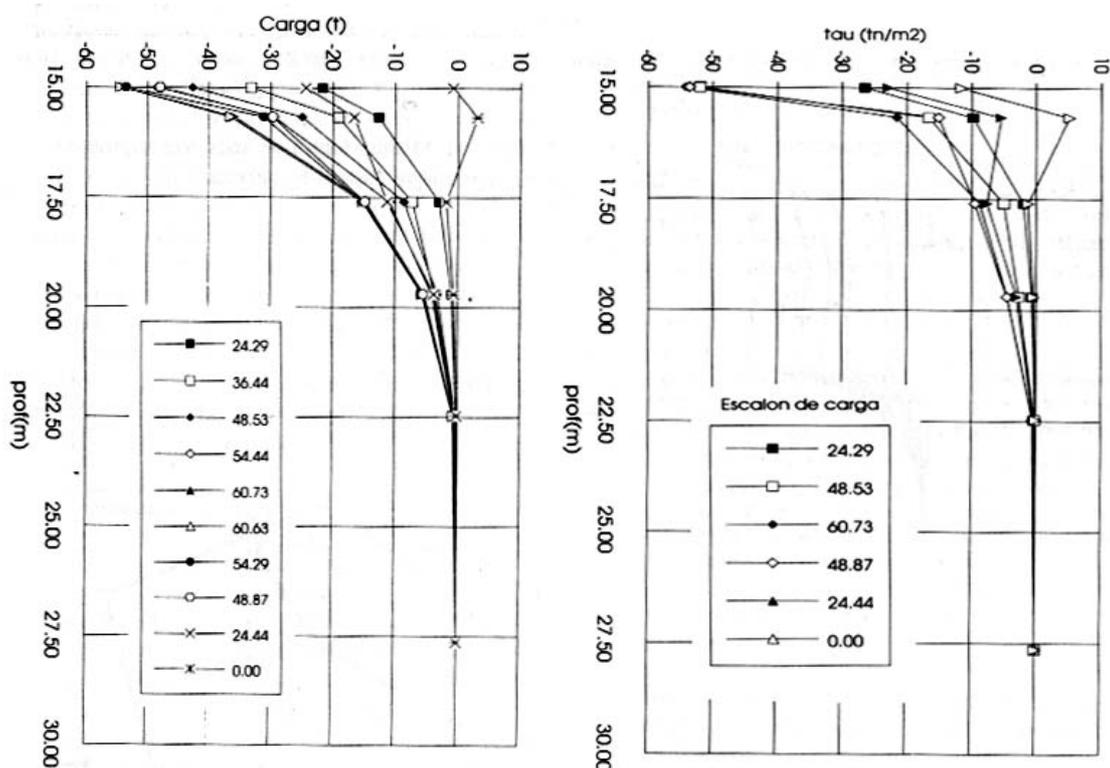


Figura 37: Distribución de carga y tensión de transferencia en micropilote a tracción (Alonso,E. et al, 1996)

Diversos autores, como Casanovas (1989) o Barley (1975) han propuestos métodos empíricos para considerar la no linealidad del bulbo, adoptando para ello “longitudes efectivas” a partir de las longitudes reales de bulbo, o empleando un factor de

eficiencia menor que la unidad. En la actualidad estos métodos no se emplean en la práctica diaria (salvo para justificar el empleo de anclajes de bulbo múltiple), pero pueden ser útiles para analizar resultados de ensayos de carga e intentar extrapolarlos a casos en los que se empleen longitudes de bulbo diferentes, especialmente si son mayores.

Como conclusiones principales cabe señalar:

- Parece razonable recomendar que en el diseño de anclajes se considere con precaución la aplicación de hipótesis de adherencia uniforme cuando las longitudes de bulbo previstas sean importantes (más de 10 ó 12 metros).
- Si se desea evitar acudir a estas longitudes, existen varias posibilidades. En primer lugar, es recomendable siempre adoptar mayores diámetros de perforación. Además de esto, suele ser lo más económico seleccionar mejores sistemas de inyección (tipo IRS), frente a la posibilidad contraria de disminuir la carga unitaria de los anclajes para así disminuir la longitud de bulbo. Otra opción frente a realizar inyecciones IRS puede ser acudir a anclajes de bulbo múltiple.
- En caso contrario, lo más deseable será realizar pruebas de adecuación previas para probar in situ la capacidad de los bulbos largos.

6.5.- Longitud libre

La longitud libre es necesaria en un anclaje salvo que éste sea pasivo y al mismo tiempo no se pretenda alejar su bulbo de la superficie del terreno o estructura de contención. Tal es el caso de las aplicaciones de suelo reforzado, "soil nailing" o incluso cosido de cuñas o bloques en macizos rocosos. Como ya se indicó, la reciente norma europea no se refiere a este tipo de anclajes.

En los demás casos, la longitud libre es necesaria por varios motivos:

- a) Para permitir las operaciones de tesado.

No es posible realizar el tesado con el control debido si no se cuenta con cierta longitud de armadura que se alargue libremente. Basta para ello pensar en las pérdidas de carga durante el acuñamiento o bloqueo, debidas a la pérdida de unos milímetros del alargamiento producido en la armadura

al tesarla. Si no existiera longitud libre, apenas se alargaría la armadura al tesarla, y por tanto, las pérdidas citadas podrían llegar a igualar a la carga aplicada, quedando la armadura descargada.

- b) Para alejar el bulbo de la superficie exterior y de la zona de terreno a contener, o bien, situarlo en un terreno más profundo.

Si bien la norma europea no indica nada al respecto, otras normativas y recomendaciones establecen una longitud libre mínima de 5 m, básicamente para posibilitar el tesado.

Los valores máximos no están limitados, y dependerán de hasta dónde sea necesario alejar el bulbo para tener suficiente seguridad frente a la estabilidad global, tanto en una estructura de contención o en un talud o ladera potencialmente inestable. Se ha de tener en cuenta no obstante que los anclajes de gran longitud libre requerirán deformaciones importantes para aumentar su carga de trabajo (tendrán una elevada flexibilidad).

6.6.- Carga de bloqueo

Se entiende por carga de bloqueo la carga a la que debe quedar el anclaje tras el tesado, es decir, en el instante previo a soltar la armadura al replegar el émbolo del gato hidráulico.

Es necesario definir esta carga para los anclajes activos. Incluso para los pasivos conviene prescribir cierta puesta en carga de valor reducido, para que queden tirantes desde el primer momento.

7.- PRUEBAS DE CARGA

7.1.- Introducción

En epígrafes anteriores se han esbozado algunos aspectos de la ejecución de anclajes. Es obvio que todo el proceso de formación y ejecución de los anclajes debe ser controlado, como se haría con cualquier otra unidad de obra.

En el caso de los anclajes se dan además una serie de circunstancias que hacen que este control sea especialmente necesario: es una unidad de carácter geotécnico, cuyo

diseño está ligado al mayor grado de incertidumbre que el terreno representa frente a otros materiales; el resultado final depende enormemente de diversos detalles constructivos y de la forma de ejecución, la cuál está en manos de los operarios de la empresa especialista; cada anclaje supone una carga de gran magnitud muy concentrada; el fallo de los anclajes puede llevar asociados daños importantes, etc.

Afortunadamente, por la propia forma de puesta en carga de los anclajes, al menos de aquéllos que son activos, pueden establecerse de forma sencilla, y de hecho están definidos con carácter normativo, ensayos o pruebas de tesado.

7.2.- Tipos de pruebas

Empleando la nomenclatura de la UNE-EN 1537:2001 se pueden distinguir tres tipos de pruebas de tesado:

- Ensayos de investigación. Se realizan de forma previa a los anclajes previstos para la obra. A grandes rasgos tienen como objetivo determinar si la configuración del anclaje es válida, y en especial la longitud de bulbo necesaria. Cuando para determinar este último punto la prueba se realiza hasta alcanzar la tensión última de transferencia, se denominan ensayos de arrancamiento.

De forma específica, la norma UNE señala los siguientes objetivos para este tipo de prueba:

- Obtener la resistencia del anclaje
 - Obtener la resistencia crítica de fluencia, o la fluencia bajo diferentes cargas, o las pérdidas de carga bajo la carga de servicio.
 - Obtener la longitud libre equivalente
- Ensayos de adecuación. Se realizan en algunos anclajes de la obra para confirmar que se han logrado los requisitos marcados por las pruebas previas.

Los objetivos marcados por la UNE serían en este caso:

- Comprobar la capacidad del anclaje para soportar una carga de prueba determinada.

- Verificar la fluencia o las pérdidas de carga para dicha carga de prueba.
- Comprobar la longitud libre equivalente
- Ensayos de aceptación. Se realizan para cada anclaje, y sirven para dar validez a cada uno de los anclajes ejecutados.

Según la norma UNE, sus objetivos serían los siguientes:

- Confirmar la capacidad de los anclajes para soportar una carga de prueba.
- Comprobar la fluencia o pérdida de carga para la carga de servicio
- Asegurar una carga de bloqueo correcta

En lo que respecta a los criterios a seguir en cuanto al número y tipo de pruebas a llevar a cabo, tanto la norma UNE-EN 1537:2001 como el PG-3 indican:

“Se recomienda hacer ensayos de investigación cuando los anclajes se utilicen en condiciones de terreno que no haya sido objeto de ensayos previos, o cuando las cargas de servicio son superiores a las adoptadas en condiciones de terreno similares.”

“Se realizarán al menos 3 ensayos de adecuación”

“Cada anclaje de obra será sometido a un ensayo de aceptación”.

7.3.- Ensayos y criterios de aceptación

En la realidad, los procedimientos de ensayo, sus objetivos y nomenclatura difieren (más bien se solapan) de una norma a otra, pero en general todos ellos se basan en realizar ciclos de carga y descarga en tiempos controlados, y de amplitud cada vez mayor (tanto en carga como en tiempo), hasta alcanzar al menos 1.25 veces la carga de tesado prevista para dicho anclaje.

Habida cuenta que el objeto de las pruebas de tesado es verificar la capacidad de los anclajes para soportar las cargas de trabajo previstas durante su vida útil, resulta fundamental que los anclajes de prueba se ejecuten siguiendo un procedimiento idéntico al previsto para los anclajes de la obra.

El adecuado funcionamiento de los anclajes se evalúa principalmente a través de tres criterios. Los dos primeros hacen referencia a la capacidad del anclaje para transmitir su carga al terreno a través del bulbo. El tercero hace referencia al comportamiento elástico del anclaje.

De forma más detallada dichos criterios de aceptación se basan en:

a) Comprobar que para la carga de trabajo prevista, las tensiones de transferencia a lo largo del bulbo se encuentran suficientemente alejadas de las que producirían la rotura de dicho contacto, con el consiguiente arrancamiento del anclaje.

Si un ensayo de investigación se lleva hasta el arrancamiento, el coeficiente de seguridad global será obviamente igual a la relación entre la carga de arrancamiento obtenida y la de trabajo prevista (F_w). Si por el contrario en el ensayo no se llega al arrancamiento, la carga máxima alcanzada será menor que la de arrancamiento, que al permanecer desconocida, obligará evidentemente a adoptar un diseño final de anclaje conservador. La relación entre dicha carga máxima y la de trabajo del anclaje podrá así como un límite inferior del coeficiente de seguridad real

Para la realización de este tipo de ensayos es necesario prever un refuerzo de la armadura del tirante (n° de cables), dado que la carga a alcanzar durante la prueba será sustancialmente superior a la de trabajo. No obstante, para conservar la similitud entre los anclajes de prueba y los de producción, es preciso mantener el diámetro de perforación previsto para estos últimos. Este aspecto puede limitar la máxima carga alcanzable en el ensayo.

b) Comprobar que la pérdida de carga en el anclaje a lo largo del tiempo (fluencia del bulbo) se encuentra dentro de un rango aceptable (fijado por la normativa).

La fluencia depende de numerosos factores, tales como:

- el tipo de terreno, siendo en general mayor en terrenos arcillosos que en terrenos granulares.
- el nivel de tensiones tangenciales en el bulbo, aumentando la fluencia a medida que aumenta dicha tensión tangencial (en algunas ocasiones y para niveles de carga elevados, el control de la fluencia puede dar una idea cualitativa de la proximidad a la rotura).

- el tiempo transcurrido, disminuyendo con el tiempo de mantenimiento de la carga (las deformaciones de fluencia obedecen en general a una ley de tipo logarítmico en la escala de tiempos).

Para determinar la fluencia del bulbo y verificar si resulta aceptable, se acude habitualmente a ensayos en los que se miden las deformaciones (elongaciones) del tirante de anclaje sometido a diferentes escalones de carga mantenidos a lo largo de un periodo de tiempo suficiente (establecido por las normas en función del tipo de terreno y de la vida útil del anclaje).

c) Comprobar el comportamiento elástico del anclaje, es decir, verificar que las deformaciones elásticas medidas en relación a las cargas a que está sometido se ajustan de forma razonable a lo que cabría esperar a partir de su geometría teórica (sección, longitud libre y longitud de bulbo principalmente).

Para ello es habitual establecer límites entre los que debe encontrarse la longitud elástica aparente que se obtiene en la prueba de tesado. El rango de aceptación se establece habitualmente entre un mínimo del 80% de la longitud libre teórica de diseño (límite rígido), y un máximo igual a dicha longitud libre teórica más un 50 % de la longitud de bulbo, también teórica (límite flexible).

Para el límite inferior (rígido) pueden considerarse además las posibles pérdidas producidas por rozamiento. Así, especialmente en anclajes con un gran número de cables y considerable longitud libre teórica, es habitual que en los primeros escalones de carga haya que vencer fuertes rozamientos hasta “enderezar” adecuadamente los cables, lo que suele dar lugar a que longitudes libres aparentes medidas resulten aparentemente menores que las previstas (por debajo del límite rígido).

Para tener en cuenta este efecto, algunas normas como la DIN 4125, modifica la condición que define el límite rígido (ver figura 40).

Con el fin de no extender en exceso esta descripción, y dado que en las normas usuales se encuentran detallados los procesos a seguir en cada una de las pruebas, a continuación se muestran simplemente a modo de ejemplo, diversos gráficos procedentes de una prueba de investigación realizada según el método de ensayo 1 de la norma española (en cada ciclo, a carga constante, se miden los alargamientos en varios tiempos).

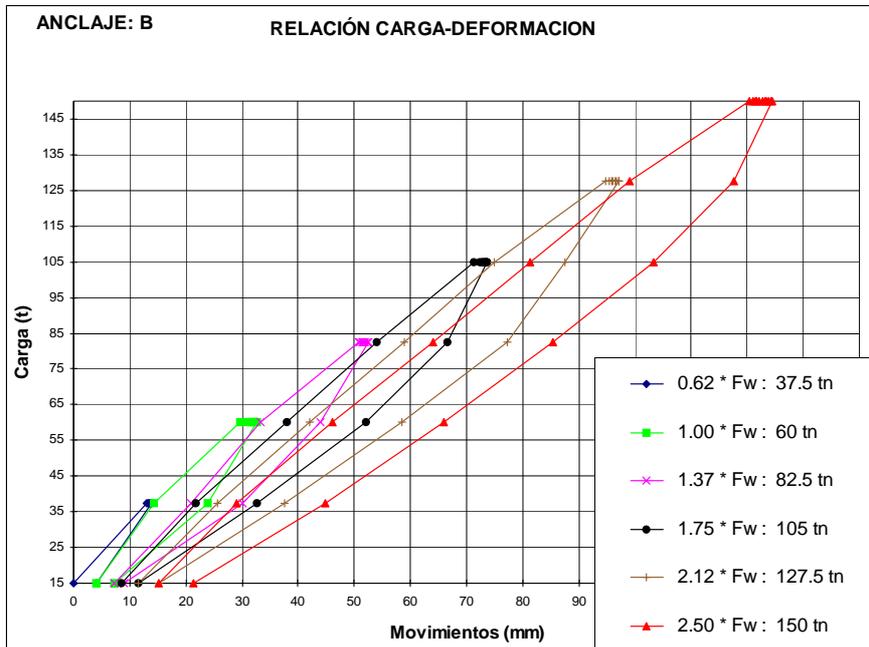


Figura 38: Gráfico carga-elongación. (en la prueba se alcanzó 2.5 veces la carga prevista de tesado (60 t), sin producir arrancamiento).

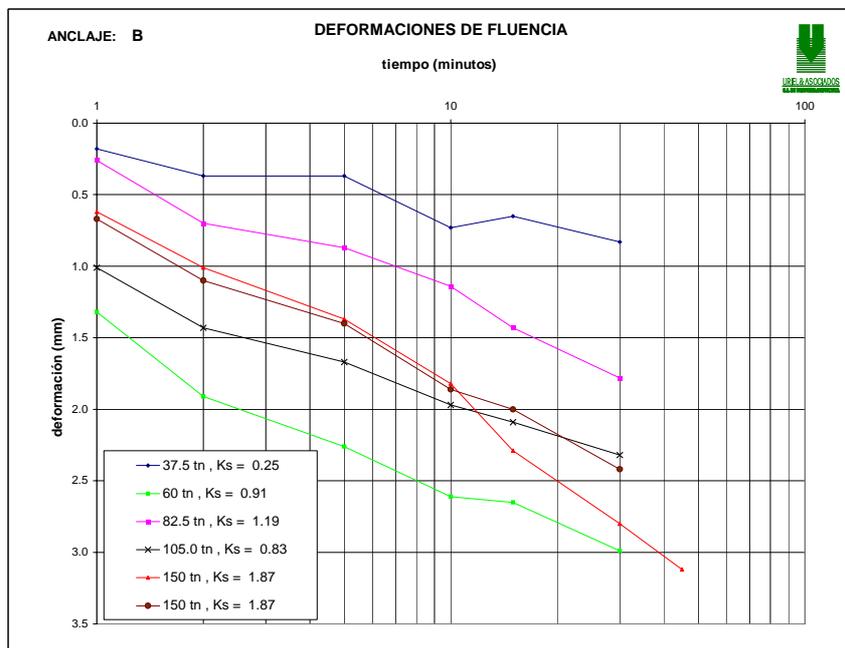


Figura 39: Gráfico fluencia para cada escalón de carga.

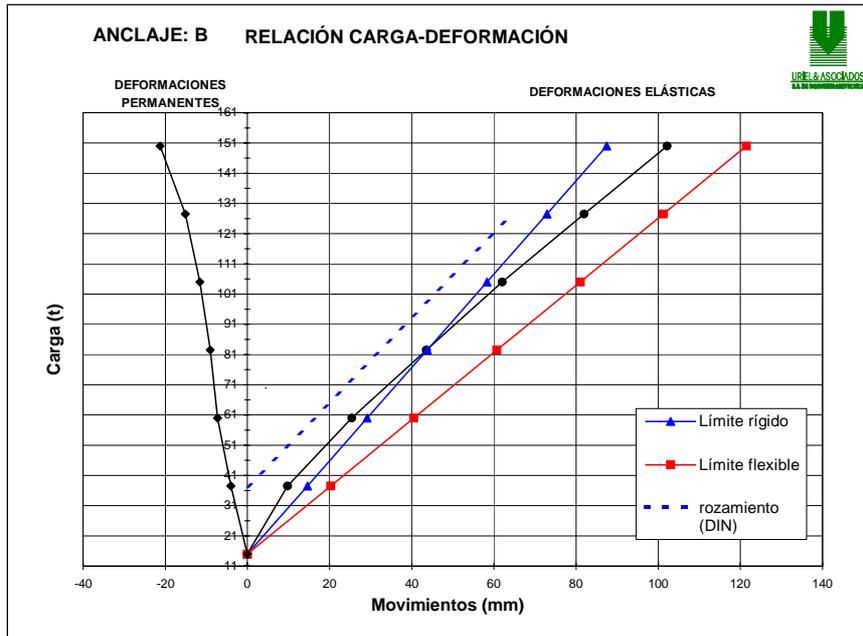


Figura 40: Deformaciones permanentes (plásticas) y elásticas en el anclaje B. Límites de aceptación

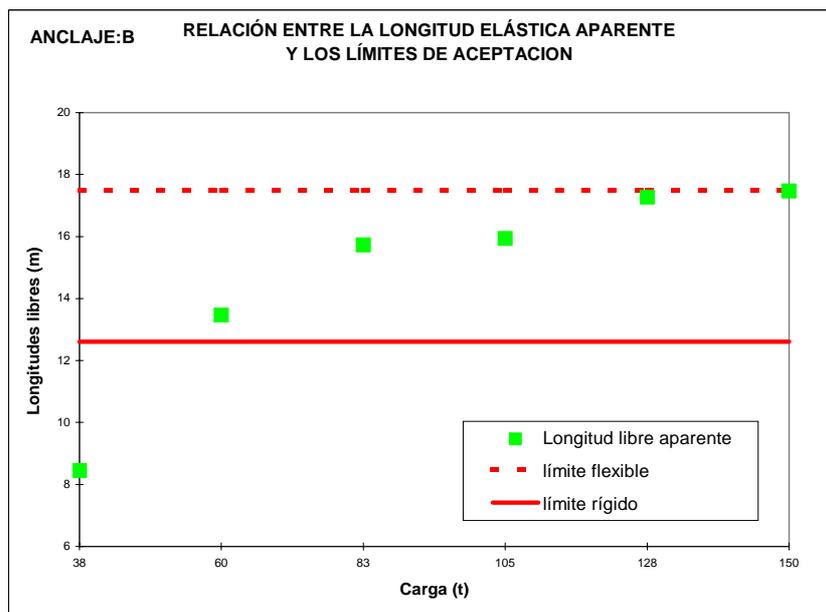


Figura 41: Longitud elástica aparente del anclaje en cada escalón de carga. Comparación con los límites flexible y rígido.

7.4.- Equipo necesario. Requisitos

En principio, el equipo necesario para los ensayos es básicamente el mismo que se necesita para la operación de tesado del anclaje. Hay sin embargo algunos requisitos

que se deben cumplir en cuanto a la precisión de medida de los equipos. Así, la norma UNE-EN 1537:2001 y el PG-3 indican lo siguiente:

- Cuando se mida la fluencia, la precisión de las medidas de desplazamiento debe ser de 0.05 mm, debiendo ser la sensibilidad del equipo de 0.01 mm. Cuando no se mida la fluencia la precisión de las medidas será de 0.5 mm.
- La medida de carga deberá tener una precisión del 2 % de la carga máxima del ensayo. Cuando en el ensayo se mida la pérdida de carga, la sensibilidad del equipo será del 0.5 %.

A efectos prácticos, estos criterios dan lugar a que:

- La medición de alargamiento pueda llevarse a cabo con un calibre convencional sólo en los ensayos de aceptación. Para el resto de ensayos, las medidas han de realizarse con un calibre de mayor precisión o con un pie de rey (es recomendable simultanear ambos equipos). (ver figuras 42 y 43).



Figura 42: Calibre con micrómetro para lectura de centésimas de milímetro (U&A).



Figura 43: Montaje de gato hidráulico con pie de rey para medida de alargamientos (U&A).

- La precisión requerida para la lectura de carga rara vez se consigue con los manómetros que convencionalmente llevan los equipos para medir la presión hidráulica del gato (que multiplicada por su sección proporcionan la carga). Por ello resulta necesario acudir (y solicitar claramente) el empleo de manómetros de mayor precisión, que pueden ser de tipo digital. (ver figura 44).



Figura 44: Manómetro de lectura digital instalado en circuito hidráulico junto al gato (U&A).

Por otro lado, cabe hacer las siguientes recomendaciones adicionales:

- En las pruebas de investigación se suele requerir alcanzar cargas de entre 2 ó 3 veces las de servicio. Hay que prever por tanto que tanto el tirante como el elemento de reparto estén lo suficientemente reforzados o sobredimensionados

para que la prueba no tenga que limitarse por rotura de éstos.

- Cuando se mide la fluencia, se debe representar un gráfico desplazamiento-tiempo en escala semilogarítmica (ver figura 45).

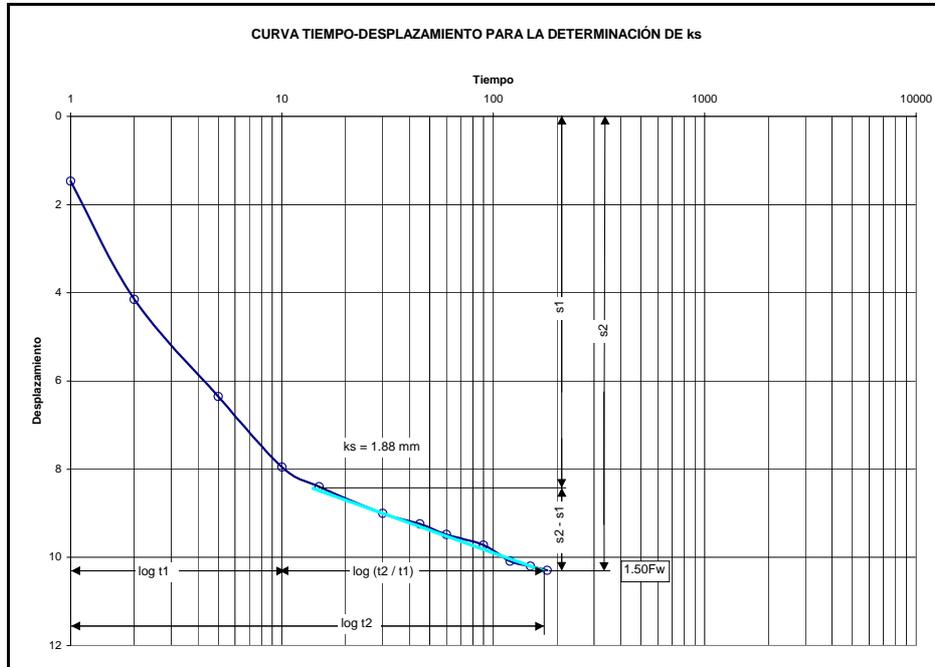


Figura 45: Determinación de la fluencia (k_s) en un escalón con carga constante.

Para el tramo recto de la curva se calcula la deformación de fluencia, definida de la siguiente manera:

$$k_s = \frac{s_2 - s_1}{\log\left(\frac{t_2}{t_1}\right)}$$

donde,

- s_1 : desplazamiento de la cabeza del anclaje en el tiempo t_1 .
- s_2 : desplazamiento de la cabeza del anclaje en el tiempo t_2 .
- t : tiempo transcurrido desde la aplicación del incremento de carga

En las diversas normas se establecen los tiempos de medida necesarios y los límites admisibles de la fluencia, función del tipo de terreno y de la vida útil del anclaje. En ocasiones, dependiendo de los resultados obtenidos, resulta preciso prolongar la

prueba de carga un intervalo de tiempo mayor. Es por tanto necesario ir analizando los resultados a medida que se desarrolla el ensayo, lo que puede llevarse a cabo con relativa sencillez, bien “a mano”, bien por medio de cualquier dispositivo electrónico sencillo (figura 46).

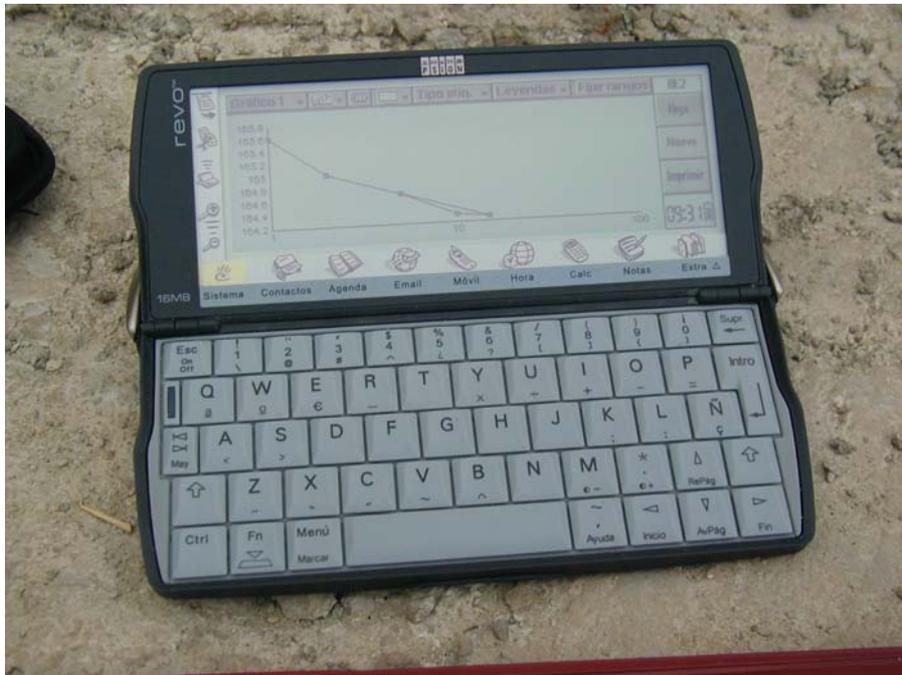


Figura 46: Determinación de la fluencia (ks) en un escalón con carga constante (U&A).

8.- DURABILIDAD. CORROSIÓN

8.1.- Introducción

Este un aspecto, de gran relevancia, al que frecuentemente no se le presta suficiente atención, especialmente en lo que respecta a algunas partes concretas de los anclajes, como los empalmes de la longitud libre con la cabeza o la propia cabeza. En otras muchas ocasiones, también frecuentes, la protección general de los anclajes es insuficiente, al menos desde el punto de vista normativo.

Todo ello puede dar lugar a condiciones de trabajo más inseguras o al menos más inciertas que las deseables, obligando a realizar mayores labores de conservación o incluso de reposición (por ejemplo la repetición de nuevos anclajes cuando se observa que los existentes se encuentran intensamente oxidados).

8.2.- Conceptos previos

8.2.1.- Tipos de corrosión

Los principales tipos de corrosión se ilustran en la siguiente figura:

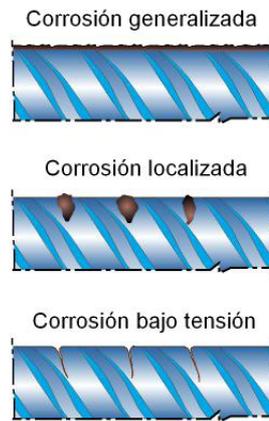


Figura 47: Tipos de corrosión (FIP, 1986)

La corrosión generalizada no suele ser la más problemática.

La corrosión localizada o picaduras ocurre en presencia de iones agresivos, como es el cloro.

La corrosión bajo tensión ocurre por la acción conjunta de la corrosión localizada y esfuerzos de tensión (tracción) a que está sometido el acero.

La corrosión bajo tensión se produce en aceros de alto límite elástico. Uhlig, H.H. (1971) indica que ocurre a partir de límites elásticos de 1240 N/mm^2 , si bien este límite se reduce si hay presencia de sulfuros.

Es obvio que este tipo de corrosión es la más agresiva, pues reduce drásticamente la sección de acero en un punto, y además puede dar lugar a una rotura frágil.

8.2.2.- Agresividad del terreno

La agresividad del terreno puede verificarse respecto a la armadura o respecto a la lechada que en algunas partes la protege.

La agresividad al acero viene dada por el contenido de agua, el contenido de iones

agresivos (cloro y sulfato, por ejemplo) y la permeabilidad del terreno.

La agresividad a la lechada depende del contenido en sulfatos, de la presencia de agua y su variación, y de la calidad de la lechada (ver por ejemplo instrucción EHE).

En la práctica, en situaciones como las siguientes es necesaria considerar la protección frente a la corrosión (F.I.P., 1986):

- Anclajes expuestos al agua marina
- Anclajes en arcillas saturadas (poco oxígeno) con sulfatos
- Anclajes en rocas evaporíticas con cloro (por ejemplo, sal gema)
- Anclajes próximos a industrias químicas corrosivas
- Anclajes en suelos con niveles freáticos variables
- Anclajes en suelos semisaturados
- Anclajes que atraviesen estratos con composición química y contenidos de aire y agua diferentes
- Anclajes sujetos a cargas cíclicas

Por otro lado, las rocas duras de baja permeabilidad podrían ser consideradas en teoría como un medio no agresivo.

8.3.- Informe de la Fédération Internationale de la Précontrainte (FIP)

En 1986 la Fédération Internationale de la Précontrainte (FIP) publicó un informe, ya citado anteriormente, sobre la corrosión y la protección frente a la corrosión de anclajes activos al terreno. En dicho informe se analizaron los 35 casos conocidos de fallos por corrosión de anclajes.

Llama la atención que de los 35 casos, 11 corresponden a anclajes provisionales, protegidos únicamente con lechada, y en ocasiones con una vaina para la longitud libre. Los otros 24 casos correspondían a anclajes permanentes, con y sin protección.

Respecto al tiempo transcurrido desde la instalación hasta la rotura, 9 fallos se

produjeron antes de 6 meses, 10 entre los 6 y los 24 meses, y 18 en más de 2 años. De estos datos se concluye la necesidad de proteger el anclaje lo antes posible tras el tesado cuando el ambiente es agresivo.

En cuanto a la localización de las roturas, 19 se produjeron en la cabeza de anclaje, o a menos de un metro de ésta, 21 en la zona libre y 2 en el bulbo.

Las conclusiones que extrae el propio informe son las siguientes:

“Aunque los mecanismos de la corrosión son conocidos, la agresividad del terreno y del entorno pocas veces se cuantifica en la fase de campaña geotécnica. En ausencia de este tipo de datos, es improbable que los casos históricos disponibles proporcionen información fiable como para poder predecir la velocidad de corrosión en servicio.

Los casos históricos de fallo por corrosión indican que éstos pueden producirse desde varias semanas tras la puesta en carga, hasta varios años después. Invariablemente dicha corrosión es localizada, y ningún tipo de tirante (barra o cable) parece tener una inmunidad especial⁹.

Habida cuenta que no se dispone de un método preciso para predecir la velocidad de corrosión localizada, cuando se detecten condiciones de agresividad, aunque sea de forma cualitativa, el proyectista debería prever sistemas de protección. En este sentido, la cabeza del anclaje resulta especialmente susceptible al ataque por corrosión, y por tanto es recomendable protegerla tanto en anclajes provisionales como permanentes.

La elección del grado de protección es responsabilidad del proyectista, y la elección depende de factores como las consecuencias de la rotura, la agresividad del entorno y el coste de la protección¹⁰.

Los anclajes deben protegerse en su totalidad, ya que la protección parcial o local induce mayor corrosión de la parte desprotegida. Para conseguir dicha

⁹ Aunque sí el tipo de acero. Los casos recogidos por la FIP para roturas en barras se produjeron en todos en aceros con límite elástico por encima de 800 MPa.

¹⁰ En realidad esto ya no es así, pues en la actualidad existe normativa al respecto.

protección total debe prestarse una especial atención al diseño y a los detalles constructivos. Las zonas de unión entre el bulbo, la zona libre y la cabeza son especialmente vulnerables, así como las uniones y manguitos.

De los millones de anclajes activos instalados en todo el mundo, 35 casos de fallo por corrosión han sido registrados. Con el paso del tiempo se han aprendido lecciones y los “standards” han mejorado, lo que augura un buen futuro. Sin embargo, no hay lugar para la complacencia, y los ingenieros deben ser rigurosos aplicando altos “standards” tanto en el diseño como en la construcción para asegurar un funcionamiento satisfactorio de los anclajes durante su vida útil”.

8.4.- Conclusiones sobre la protección frente a la corrosión

Como resumen de las observaciones realizadas podrían enunciarse las siguientes conclusiones.

- Desde un punto de vista práctico, la norma UNE-EN 1537:2001 define los sistemas de protección a emplear para anclajes provisionales y permanentes, que habitualmente se conocen como de “protección simple” y de “doble protección” respectivamente. Quedan sin definición los anclajes de barra pasivos, que quedan fuera del ámbito de la norma.
- Con independencia de lo anterior, se estima que los anclajes permanentes con tirantes de acero de alto límite elástico deberían llevar “doble protección”, tanto en el caso de barras como de cables. Esta recomendación debería extenderse a las situaciones provisionales en las que pueda darse condiciones severas de agresividad.
- Los anclajes de barra de acero convencional (límite elástico de 500 MPa) resisten mejor la corrosión. Si además se tiene en cuenta que muchos de ellos se colocan en roca, y que además suelen ser pasivos (por lo que pueden tener poca tensión o no estar trabajando realmente), se podría entender que habitualmente se hayan colocado sin protección suficiente y no hayan sufrido problemas especiales.

- La cabeza del anclaje y su empalme con la longitud libre son las partes más expuestas y vulnerables. Debe prestarse atención especial a la ejecución de estas zonas.

9.- NORMATIVA APLICABLE

A continuación se resumen las normativas y otras publicaciones oficiales que son de aplicación en España, así como las normativas internacionales más relevantes.

a) Normativa nacional de obligado cumplimiento:

- UNE-EN 1537:2001, Ejecución de trabajos geotécnicos especiales. Anclajes. AENOR. 2001
- PG3 Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes. Artículo 675: Anclajes. Orden FOM/1382/02. Dirección General de Carreteras. Ministerio de Fomento. 2002

b) Otras publicaciones oficiales nacionales:

- Guía para el diseño y la ejecución de anclajes al terreno en obras de carreteras. Dirección General de Carreteras. Ministerio de Fomento. 2001.
- HP 8-96. Recomendaciones para el proyecto, construcción y control de anclajes al terreno. ATEP. ICCET. CICCOP. 1996

c) Normativa internacional

- BS 8081 British Standard Code of practice for Ground Anchorages
- DIN 4125 "Ground Anchorages. Design, construction and testing"

10.- BIBLIOGRAFÍA.

Además de la normativa aplicable se ha empleado la siguiente bibliografía:

- ALONSO, E., CASANOVAS, J., ALCOVERRO, J., “Anclajes”, Simposio sobre Estructuras de Contención de Terrenos, SEMSC, Santander, 1996
- BARLEY, A., WINDSOR, C, “Recent Advances in Ground Anchor Technology with Reference to the Development of the Art”, International Conference on Geotechnical and Geotechnical Engineering, Melbourne, 2000
- BUSTAMANTE, M., “Un método para el cálculo de los anclajes y de los micropilotes inyectados”, Boletín de la SEMSC, nº 81-82, Madrid, 1986
- CASANOVAS, J., “Tensión de Transferencia y Capacidad de Carga de Anclajes Inyectados”, Revista Ingeniería Civil nº72, Madrid.
- FEDÉRATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAÎNTE, “Corrosion and corrosion protection of prestressed ground anchorages”, Thomas Telford, London, 1986.
- JIMÉNEZ SALAS, J.A. ET AL, “Geotecnia y Cimientos III. Segunda Parte”. Editorial Rueda. Madrid. 1979.
- MURILLO, T. & ORTUÑO, L. (2004): “Curso sobre taludes naturales y de desmonte en obras lineales”. Sevilla. INTEVIA.
- OSTERMAYER, H., “A review of diaphragm walls. Practice in the detail design applications of anchorages”. Institution of Civil Engineers. London. 1977.