

CAPITULO I

LOS ANCLAJES COMO ELEMENTO ESTABILIZADOR EN LAS OBRAS CIVILES Y MINERAS

1.- INTRODUCCION

Aproximadamente desde 1950, se ha desarrollado el concepto de masas rocosas y suelos anclados con elementos pretensados hasta alcanzar un campo muy amplio de aplicación.

Los anclajes constituyen en los actuales momentos un medio esencial para garantizar la estabilidad de estructuras muy diversas, lográndose utilizar los procedimientos y posibilidades que la tecnología actual del soporte mediante anclajes pone a nuestra disposición para aplicar la técnica moderna del sostenimiento.

Los anclajes pueden usarse en forma muy ventajosa en cualquier situación en que se necesite la ayuda de la masa de suelo para soportar un determinado estado de tensiones o esfuerzos.

Casos muy comunes se producen en los muros de tierra en donde es necesario garantizar la estabilidad de la masa de suelo, y por ende el de la obra.

Como elemento que contrarresta las subpresiones producidas por el agua, en el sostenimiento de techos y hastiales en obras subterráneas de vialidad, de centrales hidroeléctricas y mineras, e igualmente como soporte artificial en taludes constituidos por masas de suelos y/o de rocas.

En el caso de muros anclados, es muy común observar este tipo de obra a lo largo y ancho de importantes tramos carreteros, en donde parte de la calzada ha colapsado al producirse una disminución en la resistencia al corte de la masa de suelo.

Estos problemas han sido resueltos satisfactoriamente a través de las pantallas o muros atirantados.

En este sentido, cabe destacar que en las construcciones civiles se viene utilizando cada vez con mayor frecuencia y éxito los anclajes inyectados para sostener muros y absorber momentos volcadores. Este último como ocurre en las torres de alta tensión y en las presas para resistir las fuerzas volcadoras debidas al agua, así como en otras numerosas obras, en la cual la fuerza de tracción al terreno del anclaje transfiere las solicitaciones hasta una zona más profunda y estable, y por tanto de mayor capacidad portante. En estas condiciones, la resistencia tangencial de la masa de suelo o roca circundante al miembro estructural empotrado actúa para resistir dicha carga de tracción.

En lo referente a obras subterráneas tales como galerías y túneles de vialidad el problema fundamental que se plantea es el de asegurar el sostenimiento mediante anclajes durante y posterior al período de excavación, definiendo y construyendo un soporte y revestimiento capaz de asegurar la estabilidad definitiva de la obra.

Lo mencionado anteriormente es de vital importancia, por cuanto la concentración de esfuerzos en la vecindad de la excavación puede ser la causante que la roca

fracturada pueda desplazarse comprometiendo la estabilidad de la bóveda y de los hastiales del túnel.

Cabe destacar también, que el sistema de muros anclados o sistemas de contención por medio de anclajes, bien sea activos o pasivos, es cada vez de mayor utilización.

La razón fundamental se debe a que en los centros urbanos de gran desarrollo es frecuente la construcción de edificios con varios sótanos donde se requieren cortes de gran altura.

Lo dicho anteriormente indica que la utilización de los anclajes ha sido considerada como una excelente alternativa técnica y económica en la construcción de muros de retención, conjuntamente con los procedimientos modernos que nos ofrece el concreto proyectado bien sea por vía seca o húmeda. Por supuesto, al realizar este tipo de obra deben tenerse en cuenta otros aspectos que sin lugar a dudas son de vital importancia, tales como las construcciones vecinas y las redes de servicio. En este sentido, no se deben correr riesgos innecesarios que puedan causar pérdidas materiales y hasta humanas.

Por otra parte, al diseñar un sistema de anclajes es fundamental no sólo llevar a cabo todas las comprobaciones de estabilidad, sino a la vez un análisis detallado del tipo de anclaje que mejor se adapte al terreno, conjuntamente con una adecuada disposición, la cual permita una mejor ejecución y funcionamiento del refuerzo metálico.

De esta forma, se asegura que estos elementos que trabajan a tracción mejorarán las condiciones de equilibrio de la estructura incorporando al conjunto las fuerzas de masa por unidad de volumen que las circunda.

Finalmente, las gráficas que se adjuntan en las páginas siguientes muestran una gran variedad de ejemplos representativos de la utilización de los anclajes empleados como medio estabilizador en las diferentes construcciones civiles y mineras , así como los detalles principales y partes típicas de los anclajes al terreno.

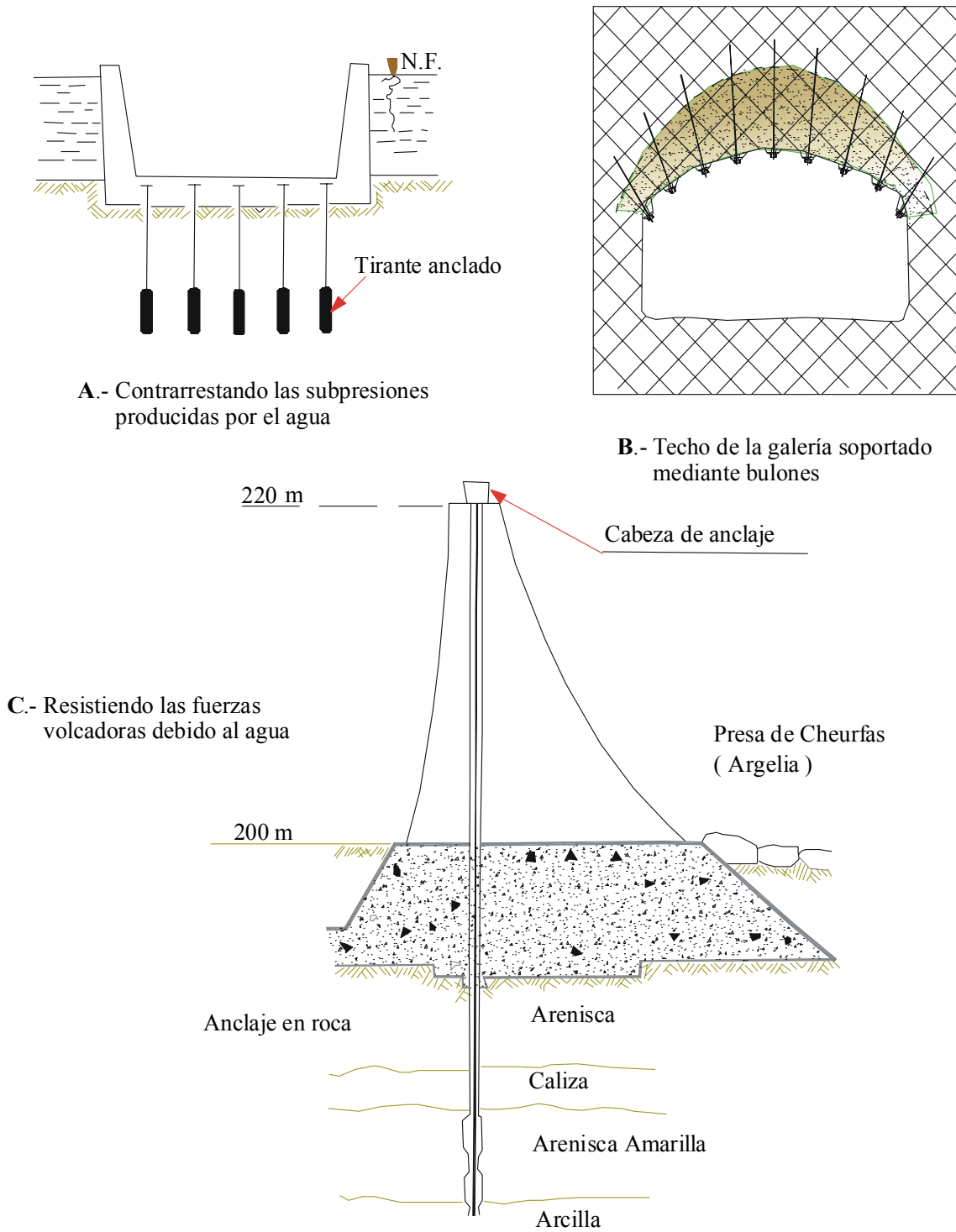


Figura 1.1. Diferentes aplicaciones de los tirantes anclados

Por otra parte, la continua investigación y las necesidades cada vez más complejas, encaminadas a ofrecer una óptima solución a la gran variedad de problemas existentes, ha generado que las empresas de ingeniería especializadas dispongan de una amplia gama de anclajes diseñados para garantizar la estabilidad aun en suelos y macizos rocosos que presentan condiciones extremadamente difíciles.

Como es bien conocido en los últimos años, se han llevado a cabo muchos estudios experimentales y teóricos sobre anclajes. El criterio actual de diseño puede ser clasificado en dos principales grupos, el primero se basa en la teoría de la elasticidad, la cual presenta limitaciones cuando se trata de masas rocosas heterogéneas.

El segundo criterio involucra la selección de parámetros mediante reglas empíricas. La brecha entre estos dos extremos es todavía muy real y las razones son que al diseñar un sistema de anclaje el proceso es complejo y requiere un conocimiento detallado de la geología del sitio, de las propiedades de las rocas, de las condiciones hidráulicas del suelo, conjuntamente con el estado de las presiones originadas por el flujo de agua a través de la masa del subsuelo. Adicionalmente es importante conocer la magnitud y dirección de los esfuerzos antes y después de la excavación.

Paralelamente, al diseñar y ejecutar el sostenimiento mediante tirantes anclados se requiere estudiar en detalle los conceptos principales de diseño en relación a los cuatro modos de ruptura:

- a) Ruptura de la masa rocosa o de suelo
- b) Ruptura en la interfase acero-lechada de cemento
- c) Ruptura en el contacto roca/suelo-lechada de cemento
- d) Ruptura de la barra o guayas de acero.

Por tanto, al establecer el factor de seguridad del anclaje como elemento estabilizador, cada uno de los modos de falla antes mencionados deben ser considerados, siendo cada caso en particular estudiado en detalle en los capítulos siguientes.

Por otra parte, la función principal del anclaje es de reforzar y sostener suelos y masas rocosas parcialmente sueltas, fracturadas o incompetentes que de otra manera pueden estar sujetas a fallar.

Estas masas inestables pueden estabilizarse mediante anclajes, al generarse un incremento de las tensiones normales sobre la existente o potencial superficie de rotura, lográndose por lo tanto un aumento en la resistencia al esfuerzo cortante en dicha superficie.

Los anclajes introducen tensiones y deformaciones adicionales en la masa de suelos mejorando la estabilidad general, y en donde el tipo de anclajes, el método de

instalación, conjuntamente con los aspectos geológicos más resaltantes juegan un papel preponderante en el diseño del soporte.

Tomando en cuenta estos aspectos al ingeniero le interesa mantener fundamentalmente la estabilidad de la masa de suelo o roca, incrementando su resistencia a través de la aplicación de los procedimientos modernos que ofrece este sistema de refuerzo al mejorar los niveles de seguridad del terreno, el cual previamente se caracterizaba por ser potencialmente inestable.

A pesar de que existen diferentes métodos de estabilización, el soporte mediante la técnica de los tirantes anclados ha tenido mucho éxito, aun en condiciones desfavorables como es el caso de rocas relativamente meteorizadas y fracturadas.

Lógicamente el área principal de aplicación del anclaje es estabilizar la masa rocosa o de suelo que no está en equilibrio consigo misma mediante la transmisión de fuerzas externas a la profundidad diseñada. En estas condiciones es esencial tener un conocimiento preciso de las características geotécnicas del suelo y del macizo rocoso, particularmente en lo referente a las discontinuidades y su arreglo espacial, así como el flujo de agua a través del subsuelo. Adicionalmente, se debe también estudiar y conocer los cambios tensionales y las deformaciones que se producen durante y después de la construcción

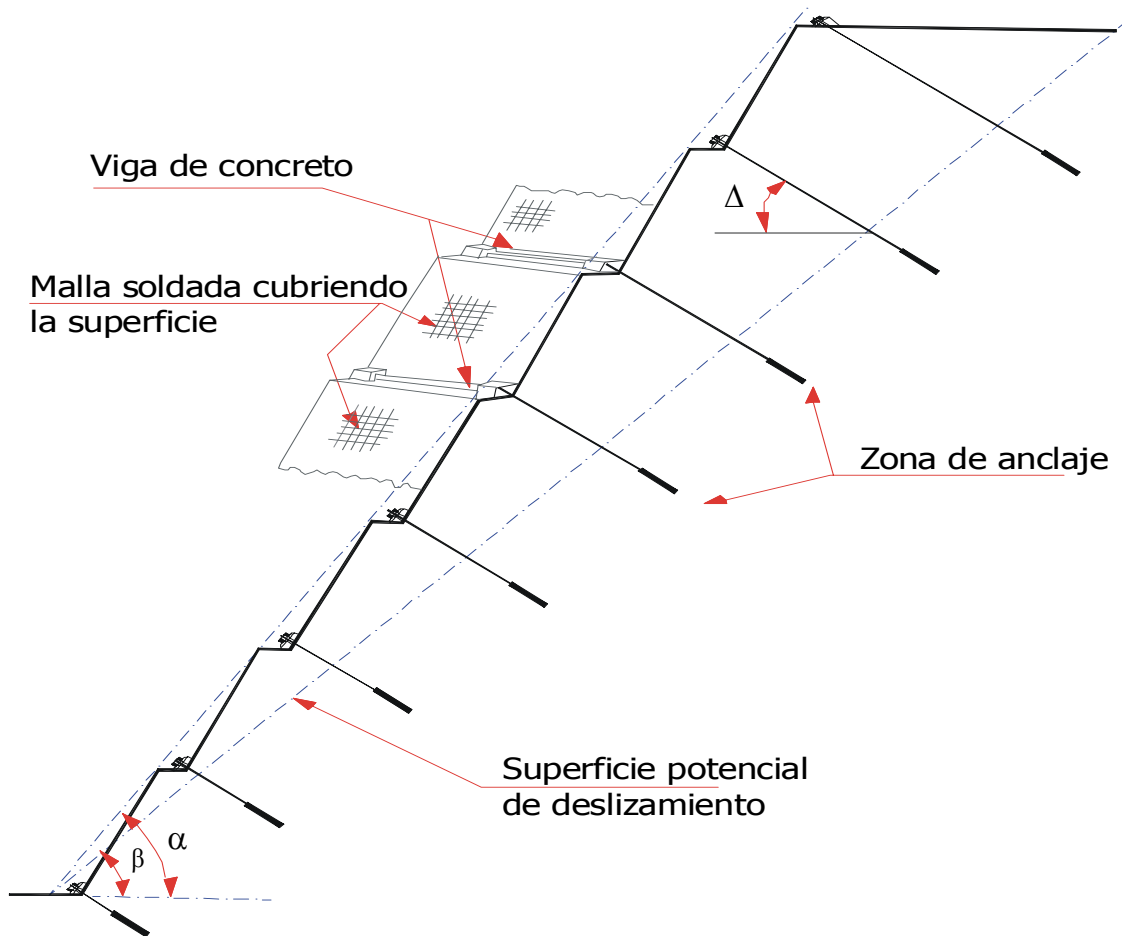


Figura 1.2 Estabilización de taludes mediante la técnica de tirantes anclados según Barron et al [1].

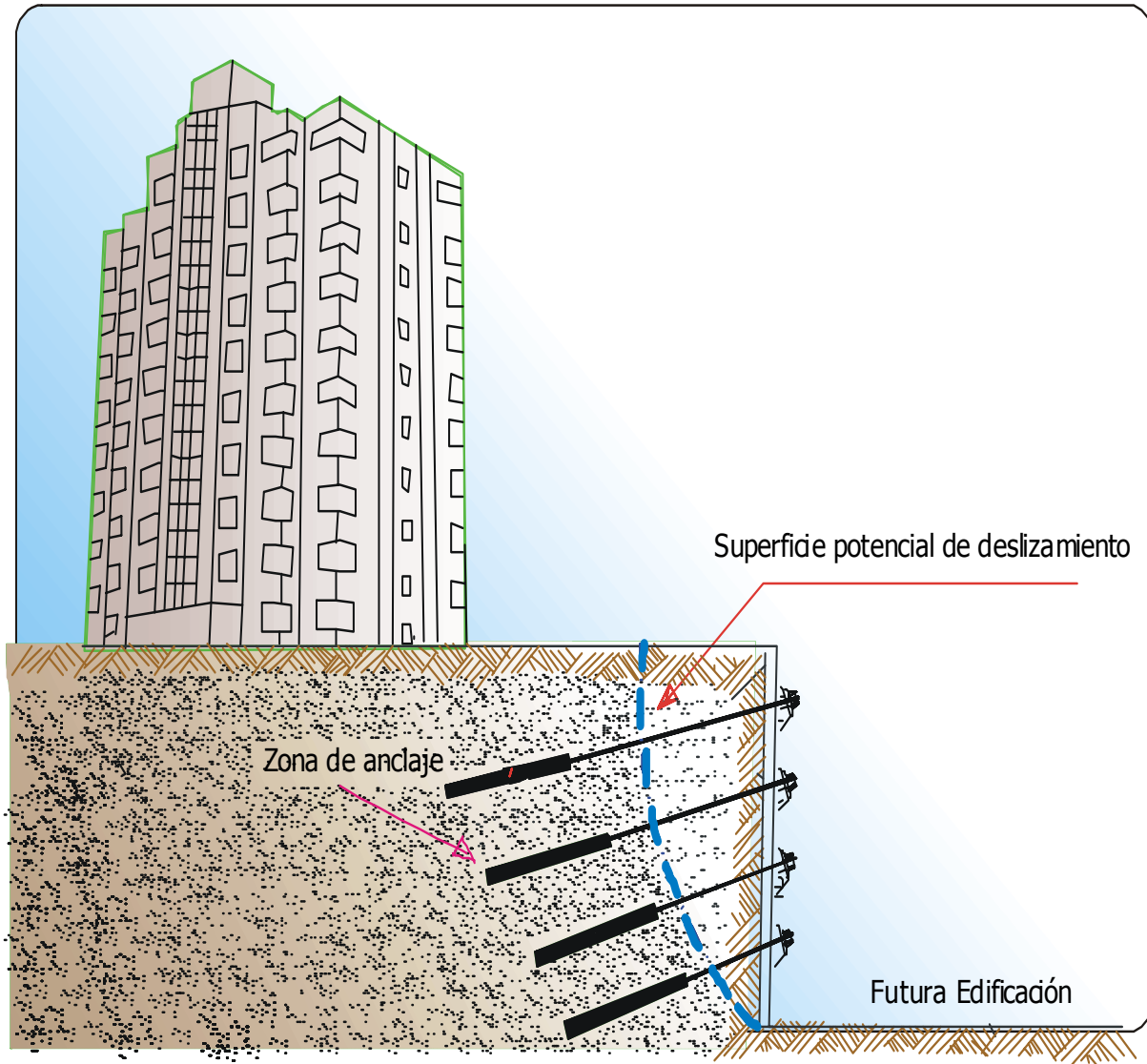


Figura 1.3. Muro anclado construido en centro urbano

Así, un caso que presenta interés especial corresponde a la figura (1.4), en la cual se muestra de acuerdo a la empresa Bauer [2], la forma de ejecutar los anclajes como elementos de soporte en las obras de tierra.

Perforación de un barreno con o sin revestimiento
de 75 - 150 mm de diámetro

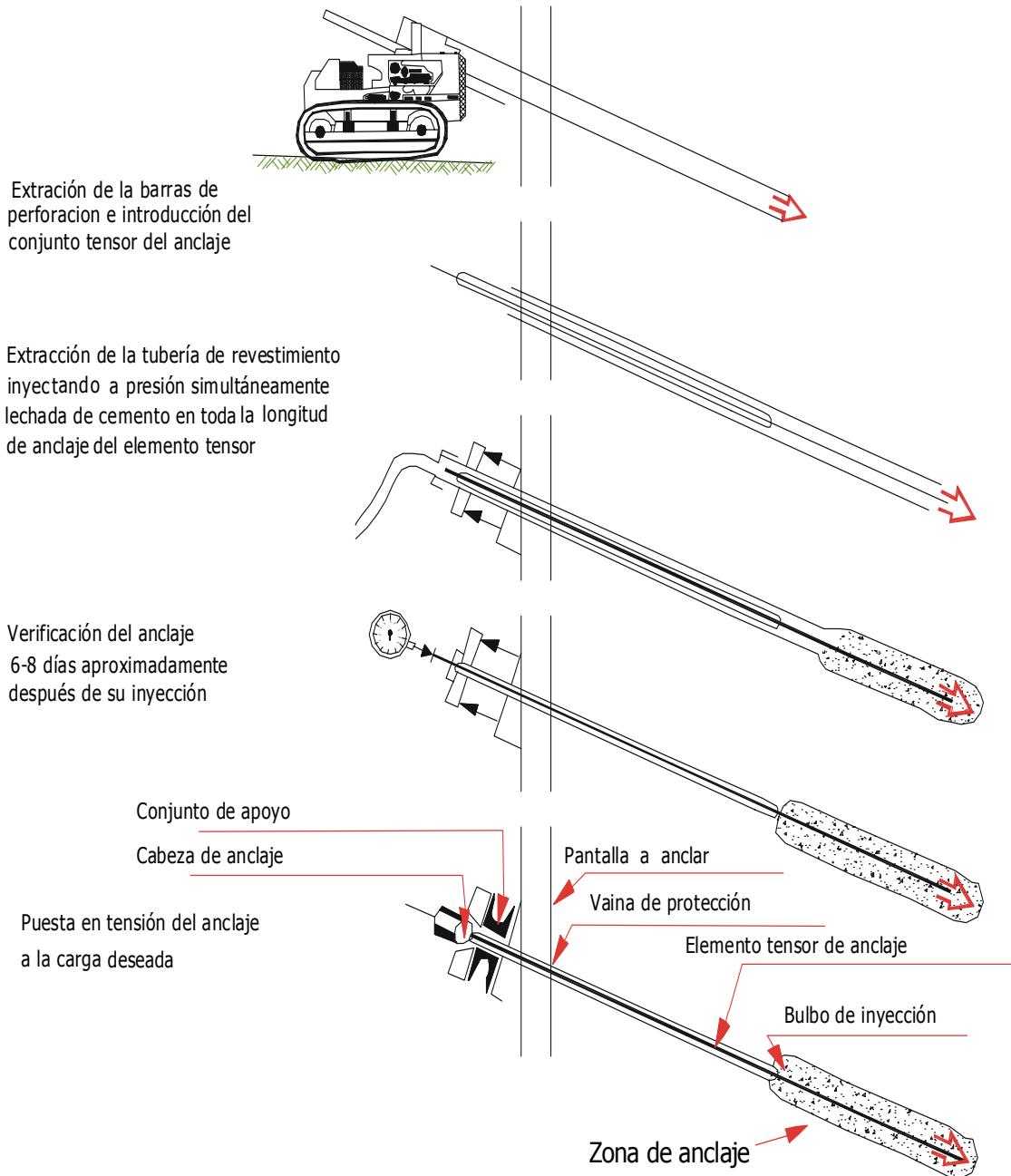


Figura 1.4 Diferentes etapas de la instalación del anclaje según Bauer [2]

2.- CONCEPTOS Y CARACTERÍSTICAS DE LOS ANCLAJES

INYECTADOS

Estos tipos de anclajes son armaduras metálicas, alojadas en taladros perforados, cementadas mediante inyecciones de lechada de cemento o mortero.

El elemento estructural es sometido a tracción, generando un esfuerzo de anclaje el cual es soportado por la resistencia al corte lateral en la zona de inyección en contacto con el terreno.

A través de la inyección, se forma un miembro empotrado en el extremo profundo del tirante metálico colocado dentro del barreno, por lo tanto las fuerzas que actúan sobre el anclaje inyectado no se transmiten al terreno en toda su longitud, sino solamente en el tramo de la zona inyectada.

Cabe destacar que adicionalmente a los anclajes inyectados se emplean también los pernos de anclaje puntuales, los cuales tienen un dispositivo para empotrar el sistema de anclaje en el fondo del barreno, siendo en minería muy utilizados los de expansión.

Este tipo de pernos se anclan debido a la apertura que se producen en dos valvas metálicas ranuradas al apretar el perno.

Igualmente, es práctica común emplear los pernos de anclaje repartidos (anclajes pasivos), en el cual el empotramiento a la roca se efectúa en toda la longitud del barreno con lechada de cemento o resina. En el último caso mencionado, la resina y

el elemento endurecedor se colocan en unas cápsulas en el fondo del barreno. Al colocar la varilla metálica y rotarla se rompen las cápsulas mezclándose sus componentes.

En las resinas rápidas, el fraguado tiene lugar en un tiempo menor del minuto y en las lentas entre tres y cuatro minutos.

También se cementan los pernos mediante el denominado tipo Perfo, el cual consiste en colocar el mortero en un cuerpo cilíndrico perforado (constituido por dos chapas) que se incorpora en el interior del barreno.

Posteriormente se introduce el perno que comprime el mortero, el cual es obligado a salir por los agujeros de las chapas rellenando todo el volumen del barreno.

Adicionalmente, es importante mencionar que entre 1977 y 1980 se desarrolló el sistema Swellex a través de un programa de investigación llevado a cabo por la empresa Atlas Copco en Suecia, el cual consiste en bulones de acero tubular de anclaje mecánico repartido que han sido doblados longitudinalmente para reducir su diámetro, al cual se le incorpora una bomba de inyección de agua de alta presión.

Una vez colocado el bulón en el taladro, se bombea agua a alta presión (unos 30 MPa) en su interior a través del orificio de inyección del casquillo inferior. Como resultado del proceso de bombeo, el bulón Swellex se comprime contra las paredes de barreno adaptándose a la vez a las irregularidades del terreno.

En estas condiciones, una vez expandido el bulón se produce una presión de contacto entre el bulón y la pared del barreno, en la cual actúan dos tipos de fuerzas, una radial perpendicular su eje en toda su longitud, y otra friccionante que dependerá principalmente de la estructura de la roca,

Por otra parte, en los tirantes de anclaje se utilizan como miembro de tracción barras de acero de alta resistencia. Las barras tienen generalmente un fileteado exterior que aumenta la adherencia en la zona de anclaje y permite por otra parte la unión por medio de manguitos especiales.

El bloqueo de la barra sobre la placa de apoyo se hace por medio de una tuerca. Los tirantes de este tipo corresponden a capacidades portantes relativamente bajas del orden de los 500,00 kN y aún menores.

Con mayor frecuencia se utilizan los tirantes constituidos por un cierto número de hilos o de cables unidos formando un haz. El anclaje se hace generalmente mediante enclavamientos cónicos, como se podrá observar más adelante.

Para los tirantes anclados en roca se pueden alcanzar perfectamente unidades que sobrepasan los 3.000,00 kN. Para tirantes anclados en terrenos aluviones las tensiones son más bajas y actualmente se limitan a 1.000,00 ó 1.500,00 kN.

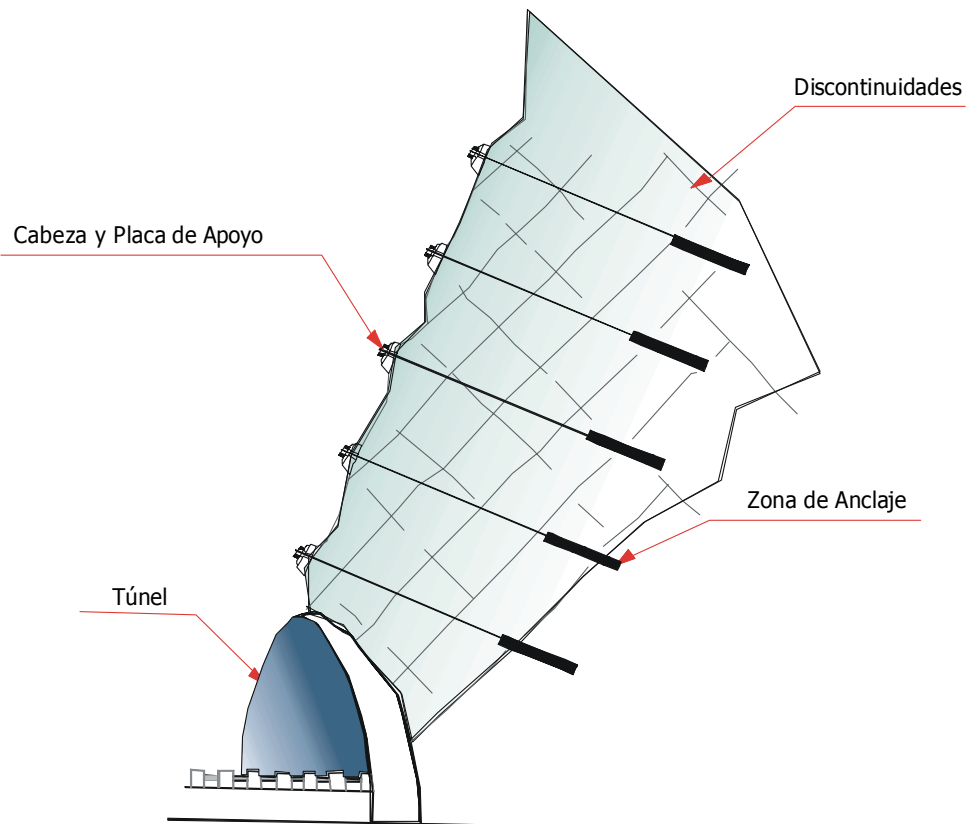


Figura 1.5 Roca fracturada en el portal de un túnel estabilizada mediante la técnica de tirantes anclados de acuerdo a Schnabel [3]

Los tirantes se componen de tres partes:

- a) La zona de anclaje propiamente dicha.
- b) Una zona libre en la que el tirante puede alargarse bajo el efecto de la tracción. En esta zona el tirante se encuentra generalmente encerrado en una vaina que impide el contacto con el terreno.
- c) La cabeza de anclaje que transmite el esfuerzo a la estructura o pantalla.

La zona de anclaje es la parte solidaria al terreno, y es la encargada de transferir los esfuerzos al mismo.

La zona libre es la parte en la cual la armadura metálica se encuentra separada o independizada del terreno que la rodea, lo que permite deformarse con plena libertad al ponerse en tensión.

Por último, la cabeza, corresponde a la zona de unión de la armadura a la placa de apoyo. El anclaje de los tirantes se coloca mediante inyecciones de mortero o de lechada de cemento. El tirante tiene uno o dos tubos que sirven para la inyección y para la salida del aire.

Este último sirve para indicar que el barreno ha sido totalmente inyectado y por ende la zona de anclaje.

Para repartir el esfuerzo ejercido por el tirante sobre la estructura a estabilizar se utiliza una placa de hormigón armado o metálica.

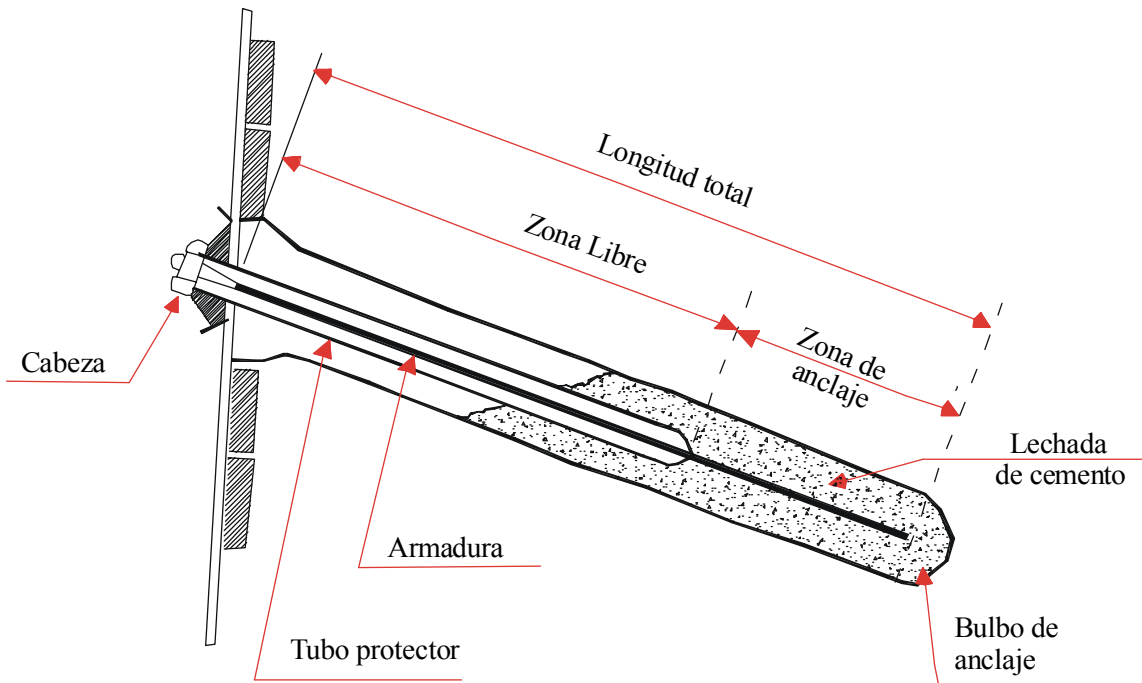


Figura 1.6 Detalle de un tirante anclado

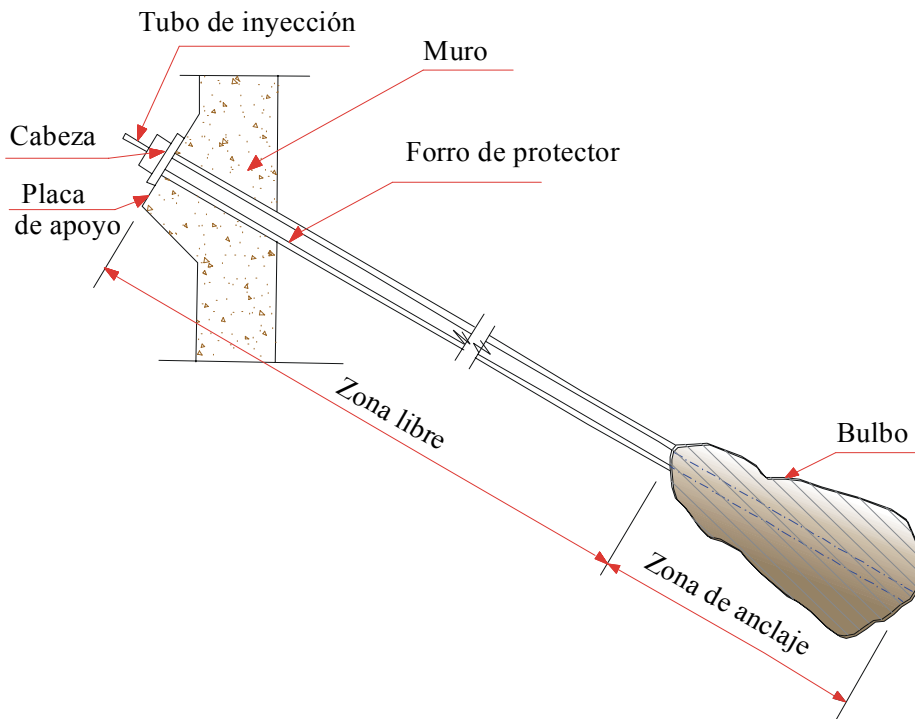


Figura 1.7 Sección típica de un tirante anclado

En relación a las características de los anclajes, Ayala et al [4] menciona lo siguiente:

La longitud de los anclajes suele oscilar entre 10 y 80 m y el diámetro de perforación entre 75 y 150 mm.

Los anclajes pueden dividirse según su aplicación en función del tiempo de servicio, distinguiéndose los siguientes tipos:

a) Anclajes provisionales: Tienen carácter de medio auxiliar y proporcionan las condiciones de estabilidad a la estructura durante el tiempo necesario para disponer otros elementos resistentes que los sustituyan. De acuerdo a Habib [5] la vida útil no debe ser mayor de 18 meses.

b) Anclajes permanentes: Se instalan con carácter de acción definitiva. Se dimensionan con mayores coeficientes de seguridad y han de estar proyectados y ejecutados para hacer frente a los efectos de la corrosión. Dichos anclajes están diseñados para una vida de servicio superior a los 18 meses [5].

Como previamente se ha indicado en este tipo de anclajes es importante disponer de la aplicación de un sistema anticorrosivo que garantice la protección del acero por varias décadas. El anticorrosivo debe ser resistente a los agentes químicos y elementos bacteriológicos, además de los ácidos orgánicos, así como resistente a los niveles de agresividad del suelo.

Adicionalmente la armadura metálica debe ser capaz de transmitir de forma duradera y continua los esfuerzos del anclaje sin sufrir deterioro alguno.

En definitiva se requiere adoptar una filosofía de diseño orientada a poder asegurar una protección completa del tirante y de la lechada de cemento.

En función de su forma de trabajar se pueden clasificar en:

c) Anclajes pasivos: No se pretensa la armadura después de su instalación. El anclaje entra en tracción al empezar a producirse la deformación de la masa de suelo o roca.

d) Anclajes activos: Una vez instalado se pretensa la armadura hasta alcanzar su carga admisible, comprimiendo el terreno comprendido entre la zona de anclaje y la placa de apoyo de la cabeza.

e) Anclajes mixtos: La estructura metálica se pretensa con una carga menor a la admisible, quedando una fracción de su capacidad resistente en reserva para hacer frente a posibles movimientos aleatorios del terreno.

La carga admisible de una armadura es igual al producto de la sección de acero por su límite elástico, multiplicado por un coeficiente de seguridad (0,6 para anclajes permanentes y 0,75 para anclajes provisionales). Por lo tanto, al utilizar anclajes permanentes la carga o tracción máxima admisible (service load o designa load) corresponde a $T_a \leq 0,6 T_g$, siendo T_g la carga que representa el límite elástico

considerando el 0,1% de la deformación en el diagrama $\sigma - \varepsilon$, para barras o cables de alta resistencia, y 0,2 % para aceros normales.

En una forma aproximada $T_g \approx 0,85 F_{pu}$, es decir un 85% de la carga de rotura (ultimate tensile load), lo que conlleva a obtener finalmente que $T_a \approx 1/2 F_{pu}$.

La Tabla 1.1*, muestra según Pfister et al [6] las características mecánicas de las barras, cordones y alambres utilizados como elementos de soporte, la cual es de gran utilidad para determinar la carga de diseño, así como la separación entre anclajes.

* Se ha conservado el sistema técnico de las unidades utilizado por el autor.

TABLA 1-1

**CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE BARRAS, CORDONES Y ALAMBRES
SEGÚN PFISTER [6]**

	TIPO	ÁREA (mm ²)	Es (tf)	T _g (tf)	F _{pu} (tf)	Tipo de acero St (Normas francesas) (kgf/mm ²)	T _a (tf) Para anclajes perma- nentes
Barras	φ26DY ^b	551,00	41,00	47,00	58,00	85,00-105,00 (Esfuerzo de tracción al 0,1% de deformación – resistencia última)	28,00
	φ32DY	804,00	60,00	68,00	84,00		41,00
	φ36DY	1.018,00	76,00	87,00	107,00		52,00
Cordones (torones)	1T13 ^c	93,00	12,00	15,00	17,00	163,00-185,00	9,00
	2T13	186,00	24,00	30,00	34,00		18,00
	4T13	372,00	48,00	60,00	68,00		36,00
	6T13	558,00	72,00	90,00	102,00		54,00
	7T13	651,00	84,00	105,00	119,00		63,00
	8T13	744,00	96,00	12,00	136,00		72,00
	9T13	837,00	108,00	135,00	153,00		81,00
	10T13	930,00	120,00	150,00	170,00		90,00
	11T13	1.023,00	132,00	165,00	187,00		99,00
	12T13	1.116,00	144,00	180,00	204,00		108,00
	1T15	139,00	18,00	22,00	24,00	153,00-175,00	13,00
	6T15	834,00	108,00	132,00	148,00		79,00
	7T15	973,00	126,00	154,00	173,00		92,00
	8T15	1.112,00	144,00	176,00	198,00		105,00
	9T15	1.251,00	162,00	198,00	222,00		118,00
	10T15	1.390,00	180,00	220,00	247,00		132,00
	11T15	1.529,00	198,00	242,00	272,00		145,00
	12T15	1.668,00	216,00	264,00	296,00		158,00
	13T15	1.807,00	234,00	286,00	321,00		171,00
	14T15	1.946,00	252,00	308,00	346,00		184,00
15T15	2.085,00	270,00	330,00	371,00	198,00		
16T15	2.224,00	288,00	352,00	395,00	211,00		
17T15	2.363,00	306,00	374,00	420,00	224,00		
18T15	2.502,00	324,00	396,00	445,00	237,00		
9T18	2.007,00	266,00	297,00	349,00	178,00		
12T18	2.676,00	354,00	396,00	465,00	237,00		
Alambres	6W8 ^d	301,00	30,00	39,60	44,40	148,00-194,00	23,00
	8W8	401,00	40,00	52,80	59,20		31,00
	10W8	502,00	50,00	66,00	74,00		40,00
	12W8	604,00	60,00	79,20	88,80	131,00-148,00	47,00

b – Barras Dywidag

c – Torones: 8T13 = 8 torones φ 13 mm

d – Alambres

T_a = Límite elástico correspondiente al 0,1% de la deformaciónen el diagrama σ - ϵ ∴ T_g ≈ 0,85 F_{pu}E_s = Límite elástico de proporcionalidad , T_a = Tracción admisible

Por ejemplo, si se considera una barra ϕ 32 DY, St 85/105 (85/105 kgf / mm²) es decir (834/1.030 MPa) los valores de F_{pu} (carga de rotura), T_g (limite elástico) y T_a (tracción admisible) son respectivamente:

$$Área = \frac{\pi (32,00)^2}{4} \text{ mm}^2 \approx 804,00 \text{ mm}^2$$

$$F_{pu} = (\text{Área de la barra} \cdot \text{Resistencia unitaria})$$

$$F_{pu} = 804,00 \text{ mm}^2 \cdot 1.030,00 \text{ N/mm}^2 = 828.12 \text{ kN} (\sim 84,00 \text{ tf})$$

$$T_g = (\text{Área de la barra} \cdot \text{Esfuerzo de tracción al 0,1\% de deformación})$$

$$T_g = 804,00 \text{ mm}^2 \cdot 834,00 \text{ N/mm}^2 = 670,54 \text{ kN} (\sim 68,00 \text{ tf})$$

$$T_g \approx 0,85 \cdot F_{pu} \approx 0,85 \cdot 828,12 \text{ kN} \approx 704,00 \text{ kN} (71,00 \text{ tf valor aproximado para fines prácticos})$$

$$T_a = 0,60 \cdot T_g (\text{Anclajes Permanentes})$$

$$T_a = 0,60 \cdot 670,54 \text{ kN} \approx 402,32 \text{ kN} (\sim 41,00 \text{ tf, ver tabla 1.1})$$

Para el caso de un cable constituido por cuatro torones de ϕ 13,00 mm, 4T13 (cada torón está formado por siete hilos, seis de acero de ϕ 4,10 mm alrededor de un alma central metálica de ϕ 4,20 mm)*, resulta:

El diámetro del cable se mide sobre el resalte máximo de los torones o hilos, y no sobre los llanos. Es un dato nominal puesto que cualquiera que sea el cuidado que se ponga en la fabricación el diámetro del cable varía de forma sensible de una a otra sección, por lo tanto posee dos diámetros, siendo el diámetro práctico igual al teórico más o menos 5%.

$$\text{Área del cordón (torón)} = \frac{\pi}{4} \left[(4,20)^2 + 6(4,10)^2 \right] \text{mm}^2 = 93,00 \text{ mm}^2$$

$$F_{pu} = 4 (93,00 \text{ mm}^2 \cdot 1.815,00 \text{ N/mm}^2)$$

$$F_{pu} = 4 \cdot 168,80 \text{ kN} = 675,20 \text{ kN} (\sim 68,00 \text{ tf})$$

$$T_g = 4 (93,00 \text{ mm}^2 \cdot 1.599,00 \text{ N/mm}^2)$$

$$T_g = 4 \cdot 148,71 \text{ kN} = 594,84 \text{ kN} (\sim 60,00 \text{ tf})$$

$$T_g \approx 0,85 F_{pu} = 0,85 \cdot 675,20 \text{ kN} = 573,92 \text{ kN} (\sim 58,00 \text{ tf})$$

$$T_a \approx 0,60 \cdot T_g = 0,60 \cdot 594,84 \text{ kN} = 356,90 \text{ kN} (\sim 36,00 \text{ tf})$$

Finalmente si el torón es 1T15, el alma tiene un diámetro de ϕ 5,35 mm, más seis hilos de satélite de ϕ 5,20 mm, dando una sección metálica nominal de aproximadamente 140,00 mm².

Durante la fase del tensado, es importante llevar a cabo la tracción de prueba T_p , la cual está limitada por la tracción admisible y por la tracción correspondiente al límite elástico.

$$T_p = 1,20 T_a \text{ (anclajes provisionales)}$$

$$T_p = 1,30 T_a \text{ (anclajes permanentes), siempre que } T_p \leq 0,90 T_g.$$

La tracción de prueba se mantiene durante cierta cantidad de tiempo y al fijar la armadura a la estructura, se produce un desplazamiento de la misma y la correspondiente pérdida de tensión, además de las producidas por el sistema de

anclaje a gato, penetración de cuñas, etc. (aproximadamente un 3% de la carga), hasta llegar a la tensión real al final del bloqueo T_b (lock-off load). Debido a que la tracción en el tirante decrece con el tiempo por pérdidas por relajación del acero, y a deformaciones que sufre el terreno $T_b = (T_a + \text{pérdidas de tensión})$.

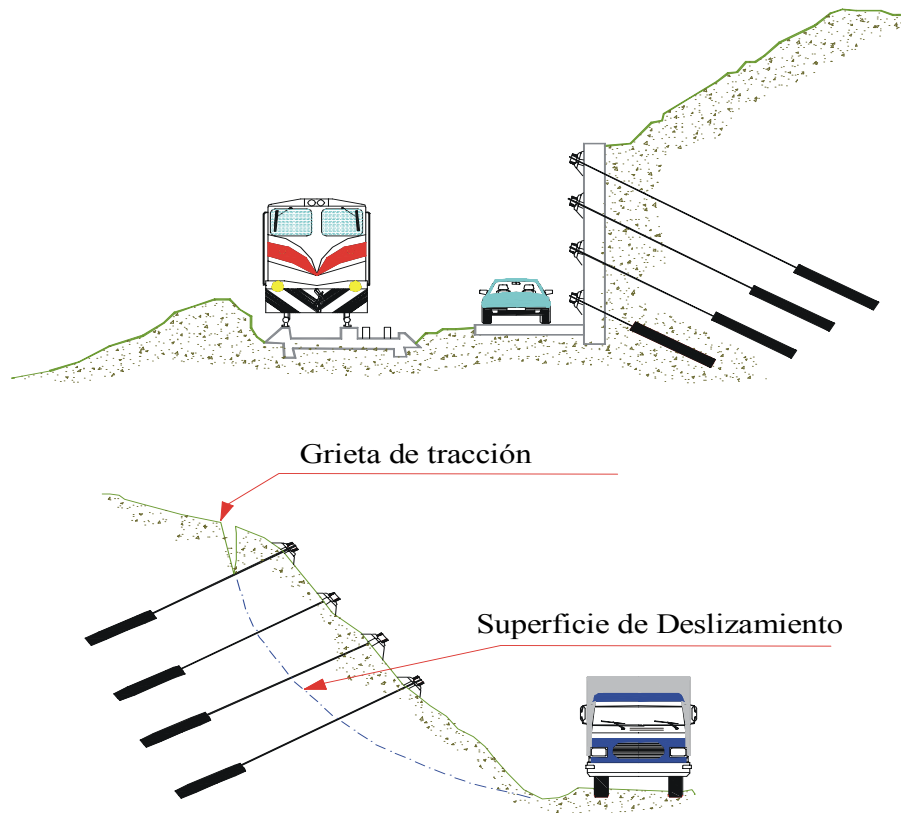


Figura 1.8 Estabilización de talud rocoso utilizando la técnica de anclajes en las vías terrestres .

En base a lo indicado por Habib [5], los anclajes instalados en suelos de buena capacidad las pérdidas han representado alrededor del 2 al 3% de la carga máxima, lógicamente es necesario agregar además las pérdidas accidentales y

aquellas no proporcionales a la carga causadas por fenómenos más complejos inherentes al proceso de adherencia en la zona del anclaje.

Con el objeto de aclarar lo arriba indicado se lleva a cabo el siguiente ejemplo con pequeñas variaciones, el cual es descrito por Xanthakos [7].

Cable de 7 torones de ϕ 13,00 mm con una carga de rotura por cordón de 167,00 kN, es decir la carga total última a tracción es $F_{pu} = 7 \times 167,00 \text{ kN} = 1.169,00 \text{ kN}$, siendo el valor de $T_a = 1/2 F_{pu} = 584,50 \text{ kN}$. El área total del anclaje por cable constituido por los siete torones es $A = 7 \cdot 93,00 \text{ mm}^2 = 651,00 \text{ mm}^2$ y el módulo de elasticidad $E=197,00 \cdot 10^6 \text{ kN/m}^2$.

Las pérdidas iniciales producidas por la puesta de tensión en el sistema de anclaje a través del gato, penetración de cuñas y rozamiento en la entubación es de 6,00 milímetros y las pérdidas diferidas a través del tiempo por relajamiento del acero y deformaciones del suelo han sido estimadas en un 8% de la carga de diseño. La longitud libre del anclaje es $L = 12,00 \text{ m}$.

Inicialmente el alargamiento del acero es:

$$(\Delta L)_i = \frac{T_a \cdot L}{A \cdot E} = \frac{584,50 \text{ kN} \cdot 12,00 \text{ m}}{651,00 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot 197,00 \cdot 10^6 \text{ kN/m}^2}$$

$$(\Delta L)_i = 0,0547 \text{ m} = (54,70 \text{ mm})$$

Por lo tanto el alargamiento total estimado, considerando el 8% a través del tiempo, más el correspondiente a las pérdidas iniciales es:

$$(\Delta L)_t = 54,70 \text{ mm} \cdot 1,08 + 6,00 \text{ mm} \approx 65,00 \text{ mm}$$

Bajo estas condiciones la carga de tracción de bloqueo T_b requerida, a objeto de lograr la carga de diseño T_a , una vez consideradas las pérdidas es :

$$T_b = \frac{(\Delta L)_t \cdot A \cdot E}{L} = \frac{65,00 \cdot 10^{-3} \cdot 651,00 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot 197,00 \cdot 10^6 \text{ kN/m}^2}{12,00 \text{ m}}$$

$T_b = 694,67 \text{ kN}$, es decir aproximadamente un 59,00% de F_{pu}

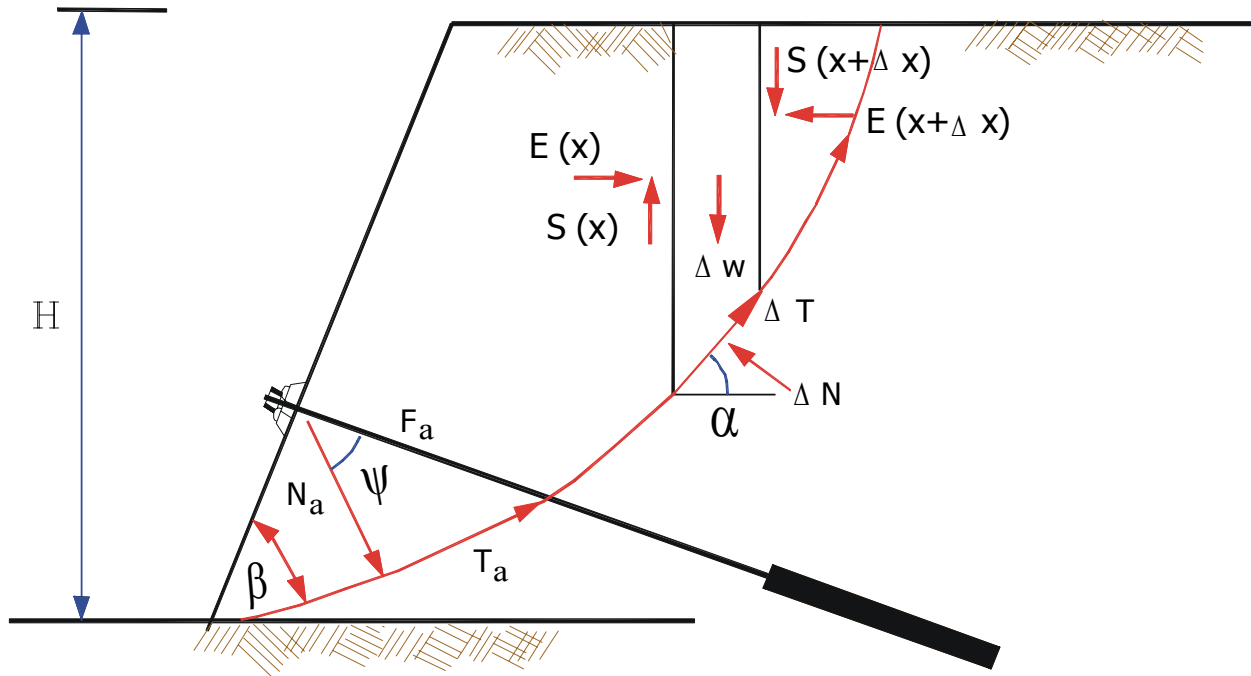


Figura 1.9 Tirantes anclados como elemento estabilizador en masa de suelos.

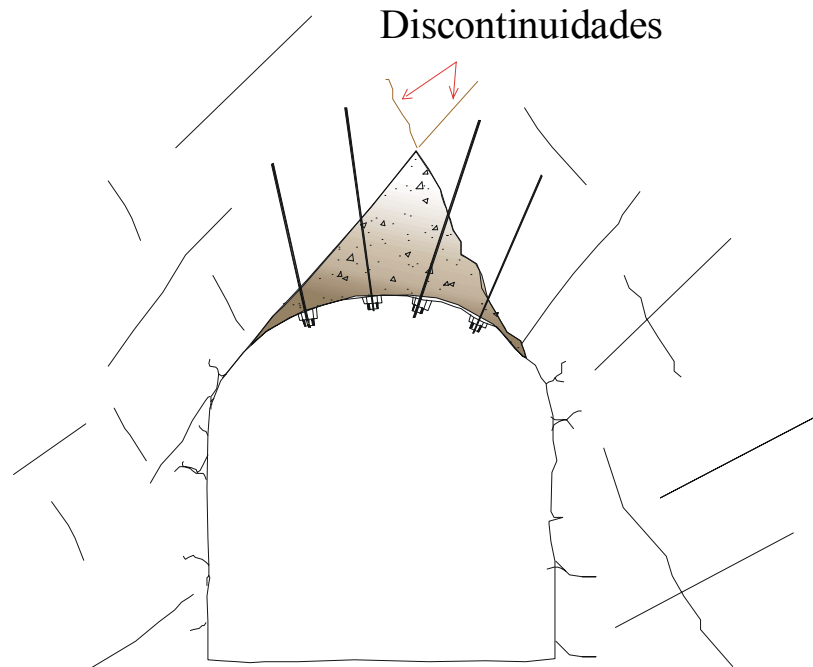


Figura 1.10 a Bulones de anclajes soportando un bloque de roca en un túnel excavando a través de un macizo rocoso diaclasado.

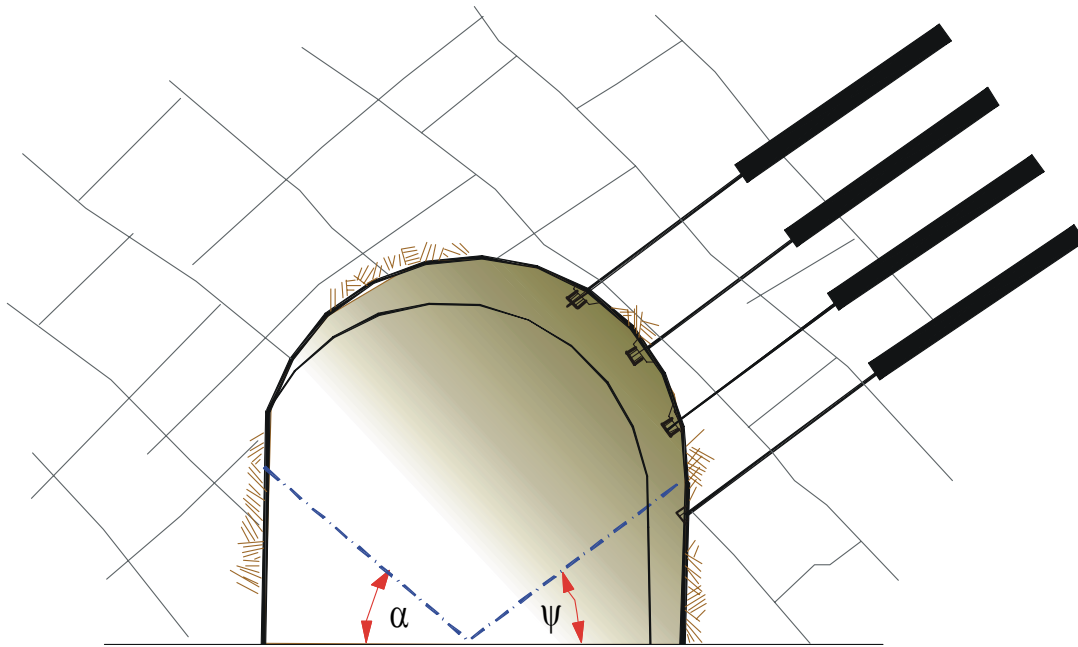


Figura 1.10 b Galería excavada en roca estratificada y estabilizada mediante bulones o pernos de anclaje.

De acuerdo a Muzás Labad [8] los materiales empleados como armadura o miembro de tracción son los siguientes:

- Alambres de acero de alta resistencia.
- Cordones o torones constituidos por alambres de alta resistencia.
- Barras de Acero especial.

Los alambres utilizados generalmente tienen un diámetro entre 5 y 8 mm. El acero posee una resistencia a tracción de 1.600,00 a 1.900,00 N/mm² y un límite elástico convencional de 1.450,00 a 1.700,00 N/mm².

La armadura de los anclajes se conforma de una serie de alambres paralelos cuyo número suele oscilar entre 6 y 54.

Alambres con un diámetro algo inferior (entre 2 y 4 mm) sirven para la fabricación de cordones de alambres trenzados. Los más utilizados son los torones de 7 y de 19 hilos o alambres. Los cordones se emplean aisladamente o en grupos de hasta 39 cordones. Las barras de acero especial tienen generalmente diámetros comprendidos entre 16 y 40 mm, con resistencia a la tracción del orden de 600,00 a 1.050,00 N/mm² y límite elástico convencional entre 500,00 y 900,00 N/mm².

En todos los casos los aceros empleados han de ser dúctiles, con alargamientos de rotura superiores al 4%. Las barras de acero utilizadas en los anclajes se denominan bulones o pernos de anclaje.

El anclaje mediante cordones o grupos de cordones (torones) se denomina anclaje por cables. Dicha armadura está formada por una serie de hilos paralelos comprendidos entre 6 y 54. La torsión en hélice de una o varias capas de hilos de acero, alrededor de un alma central rectilínea constituye el torón", con un mínimo de 7 hilos o alambres (1 + 6), o de 19 hilos (1 + 6 + 12), el primero frecuentemente utilizado en la estabilización de taludes. Faraco [9], menciona que una combinación de 39 cordones de 19 alambres cada uno puede resistir 7.500,00 kN.

Por consideraciones operacionales los bulones no suelen usarse para anclajes de más de 12 m de longitud por lo que su uso está limitado a anclajes superficiales.

Se emplean generalmente en taludes y galerías en roca con objeto de minimizar los desprendimientos producidos por fracturas a lo largo de fisuras superficiales.

Los bulones se caracterizan por su aplicación como anclajes de baja capacidad, tanto activos como pasivos. La carga admisible, suele fluctuar entre 60,00 y 100 kN por bulón. Por lo general las longitudes varían entre 3 a 6 metros

Los anclajes por cable suelen tener una longitud mucho mayor, en ocasiones superior a los 80 m y una capacidad de carga también superior, generalmente entre 200,00 y 2.000,00 kN por anclaje, sobrepasándose, en algunos casos, las 4.000,00 kN por anclaje. A diferencia de los bulones, es poco frecuente como anclaje pasivo. Los anclajes por cable se emplean para estabilizar grandes masas deslizantes con superficies de rotura profundas.

2.1.- Partes del Anclaje

Como lo mencionan Ayala et al [4], existen diferentes maneras de constituir la zona de anclaje, en la que la armadura queda fijada al terreno.

a) Zona de Anclaje

El dispositivo mecánico más elemental y de más fácil instalación es el casquillo expansivo (figura 1.12a) dado su carácter puntual, está concebido para anclar en roca sana o estabilizar bloques y cuñas de roca que se han desarrollado por la intersección de unos pocos planos de debilidad. Se utiliza generalmente en bulones de poca capacidad resistente (menos de 200 kN por bulón)

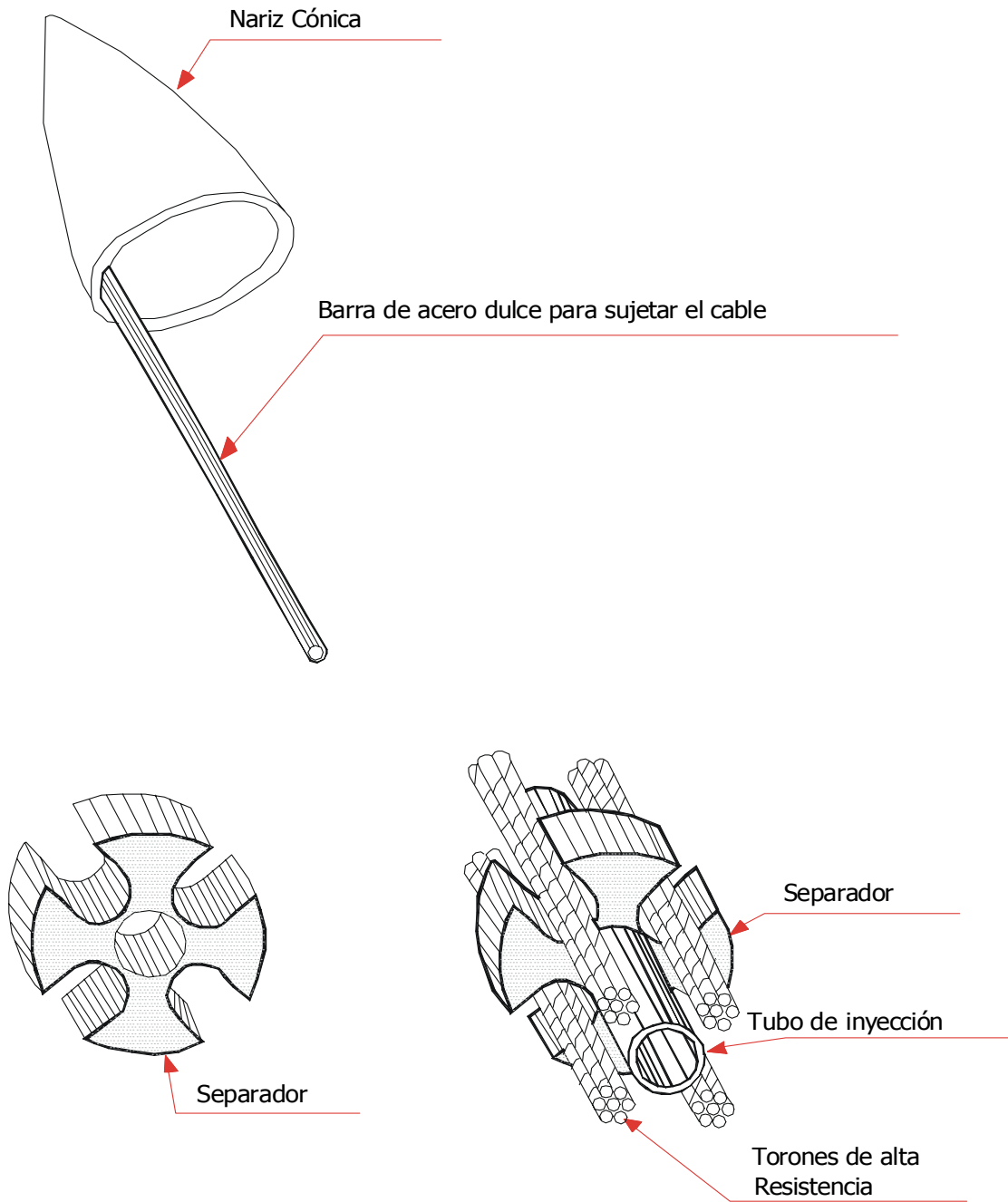
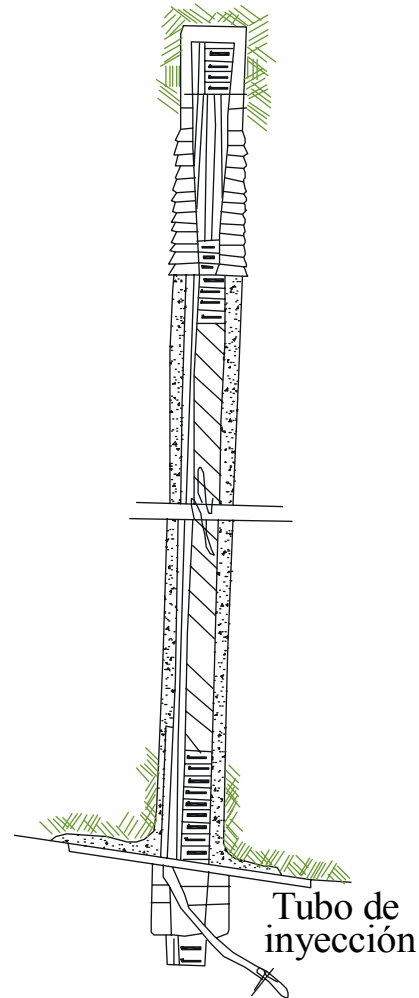
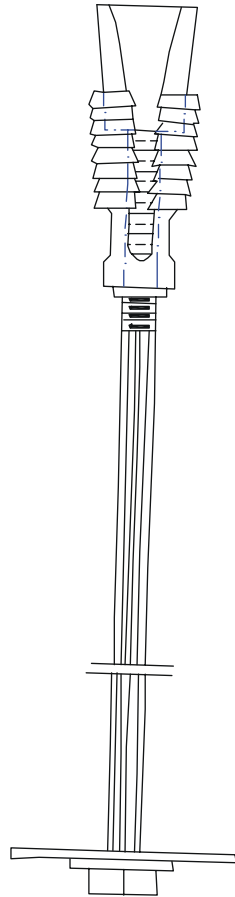


Figura 1.11 Algunos elementos del anclaje según Coates y Sage [10].

a) Anclaje de expansión



b) Anclaje de expansión inyectado

Figura 1.12 Anclajes de expansión según el Corps of Engineers [11].

Con el tiempo hay la tendencia que el cono de expansión se deslice perdiendo efectividad progresivamente debido probablemente, como resultado del efecto de las vibraciones por las voladuras. En muchos casos para evitar esta desventaja, el barreno es inyectado con lechada de cemento.

La lechada se inyecta por la boca del barreno y el tubo de regreso llega hasta el final del mismo. La inyección termina después de la salida del aire y de la emisión de lechada por el tubo de regreso (véase figura 1.12b). De esta forma el anclaje actúa en forma permanente, evitándose a la vez los efectos de corrosión.

Los bulones de expansión se utilizan con éxito en el campo de la minería debido a las siguientes ventajas:

Recuperabilidad: Al aflojar la tuerca que sujeta la placa, el perno pierde la tensión, y si no existen deformaciones excesivas puede recuperarse con facilidad.

Mecanización: El perno de expansión puede mecanizarse con bastante simplicidad con las modernas unidades de perforación tipo jumbo para bulonaje.

Seguridad: Las conchas de expansión poseen una mayor superficie de anclaje.

Los bulones de expansión no pueden ser empleados en rocas friables y la carga que admiten, es por lo general, inferior a la resistencia del acero de la barra.

Este obstáculo ha sido superado mediante la utilización de bulones de anclaje repartido, donde la zona de anclaje se obtiene a todo lo largo de la superficie lateral del perno mediante el fraguado de un mortero que ocupa el espacio anular libre entre el perno y las paredes del barreno (véase figura 1.13)

Adicionalmente tiene la ventaja con relación a los bulones de expansión, que pueden emplearse con éxito en rocas fracturadas, además de su simplicidad, economía y estabilidad en el tiempo como anclaje permanente.

Una forma de eliminar el sistema de inyección del mortero o lechada de cemento, es aplicando el método perfo, sin lugar a dudas más versátil pero también más costoso.

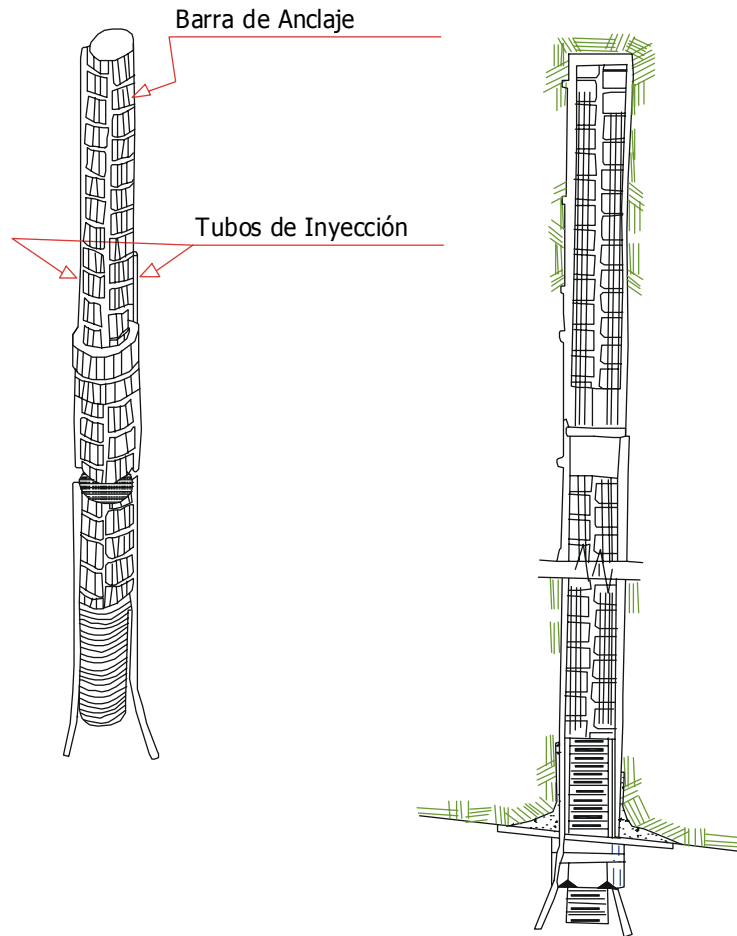


Figura 1.13 Bulones de anclajes repartidos según el Corps of Engineers [11].

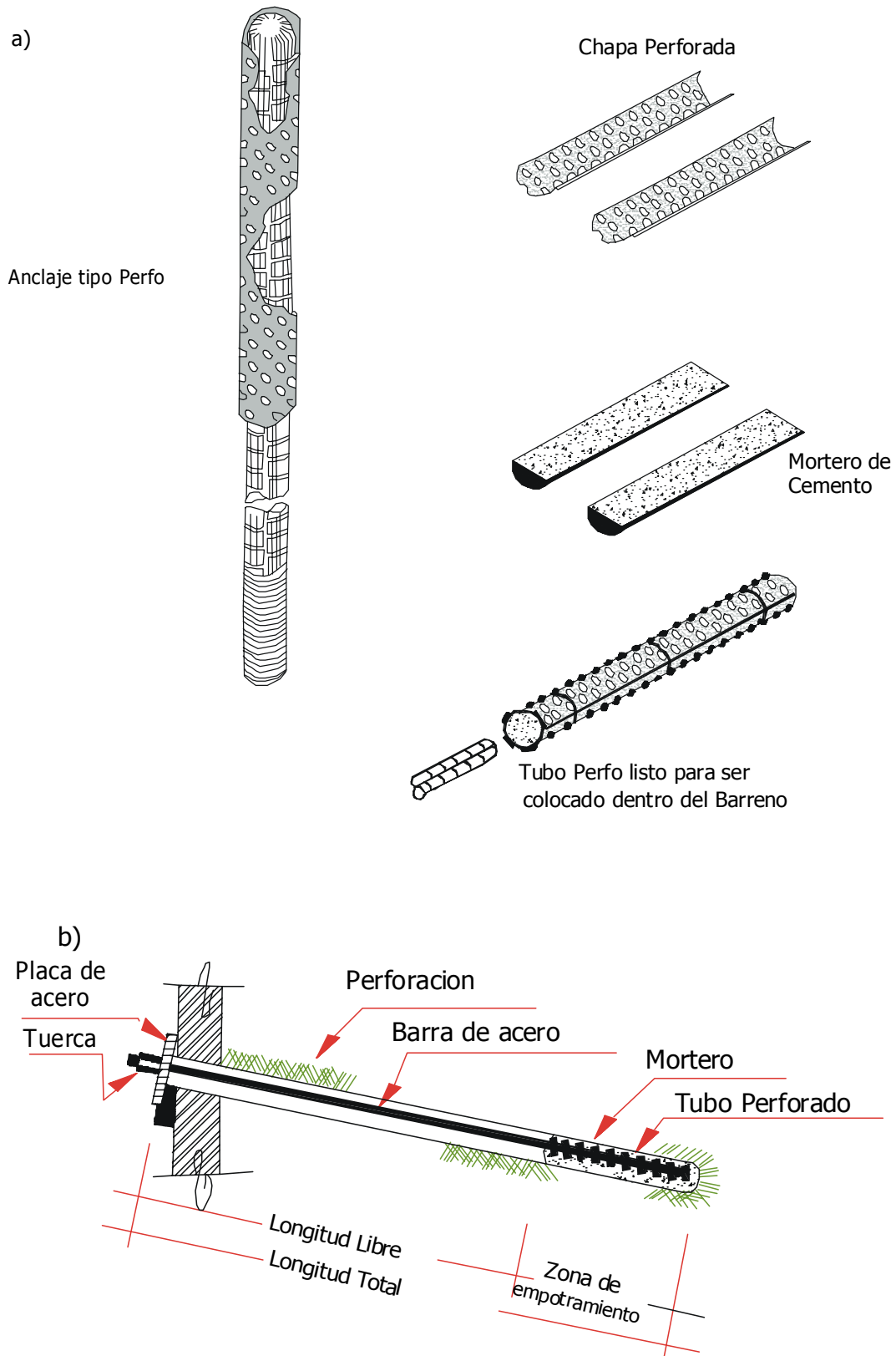


Figura 1.14 Anclaje tipo perfo con longitud libre que permite ser tensado.

Para colocar el mortero se utilizan dos semicilindros de chapa perforadas (ver figura 1.14a), que una vez rellenos de mortero se introducen en el barreno, posteriormente se inserta la barra de acero, desplazando lateralmente el mortero, el cual penetra en el espacio anular, adaptándose perfectamente a todas las irregularidades, garantizando al mismo tiempo una buena adherencia de los barrenos. Los anclajes tipo perfo se construyen en longitudes hasta de 12 metros y para capacidades de carga entre 120,00 y 200,00 kN.

De acuerdo a Stilborg [12] los pernos de anclajes repartidos (totalmente inyectados) han sido utilizados con extraordinarios resultados a través de diferentes aplicaciones en el campo de la ingeniería civil y la minería, así como en las diversas condiciones que pueda presentar la roca.

A pesar de su versatilidad, por su rigidez en algunos casos extremos puede resultar inadecuado.

Hoek y Brown [13] recomiendan los siguientes diámetros para el sistema perfo.

Diámetro barra (mm)	Diámetro barreno (mm)	Diámetro adecuado del tubo “perfo” (mm)
19 (3/4")	32 (1 1/4")	27 (1 1/16")
25 (1")	32 (1 1/2")	32 (1 1/4")
29 (1 1/8")	44 (1 3/4")	38 (1 1/2")
32 (1 1/4")	51 (2")	44 (1 3/4")
35 (1 3/8")	57 (2 1/4")	51 (2")

Desde luego, si únicamente en la parte extrema del barreno se coloca el mortero con el tubo perforado, quedará una longitud libre, lo que permitir en este caso tensar el

tirante (ver figura 1.14b). Como se ha indicado previamente la zona de anclaje se efectúa mediante inyecciones de lechada, generalmente a base de cemento con relaciones cemento-agua entre 1,5 y 2. También se emplean, en algunos casos, inyecciones de mortero de cemento.

La inyección se lleva a cabo a través de tuberías de PVC y es frecuente inyectar a presión, alcanzándose valores de hasta 3,00 MPa. En este caso es necesario separar la zona de anclaje de la zona libre y evitar que ésta se cimente con la lechada.

Puede ser ventajoso emplear aditivos que aceleren el fraguado y disminuyan la retracción.

En el caso de bulones de roca es frecuente la utilización de resinas para la formación de la zona de anclaje. La adherencia resina-roca es 2 ó 3 veces la de la lechada de cemento siempre que se utilice en un medio seco.

Se llama bulbo de anclaje al material (cemento, mortero o resina) que recubre la armadura y que la solidariza con el terreno que la rodea.

Es importante lograr una buena materialización del bulbo de anclaje, operación más delicada cuando se trata de terrenos sueltos y fracturados.

La versión más simple es el tirante tipo monobarra o mono (figura 1.6) en el cual la barra es directamente empotrada en el bulbo.

Debido a las dificultades de garantizar una buena protección a la corrosión de la armadura metálica tienen su aplicación en la mayoría de los casos en contenciones temporales.

A la vez es importante destacar tal como lo menciona Schnabel [3], que en la zona de anclaje el mortero o lechada de cemento es de gran utilidad para preservar la armadura metálica frente a la acción corrosiva, protegiéndola mediante una película pasiva formada por hidróxidos ferrosos $[\text{Fe}(\text{OH})_2]$, que se caracteriza por ser altamente insoluble en soluciones con un PH alcalino, siendo además la responsable de garantizar la seguridad en ambientes agresivos cuando el acero está embebido en estructuras de concreto.

Como se sabe el cemento hidratado tiene un PH mayor de 12,40, proporcionando un medio ideal alcalino para mantener la mencionada película. (El acero se encuentra bien protegido en un medio de PH 10-12).

Por otro lado el mencionado autor, ha investigado una gran cantidad de anclajes permanentes instalados a partir de 1960, y protegidos únicamente con lechada o mortero de cemento, sin que exista evidencia de que hallan fallado debido a la acción de los agentes corrosivos.

Igual resultado positivo ha tenido el analizar y examinar la mencionada protección con diferentes empresas especialistas en la materia, consultores y suplidores, quienes coinciden de no haber registrado falla por corrosión.

También menciona, que aun cuando los criterios británicos y franceses han tenido gran influencia de las normas alemanas, la última en mencionarse utiliza doble protección como anclaje permanente, sin embargo, en Europa y los Estados Unidos de Norteamérica, emplean en la mayoría de los casos la inyección de cemento como elemento de protección en la zona de anclaje, y grasa con camisas de PVC o metálicas en la zona libre.

Sin embargo, cabe destacar que hay evidencias que el mortero o lechada de cemento haya fallado como elemento de protección contra la corrosión, y existe la duda que la inyección de cemento pueda proveer una garantía adecuada para una vida útil de 50 a 100 años.

En este sentido Merrifield, Barley y Von Matt [14], reportan que de los millones de tirantes anclados instalados alrededor del mundo, 35 casos de falla por corrosión han sido señalados en los últimos años. Esto indica que los ingenieros deben aplicar rigurosamente las especificaciones concernientes al diseño e instalación de los anclajes, especialmente si se considera que en la próxima década habrá un incremento considerable de anclajes, los cuales requerirán que se implementen rigurosos controles de protección contra la corrosión.

Por tal motivo Barley [15] menciona que el British Standard Institute de Inglaterra a través de un comité dirigido por G.S. Littlejohn en 1978, concluyen que la lechada de cemento en la zona de anclajes no puede ser considerada como un elemento único de

protección contra la corrosión, debiéndose utilizar doble barrera protectora a través de una vaina corrugada interna y otra externa.

Adicionalmente, para disminuir el riesgo de corrosión es recomendable instalar los tirantes anclados en masas de suelo con PH mayores a 4,50 y resistividades superiores a los 2.000,000 ohm-cm, por cuanto están actuando en ambientes no agresivos.

La resistencia de la zona de anclaje viene determinada, en primer lugar, por la adherencia entre lechada y acero, y en segundo lugar, por la adherencia entre el bulbo de anclaje y el terreno que lo rodea que es generalmente lo que determina la resistencia.

Es difícil determinar "a priori" la resistencia de la zona de anclaje, especialmente en anclajes inyectados, dado que no es fácil definir la presión residual de inyección y la forma real del bulbo. En la Tabla anexa recomendada por Muzás Labad [8] se recogen con carácter orientativo algunos valores de la resistencia media al deslizamiento de bulbos inyectados, en distintos tipos de terreno (en el capítulo V se analiza en detalle este tema).

**RESISTENCIA MEDIA AL DESLIZAMIENTO DE BULBOS INYECTADOS
SEGÚN Muzás Labad [8]**

Tipo de terreno	Resistencia media al deslizamiento (MPa)
Rocas duras (granito, gneis, caliza)	1,00 a 2,50
Roca floja	0,30 a 1,00
Gravas y arenas gruesas	0,70 a 1,00
Arenas medias y finas	0,30 a 0,60
Arcillas con resistencia a la compresión simple:	> 0,80
≥ 0,4 MPa	0,40 a 0,80
0,10 a 0,40 MPa	0,25 a 0,40
0,05 a 0,10 MPa	

b) Zona Libre

La zona libre, cuando el terreno de la perforación puede separarse, queda independizado del mismo mediante camisas de PVC o metálicas. En cualquier caso debe protegerse de la corrosión mediante rellenos de productos protectores.

Por razones constructivas, la zona libre debe tener una longitud mínima de 6m, con objeto de controlar adecuadamente la puesta en tensión y minorar la influencia de los movimientos de la cabeza.

c) Cabeza y Placa de Apoyo

El sistema de abroche de la armadura a la placa de apoyo puede estar constituido por tuercas en el caso de barras roscadas o bien remachados o conos macho-hembra para alambres y cordones.

El abroche puede ser común al conjunto de la armadura o independiente para uno o varios elementos.

La placa de apoyo suele situarse, a su vez, sobre un bloque de hormigón armado que transmite los esfuerzos a la superficie del terreno.

La puesta en tensión de los cables se efectúa normalmente mediante gatos o, si la cabeza dispone de rosca (barra), mediante llave dinamométrica. En este último caso es posible conocer aproximadamente la tensión transmitida al anclaje.

Tomando en cuenta las gráficas elaboradas por la empresa Williams [16], se obtiene una fórmula sencilla para determinar la fuerza (F) de tensión, resultando la

expresión $F \approx 315,00 \left(\frac{18,75}{\phi} \right) \cdot M$, para barras de $18,75 \leq \phi \leq 35$ mm. La tracción

expresada en N y el momento de torsión M en N·m. Existen sistemas en los que, además de tensar simultáneamente todos los alambres, se puede comprobar la tensión y efectuar el pretensado posterior sin dañar los alambres.

2.2.- Anclajes Activos y Pasivos

Los anclajes activos ejercen una acción estabilizadora desde el mismo instante de su puesta en tensión incrementando la resistencia al corte de la masa de suelo o roca como consecuencia de las tensiones normales adicionales al esqueleto mineral. Los anclajes pasivos entran en acción, oponiéndose al desplazamiento, cuando la masa deslizante ha comenzado a moverse. De aquí se obtienen dos importantes ventajas de los anclajes activos sobre los pasivos. En los primeros se logra aprovechar la resistencia intacta del terreno, por cuanto, el movimiento de la masa produce una disminución de las propiedades resistentes. Por otro lado, dicho movimiento puede causar la rotura del revestimiento protector contra la corrosión, precisamente en el momento en el que la resistencia del anclaje es más necesaria.

Los anclajes pasivos entran en tracción al oponerse a la expansión o dilatación que se produce en las discontinuidades de la roca cuando comienza a producirse un deslizamiento a lo largo de las mismas.

El movimiento de la masa produce un incremento de volumen (dilatación) que está relacionado con la presencia de rugosidades en la misma.

Es decir, la efectividad de un anclaje pasivo está relacionada directamente con la magnitud de la dilatación, la cual depende del tamaño y la dureza de las

rugosidades. Por consiguiente en taludes en suelos o rocas blandas con juntas relativamente lisas los anclajes pasivos son menos efectivos.

2.3.- Protección Contra la Corrosión

La vida útil de un anclaje está condicionada a los efectos de la corrosión. Un anclaje carente de cualquier tipo de protección puede tener una duración de pocos meses.

También, cabe destacar que un anclaje sometido a esfuerzos relativamente altos puede originarse la denominada corrosión bajo tensión, que aparece incluso si el anclaje se encuentra en un ambiente neutro. El problema se evidencia por la formación de zonas frágiles en el anclaje a lo que sigue una rotura repentina.

En lo referente a las medidas efectivas está rellenar el anclaje en toda su longitud.

En la zona de anclaje, el mortero o lechada de cemento es vital importancia para evitar la corrosión, necesitándose un recubrimiento mínimo de 2 a 3 cm.

En general, como previamente se ha mencionado es necesario emplear en el caso de anclajes permanentes una vaina corrugada como elemento protector. Véase figura (1.15), tal como se indica en las recomendaciones para el proyecto, construcción y control de anclajes al terreno H.PO.8-96, redactado por la Asociación Técnica Española de Pretensado ATEP [17].

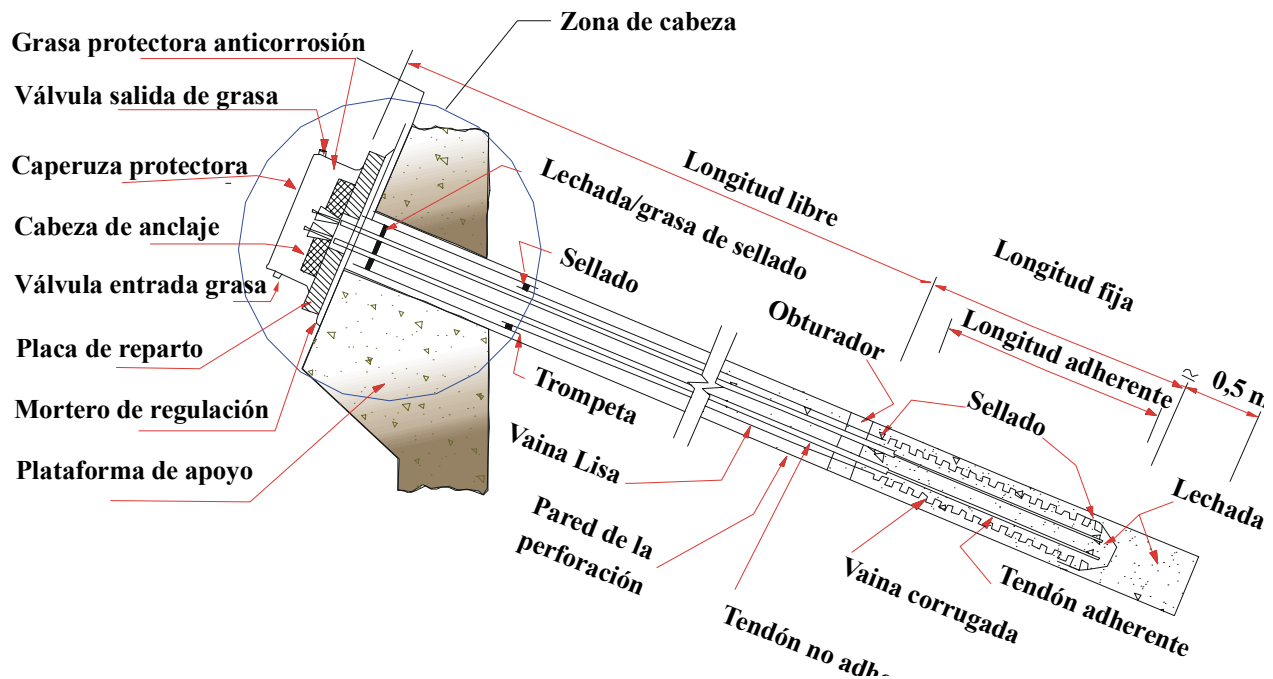


Figura 1.15 Partes típicas de un anclaje inyectado al terreno según la ATEP

[17].

También se utiliza la doble vaina corrugada para asegurar la completa protección contra la corrosión. La vaina interior de plástico corrugada contiene los tirantes, no debe agrietarse durante la carga, además de poseer suficiente capacidad adherente con la lechada de cemento en la interfase interior y exterior para asegurar la máxima capacidad de carga del tirante.

El conducto de plástico o vaina exterior debe tener suficiente espacio anular para permitir que penetre con facilidad la lechada de cemento entre ambos conductos y

tiene que cumplir con los mismos requisitos de la vaina interior. A la vez, la distancia adecuada entre el conducto externo y el barreno para que la lechada fluya con facilidad es de 5,00 mm, sin embargo los códigos especifican un mínimo de 10,00 mm.

Por otro lado, las grietas en la lechada de cemento no deben exceder de 0,10 mm de ancho.

La zona libre se puede preservar cubriendo el espacio entre la armadura y el barreno de la perforación con la lechada de cemento, recomendándose después de la puesta en tensión de la armadura, aunque en muchos casos no es posible, por cuanto hay que estar seguro que la inyección de la lechada de cemento ha cubierto en toda su longitud la zona de anclaje.

Adicionalmente es necesario revestir individualmente las barras o cordones con tubos de polietileno rellenos de grasa, lo cual está especialmente indicado si son previsibles movimientos posteriores a la puesta en tensión, pues podría producirse la rotura del revestimiento de lechada.

La cabeza de anclaje se encuentra en la parte exterior y debe ser objeto de cuidado especial. Es común sellarla con cemento o bien protegerla con grasa en el interior de una cubierta galvanizada. En función de lo previamente indicado Hanna [18], destaca que es importante conocer los principales factores que ayudan a contribuir con el proceso de corrosión del acero, éstos son:

a) Resistividad del suelo, la cual decrece a medida que la porosidad incrementa.

La tabla anexa muestra claramente que al disminuir la resistividad del suelo, el riesgo de corrosión aumenta.

b) Factores microbiológicos.

c) Contenido de humedad.

Un incremento en el contenido de humedad genera un ambiente propicio para la corrosión bacterial.

d) Contenido de sales en el suelo.

e) Valor del pH.

pH < 4, corresponde a suelos altamente ácidos, generando picaduras en el metal.

f) Contenido orgánico y transferencia de oxígeno.

Suelos orgánicos producen ácidos orgánicos los cuales atacan a metales enterrados.

El flujo de aire o de oxígeno a través del suelo, retrasa la corrosión microbiológica, pero incrementa la corrosión electroquímica.

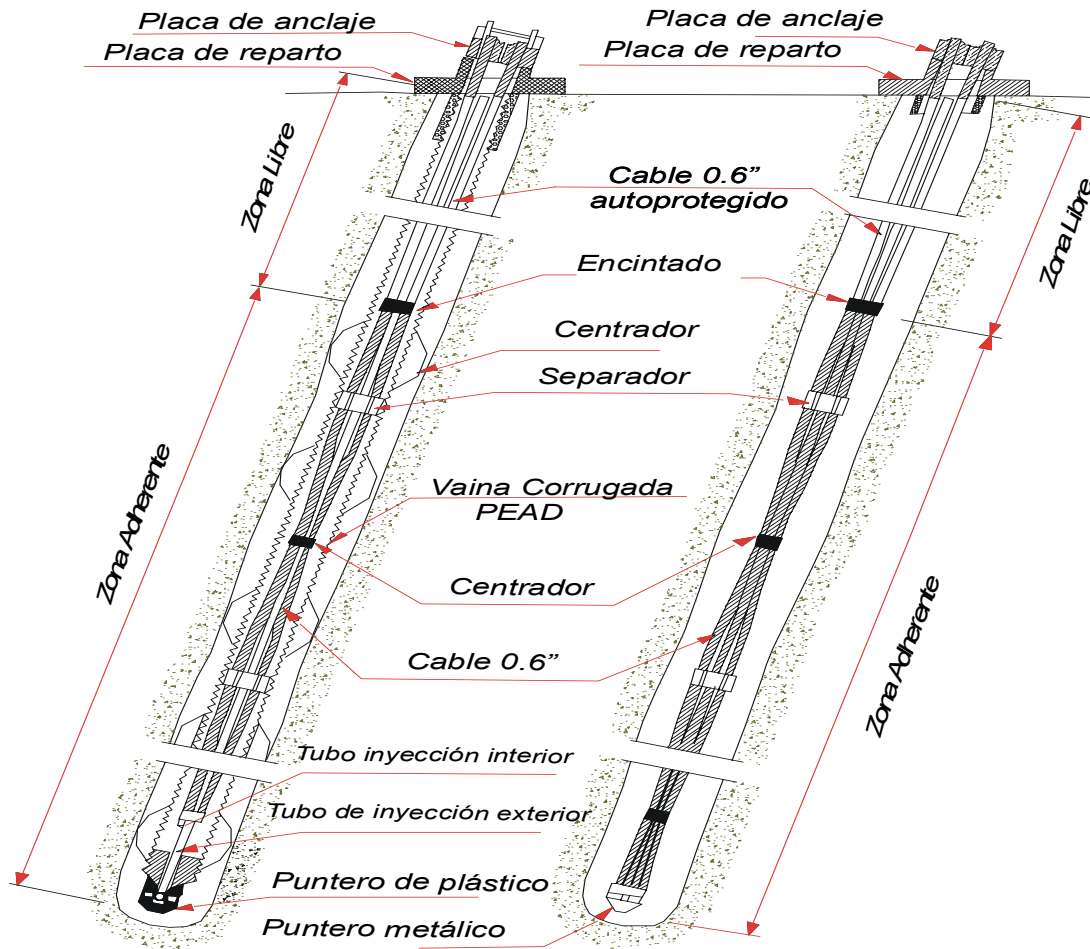
Corrosividad del Suelo	Resistividad ohm-cm
Muy corrosivo	< 700,00
Corrosivo	700,00 – 2.000,00
Moderadamente corrosivo	2.000,00 – 5.000,00
No corrosivo	> 5.000,00

En resumen, tomando en cuenta que el anclaje está constituido por varios torones, se requerirá de separadores para lograr un espacio mínimo de 5 mm entre torones, debiéndose a la vez instalar piezas centradoras para mantener el conjunto del anclaje correctamente centrados (ver figura 1.16). Cuando los anclajes actúan como una estructura de soporte permanente o definitiva, se debe utilizar la vaina corrugada con la finalidad de obtener una protección segura contra la corrosión del tensor dentro del bulbo (ver figuras 1.15, 1.16 y 1.17).

Para garantizar y transmitir una carga efectiva, el paso del tubo corrugado debe ser de 6 a 12 veces el espesor de la pared, cuyo valor mínimo recomendado es de 0,8 mm.

Los torones en el tramo libre del tensor deben ser recubiertos con grasa anticorrosiva, completamente estable al agua y el oxígeno, así como a la acción microbiológica.

Debe ser también estable a largo plazo, y no debe contener elementos que puedan producir condiciones de corrosión. En este sentido, Littlejohn [19] menciona que la cantidad de cloruros y nitratos no debe exceder del $5 \cdot 10^{-4}\%$ en peso. Adicionalmente el tramo libre deberá estar protegido mediante un tubo plástico liso, para lograr una protección óptima.



Tendón Tipo Permanente

Tendón Tipo Provisional

Figura 1.16 Anclajes tipo MK4, Según MeKano4, s.a. [20].

Con relación a la inyección del bulbo, cabe mencionar que el cemento no debe contener sulfatos en cantidades superiores al 4% (en peso del cemento). Por otro lado es recomendable que los contenidos de cloruros totales se encuentren por debajo del 0,1% en peso.

Finalmente con el propósito de garantizar que la instalación y puesta en marcha de los tirantes anclados han cumplido correctamente con las pruebas de idoneidad correspondientes a la fabricación, instalación, inyección, pruebas de tensado, etc., es de vital interés utilizar el manual de la ATEP (H.P.8-96) ya referido, el cual es una excelente guía concerniente con las recomendaciones para el proyecto, construcción y control de anclajes al terreno.

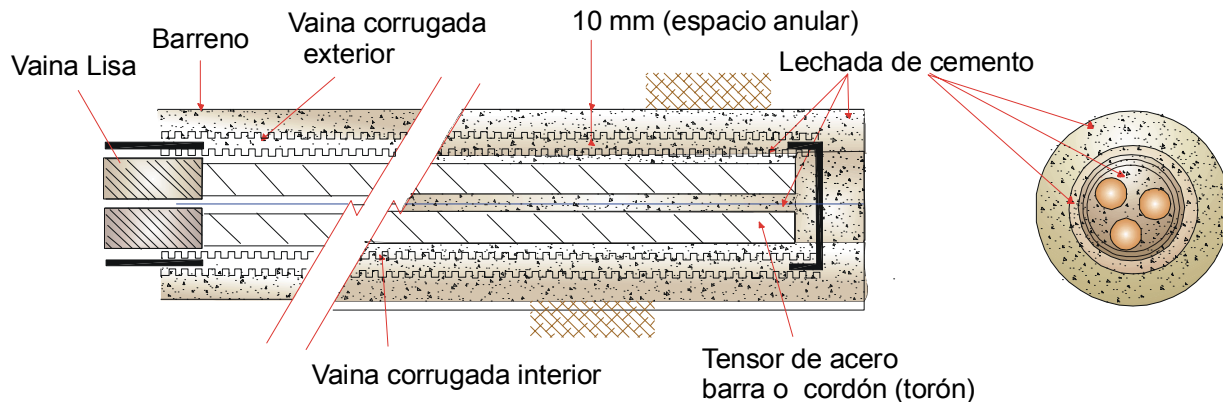


Figura 1.17 Anclaje protegido de la corrosión mediante doble vaina corrugada

REFERENCIAS

1. BARRON, K., COATES, D. y GYENGE, M., (1970), “Artificial Support of Rock Slopes”, Department of Energy and Resources, Mines Branch, Canadá, Research Report No. 228, 144 p.
2. ANCLAJES DE INYECCIÓN. Egesa Bauer, Catálogo Informativo, 6p.
3. SCHNABEL FOUNDATION Co., (1982), “Tiebacks”, Federal Highway Administration , Report N° FHWA/RD-82/047 , Washington, D.C., 233 p
4. AYALA, F., et al (1987), “Manual de Taludes”, Instituto Geológico y Minero de España, 456 p.
5. HABIB, P. (1989), “Recommendations for the Design, Calculation, Construction and Monitoring of Ground Anchorages”, A.A. Balkema, 115 p.
6. PFISTER, P., EVERS, M., GUILLAND y DAVIDSON, R., (1982), “Permanent Ground Anchors”, Soletanche Design Criteria, Office of Research and Development, Federal Highway Administration, U.S. Dept. Transp. Washington, D.C., report N° FHWA/RD-81/150 , 195 p.
7. XANTHAKOS, P. (1991), “Ground Anchors and Anchored Structures”, John Wiley and Sons, Inc, 686 p.
8. Muzás , F (1980), “ Anclajes “ , capítulo 13 , Tomo III , del libro Geotecnia y Cimientos”, Edición coordinada y dirigida por José Antonio Jiménez Salas, Editorial Rueda, Madrid., pp. 1143-1153

9. FARACO, C. (1982), “Anclajes: Ejecución. Puesta en Carga y Ensayos”, Boletín de Información del Laboratorio de Carreteras y Geotecnia., Centro de Estudios y Experimentación de obras Públicas, Madrid, No. 151, pp. 9-19.
10. COATES, D. y SAGE R., (1973), “Rock Anchors in Mining”, Department of Energy and Resources, Mines Branch, Canadá, Technical Bulletin TB, 47 p.
11. CORPS OF ENGINEERS – Department of the Army (1980), “Rock Reinforcement Engineer Manual, EM 1110-12907, Washington, D.C.
12. STILLBORG, B. (1986), “Professional Users Handbook for Rock Bolting”, Trans Tech. Publications, 145 p.
13. HOEK, E. y BROWN, T. (1980), “Underground Excavations in Rock”, Institution of Mining and Metallurgy, England, 527 p.
14. MERRIFIELD, C., BARLEY, A. y VON MATT U. (1997), “The Execution of Ground Anchor Works: The European Standard prEN 1537”, Ground Anchorages and Anchored Structures, Edited by G.S. Littlejohn, Thomas Telford, pp. 492-507.
15. BARLEY, A. (1997), “Ground Anchor Tendon Protected Against Corrosion and Damage by a Double Plastic Layer”, Ground Anchorages and Anchored Structures, Edited by G.S. Littlejohn, Thomas Telford, pp 371-392.
16. WILLIAMS – “Rock & Concrete Anchors”, Catálogo No. 728, pp. E2-H4.
17. ASOCIACIÓN TÉCNICA ESPAÑOLA DE PRETENSADO”, Recomendaciones para el Proyecto, Construcción y Control de Anclajes al terreno”, H.P.8-96, Geotecnia (G-1), 1996, 86 p.
18. HANNA, T. (1982), “Foundations in Tension – Ground Anchors”, Trans. Tech. Publications, 573 p.

19. LITTLEJHON, T (1982) ,” Ground Anchorage Practice”, Design and Performance of Earth Retaining Structures , Editado por Philip, Lambe y Lawrence. A Hansen, ASCE, Geotechnical Special Publication N° 25, pp 693-731
20. MEKANO4, S.A., (1996), “Anclajes al Terreno MK4”, Catálogo, 6 p, Barcelona, España.