



# Bulbo de Anclajes

**La longitud de bulbo de anclajes: pérdida progresiva de adherencia y factor de eficiencia**

***G. Vukotić , A. Soriano,  
J. González***

**Keller Cimentaciones, S.L.U.**

c/ Argentina, 15

28806 Alcalá de Henares, Madrid (Spain)

Tel. +34 91 298 9600

E-Mail: [Info@Keller-cimentaciones.com](mailto:Info@Keller-cimentaciones.com)

[www.keller-cimentaciones.com](http://www.keller-cimentaciones.com)

9º Simposio Nacional de Ingeniería Geotécnica. Octubre 2012  
Sevilla

77-53ES



# La longitud de bulbo de anclajes: pérdida progresiva de adherencia y factor de eficiencia

G. Vukotić<sup>1</sup>, A. Soriano<sup>2</sup>, J. González<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Keller Cimentaciones, Madrid, España

<sup>2</sup>Universidad Politécnica de Madrid, España

<sup>3</sup>Universidad Politécnica de Madrid, España

## Resumen

Es conocido en el ámbito geotécnico que la transferencia de la carga de un anclaje al terreno no se realiza de manera uniforme a lo largo de la longitud del bulbo, si éste supera una determinada longitud. En este artículo se ha realizado una recopilación de las referencias clásicas más importantes sobre este tema, resumiendo los procedimientos de diseño de los anclajes más habituales. En ocasiones, para poder movilizar la resistencia máxima del terreno se emplean anclajes de bulbo múltiple. La diferencia entre el comportamiento de los anclajes convencionales de un único bulbo y los de bulbo múltiple ha podido ser estudiada en dos pruebas realizadas in situ, cuyos resultados principales se presentan en este artículo. A partir del estudio de estas pruebas y de las referencias expuestas se propone una metodología para el cálculo del bulbo de los anclajes.

**keywords:** Anclaje, bulbo, SBMA, adherencia límite, eficiencia

## I Introducción

En los tiempos actuales, los anclajes representan un medio fundamental para reforzar y sostener taludes formados por suelos y rocas fracturadas inestables, y para garantizar la estabilidad de diversos tipos de estructuras de gravedad.

En general, la mayoría de los procedimientos de cálculo de la capacidad de anclajes, en lo que se refiere a la capacidad de transferencia de la carga en la interfase lechada de cemento-terreno, son formulas empíricas obtenidas por experiencias locales, y que por tanto, son difícilmente extrapolables si se cambia el emplazamiento o el sistema de ejecución.

El procedimiento de diseño muchas veces se ha simplificado, considerando que existe una proporcionalidad entre la longitud de bulbo y la capacidad del anclaje. Sin embargo, desde los finales de los años 1960 hasta la actualidad, varios autores detectaron que no existe la uniformidad de la distribución de adherencia a lo largo de la longitud de bulbo, y que altas tensiones de adherencia pueden ser movilizadas en la interfase lechada de cemento-suelo en una longitud muy reducida.

En este trabajo se plantea el análisis y la comparación entre las diferentes recomendaciones y métodos de cálculo de la capacidad de transferencia de carga en la interfase lechada cemento-terreno, comparándolos con los resultados de las pruebas de investigación realizadas últimamente en España.

Como resumen, en el último apartado se expone una propuesta de metodología de cálculo que se centra en los parámetros más importantes que definen la capacidad y el comportamiento real de anclajes, con especial énfasis en la distribución de tensiones a lo largo del bulbo.

## 2 Criterios generales de análisis y diseño

Para el análisis de la capacidad última de los anclajes tienen incidencia los siguientes factores:

- Adherencia
- Longitud de bulbo
- Distribución de adherencia
- Propiedades geotécnicas del terreno
- Tipo del material que forma el tirante
- Parámetros de ejecución (método de perforación, diámetro de perforación, tipo y características de inyección, etc.)

Cada uno de estos factores influye sobre la capacidad de los anclajes, de forma distinta y en mayor o menor proporción en función del tipo de obra o circunstancias en el que se encuentren.

De acuerdo con el objetivo de este trabajo a continuación se recopilan las aportaciones de diversos autores, normativas y recomendaciones correspondientes a los temas relacionados tanto con las metodologías básicas de cálculo como con la distribución de la adherencia a lo largo de la longitud del bulbo. Los parámetros de ejecución, rangos de adherencia límite y adherencia media en función de las propiedades del terreno no se abordan en este artículo.

A pesar del conocimiento de la no uniformidad de la distribución de la adherencia, el procedimiento de diseño habitual de los anclajes parte de la hipótesis de que el valor de adherencia es constante a lo largo de toda la longitud de bulbo (Littlejohn, 1972). Con este criterio la resistencia de un anclaje se calcula como:

$$P_{lim} = \pi \cdot d \cdot L_b \cdot T_{lim} \quad (I)$$

Donde:

$L_b$  – longitud de bulbo  
 $d$  – diámetro del anclaje  
 $T_{lim}$  – adherencia límite

Este sistema de cálculo, aceptado en muchos países, se basa en las siguientes hipótesis (Littlejohn y Bruce, 1975/76):

- Transferencia de la carga desde el anclaje y la lechada al terreno se realiza a través de una tensión uniformemente distribuida a lo largo de toda la longitud del bulbo.
- No existen planos de discontinuidad o de debilidad local a lo largo de los cuales se pueden producir roturas.
- El diámetro de perforación coincide con el diámetro del bulbo.
- El estado límite o de rotura se produce por deslizamiento en la interfaz roca/suelo-lechada de cemento, o por alcanzar la capacidad de resistencia al corte de la misma, en la parte del medio más débil.

Teniendo en cuenta las hipótesis mencionadas, especialmente la hipótesis relacionada con una distribución uniforme de las tensiones a lo largo del bulbo, posiblemente sería más realista introducir en la formulación (1) el término de adherencia media en vez de adherencia última (Ostermayer, 1974):

$$P_{lim} = \pi \cdot d \cdot L_b \cdot T_{med} \quad (2)$$

donde -  $T_{med}$  es la adherencia media a lo largo de toda la longitud del bulbo.

La hipótesis de que la capacidad de carga es proporcional a la longitud de bulbo puede ser próxima a la realidad para pilotes, especialmente si trabajan a compresión. Sin embargo, para la gran mayoría de los anclajes las longitudes de los bulbos son superiores a los 3,00-4,00 m, por lo que la hipótesis de partida indicada previamente no reflejaría su comportamiento real.

Para cuantificar la función de la longitud del bulbo y su influencia sobre la capacidad de anclaje, autores como Casanovas (1989), Barley (1995), Barkhodari (1997) y Mesci (1997) entre otros, introducen el factor de eficiencia. Este factor de eficiencia o de corrección nos permite controlar la capacidad real del bulbo en función de su longitud, partiendo de la hipótesis de que el valor real de la adherencia última corresponde a un bulbo de longitud reducida.

Utilizando este concepto, que será definido con más detalles en el apartado 3, la capacidad última de anclajes se puede expresar como:

$$P_{lim} = \pi \cdot d \cdot L_b \cdot T_{lim} \cdot f_{ef} \quad (3)$$

donde -  $f_{ef}$  es el factor de eficiencia.

Al comparar las tres mencionadas formulaciones básicas para el cálculo de la capacidad máxima o última de un anclaje, es evidente que, fundamentalmente, debe conocerse el valor de adherencia media o adherencia última correspondiente a los criterios de cada formulación.

$$P_{lim} = \pi \cdot d \cdot L_b \cdot T_{lim} \quad (\text{Littlejohn, 1972}) \quad (1)$$

$$P_{lim} = \pi \cdot d \cdot L_b \cdot T_{med} \quad (\text{Ostermayer, 1974}) \quad (2)$$

$$P_{lim} = \pi \cdot d \cdot L_b \cdot T_{lim} \cdot f_{ef} \quad (\text{Casanovas (1989), Barley (1995), Barkhodari (1997) y Mesci (1997), etc.}) \quad (3)$$

Consecuentemente, para adoptar o estimar el valor de la adherencia del terreno es imprescindible tener en cuenta la fórmula de cálculo de la capacidad de anclaje que se pretende aplicar en cada caso concreto.

La determinación de la adherencia puede llevarse a cabo a partir de los parámetros geotécnicos del terreno, de experiencias previas en terrenos similares o mediante pruebas de arrancamiento in situ. En este último caso es siempre recomendable que la longitud de bulbo de los anclajes de prueba y anclajes definitivos sean similares.

Para analizar las pruebas de arrancamiento en anclajes, además de determinar las características de los anclajes ensayados (fundamentalmente su longitud de bulbo), se debe decidir el método de cálculo que se utilizará para la interpretación de las pruebas.

### 3 Distribución de tensiones en bulbos

Uno de los avances más importantes en el desarrollo de los anclajes ha sido el conocimiento de que cuando un esfuerzo axial de tracción es aplicado a un elemento metálico totalmente embebido en una lechada de cemento, el mecanismo de transferencia de carga del acero al terreno no es uniforme a lo largo de la longitud del bulbo (Vincent F., 2005/2011). Este fenómeno ha sido confirmado por numerosos autores que investigaron este efecto, cuyo origen en general es la incompatibilidad ente el módulo de elasticidad del acero, de la lechada de cemento y la deformación del suelo.

Coates y Yu (1970) analizaron la influencia del cociente de módulos de deformación  $E_{\text{anclaje}}/E_{\text{terreno}}$  sobre la distribución de tensiones a lo largo del bulbo (ver figura 1). En el caso de suelos muy blandos el cociente  $E_{\text{anclaje}}/E_{\text{terreno}}$  es elevado (por ejemplo, mayor que 10), observándose que la distribución de tensiones es tal, que se puede asemejar a una distribución de tensiones tangenciales relativamente constantes a lo largo de la longitud del bulbo.

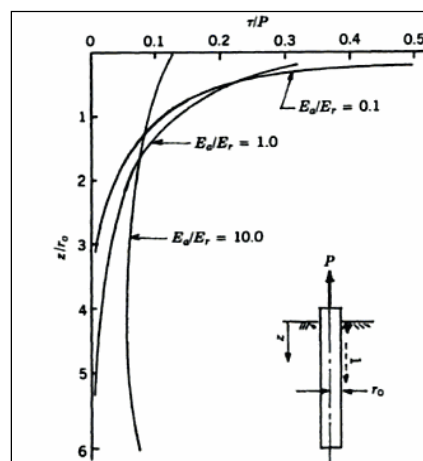


Figura 1. Variación de las tensiones a lo largo del bulbo en función del cociente  $E_{\text{anclaje}}/E_{\text{terreno}}$  (Coates y Yu, 1970).

En cambio, para rocas duras y suelos con elevada compacidad/consistencia, donde el cociente  $E_{\text{anclaje}}/E_{\text{terreno}}$  es bajo, la distribución de tensiones es muy poco uniforme, movilizándose más tensiones en el extremo más superior del bulbo.

En realidad, el valor habitual del cociente  $E_{\text{anclaje}}/E_{\text{terreno}}$  está ente 0,1 y 1, y para este rango la distribución de tensiones es marcadamente no uniforme (Littlejohn, 1982).

Las predicciones teóricas de Coates y Yu (1970) indicadas en la figura 1, han sido confirmadas mediante investigaciones realizadas por Muller (1966), y Berrardi (1967), detectando la concentración de la carga en la parte inicial de un bulbo anclado en roca.

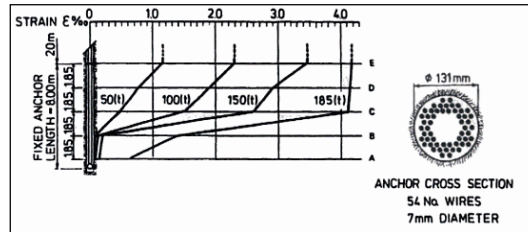


Figura 2. Distribución de tensión-deformación a lo largo de la longitud del bulbo, anclaje tesado hasta 2.200 kN ( Muller, 1966).

Los ensayos realizados por Muller (1966) sobre el anclaje con la longitud del bulbo de 8,00 m y la máxima carga de tesado llevada por escalones de hasta 2.200 kN, evidenciaron por primera vez que la distribución de tensiones a lo largo del bulbo no es uniforme, debido a la auscultación realizada sobre la deformación del anclaje. Por ejemplo, como puede verse en la figura 2, la carga correspondiente al primer escalón de 500 kN se transmitía al terreno en los primeros 5,50 m del bulbo, lo que supone 75% de su longitud. La adherencia media correspondiente fue de 220 kN/m<sup>2</sup>. Contrariamente, en el escalón de 1.850 kN, la carga se transmitía en la parte inferior del bulbo, concretamente en los últimos 4,00 m del bulbo, registrándose una pérdida de adherencia en la primera parte del bulbo. La adherencia media correspondiente a este escalón, considerando únicamente la zona de la máxima concentración de transmisión de carga, superaba 980 kN/m<sup>2</sup>. Teniendo en cuenta la longitud total del bulbo de 8,00 m, la adherencia media correspondiente a este escalón sería inferior a los 650 kN/m<sup>2</sup>, muy por debajo de la adherencia máxima registrada de casi 1.000 kN/m<sup>2</sup>, por lo que se evidencia que existe una distribución no uniforme a lo largo del bulbo, dependiendo básicamente de su longitud y del nivel de la carga aplicada.

El fallo, o la pérdida de adherencia total, se produjo con la carga de tesado de 2.800 kN (este escalón no está representado en la figura 2).

Los ensayos realizados por Berardi (1967) sugieren que la zona activa es independiente de la longitud total del bulbo, y que dependen del diámetro del anclaje y de la resistencia característica de roca, especialmente su módulo de elasticidad.

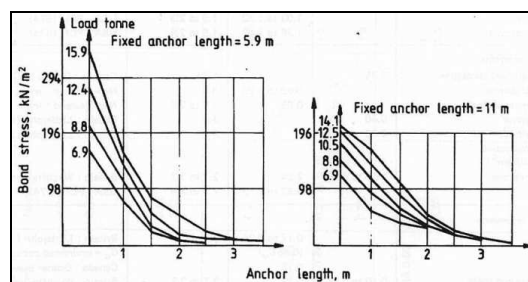


Figura 3. Distribución de adherencia a lo largo de la longitud del bulbo (Berardi, 1967).

Los ensayos se realizaron en marga caliza, con el módulo de elasticidad de  $3 \cdot 10^7$  kN/m<sup>2</sup>, aproximadamente doble del valor de  $E_{\text{anclaje}}$  para lechadas habituales, y la resistencia de la roca a compresión simple de  $10^5$  kN/m<sup>2</sup>, más de tres veces superior a la resistencia de la lechada. La figura 3 demuestra claramente, para este caso particular, la desigual adherencia.

Por otro lado, Mastrantuono y Tomillo (1977), y Evangelista y Sapio (1978) mostraron la distribución no uniforme de adherencia a lo largo de las longitudes de bulbo de anclajes en suelos cohesivos.

Las investigaciones y publicaciones sobre el comportamiento de anclajes en arcillas, arenas y gravas, realizadas por Ostermayer en los años 1970, confirmaron la distribución no uniforme de las tensiones a lo largo del bulbo.

La Norma británica BS 8081:1989 recomienda el empleo de los ábacos de Ostermayer (1974) para el diseño de anclajes en distintos tipos de suelo (figuras 4 y 5), siendo una de las pocas normativas que tiene en cuenta efectos de la no uniformidad desde los años 1970.

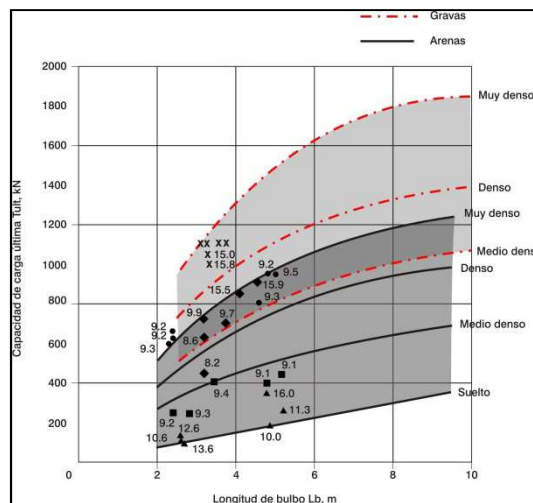


Figura 4. Relación entre la capacidad de anclaje, densidad del terreno y longitud del bulbo en arenas y gravas (Ostermayer, 1974).

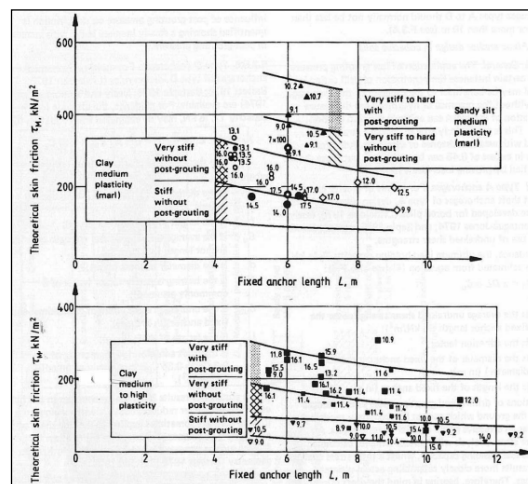
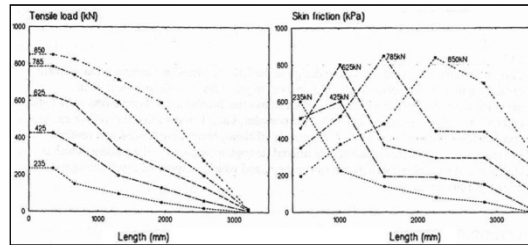


Figura 5. Relación entre la adherencia media y consistencia, plasticidad, tipo de inyección y longitud del bulbo en arcillas (Ostermayer, 1974).

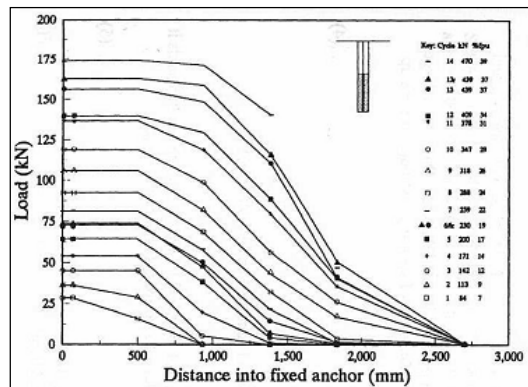


Los ensayos in situ y la auscultación realizada por Ostermayer y Scheele (1977/1978) sobre los anclajes en arenas semi-densas a densas, demuestran que con la carga de trabajo existe una pronunciada concentración de tensiones en la parte inicial del bulbo, dejando una gran parte del resto del bulbo sin tensión o sin carga. Aumentando la carga por encima del nivel de trabajo, las tensiones registradas en la parte inicial del bulbo se reducen, registrándose un aumento en las zonas más alejadas, cuya efectividad crece con el incremento de la carga (ver figura 6).



**Figura 6.** Distribución de la carga (a) y adherencia a lo largo de la longitud del bulbo (b) (Ostermayer y Scheele 1977).

El mismo comportamiento, la relación no lineal entre la carga de anclaje y la distribución de las tensiones a lo largo del bulbo ha sido demostrado mediante ensayos de arrancamiento realizados en el laboratorio por Weerasinghe (1993), ver la figura 7.



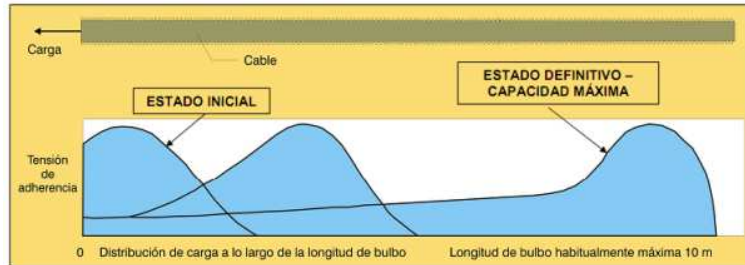
**Figura 7.** Distribución de las tensiones a lo largo del bulbo en función del nivel de carga, ensayos de investigación realizados en el laboratorio (Weerasinghe 1993).

La incompatibilidad entre los módulos de elasticidad que forman el sistema de anclaje y el terreno ha sido analizada por Barley (1995/1997) en base al ejemplo de un anclaje tipo, con la longitud del bulbo de 6,00 m en suelo o roca alterada. Según este ejemplo, para que entre en carga la parte más alejada de este anclaje, se necesita una deformación del cable de aproximadamente 15 a 20 mm en la parte inicial del bulbo. Esta deformación no es compatible con la relación entre los módulos de elasticidad del terreno y la lechada de cemento, por lo que no es posible que se produzca una distribución uniforme de tensiones a lo largo del bulbo. Consecuentemente, para que la tensión o la carga llegue a las zonas más alejadas del bulbo, en la mayoría de los casos, debe producirse una progresiva pérdida de adherencia en la interfase cable-lechada o lechada-suelo. Este fenómeno, conocido también con el termino “*progressive debonding*”, esta asociado con la distribución no uniforme de tensiones a lo largo del bulbo en todas las fases de carga.

La pérdida progresiva de adherencia (ver figura 8) significa que el bulbo no es capaz de movilizar la resistencia máxima del terreno en toda su longitud. Como se puede en dicha figura, aunque la resistencia del suelo se moviliza a lo largo de toda la longitud del bulbo, sólo en una parte reducida del mismo se desarrolla la máxima adherencia. El resto de la longitud de bulbo está en un estado de

adherencia residual al haberse excedido la resistencia de la interfase cable-lechada o lechada-suelo debido a la deformación impuesta para lograr tal movilización.

Autores como Farmer (1975), Mesci (1995/1997), Woods y Barkhodari (1997), intentaron analíticamente definir el fenómeno de la pérdida de adherencia progresiva.



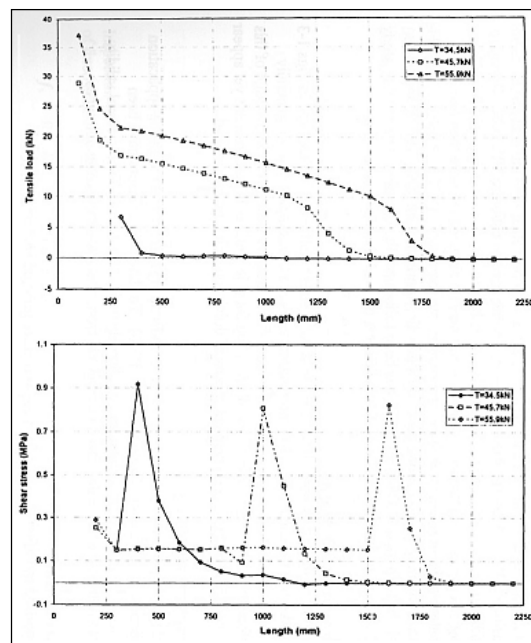
**Figura 8.** El proceso de la pérdida de adherencia progresiva, (Barley, 1977).

Una aproximación para la distribución de las tensiones fue propuesta por Farmer (1975) con la siguiente formula:

$$\frac{\tau_x}{\sigma_0} = 0,1 \cdot \exp(-0,2 \cdot x / a) \quad (4)$$

Donde,  $\sigma_0$  representa la tensión del anclaje que se desarrolla en el extremo de la longitud libre,  $x$  la longitud del anclaje tomando como origen la cara externa del anclaje, y  $a$  el radio de la barra o el cable de anclaje.

Woods y Barkhodari (1997) analizaron la distribución de adherencia utilizando el programa de elementos finitos VISAGE, modelizando de manera separada la lechada de cemento y el suelo circundante e introduciendo una interfase entre ambos materiales (ver figura 9).



**Figura 9.** Carga y distribución de adherencia calculada mediante elementos finitos (Woods y Barkhodari, 1997).

Para la interfase se ha aplicado un elemento especial que permitía, comparando con los elementos habituales utilizados en los análisis con elementos finitos, una modelización más sofisticada de su comportamiento real. Con este sistema la interfase se comporta elásticamente hasta llegar a los niveles de adherencia última previamente definida. Una vez alcanzada la adherencia última, empieza a desarrollarse plastificación y fluencia, acompañados por la pérdida progresiva de adherencia y concentración de tensiones en las zonas inferiores del bulbo.

Para la calibración del programa VISAGE entre otros se han utilizado los resultados de ensayos de arrancamiento realizados por Weerasinghe (1993).

La relación no lineal entre la carga de anclaje y la distribución de las tensiones a lo largo del bulbo la confirman también los trabajos presentados por Barley (2000), Barley y Ostermayer (2003), Bruce et al. (2004/2007) entre otros.

Resumiendo todo lo expuesto en este apartado, queda evidente que la hipótesis de que la capacidad de carga es proporcional a la longitud de bulbo no refleja el comportamiento real para la gran mayoría de los casos de anclajes con longitudes de bulbo superiores a los 3,00-4,00 m. Del mismo modo está demostrado que las longitudes de de anclajes superiores a los 7,00-8,00 m no aportan efectos beneficiosos para la capacidad de anclaje. La importancia de la distribución real de las tensiones a lo largo del bulbo es especialmente significativa teniendo en cuenta que la mayoría de los métodos habituales de cálculo de capacidad de anclaje no lo tienen en cuenta. Por este motivo el empleo de la formulación que aplica el valor de adherencia media debería estar limitado para las longitudes de bulbo entre 4,00 y 8,00 m aproximadamente.

## 4 Factor de eficiencia

La no uniformidad de distribución de tensiones y la pérdida progresiva de la adherencia todavía no están incorporadas plenamente en los métodos habituales de diseño a pesar de que ya se han abordado por varios investigadores. Aunque estos fenómenos son bastante complejos, posiblemente, la manera más conveniente para introducirlos en los cálculos o estimaciones de la capacidad máxima de anclaje es mediante el factor de eficiencia, aplicando la formulación (3) indicada previamente en el apartado 2:

$$P_{lim} = \pi \cdot d \cdot L_b \cdot T_{lim} \cdot f_{ef} \quad (3)$$

Existen varias recomendaciones para la introducción de la no linealidad mediante el factor de eficiencia. Casanovas (1989) recomienda el cálculo de la longitud del bulbo aparente, a lo largo del cual se puede movilizar la adherencia última:

$$L_{ve} = L_b \frac{1}{\log(0,1 \cdot \frac{\tau_{ult}}{\tau_0})} \quad (5)$$

donde:

$L_b$ : longitud total del bulbo

$L_{ve}$ : longitud aparente, correspondiente a la zona de la concentración de la adherencia última

$T_{ult}$ : adherencia última

$T_0$ : valor de referencia = 1 kN/m<sup>2</sup>

El mismo autor recomienda las siguientes correlaciones para estimar la adherencia última  $T_{ult}$  (kN/m<sup>2</sup>), en base al valor de  $N_{SPT}$  (el número representativo de golpes del ensayo de penetración estándar SPT):

$$\begin{aligned} T_{ult} &= 1,1 N_{SPT} \text{ en arenas finas} \\ &= 1,5 N_{SPT} \text{ en arenas medias} \\ &= 1,9 N_{SPT} \text{ en arenas y gravas} \end{aligned}$$

Estas fórmulas permiten evaluar la longitud máxima del bulbo aparente en arenas flojas a semidensas ( $N_{SPT} = 10$ ) en 7,10 m, y en arenas y gravas muy densas ( $N_{SPT} = 60$ ) en 3,06 m. Suponiendo la longitud del bulbo total de 10,00 m los factores de eficiencia para los dos casos analizados variarían entre 71% y 30,6%, es decir, confirmando las hipótesis de la no uniformidad de distribución de tensiones, acentuada especialmente en terrenos más duros, donde el cociente  $E_{anclaje}/E_{terreno}$  suele estar entre 0,1 y 1 (Coates y Yu (1970), Littlejohn, 1982)).

Al analizar los resultados de las numerosas pruebas de arrancamiento realizadas en distintos tipos del suelo, con la idea de definir el factor de eficiencia  $f_{ef}$  para poder cuantificar la movilización del valor último de la adherencia en función de la longitud del bulbo, Barley (1995/1997) propone siguiente expresión:

$$f_{ef} = 1,6 \cdot \left( \frac{L_b}{L_0} \right)^{-0,57} \quad (6)$$

siendo:

$L_b$ : longitud total del bulbo

$L_0$ : 1,00 m como longitud de referencia

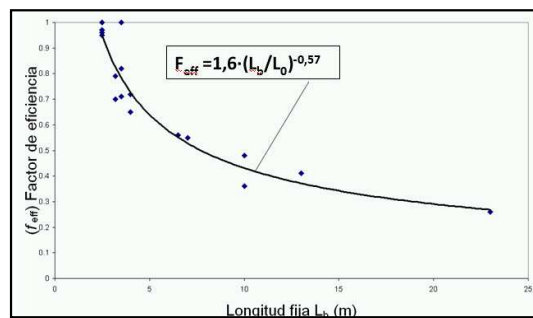


Figura 10. Factor de eficiencia  $f_{ef}$  (Barley, 1995/1997).

Aplicando esta formulación a distintas longitudes de bulbo, el factor de eficiencia puede variar entre 95% ( $f_{ef} = 0,95$ ) para los bulbos de entre 2,50 y 3,00 m, y 50% ( $f_{ef} = 0,50$ ) para los bulbos de 10,00 m.

Para entender mejor el factor de eficiencia Barley (1995/1997) utiliza la figura 11, que representa la pérdida progresiva de adherencia, comparando el área que correspondiente al estado final justo antes del fallo del anclaje, área final  $A$ , con el área máxima posible total, bajo la línea que representa la adherencia última  $T_{ult}$  que se puede alcanzar únicamente en una zona o longitud muy reducida del bulbo:

$$f_{ef} = \frac{\text{Área.}A}{\text{Área.bajo.}\tau_{ult}} \quad (7)$$

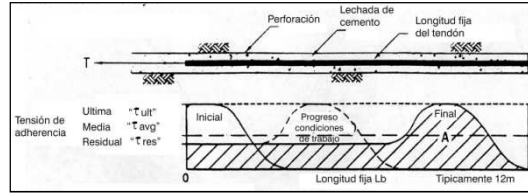


Figura 11. Factor de eficiencia definido mediante el diagrama de pérdida de adherencia progresiva (Barley, 1995).

Cabe mencionar que el factor de eficiencia definido por Barley (1995/1997), ecuación (6), representa una formulación matemática muy consistente con los ábacos de Ostermayer (1974), que correlacionan los valores de adherencia media vs. longitud de bulbo.

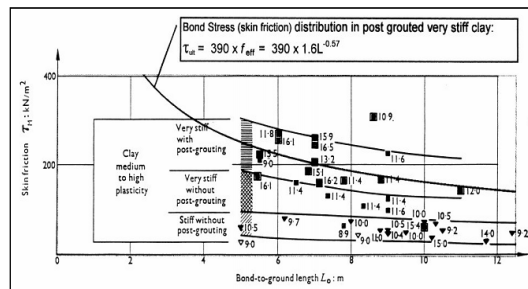


Figura 12. Suposición de alguno de los ábacos de Ostermayer (1974) con el factor de eficiencia  $f_{ef} = 1,6 \cdot L_b^{-0,57}$  de Barley (1995/1997).

Tal y como se ha comentado anteriormente, la relación entre los módulos de elasticidad entre el terreno y el anclaje influye directamente sobre la pérdida de adherencia progresiva, es decir afecta o determina el factor de eficiencia. En este contexto, la superposición con los ábacos de Ostermayer (1974), que abarcan una amplia gama de suelos, confirma la validez del factor de eficiencia propuesto por Barley (1995/1997) dado que se ajusta a suelos con diferente rigidez.

Para suelos arenosos, Barley (1995) sugiere otra formulación del factor de eficiencia, correlacionando el mismo con el ángulo de rozamiento  $\phi$ :

$$f_{eff} = 0,91 \frac{L_b}{L_0} \cdot \tan\phi \tag{8}$$

Este trabajo, en coordinación con la Universidad de Surrey (Inglaterra), dio lugar a la investigación realizada por Woods y Barkhodari (1997), quienes estudiaron los resultados de las pruebas realizadas por Ostermayer (1974), y Ostermayer y Scheele (1998), intentando proponer una relación entre el factor de eficiencia y el ángulo de rozamiento. El resultado de su trabajo ha sido la siguiente definición del factor de eficiencia:

$$f_{ef} = \exp(-0,05 \cdot \frac{L_b}{L_0} \cdot \tan\phi), \tag{9}$$

para su incorporación en la fórmula del cálculo de la capacidad de anclajes en arenas:

$$P_{lim} = L_b \cdot n \cdot \tan(\phi) - (\text{en kN/m}^2 \text{ cuando } L \text{ está en m}), \tag{10}$$

ó

$$P_{lim} = \gamma_0 \cdot L_b \cdot n \cdot \tan(\varphi) - (\text{con } \gamma_0 = 1 \text{ kN/m}^3 \text{ como valor de referencia}) \quad (11)$$

Aplicando los valores del ángulo de rozamiento  $\varphi$  y el factor  $n$  de 36° y 75, 42° y 120, 43° y 175, 47° y 200, representativos para arena floja, semidensa, densa, y muy densa con grava, los valores de la capacidad última teniendo en cuenta distintas longitudes de bulbo se ajustaban con precisión con las líneas del desarrollo de la fuerza máxima propuesta por Ostermayer y Scheele (1977).

El análisis de Mesci (1995/1997), que se fundamenta en cientos de resultados de ensayos de investigación, representa uno de los intentos más extensos para definir la capacidad última de anclajes en función de los procesos de ejecución en diferentes tipos del terreno.

En su trabajo Mesci compara la capacidad máxima ( $T_0$ ) con la capacidad de anclajes con el bulbo de 1,00 m. Por tanto, el concepto es similar al de Barley, que también analiza bulbos suficientemente cortos para que no se desarrolle el efecto de pérdida de adherencia progresiva. Entre otros factores, figura la rigidez del anclaje, considerando que la adherencia última se moviliza a lo largo de una zona limitada de bulbo ( $L_0$ ), mientras que en el resto del bulbo ( $L_{fixed} - L_0$ ) se desarrolla únicamente un porcentaje reducido de adherencia (ver la figura 13).

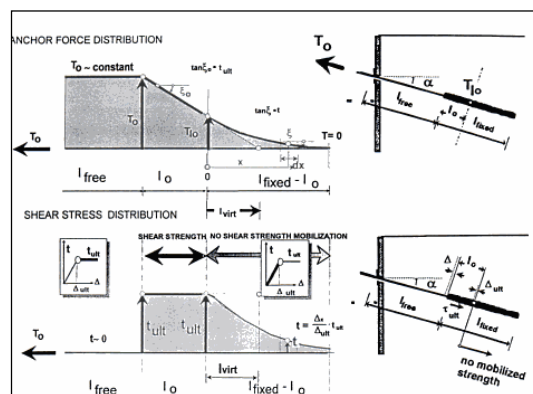


Figura 13. El modelo de movilización de adherencia (Mesci, 1995/1997).

$$T_0 = \tau_{ult} \cdot \left[ L_0 + \frac{1}{k} \cdot \tanh[k \cdot (L_b - L_0)] \right] \quad (12)$$

$$k = \sqrt{\frac{\tau_{ult}}{E_{steel} \cdot A_{steel} \cdot \Delta_{ult}}} \quad (13)$$

donde:

$\tau_{ult}$ : adherencia última correspondiente al bulbo de longitud de 1,00 m (kN/m<sup>2</sup>)

$L_0$ : longitud correspondiente a la zona de la máxima movilización de adherencia

$L_b$ : longitud del bulbo

$k$ : factor de rigidez del cable que forma el anclaje

$E_{steel}$ : módulo de deformación de acero

$A_{steel}$ : área de acero que forma el anclaje

$\Delta_{ult}$ : elongación correspondiente al “resto” del bulbo ( $L_b - L_0$ )

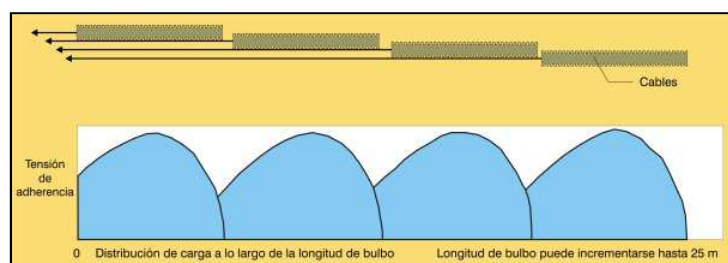
Teniendo en cuenta las referencias expuestas en este apartado, parece muy razonable proponer la incorporación del factor de eficiencia o similares expresiones matemáticas en las formulas habituales de cálculo de capacidad de anclajes, con el objetivo de reconocer la no uniformidad de adherencia a lo largo del bulbo. Es importante destacar que para una adecuada aplicación del factor de eficiencia es imprescindible partir o emplear el valor de adherencia última, correspondiente a un bulbo de longitud reducida.

Este hecho puede plantear un problema o inconveniente ya que no se dispone de muchas formulaciones o ábacos que claramente tienen su origen en los ensayos de investigación sobre los anclajes con las longitudes de bulbo no superiores a los 3,00-4,00 m.

## 5 Anclajes de bulbo múltiple (SBMA)

Las experiencia acumulada durante más de dos décadas de trabajos de investigaciones sobre la distribución real de tensiones a lo largo del bulbo, le sirvieron a Barley no solo para definir el factor de eficiencia, sino también para el desarrollo de una nueva tecnología de anclajes, denominados anclajes de bulbo múltiple o SBMA (Single Bore Multiple Anchor).

El sistema de anclaje de bulbo múltiple consiste en la movilización, de forma más eficiente, de la adherencia última del terreno mediante el empleo de varias unidades de anclajes dentro de la misma perforación. Cada unidad tiene su propio tendón individual, con su propia longitud libre y longitud de bulbo.



**Figura 14.** Anclaje de bulbo múltiple SBMA, distribución de adherencia a lo largo de las longitudes de bulbo de cada unidad del anclaje múltiple.

Con este sistema se pueden usar de forma eficaz las longitudes totales de bulbo de entre 10,00 y 25,00 m, mientras que para los anclajes convencionales el incremento de carga del anclaje con longitudes de bulbo superiores a 7,00-10,00 m es casi despreciable (Ostermayer, 1978; Fujita et al. 1978, Xanthakos, 1988; Barley y Ostermayer (2003); etc.). Para aumentar el factor de eficiencia o reducir los efectos de pérdida progresiva de adherencia, las longitudes de bulbo de cada unidad deben ser suficientemente cortas para no verse afectadas por la reducción de eficacia ya comentada anteriormente.

En el caso de suelos no homogéneos los anclajes de bulbo múltiple tienen como ventaja comparando con los anclajes convencionales dado que la longitud de bulbo de cada unidad puede ser diseñada para la condición apropiada. La suma de las cargas de las distintas unidades de anclajes representa la carga total de un anclaje de bulbo múltiple. Si las características del terreno varían a lo largo de la longitud adherente del bulbo, las longitudes de cada unidad que forma el bulbo múltiple se adaptan a las

características reales del terreno natural (ver la figura 15). Además, si las unidades de anclaje están en suelos con diferentes características de fluencia, las longitudes de bulbo de cada unidad deben diseñarse para cumplir con los criterios de fluencia adoptados en su condición de servicio particular.

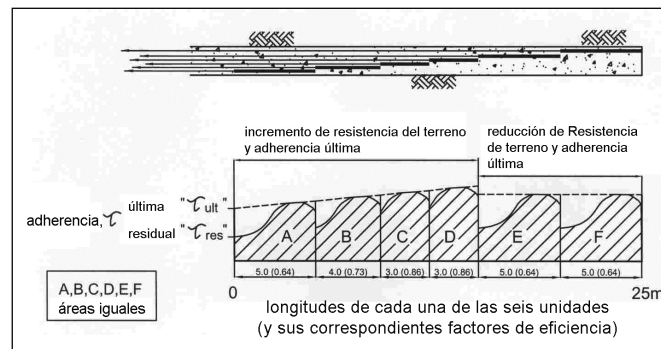


Figura 15. Distribución de diferentes unidades de bulbos en función de las características del terreno (Barley, 2001).

## 6 Ensayos de investigación

En los últimos 8 años la empresa Keller Cimentaciones realizó numerosos proyectos aplicando los anclajes de bulbo múltiple, aprovechando su eficiencia y sus ventajas respecto a los anclajes convencionales. En total se ejecutaron más de 100.000 ml de este tipo de anclaje, formados habitualmente con entre 3 y 5 unidades de anclaje dentro de la misma perforación, logrando cargas de servicio superiores a los 2.000 kN en terrenos muy complejos y en algunos casos de consistencia/compacidad muy blanda.

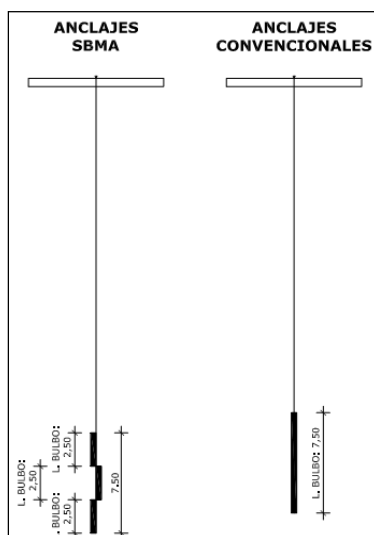
En la mayoría de los casos, previamente a la ejecución de anclajes de bulbo múltiple de proyecto, se realizaron pruebas o ensayos de investigación con el objetivo de determinar la adherencia última, la capacidad máxima y el factor de eficiencia correspondiente a las diferentes longitudes de bulbo y diferentes tipos de terreno.

A continuación se expone el resumen de los resultados de los ensayos de investigación realizados en dos campos de prueba.

### 6.1 Campo de prueba I

En este Campo I en total se realizaron 18 anclajes de prueba, concretamente 14 anclajes SBMA con 30 unidades de bulbo de 2,50 y 3,00 m cada unidad (cada anclaje disponía de 2 o 3 unidades de bulbo), garantizando el desarrollo de la máxima adherencia disponible en el suelo, y 4 anclajes convencionales formados únicamente por un bulbo de 7,50 m de longitud, para poder comparad la capacidad máxima real de los dos sistemas de anclajes y verificar el factor de eficiencia.





**Figura 16.** Anclaje SBMA TA-2 y TA-2' y convencional TA-2'', de características similares y la misma longitud total del bulbo.

Es importante subrayar que los anclajes de bulbo múltiple permitieron ensayar varias capas del terreno en la misma perforación, dado que diferentes unidades de bulbo trabajan de una forma independiente, representando de esta forma una gran ventaja comparándolos con los anclajes convencionales.

Los ensayos de investigación se realizaron lo más próximo posible a los sondeos del Informe geotécnico, para poder ajustar los parámetros de ejecución y correlacionar los resultados con las características del terreno a la profundidad correspondiente.

Para el procedimiento de los ensayos se siguió la norma UNE 1537, según el método I. Igualmente se han tenido en consideración las normas DIN 4125, BS8081:1989 y las especificaciones de ensayos de SBMA Ltd.

A continuación se exponen los resultados y las conclusiones correspondientes a una parte de los anclajes de investigación realizados en gravas en una matriz areno-limosa, con el nivel de golpeo del ensayos SPT de entre 35 y > 50.

Los rangos de adherencia última en los anclajes de bulbo múltiple variaron entre 558,2 y 686,7 kN/m<sup>2</sup>, con un valor medio de 622,5 kN/m<sup>2</sup>, es decir 35% más que el valor medido in situ para la adherencia última del anclaje convencional (459 kN/m<sup>2</sup>). La carga máxima con la que se alcanzó el desplazamiento máximo por fluencia en los anclajes de bulbo múltiple fue de entre 2.340 y 2.880 kN, mientras que el anclaje convencional con la misma longitud total de bulbo soportó una carga de 1.920 kN.

Partiendo de la hipótesis de que el valor real de la adherencia última se corresponde a un bulbo de longitud reducida, en este caso a los bulbos de las unidades que formaron el anclaje SBMA de 2,50 m, el factor de eficiencia del bulbo correspondiente al anclaje convencional de 7,50 m, se puede calcular como el cociente entre las adherencias representativas de los dos bulbos con las longitudes diferentes.

#### Anclajes SBMA (TA-2 y TA-2'):

$$L_{\text{bulbo}} = 2,50 \text{ m} \quad \tau_{\text{lim}} = 622,5 \text{ kN/m}^2$$

#### Anclaje Convencional TA-2'':

$L_{bulbo} = 7,50 \text{ m}$     $\tau_{lim} = 459 \text{ kN/m}^2$

Factor de eficiencia:  $f_{ef} = 459 / 622,5 = 0,74$

La superposición de los resultados de las pruebas realizadas con el ábaco de Ostermayer (1974) de la figura 17, confirma una vez más la influencia de la longitud de bulbo sobre la capacidad última de anclaje, especialmente los resultados de los anclajes TA-2 y TA-2' (anclajes SBMA), y el anclaje convencional TA-2'', aproximándose claramente a la curva que representa las gravas muy densas.

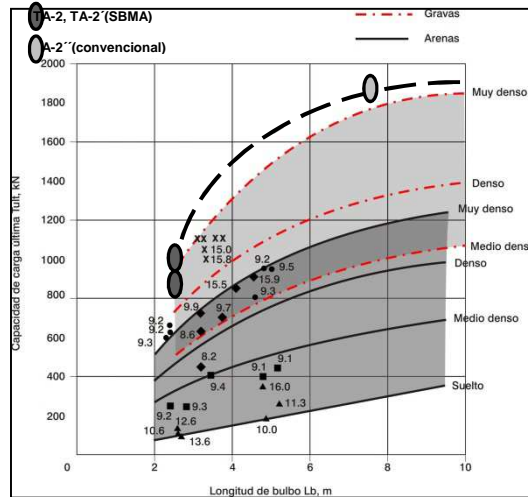


Figura 17. Superposición de los resultados obtenidos en las pruebas del Campo N° 1 con los ábacos de Ostermayer (1974).

Analizando esta misma curva se puede comprobar la eficiencia de anclajes en este tipo de terreno. En el tramo correspondiente a las longitudes de bulbo de entre 2,00 y 5,00 m se puede esperar una eficiencia muy alta, con el aumento de la capacidad de anclaje casi proporcional con la longitud de bulbo. Entre los 5,00 y 8,00 m la eficiencia disminuye significativamente, mientras que a partir de los 8,00 m el aumento de la longitud de bulbo no representa ningún beneficio para la capacidad del anclaje.

## 6.2 Campo de prueba 2

En el Campo 2 se realizaron 4 anclajes de prueba, de los cuales 2 anclajes fueron del tipo SBMA y 2 anclajes fueron convencionales. Todas las unidades de bulbos se alojaron en el estrato formado predominantemente por arcillas margosas. Los anclajes SBMA estaban formados por 2 unidades de bulbo, de longitud de 3,00 m cada uno. Los anclajes convencionales se diseñaron con una longitud muy elevada, de 11,00 m, para verificar los posibles efectos de pérdida progresiva de adherencia, y comparar su eficiencia con los anclajes de longitudes de bulbo reducidas.

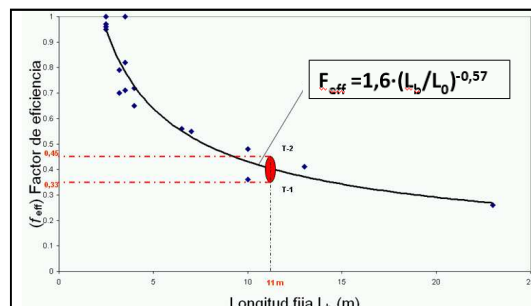


Figura 18. Factor de eficiencia, Campo de prueba N° 2 - Superposición de los resultados obtenidos en las pruebas con la formulación de Barley (1995/1997).

En las 4 unidades de bulbo que formaban los 2 anclajes de bulbo múltiple SBMA se desarrolló la máxima carga de 450 kN, lo que correspondería a un valor de adherencia última de 335 kN/m<sup>2</sup>.

En el caso de los anclajes convencionales el valor de adherencia última variaba entre 110,2 y 151,5 kN/m<sup>2</sup>, lo que representa el factor de eficiencia de entre 0,33 y 0,45, aproximándose a los valores propuestos por Barley (1995/97), tal y como se puede observar en la figura 18.

## 7 Propuesta de metodología de cálculo

En base a la información expuesta en los apartados anteriores, a continuación se presenta una propuesta de metodología de cálculo de anclajes activos, formados por cables que transmiten la carga al terreno mediante la lechada de cemento. La propuesta se centra en los parámetros más importantes que definen la capacidad y el comportamiento real de anclajes, como son:

- Características del terreno.
- Proceso de ejecución.
- Valores de adherencia media y adherencia última.
- Longitud de bulbo.
- Distribución de adherencia en función de la longitud del bulbo – factor de eficiencia.
- Tipología del anclaje (anclaje convencional o anclaje de bulbo múltiple).

Se pondrá especial énfasis en los efectos de la distribución no uniforme de tensiones a lo largo de la longitud de bulbo como el resultado del proceso de progresiva pérdida de adherencia. Como el concepto de control y cuantificación de la capacidad real de anclaje, en función de la longitud de bulbo se introducirá el factor de eficiencia ( $f_{ef}$ ), que permite definir la capacidad real de anclaje y adoptar el sistema adecuado del anclaje (anclaje convencional o anclaje de bulbo múltiple).

Debido a la complejidad y el número de parámetros que entran en el análisis, el tipo de procedimiento que se recomienda para el cálculo de anclajes tiene un carácter iterativo, como se puede ver en la figura 19.

Algunos de los pasos del diagrama de flujo que se puede ver en la figura 19 se comentan a continuación:

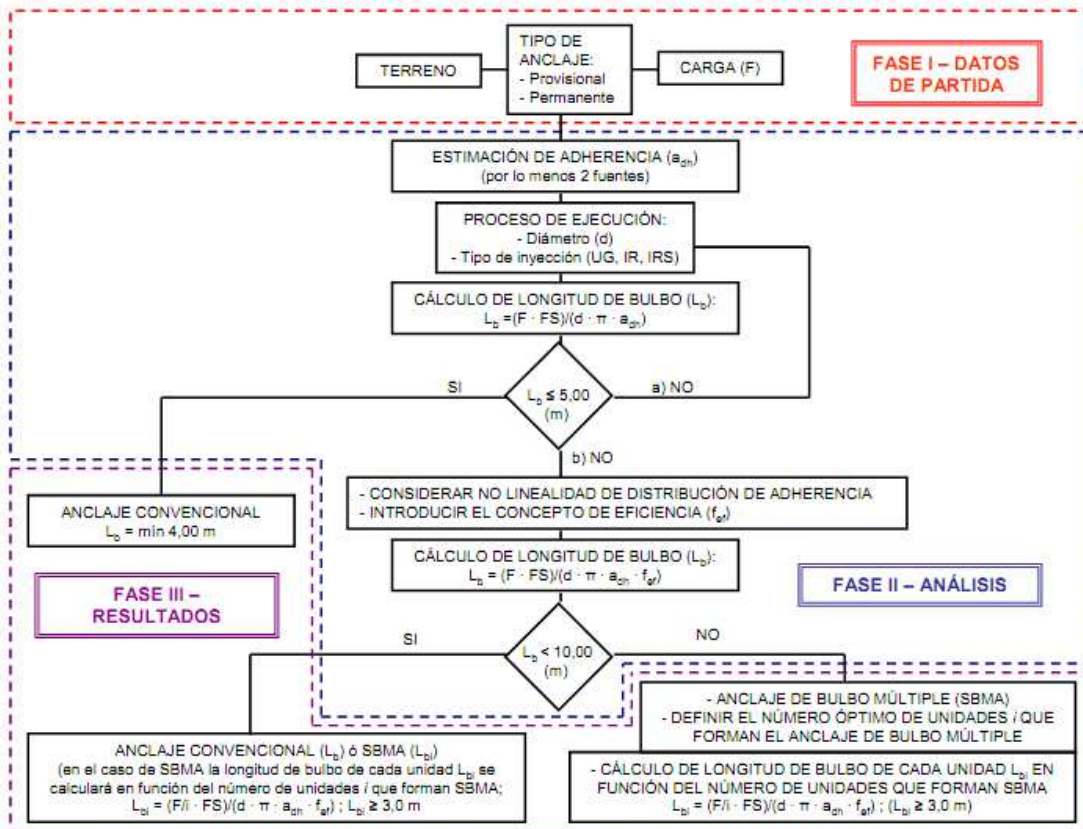


Figura 19. Propuesta de metodología para el cálculo de anclajes.

En la Fase I (datos de partida), como es de esperar las características del terreno natural tienen especial importancia. En particular, las características del terreno influyen directamente en la estimación de la adherencia y en el proceso de ejecución, que se analizan en la Fase II.

Fase II (análisis):

Para la estimación de la adherencia se recomienda utilizar por lo menos dos fuentes y tener en cuenta el concepto o la fórmula de cálculo de la capacidad de anclaje que se pretende aplicar en cada caso concreto.

En el caso de las pruebas de arrancamiento, las características de los anclajes ensayados, fundamentalmente su longitud de bulbo, deben acompañar al método de cálculo que se utilizará para la definición de los anclajes, siendo siempre recomendable que la longitud de bulbo de los anclajes de prueba y anclajes definitivos sean similares.

En la primera iteración es conveniente adoptar diámetros de perforación hasta 150 mm y tipo de inyección UG o IR.

De igual modo, en la primera iteración, la longitud de bulbo se calcula considerando una distribución de la adherencia uniforme.

En el caso de obtener una longitud de bulbo superior a 5,00 m se puede reconsiderar el proceso de ejecución (alternativa a), variando el diámetro y el tipo de inyección con el objetivo de optimizar la

longitud de bulbo y tenerla dentro del rango previamente indicado, es decir  $< 5,00$  m; una alternativa *b* sería introducir directamente la no linealidad en la distribución de adherencia.

En la Fase III (resultados), en el caso de que la longitud de bulbo obtenida teniendo en cuenta el efecto de la no linealidad de distribución de adherencia se encuentre entre 5,00 y 10,00 m, se plantean dos alternativas. Por un lado podría considerarse el tipo de anclaje convencional, cuya longitud de bulbo se calcularía teniendo en cuenta el factor de eficiencia  $f_{ef}$ , y por otro lado se podría adoptar el sistema de anclaje de bulbo múltiple SBMA, incorporando varias unidades de bulbo con el objetivo de incrementar la eficiencia del anclaje.

En el caso de que la longitud de bulbo obtenida teniendo en cuenta el efecto de la no linealidad de distribución de adherencia sea superior a los 10,00 m el sistema recomendado sería la utilización de bulbo múltiple.

## Agradecimientos

Agradecimiento a la empresa Keller Cimentaciones por el apoyo prestado y por permitirnos el uso de la información correspondiente a los ensayos de investigación presentados.

## Referencias

Barley, A.D. (1995). Theory and Practice of the Single Bore Multiple Anchor System. Gproc. Int. Symposium Salzburg Okt. 1995. Balkema Rotterdam, pp 293-301.

Barley, A.D., McBarron, P.L. (1997). Field trials on four high capacity removable multiple anchors founded in marine sand fill and in completely decomposed granite. International Conference Ground Anchorages and Anchorages Structures. Londres, pp. 8-157.

Barley, A.D. (2000). Trial soil nails for tunnel face support in London Clay and the detected influence of tendon stiffness and bond length on load transfer. Proceedings of the Third International Geosystems, Londres.

Barley, A.D., Windsor, C.R. (2000). Recent advances in ground anchor and grout reinforcement technology with reference to the development of the art. GeoEng 2000, International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, Melbourne, pp. 1083-1094.

Barley, A.D., Ostermayer, H. (2003), Ground Anchors, Geotechnical Handbook. Ernst & Sohn, pp. 169-215.

Berardi, G. (1967). Sul Comportamento Deglic Ancoraggi Immersi in Terreni Diversi. Universidad Genoa, Inst. Contr. Sc. Serie III, N° 60, pp 18-19.

British Standard Institution (1989). Ground Anchorages. BS8081, BSI, Londres, Inglaterra.

Bruce, D.A. (1976). The Design and Performance of Prestressed Rock Anchors with Particular Reference to Load Transfer Mechanism. PhD Thesis, University of Aberdeen, Scotland.

Bruce, M.E., Traylor, R.P., Barley, A.D. Bruce, D.A. and Gomez, J. (2004). Post Grouted Single Bore Multiple Anchors at Hopewell Dam, Michigan. GeoSupport 2004 Drilled Shafts, Micropiling, Deep Mixing, Remedial Methods and Specialty Foundation Systems, ADSC, Geotechnical Special Publication No. 124, Orlando, pp. 361-373.

Casanovas (1989). Anchoring in rock. Elsevier Scientific Publishing Company, pp 0-33.

Coates, D.F., Yu, Y.S. (1970). Three dimensional stress distribution around a cylindrical hole and anchor. Proceeding of 2 International Conference on Rock Mechanics, Belgrado, pp. 175-182.

Bruce, M.E., Gómez, J. and Traylor, R.P. (2007) Repeated Lift-off Testing of Single Bore Multiple Anchors for Dam Retaining Wall over a 5-year Period. International Conference on Ground Anchorages and Anchored Structures in Service, Londres, pp. 111-119.

Evangelista, A. y Sapio, G. (1978). Behaviour of Ground Anchors in Stiff Clays. Revue Francaise de Géotechnique, N° 3, pp. 39-46.

Farmer, I.W. (1975). Stress distribution along a resin grouted rock anchor. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science Vol 12, pp 347-351.

Fernández Vincent, J.M. (2005). Anclajes de bulbo múltiple. 5ª Jornada Técnica de SEMSIG-AETESS, Madrid, pp 113-124.

Fernández Vincent, J.M. (2011). Casos de Aplicación de Anclajes de Bulbo Múltiple. Pan American Geotechnical Conference CGS, Toronto.

Fujita, K., Ueda, K., Kusabaka, M. (1978). A Method of Predict the Load Displacement Relationship of Ground Anchor. Recue Francaise de Géotechnique, N°3, pp.58-62.

Keller Cimentaciones (2009). Campo de Prueba Sevilla I, Informe técnico de resultados de pruebas de arrancamiento de anclajes de bulbo múltiple y anclajes convencionales.

Keller Cimentaciones (2011). Campo de Prueba Antequera, Informe técnico de resultados de pruebas de arrancamiento de anclajes de bulbo múltiple y anclajes convencionales.

Littlejohn, G.S. (1972). Some empirical design methods employed in Britain. In. Questionnaire on Rock-Anchor design, Geotechnics Research Group, Dept. of Engineering, University of Aberdeen, recogido de BS 8081: 1989.

Littlejohn, G.S. (1975). Rock anchors-state of the art, Part I: Design.

Littlejohn, G.S. (1982a). Design of Cement Based Grouts. In. Proc. Geotechnical Engineering Speciality Conference, Grouting in Geotechnical Engineering, ASCE, New Orleans, Louisiana.

Mesci, J. (1997). Some Practical and Theoretical Aspects of Grouted Soil Anchors. Proceedings of International Conference Ground Anchorages and Anchorages Structures. Londres, pp. 119-130.

Muller, H. (1966). Erfahrungen mit Verankerungen Systeme BBRV in Fels-und Lockergesteinen. Schweizerische Bauzeitung, 84 (4), pp. 77-82.

Ostermayer, H. (1974). Construction carrying behavior and creep characteristics of ground anchors. Diaphragm Walls and Anchorages. Proceedings, Institution of Civil Engineers, Londres, Septiembre 18-20, pp. 141-151.

Ostermayer, H. y Scheele, F. (1977). Research and Ground Anchors in Non-Cohesive Soils. Revue Francaise de Géotechnique N° 3, pp. 92-97.

Vukotić, G. (2011). Análisis de la distribución de las tensiones a lo largo de la longitud de bulbo de anclajes – Progresiva pérdida de adherencia. Trabajo tutelado del Programa de Doctorado, Departamento de Ingeniería y Morfología del Terreno – ETS de ICCP, Universidad Politécnica de Madrid.

Weerasinghe, R.B. (1993). The Behaviour of Anchorages in Weak Mudstone. PhD Tesis, University of Bradford.

Woods, R.I, Barkhordari, K. (1997). The Influence of Bond Stress Distribution on Ground Anchor Design. Proceedings of International Conference Ground Anchorages and Anchorages Structures. Londres, pp. 55-64.

Xanthakos, P. (1988). Ground anchors and anchored structures. Ed. John Wiley & Sons, Inc, pp. 123-366.