

# ANCLAJES, PILOTES Y MICROPILOTES: MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CARGA AL TERRENO

**Javier Ripoll García-Mansilla**

*Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos*

*Ripoll Consulting de Ingeniería S.L.*



## Resumen

El artículo trata sobre el modo en que tres tipos de cimentaciones profundas (anclajes al terreno, micropilotes y pilotes) transfieren su carga al terreno, discute la forma de determinar los parámetros del terreno ( $\tau_k$  y  $q_k$ ) que caracterizan la transferencia y describe distintas opciones de pruebas de carga real que permiten comprobar cómo se materializa la misma. Finalmente se propone un procedimiento de control que podría incrementar notablemente el grado de confianza y seguridad en este tipo de cimentaciones.

## 1 - Introducción

La mayoría de las construcciones se apoyan sobre la superficie de la tierra y normalmente, en su proyecto y construcción, se desea garantizar la máxima estabilidad, durabilidad e inmovilidad del apoyo.

Un apoyo directo estructura-terreno solo suele ser posible cuando tanto las estructuras como los terrenos en que se apoyan tienen elevadas resistencias mecánicas. Normalmente ni los terrenos, sobre todo en sus capas superficiales, ni las estructuras suelen ser remarcablemente resistentes y, por lo tanto, los apoyos directos no suelen recomendarse pues podrían aparecer asentamientos apreciables con sus consecuentes problemas estructurales o de servicio.

Para mejorar la capacidad del apoyo estructura- terreno puede tratarse el terreno incrementando su capacidad, pueden dotarse a la estructura de una cimentación (parte de la estructura especialmente diseñada para transmitir las cargas al terreno de forma aceptable por él mismo) o pueden realizarse ambas actuaciones simultáneamente.

Las cimentaciones de las estructuras se dividen, básicamente, en dos grandes grupos: las cimentaciones superficiales y las cimentaciones profundas. Las primeras (zapatas, vigas flotantes, zapatas corridas, placas,..) son las adecuadas para terrenos con niveles resistentes aceptables en zonas próximas a las estructuras mientras que las segundas (pilotes, micropilotes,..) son las adecuadas para terrenos en los que los niveles resistentes aceptables se encuentran a mayores profundidades.

Normalmente las cimentaciones actúan de forma pasiva transmitiendo al terreno las cargas que reciben, básicamente son pesos situados sobre el terreno y que de forma natural tenderían a hundirse por gravedad en el mismo. No obstante, en algunas construcciones la problemática es radicalmente diferente: surge la necesidad de sujetar la estructura al terreno pues tenderían de forma natural a separarse del mismo. Como ejemplo de dichos casos podemos citar los muros de contención de tierras y las placas de cimentación bajo nivel freático. Para solucionar dichas situaciones se han desarrollado una serie de elementos especiales denominados genéricamente “anclajes”.

Los anclajes podrían subdividirse, considerándolos como una tipología especial de cimentación, en anclajes superficiales y anclajes profundos. Dentro de los anclajes superficiales incluiríamos a los bulones y dentro de los profundos a los anclajes al terreno con longitud libre y bulbo.

Este artículo se centrará en tres tipologías de cimentación profunda: los anclajes al terreno, los micropilotes y los pilotes. Existe abundante bibliografía existente sobre las mismas ((1) a (5)) por lo que nos ceñiremos únicamente a comentar nuestras experiencias y conclusiones sobre un aspecto relativamente poco estudiado y común a todas ellas: el mecanismo de transferencia de carga al terreno.

## 2 - Definiciones

**Anclaje al terreno:** Dispositivo capaz de transmitir una carga de tracción, aplicada en la superficie de un terreno, a una zona interior del mismo. El dispositivo se compone básicamente de una zona de cabeza, una zona de alargamiento (longitud libre) y una zona de adherencia (longitud fija o bulbo de anclaje). (1)

**Pilote:** Elemento constructivo capaz de transmitir cargas de compresión, aplicadas en la superficie de un terreno, a zonas profundas del mismo. La transmisión puede realizarse por rozamiento lateral (fuste), por apoyo en su punta o mediante ambos mecanismos actuando simultáneamente.

**Micropilote:** pilote cilíndrico de diámetro inferior a trescientos milímetros, perforado en el terreno, armado con tubería de acero reforzada a veces con una o varias barras corrugadas, e inyectado con lechada de cemento o mortero de cemento en una o varias fases.(5)

Los micropilotes pueden considerarse como una variante de los pilotes, no obstante, suelen presentarse separadamente pues su utilización es muy frecuente y disponen de una tecnología específica muy desarrollada.

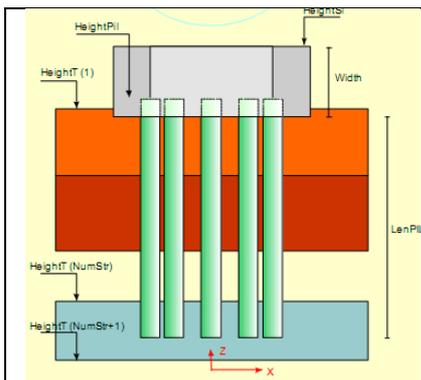


Figura 1: Pilotes

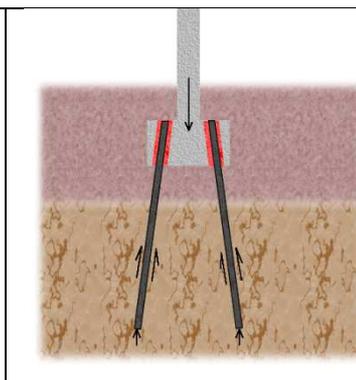


Figura 2: Micropilotes



Figura 3: Anclajes al terreno

## 3 – La transferencia de cargas al terreno

Los tres elementos de cimentación profunda considerados comparten dos características fundamentales:

- Son elementos lineales fabricados con hormigón y acero
- Reciben una carga en su extremo sobresaliente al terreno y deben transmitirla a zonas profundas del mismo.

La transmisión de carga puede realizarse de dos formas:

- A través del fuste transmitiéndola al terreno por adherencia
- A través de un apoyo de su punta en el terreno transmitiéndola al terreno por compresión del mismo.

La adherencia elemento-terreno depende de muchos factores (tipo y condiciones del terreno, tipo de elemento de cimentación, sistema de perforación,...) y se representa mediante un parámetro  $\tau_k$  expresado en  $N/mm^2$ .

De forma general, la carga transmitida por adherencia al terreno se podría determinar mediante una fórmula como la siguiente

$$F_{ad} = L_{efec} \cdot D_{efec} \cdot \pi \cdot \tau_k$$

donde

$F_{ad}$  = fuerza total que se puede transmitir al terreno por adherencia elemento-terreno

$L_{efec}$  = longitud efectiva de transmisión de fuerzas

$D_{efec}$  = diámetro efectivo del elemento de cimentación

$\tau_k$  = tensión máxima de adherencia terreno-elemento de cimentación

La utilización precisa de la formula básica anterior no es sencilla pues no es fácil determinar los valores reales de los tres parámetros participantes ( $L_{efec}$ ,  $D_{efec}$ , y  $\tau_k$ ).

Además, complicando el problema, dichos parámetros no son realmente constantes sino que normalmente varían con la profundidad.

Para poder utilizar la formula, normalmente

- a) se determina un valor de  $D_{efec}$ , que depende del tipo y diámetro nominal del elemento y del tipo y características del terreno. Existen tablas empírico-experimentales que proponen valores de  $D_{efec}$  en función de las variables citadas.
- b) se considera que toda la longitud construida del elemento es contribuyente ( $L_{efec} = L_{elemento}$ ) o en ocasiones se recurre, como en el caso anterior, a tablas que dan coeficientes reductores para la longitud adherente teórica en función del tipo de elemento, tipo de terreno y método constructivo.
- c) se determina el valor de una tensión media de transferencia característica del terreno a partir de tablas con características medias de distintos tipos de terrenos o utilizando formulas empírico-experimental basadas en los resultados de ciertos ensayos geotécnicos.

Análogamente, la carga que se puede transmitir al terreno por punta se suele determinar mediante la fórmula siguiente

$$F_p = D_{efec}^2 \cdot \pi \cdot q_k / 4$$

donde

$F_p$  = fuerza total que el elemento puede transmitir al terreno por apoyo de su punta inferior

$D_{efec}$  = diámetro efectivo del elemento de cimentación

$q_k$  = tensión máxima de compresión del terreno en la zona del apoyo

Como en el caso anterior, la determinación de los parámetros participantes tampoco resulta sencilla. Para poder utilizar la formula se determina  $D_{efec}$  de forma análoga a la comentada previamente, sin embargo  $q_k$  puede determinarse mucho mas ajustadamente utilizando resultados de ensayos geotécnicos realizados "in situ" o en laboratorio.

Finalmente, se suele determinar la capacidad total de carga de los elementos de cimentación profunda sumando los valores ponderados de sus capacidades de resistencia por fuste y de resistencia por punta:

$$F = (\gamma_{ad} \cdot F_{ad}^*) + (\gamma_p \cdot F_p^*)$$

donde

$F$  = capacidad de transmisión de carga del elemento

$\gamma_{ad}$  = factor de ponderación de la capacidad de carga por fuste

$F_{ad}^*$  = capacidad de transmisión de carga por fuste

$\gamma_p$  = factor de ponderación de la capacidad de carga por punta

$F_p^*$  = capacidad de transmisión de carga por punta

Existen distintos criterios para determinar los valores de  $\gamma_{ad}$  y  $\gamma_p$ , pero la experiencia del proyectista suele ser determinante en dicha elección.

Tras la anterior exposición queda claro que la determinación teórica de la capacidad de transmisión de carga de los elementos de cimentación profunda es muy compleja y que normalmente los métodos teóricos desarrollados introducen un alto grado de incertidumbre.

Para combatir dicha incertidumbre, lógicamente, los coeficientes de seguridad que deben emplearse en los diseños deben ser muy grandes.

Nuestra experiencia en la realización de un gran número de ensayos, instrumentados y no instrumentados de este tipo de elementos nos permite asegurar que:

En el caso de micropilotes y pilotes:

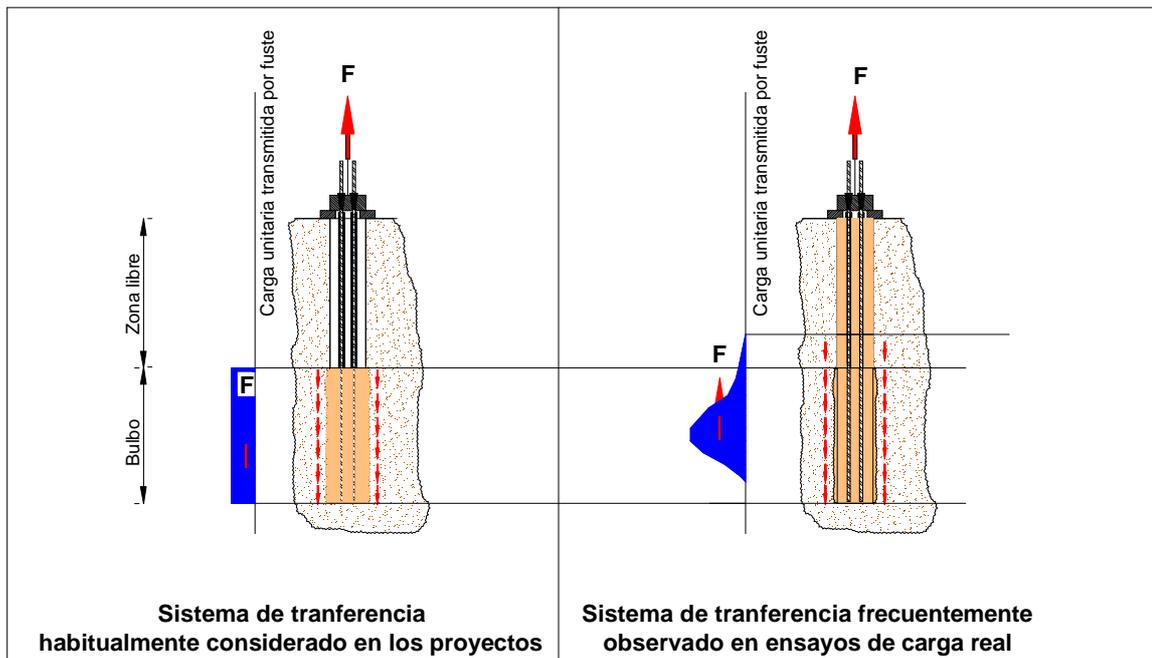
- La transmisión por adherencia, en la inmensa mayoría de los elementos ensayados, suele ser la única forma de transmisión que realmente se produce. Únicamente en un ensayo de un pilote instrumentado detectamos una transmisión por punta tras el deslizamiento del pilote por rotura de su adherencia lateral.
- La transmisión por adherencia no es uniforme a lo largo del fuste sino que puede representarse como una ola, cuya altura y longitud aumenta con la carga, y que se desplaza al aumentar la misma alcanzando profundidades cada vez mayores.
- La transmisión por punta sólo comienza cuando la “ola” de transmisión por adherencia alcanza la base del elemento.
- Las tensiones de adherencia crecen en cada capa del terreno hasta alcanzar un máximo y tras alcanzarlo el terreno experimenta una “plastificación” reduciéndose la adherencia bruscamente hasta un valor residual reducido pero no despreciable que a partir de dicho momento prácticamente permanece constante.
- Las tensiones de punta sólo se desarrollan sensiblemente tras la compresión total de los detritus o del terreno mal compactado que pueda estar ubicado debajo de la punta del elemento. Esto implica, en general un sensible asentamiento del elemento completo antes de que empiecen a desarrollarse las resistencias por punta.

En el caso de anclajes al terreno:

- La zona de la longitud libre inmediatamente en contacto con el bulbo se comprime tras la puesta en carga del anclaje y actúa como un tapón del bulbo absorbiendo una parte no despreciable de la carga de tesado del anclaje y transmitiéndola al terreno por encima de la zona del bulbo. En algunos ensayos hemos observado que el “tapón” retenía fuerzas del orden del 20% de la fuerza aplicada al anclaje y que consecuentemente dicha fuerza se transmitía al terreno en zonas por encima del bulbo teórico.

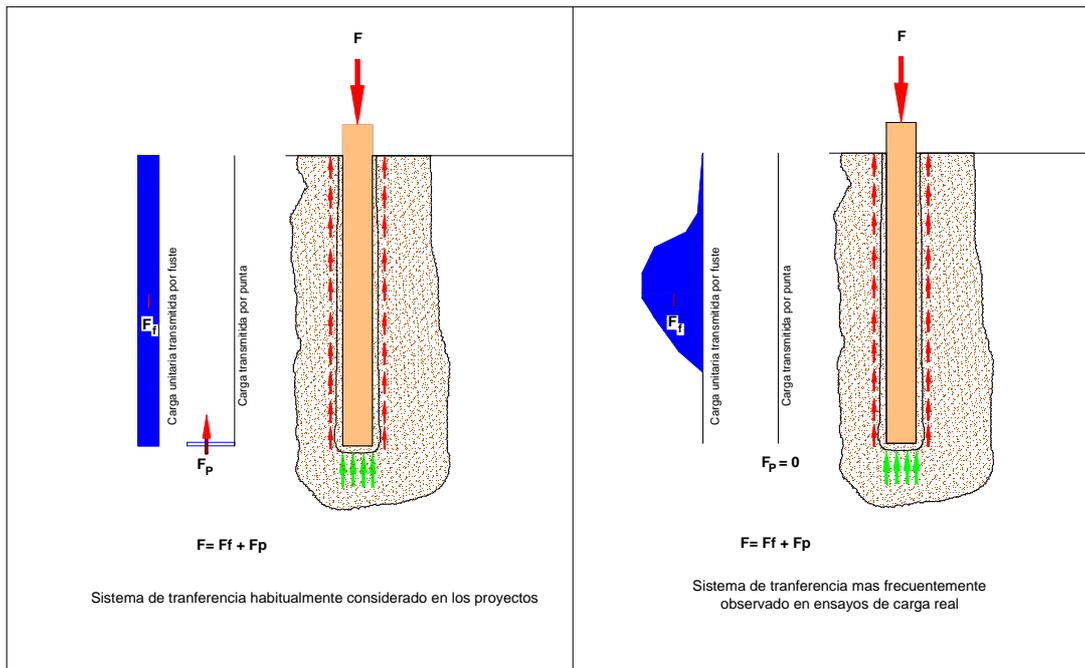
Los gráficos que se muestran a continuación comparan los mecanismos de transferencia de carga habitualmente considerados en proyecto para estos tipos de cimentaciones (en función de los cuales se han desarrollado los procedimientos de cálculo habituales) y los mecanismos de transferencia que hemos observado frecuentemente en las pruebas de carga realizadas.

Los gráficos mostrados deben considerarse únicamente como ejemplos ilustrativos que permiten resaltar las diferencias observadas entre teoría y práctica.



*Figura 4: Transferencia de cargas teórica y real en anclajes al terreno*

En anclajes al terreno se ha comprobado reiteradamente que las tensiones medias de transferencia reales suelen ser superiores a las deducidas teóricamente y que hay una zona en la parte distal de la longitud libre que transmite al terreno un porcentaje de carga no despreciable. Dicho tramo transmisor ubicado en la longitud libre parece tener una longitud del orden de 2 m.



**Figura 5: Transferencia de cargas teórica y real en pilotes y micropilotes**

En el caso de los pilotes hemos observado, en general, que las tensiones de adherencia suelen ser superiores a las previstas, que la parte superior del pilote suele transmitir poca carga y que, en la práctica totalidad de los ensayos realizados, el pilote no transmitía ninguna carga por punta al terreno. Únicamente en un caso, tras verificarse un claro deslizamiento del fuste en el que todas las capas del terreno superaron sus tensiones admisibles de adherencia y tras un hundimiento de varios cm, comenzó a detectarse una transmisión de carga por punta.

Vemos por lo tanto que, por un lado la metodología habitualmente empleada para la determinación teórica de la capacidad de transmisión de carga de los elementos de cimentación profunda presenta un alto grado de incertidumbre y que, por otro lado, el comportamiento real de dichas estructuras normalmente es muy diferente del teóricamente considerado en los métodos de cálculo.

En consecuencia, mientras no se desarrollen métodos teóricos más cercanos a la realidad, consideramos que la utilización de los actualmente existentes debería restringirse a fases de diseño básico o inicial pero que cualquier ejecución real debería requerir ensayos in situ que verificasen la idoneidad del diseño de proyecto.

## 4 – Métodos habitualmente utilizados para determinar los parámetros del terreno que afectan a la transferencia de cargas

Cuando se proyectan estructuras con anclajes al terreno, micropilotes o pilotes las cargas que dichos elementos deben transmitir al terreno suelen conocerse con bastante exactitud. No sucede lo mismo con las características resistentes del terreno que afectan a la transmisión de cargas: la tensión de adherencia última ( $\tau_k$ ) y la carga de hundimiento por punta ( $q_k$ ).

Los principales procedimientos que suelen utilizarse para determinar  $\tau_k$  y  $q_k$  son los siguientes:

- Ensayos de penetración in situ
- Ensayos de laboratorio a partir de muestras tomadas in situ
- Ensayos presiométricos in situ

Los ensayos de penetración (SPT, DPSH,..) se realizan normalmente en todos los informes geotécnicos. Consisten en la introducción en el terreno de un elemento de penetración, generalmente de forma cónica, unido solidariamente a un varillaje. La hinca se realiza por golpeo de una maza con un peso definido, sobre una sufridera o cabezal colocado en la parte superior del varillaje. Dicha maza se eleva a una altura fijada, y se deja caer libremente. El resultado del ensayo es el número de golpes necesario para que el penetrómetro se introduzca una determinada profundidad.

Los informes geotécnicos incluyen también una serie de ensayos destinados a determinar la tipología y granulometría del terreno.

Los valores de  $\tau_k$  y  $q_k$  se determinan utilizando una serie de tablas que relacionan los valores de  $\tau_k$  y  $q_k$  con los resultados de los ensayos de penetración y de caracterización del terreno.

Existen muchas tablas, desarrolladas en distintos países y por distintos organismos, que suelen obtenerse tras dar un tratamiento matemático y estadístico a una larga serie de resultados experimentales.

Vemos, pues, que los valores de  $\tau_k$  y  $q_k$ , cuando se deducen de los resultados de ensayos de penetración, pueden ser bastante orientativos pero su grado de fiabilidad es excesivamente dependiente del grado de fiabilidad de la tabla utilizada.

Un segundo método para determinar  $\tau_k$  y  $q_k$  es realizar ensayos de laboratorio sobre testigos tomados in situ. Existen multitud de ensayos de laboratorio que permiten la determinación bastante precisa de  $q_k$  pero no sucede lo mismo respecto a  $\tau_k$  que como en el método anterior suele determinarse mediante tablas empírico-experimentales.

La gran dificultad de los métodos de laboratorio es el lograr las muestras inalteradas del terreno. La precisión en los resultados de  $q_k$  depende mucho de la inalterabilidad de la muestra.

El tercer tipo de ensayos desarrollados para determinar  $\tau_k$  y  $q_k$  es el basado en ensayos presiométricos. Estos ensayos, conceptualmente, pretenden ser “ensayos de laboratorio” realizados in situ. Básicamente consisten en realizar una perforación que afecte lo menos posible al terreno, introducir en ella un dispositivo hinchable de forma hidráulica e hincharlo deformando el terreno hasta detectar sus límites resistentes característicos.

Los ensayos presiométricos minimizan la problemática de la alteración de la muestra y sólo mantienen la incertidumbre de la alteración del terreno debida a la perforación. Mediante estos ensayos se determina de forma bastante precisa el valor de  $q_k$  pero, como en los casos anteriores, la determinación de  $\tau_k$  sigue sin ser directa y es necesario el uso de tablas auxiliares.

En conclusión vemos que

- la determinación de  $\tau_k$  y  $q_k$  mediante resultados de ensayos de penetración es cualitativamente aceptable pero con un grado de incertidumbre elevado. Para poder asegurar una seguridad razonable los valores determinados por este procedimiento suelen ser muy conservadores.
- Si se realizan ensayos de laboratorio sobre muestras muy poco alteradas los valores de  $q_k$  suelen ser mas cercanos a la realidad aunque se mantiene la incertidumbre de los valores de  $\tau_k$ .
- Si se realizan ensayos presiométricos se mejora nuevamente la precisión en la determinación de  $q_k$  aunque sigue sin mejorarse la determinación de  $\tau_k$ .

## 5 – Pruebas de carga

La determinación de  $\tau_k$  y de  $q_k$  mediante los métodos anteriormente descritos puede resultar adecuada y practica para un proyecto inicial pero los valores determinados deberían verificarse antes de la ejecución del proyecto mediante pruebas in situ de carga real.

Idealmente, los elementos de cimentación profunda a ensayar deberían estar dotados de una instrumentación especial que permita comprobar cómo se transfiere su carga al terreno.

Si no se instala instrumentación en profundidad sólo puede comprobarse la capacidad mínima y los movimientos en cabeza del elemento ensayado pero no hay forma de comprobar cómo se transmiten las cargas al terreno y salvo que el ensayo sea a rotura no hay forma de determinar la capacidad máxima del elemento.

En ensayos instrumentados la forma de transmisión de cargas puede determinarse con bastante precisión.

Las normativas normalmente presentan y especifican tres tipos de pruebas o ensayos de carga:

- Pruebas de investigación.
- Pruebas de idoneidad
- Pruebas de aceptación.

Las pruebas de investigación se realizan sobre elementos situados en la zona de la obra pero que posteriormente no formarán parte de la misma. Su objetivo es verificar las características resistentes del terreno que afectan a la transmisión de cargas cotejándolas con las consideradas en el proyecto. Idealmente estas pruebas deberían realizarse antes del proyecto para evitar posibles ajustes en el mismo, realizarse sobre elementos que no tienen porque ser idénticos a los que se instalarán en el proyecto y deberían ser pruebas destructivas en las que se alcanza la rotura del terreno. Por ello es recomendable que los elementos tengan longitudes de adherencia

reducidas de forma que al aplicar las cargas se pueda llegar al deslizamiento o superficies de apoyo en punta reducidas que aseguren el hundimiento a las cargas máximas de la prueba. Estas pruebas permiten determinar los valores reales de  $\tau_k$  y de  $q_k$  solo dependientes del sistema de perforación utilizado.

Los valores reales de  $\tau_k$  y de  $q_k$  determinados mediante pruebas de carga real permitirán comprobar y, si es preciso, ajustar el proyecto inicial.

Las pruebas de idoneidad se realizan sobre elementos que formarán parte de la obra. Se realizarán sobre los primeros elementos instalados y antes de comenzar el proceso constructivo en serie de los mismos. Permitirán comprobar que tanto los elementos como su proceso constructivo se comportan de acuerdo con las previsiones del proyecto. Constituyen la oficialización de la corrección del diseño. Las cargas a aplicar en este tipo de ensayos deberían ser del orden de 1,25 a 1,35 veces mayores que las de trabajo previstas.

Las pruebas de aceptación constituyen una comprobación estadística de la corrección de la ejecución. La carga de ensayo debería ser 1.25 veces mayor que la de trabajo prevista.

El número de pruebas de cada tipo a realizar dependerá de la magnitud y responsabilidad de la obra pero se recomienda que se realicen al menos dos pruebas de investigación y que se sometan a pruebas de idoneidad los dos primeros elementos de cada tipología anclaje-terreno presente en el proyecto.

En el caso de anclajes al terreno, la normativa vigente requiere que todos los anclajes, excepto los que ya han sido sometidos a ensayos de idoneidad, se sometan a una prueba de aceptación.

En el caso de los micropilotes y los pilotes, aunque técnicamente sería deseable, no resulta económicamente viable realizar pruebas de aceptación en todos los elementos de la obra. En general se recomienda realizar únicamente ensayos de idoneidad y controlar que el resto de los pilotes o micropilotes de la obra se fabrican de forma análoga a la utilizada para los elementos que se sometieron a ensayos superados de idoneidad.

## 6 – Características de las pruebas de carga

Las pruebas de carga tienen cuatro características fundamentales:

- a) Tipo de instrumentación (exterior o exterior y profunda)
- b) Tipo de carga (compresión, tracción o carga lateral)
- c) Carga máxima de la prueba
- d) Número de ciclos de carga

### 6.1 – Tipo de instrumentación

El tipo de instrumentación es fundamental. En todos los casos se instalará instrumentación exterior que registrará obligatoriamente los siguientes parámetros:

- Fuerza aplicada
- Movimiento de la cabeza del elemento
- Tiempo de aplicación de carga

Y opcionalmente los siguientes parámetros:

- Temperatura ambiente
- Movimientos de los componentes de la estructura de reacción

Mediante la instrumentación exterior se comprobará el funcionamiento aparente del elemento pero sólo podrán deducirse mediante métodos empíricos o teóricos el funcionamiento en profundidad del elemento y sus mecanismos de transmisión de carga al terreno.

Si se desea conocer de forma mas precisa los mecanismos de transmisión de carga que actúan en las zonas profundas del terreno es necesario instrumentar el elemento en profundidad.

La instrumentación en profundidad consiste en la instalación de extensómetros embebidos en el bulbo que permiten determinar las deformaciones de las secciones de bulbo instrumentadas en función de las cargas introducidas. Conociendo las deformaciones y las características mecánicas de las secciones del bulbo correspondientes puede determinarse la fuerza que las produce. Conocida la fuerza en las secciones instrumentadas puede deducirse la fuerza que por adherencia se va transmitiendo al terreno entre secciones instrumentadas consecutivas.

Cuando se instrumenta en profundidad se controla la deformación en cada extensómetro para cada fase o escalón de carga.

En pruebas instrumentadas exteriormente es posible determinar:

- a) La curva fuerza aplicada – movimiento en cabeza del elemento
- b) La curva fuerza aplicada – movimiento elástico en cabeza del elemento
- c) La curva fuerza aplicada – movimiento plástico en cabeza del elemento
- d) La carga máxima con estabilización verificada

En pruebas instrumentadas también en profundidad, además de los resultados anteriores es posible determinar:

- e) La evolución con la fuerza aplicada de las tensiones medias de transferencia desarrolladas a lo largo del fuste.
- f) Las tensiones medias de transferencia últimas en cada capa del terreno si es que se llegan a alcanzar.
- g) La longitud del elemento que transmite carga al terreno para cada nivel de carga
- h) Los movimientos del elemento en profundidad

## **6.2 – Tipo de carga**

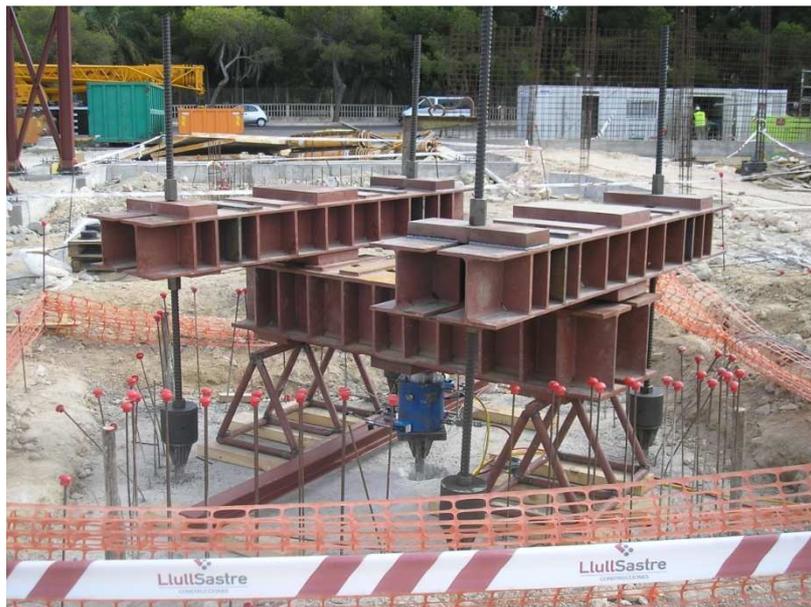
La carga aplicada puede ser de compresión, de tracción o lateral.

Existen muchas disposiciones de ensayo. La utilización de una disposición u otra depende de factores tales como las características del terreno, las fuerzas a aplicar, la ubicación del elemento en la obra, el tipo de resultados deseado, etc.

Las siguientes fotografías muestran distintos tipos de pruebas de carga:



*Figura 6: Ensayo de idoneidad de un anclaje al terreno*



*Figura 7: Prueba de carga de compresión de un micropilote vertical (Tipo 1)*



*Figura 8: Prueba de carga de compresión de un micropilote vertical (tipo 2)*



*Figura 9: Prueba de carga de compresión de un micropilote inclinado*



*Figura 10: Prueba de carga de tracción de un micropilote vertical (Tipo 1)*



*Figura 11: Prueba de carga de tracción de un micropilote vertical (Tipo 2)*



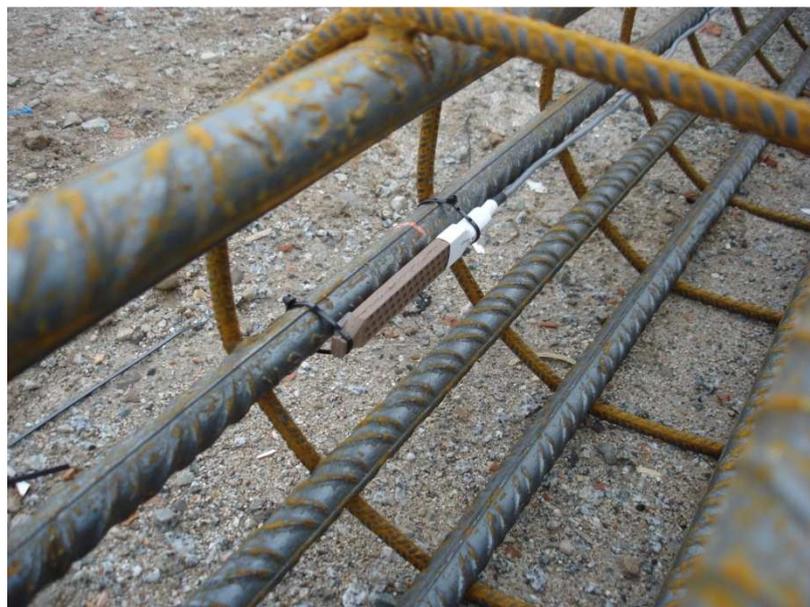
*Figura 12: Prueba de carga lateral de micropilotes*



*Figura 13: Prueba carga de micropilotes con empuje lateral y momento*



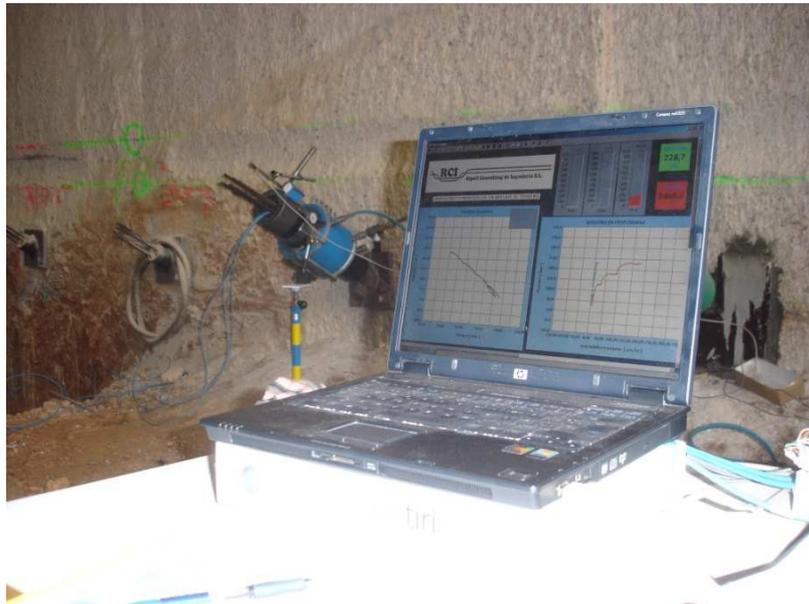
*Figura 14: Prueba de carga de compresión de un pilote*



*Figura 15: Montaje de sensores de deformación en la armadura de un pilote*



*Figura 16: Montaje de sensores de deformación en el bulbo de un anclaje al terreno*



*Figura 17: Control continuo e inmediato de la evolución de deformaciones y movimientos durante la ejecución de un ensayo instrumentado*



*Figura 17: El control continuo, instantáneo y preciso de la evolución del ensayo permite introducir variantes en el procedimiento de ensayo previsto que clarifiquen la comprensión del comportamiento observado.*

### 6.3 – Carga máxima de la prueba

La carga máxima de los ensayos debe ser especificada por la Dirección de Obra en función de sus necesidades aunque existe abundante normativa sobre el tema.

En general se recomienda que los ensayos de investigación sean ensayos a rotura (siempre del terreno y nunca del elemento de cimentación).

Los ensayos de idoneidad suelen tener unos valores de carga máxima del orden de 1,25 a 1,35 veces superior a la carga máxima de trabajo prevista.

Los ensayos de aceptación suelen tener unos valores de carga máxima del orden de 1,25 veces superior a la carga máxima de trabajo prevista.

### 6.4 – Número de ciclos de carga

La diferente normativa existente suele especificar el número de ciclos de carga en función del tipo de ensayo. Normalmente los ensayos de investigación y los de idoneidad suelen tener cinco o seis ciclos de carga incremental. Los ensayos de aceptación suelen tener entre 1 y tres ciclos de carga incremental.

Cuando los ensayos se realicen sobre elementos con instrumentación en profundidad suele ser más aconsejable realizar un único ciclo de carga pues los resultados obtenidos suelen ser más claros de interpretar. La razón es simple: cuando se descarga el elemento la descarga solo es clara en superficie. Internamente suelen quedar tensiones remanentes que dificultan la interpretación de la evolución de la transferencia de cargas en función de la fuerza aplicada.

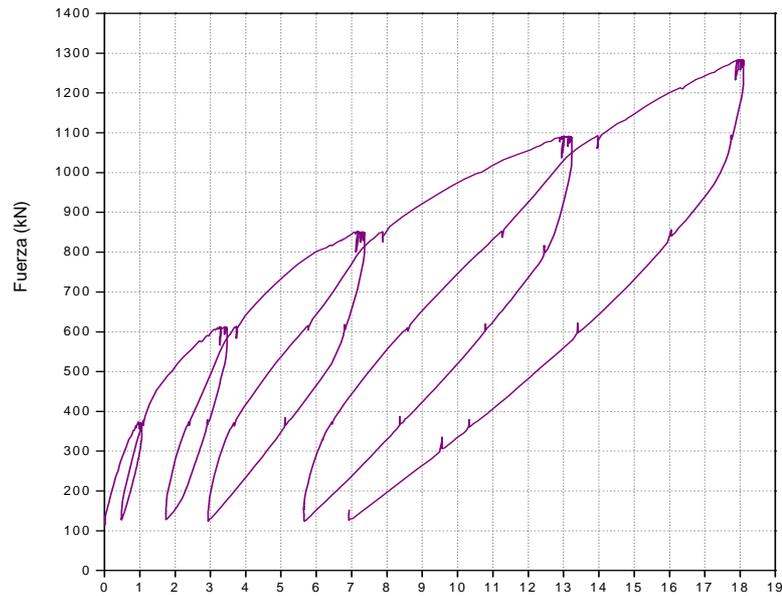
En general, cuando RCI ensaya elementos con instrumentación en profundidad, suele realizar en primer lugar un ensayo de un solo ciclo que alcanza la carga máxima prevista y posteriormente

un ensayo de cinco ciclos incrementales de carga. El estudio conjunto de los resultados de los dos ensayos consecutivos suele proporcionar los datos suficientes para un buen estudio del comportamiento del elemento.

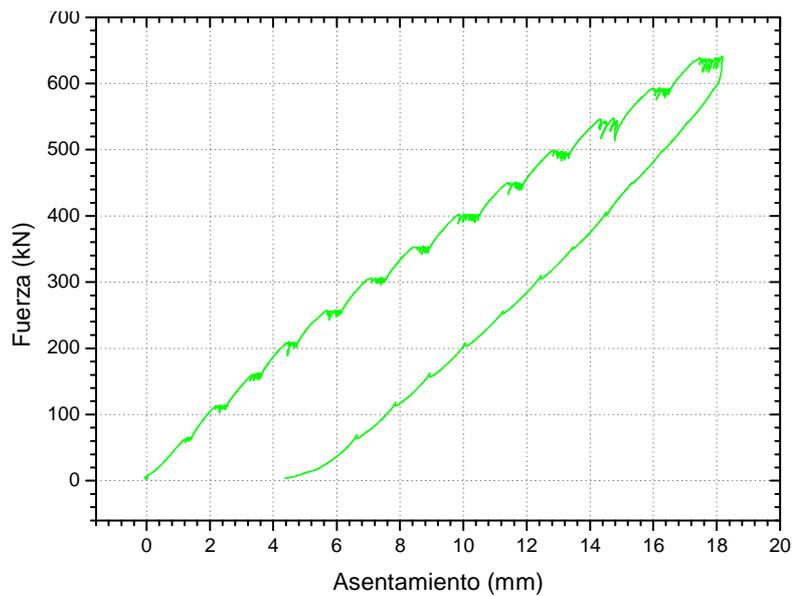
## 7 – Resultados de pruebas de carga

Los resultados de las pruebas de carga se comprenden mejor representándolos de forma gráfica. Normalmente se obtienen gráficos como los siguientes:

### a) Curvas fuerza aplicada – movimiento en cabeza



*Figura 18: Prueba de cinco ciclos de carga incremental*



*Figura 19: Prueba de un ciclo escalonado de carga*

- b) Curvas fuerza aplicada – movimiento elástico en cabeza – movimiento plástico en cabeza

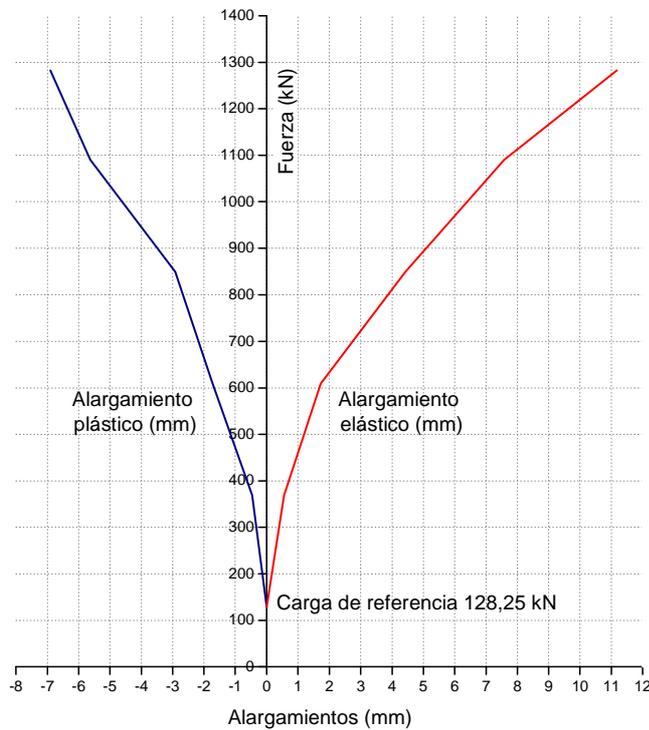


Figura 20: Curva fuerza-movimientos plástico y elástico en cabeza

- c) Curvas fuerza aplicada – deformación en sensores instalados en profundidad

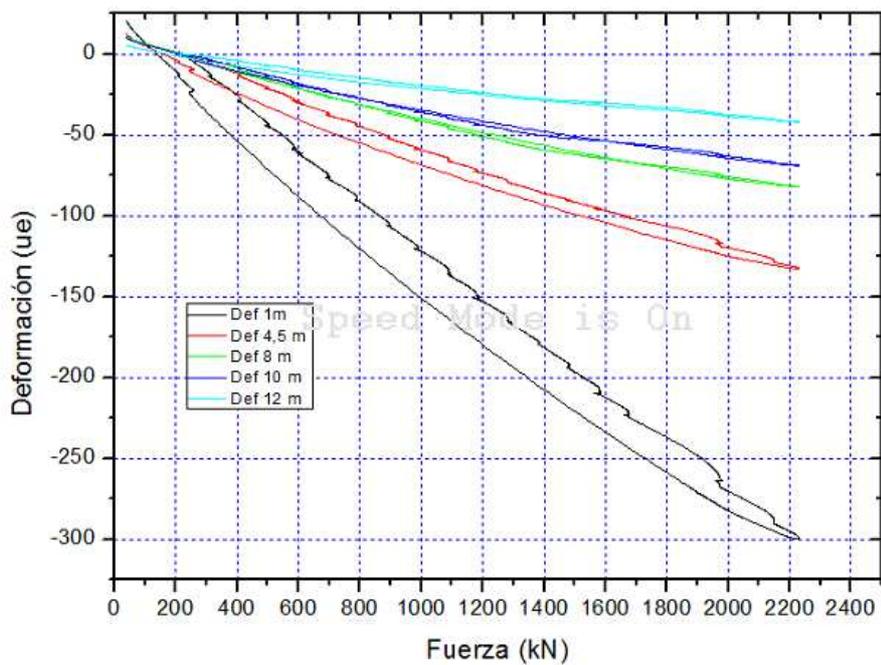


Figura 21: Curva fuerza-deformación sensores en profundidad

d) Curvas fuerza aplicada – tensión de adherencia – profundidad

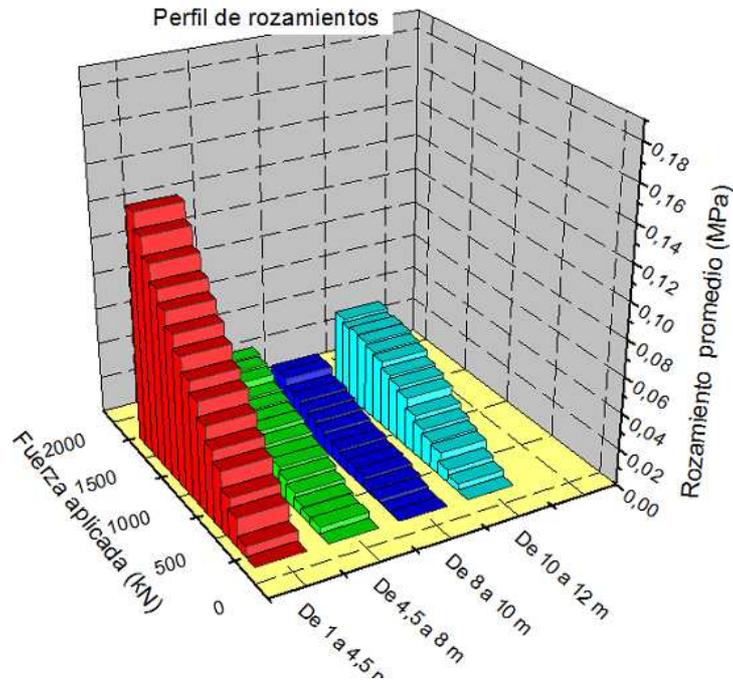


Figura 22: Gráfico mostrando la evolución de las tensiones de adherencia en función de la carga aplicada y la profundidad. Caso 1.

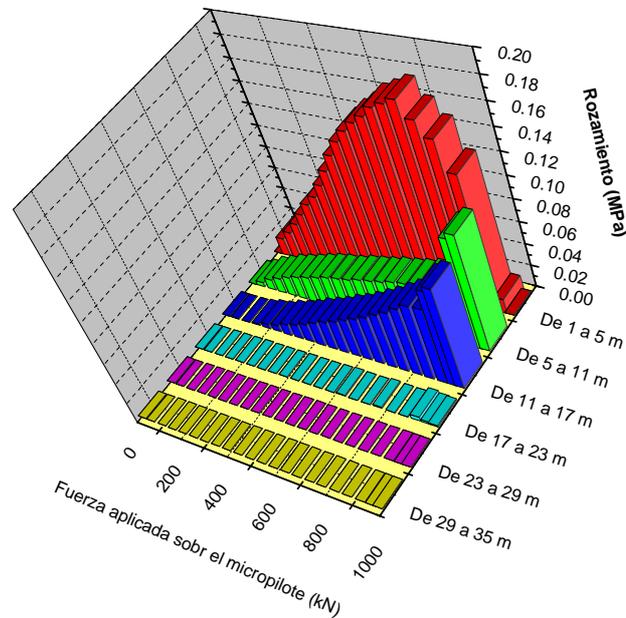


Figura 23: Gráfico mostrando la evolución de las tensiones de adherencia en función de la carga aplicada y la profundidad. Caso 2.

Existen otros resultados interesantes que también pueden obtenerse en las pruebas de carga:

- Longitud libre aparente (en el caso de anclajes al terreno)
- Fuerza de tesado y tiempo mínimo de espera manteniendo la carga de tesado (anclajes al terreno)
- Asientos iniciales y diferidos a las cargas de trabajo (pilotes y micropilotes)

## **8 – Conclusiones**

### **8.1 – Situación actual en España**

Creemos que la realización de pruebas de carga sobre elementos de cimentación profunda, a pesar de ser obligatoria en la mayoría de las normativas, es aún hoy en día una actuación relativamente rara en España. Solo suelen realizarse pruebas de carga en proyectos de cierta magnitud y responsabilidad.

Podemos decir, en función de la información que disponemos, que las pruebas de carga de pilotes de gran diámetro realizadas en España durante los últimos años pueden contarse con los dedos de una mano. Sin embargo el número de pilotes de ese tipo que se han instalado es considerablemente alto. Surge de inmediato la pregunta: ¿Tendrán la capacidad portante que se les supone?

Normalmente los pilotes se someten a pruebas de integridad, en general basadas en técnicas sísmicas, dichas pruebas permiten comprobar únicamente si el pilote está bien hormigonado y fabricado pero no aportan ningún dato respecto a su capacidad portante ni respecto a los asientos que pueden esperarse. En algunas ocasiones se realizan ensayos de carga dinámica que consisten, básicamente, en golpear el pilote de una manera normalizada y medir el pequeñísimo movimiento que se produce en su cabeza. A partir de ese movimiento, utilizando complejos y sofisticados métodos semi-empíricos de cálculo, se llega a determinar una capacidad máxima del pilote. En nuestra opinión los resultados obtenidos, si no son verificables, tienen un alto grado de incertidumbre. Estos métodos nos parecerían más fiables si se utilizaran con el complemento de algunas pruebas de carga real que permitieran verificar sus conclusiones y ajustar los parámetros teóricos considerados en el cálculo de los ensayos dinámicos.

Hay que resaltar, sin embargo, un notorio incremento en las pruebas realizadas sobre micropilotes y anclajes al terreno aunque aún siguen siendo muy pocas en comparación con lo exigido por la normativa vigente y, sobre todo, en comparación con las que se realizan en otros países europeos de nuestro entorno.

La posible optimización de los proyectos basada en resultados de pruebas de carga real es una opción prácticamente no utilizada por los proyectistas españoles.

## 8.2 – ¿Por qué realizar pruebas de carga?

La realización de pruebas de carga real proporciona mucha seguridad a un proyecto pues

- Permite a la Propiedad de la obra comprobar la corrección del proyecto y la capacidad del constructor para realizar la obra.
- Permite al Proyectista comprobar y certificar la adecuación de sus previsiones a la realidad de la obra.
- Permite al Contratista comprobar que el proyecto es ejecutable y que la empresa subcontratada para fabricar los elementos de cimentación es capaz de realizar dicha ejecución.
- Permite a Contratista establecer unos criterios para la aceptación de los elementos que posteriormente el subcontratista especializado fabricará en serie.
- Permite a la empresa subcontratista comprobar la corrección de su sistema de fabricación y solicitar su aprobación por la Dirección de Obra.

En resumen, una prueba de carga real proporciona seguridad y confianza a todos los participantes en la obra. Sin dicha prueba, en caso de problemas durante la construcción o después de la misma, resulta muy difícil determinar si el problema proviene del proyecto o de la ejecución del elemento y por lo tanto desconociendo el origen del problema resulta muy difícil solucionarlo.

## 8.3 - ¿Cuándo realizar las pruebas de carga?

Es importante remarcar que las pruebas de carga real tienen sentido únicamente si se realizan antes de construir una obra. Realizarlas tras construir la obra o tras haber construido muchos elementos de cimentación profunda es un sinsentido que por desgracia aún es muy frecuente en España.

## 8.4 – Propuesta para el futuro control de los elementos de cimentación en profundidad

Como conclusión del artículo, consideramos que la futura Normativa debería incluir la obligatoriedad de realizar cuatro tipos de ensayos o pruebas en todos los proyectos que contengan elementos de cimentación en profundidad:

- a) Ensayos para determinar los parámetros reales que afectan a la transferencia de cargas ( $\tau_k$  y  $q_k$ ) y que deberían incluirse en el estudio geotécnico exigido al proyecto.
- b) Pruebas de idoneidad, con carga real e instrumentadas en profundidad, sobre los elementos de cimentación profunda definidos en el proyecto, seguidas de pruebas de carga simplificadas. La comparación de resultados permitiría calibrar las pruebas de carga simplificadas.
- c) Pruebas de carga simplificadas sobre todos los elementos de cimentación profunda del proyecto.

Los ensayos para determinar directamente los parámetros que afectan a la transmisión de cargas ( $\tau_k$  y  $q_k$ ) serían de dos tipos:

- Para determinar lo más precisamente posible  $q_k$  se podría especificar la realización de ensayos presiométricos in situ.
- Para determinar lo más precisamente posible  $\tau_k$  se podrían realizar ensayos de rotura por tracción de microbulbos situados a distintas profundidades.

Para la realización de ambos tipos de ensayos se podrían utilizar las perforaciones que necesariamente se realizan para los sondeos en todos estudios geotécnicos.

Los proyectistas realizarían sus proyectos utilizando los datos de los parámetros de transferencia determinados de forma muy precisa en los estudios geotécnicos.

Las pruebas de idoneidad con carga real se realizarían en los primeros elementos construidos en la obra y permitirían verificar que los elementos diseñados se comportan de acuerdo a las previsiones. Tras estas pruebas de idoneidad, más caras y complicadas, se realizarían, en los mismos elementos otras pruebas más sencillas y simplificadas como pueden ser las pruebas dinámicas. La comparación de resultados permitiría la correcta calibración de las pruebas de carga simplificadas y el establecimiento de unos criterios generales de aceptación de los elementos de cimentación basados en el resultado de las pruebas simplificadas.

Todos los elementos de la obra se someterían a pruebas simplificadas de carga que permitirían su comprobación de forma sistemática y económica. Con la tecnología actual pensamos que las mejores pruebas simplificadas disponibles serían las basadas en métodos dinámicos pero restringiéndolas al puro registro de movimientos tras el golpeo y eliminando los procesos de cálculo asociados.

Probablemente deberían desarrollarse más tecnologías que permitiesen realizar pruebas de carga simplificadas.

## 9 – Agradecimientos

El desarrollo de las técnicas necesarias para la realización de ensayos especiales requiere siempre la colaboración y el patrocinio de algunas empresas y personas que decidan arriesgar un poco y proponen la utilización de esas nuevas técnicas en sus proyectos constructivos.

En nuestro caso, agradecemos especialmente la colaboración de empresas como **BSM** (Srs. Antón M<sup>a</sup> Montull, Xavier Pascual y Jordi Pujol), **FCC** (Srs. Javier Ainchil y Santiago Pedrera), **BIMSA** (Sr. Ángel López), **COLLOSA** (Sr. Álvaro García), **FERROVIAL** (Srs. Luis Matarán e Ignacio Sánchez), **PENTAEDRO** (Sr. José Rebollo) y **SENER** (Iván Trullás) que nos han dado la oportunidad de probar en varias de sus obras nuestros procedimientos de ensayo y que consecuentemente nos han posibilitado su desarrollo y perfeccionamiento.

**B:SM**  
Barcelona  
de Serveis  
Municipals



**ferrovial**  
**BIM/sa**



**Pentaedro**

## **10 - Bibliografía**

- (1) ACHE, “Recomendaciones para el Proyecto, Construcción y Control de Anclajes al Terreno”, 3ª Edición, 2005.
- (2) Ministerio de Fomento, Serie normativas, “Guía para el diseño y la ejecución de anclajes al terreno en obras de carretera”, 2004
- (3) CEN, EN1537:1997, “Execution of special geotechnical work – Ground anchors”, 1997
- (4) Ministerio de Fomento, Serie monografías, “Guía de cimentaciones en obras de carretera”, 2004
- (5) Ministerio de Fomento, Serie normativas, “Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera”, 2006