

## MICROPILOTES Y PILOTES INSTRUMENTADOS EN PROFUNDIDAD

### Javier RIPOLL GARCÍA-MANSILLA

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Ripoll Consulting de Ingeniería S.L.

Director

[javierripoll@ripollconsulting.com](mailto:javierripoll@ripollconsulting.com)

### Jordi Tuá Vilagrasa

Ingeniero Industrial

Ripoll Consulting de Ingeniería S.L.

Director de Producción

[jorditua@ripollconsulting.com](mailto:jorditua@ripollconsulting.com)

### RESUMEN

Los micropilotes y los pilotes son estructuras lineales de cimentación especialmente concebidas para transmitir cargas recibidas en la superficie de un terreno a zonas profundas del mismo.

El diseño de este tipo de estructuras se basa en una hipótesis de proyecto sobre la forma en que se verifica la transferencia de cargas desde la estructura al terreno.

La realización de pruebas de carga en estructuras instrumentadas en profundidad permite conocer la mecánica real de la transferencia de cargas al terreno y contrastar así las hipótesis consideradas en el proyecto.

**PALABRAS CLAVE:** Micropilotes, pilotes, transferencia de carga, tensión media de transferencia, prueba de carga, instrumentación en profundidad,...

### 1. Introducción

Los micropilotes y los pilotes son estructuras lineales de cimentación cuya principal misión es transmitir cargas desde la superficie del terreno a zonas profundas del mismo. El parámetro fundamental para el diseño de este tipo de estructuras suele ser la tensión de transferencia que se desarrolla en la superficie de contacto estructura-terreno. Sin embargo dicha tensión de transferencia, considerando los métodos de diseño y ensayo normalizados y vigentes, es un parámetro difícil de estimar y de verificar.

En otro artículo que hemos presentado en esta misma sección del Congreso y titulado “Anclajes al terreno instrumentados en profundidad” se describen detalladamente los métodos que suelen utilizar los proyectistas para estimar los valores de proyecto de las tensiones medias de transferencia y se concluye que, en general, se basan en la utilización de unas tablas genéricas que correlacionan las tensiones de transferencia con las distintas tipologías de terreno o con los resultados de ciertos ensayos geotécnicos normalizados. Todas dichas tablas se obtienen como resultado del tratamiento estadístico de un gran número de ensayos realizados en obras por todo el mundo, pero indudablemente, como todos los resultados de cariz estadístico y generalista, son de dudosa precisión cuando se utilizan en los terrenos concretos de una obra.

En la normativa vigente suele especificarse la realización de pruebas de carga real para comprobar el ajuste del diseño a la realidad, sin embargo la mayoría de las pruebas normalizadas sólo contemplan el registro de reacciones (movimientos y fuerzas) en las cabezas de las estructuras sobresalientes del terreno. Existen algunas normativas que presentan la opción de

instrumentar las zonas profundas de las cimentaciones pero, en general y sobre todo en España, no suelen ser consideradas ni contempladas en los proyectos.

Si sólo se obtienen datos de comportamiento real en la cabeza de las estructuras, entonces el comportamiento en profundidad solo puede determinarse de manera teórica siguiendo modelos de cálculo que, en cierto modo, podrían asimilarse al uso de las “tablas de correspondencia” previamente comentadas y, por lo tanto, se continuaría manteniendo un elevado grado de desconocimiento sobre como se produce realmente la transferencia de cargas.

Instrumentando en profundidad es posible determinar de forma bastante precisa como se produce la transferencia de cargas entre la estructura y el terreno.

## 2. Tipos de pruebas de carga de micropilotes y pilotes

La comprobación práctica del correcto dimensionamiento de los micropilotes o los pilotes de un proyecto se realiza ejecutando pruebas de carga real.

Las características de las pruebas de carga a realizar dependen, fundamentalmente, de los siguientes tres factores:

- A) Objetivo de la prueba
  - Estudio del comportamiento del terreno de la obra antes del inicio de la misma
    - Ensayo de investigación
  - Comprobación del comportamiento en obra del elemento diseñado para el proyecto
    - Ensayo de idoneidad
  - Comprobación individual de cada elemento ejecutado
    - Ensayo de aceptación
- B) Forma de trabajo del elemento a comprobar
  - Compresión
  - Tracción
  - Empuje lateral en cabeza
- C) Nivel de control que se desea obtener
  - Nivel reducido (Control limitado a la cabeza del elemento)
  - Nivel completo (Control en cabeza y a lo largo del fuste)

La realización de pruebas de carga de micropilotes o pilotes es costosa por lo que se tiende a minimizar el número de pruebas y adoptar criterios de aceptación por grupos de elementos fabricados basados en la comprobación de elementos representativos.

No suelen realizarse ensayos de investigación y suele ser económicamente inviable realizar ensayos de aceptación en todos los elementos construidos. En la práctica habitual, los proyectos suelen especificar la realización de algunos ensayos de idoneidad al comienzo de la obra para comprobar el dimensionamiento de proyecto. Si los resultados de dichos ensayos son satisfactorios se suele dar por bueno el dimensionamiento y se continúa la obra hasta finalizarla sin realizar ninguna otra prueba de carga salvo que se produzcan circunstancias imprevistas que recomienden nuevos ensayos.

La normativa habitual suele únicamente contemplar la realización de ensayos con un nivel de control de comportamiento reducido (limitados al control de fuerzas y movimientos inducidos en la cabeza del elemento ensayado). Este tipo de ensayos no aporta ninguna información sobre el proceso de transferencia de carga desde el elemento al terreno circundante. Cualquier conclusión sobre cómo se realiza dicha transferencia sólo podrá obtenerse de forma teórica e indirecta a partir de los registros realmente obtenidos.

En nuestra opinión, los resultados obtenidos mediante ensayos con un nivel de control reducido son excesivamente limitados y no permiten que el proyectista pueda comprobar adecuadamente el grado de ajuste entre sus estimaciones de proyecto y la realidad de la obra. El proyectista podrá únicamente conocer, según el elemento ensayado supere o no la prueba de carga, si éste ha sido infra o sobre dimensionado pero no podrá conocer el grado de infra o sobredimensionamiento.

Para minimizar la problemática anterior se han desarrollado los ensayos de micropilotes y pilotes con sus zonas de transferencia instrumentadas. La instrumentación permite conocer las deformaciones que se producen en ciertas secciones del elemento como respuesta a las cargas introducidas en sus cabezas. Conocidas dichas deformaciones pueden determinarse las fuerzas que las originan. La variación de fuerza entre cada dos secciones del elemento será la fuerza que se transfiere al terreno a lo largo de la longitud entre ambas secciones.

La tensión de transferencia media desarrollada entre dos secciones instrumentadas se obtendrá dividiendo la fuerza transferida por la superficie de transferencia.

Mediante la instrumentación de las zonas de transferencia, el proyectista podrá obtener, con bastante precisión y basada en registros directos y reales, la siguiente información que los ensayos normales no le permiten obtener:

- Longitud de la zona a lo largo de la cual se verifica la transferencia de carga.
- Evolución de las tensiones medias de transferencia en función de la carga aplicada.
- Determinación de las tensiones medias de transferencia límites y de sus valores remanentes en las capas de terreno donde se observe su agotamiento. En los demás casos podrá obtener valores mínimos verificados.
- Observación de la evolución de la transferencia de cargas durante la realización del ensayo y pudiéndose detener el ensayo en cualquier momento si se observase que la capacidad de transferencia del elemento se encuentra cercana a su límite admisible.
- Evolución de la estabilización del elemento basada en registros en profundidad.

Los procedimientos de introducción de cargas y de toma de registros en la cabeza de los anclajes están descritos de forma bastante clara en muchas normativas y recomendaciones. Cuando se instrumentan las zonas de transferencia la extrapolación de los procedimientos de ensayo es inmediata. Básicamente consiste en registrar datos en los sensores cada vez que se registran en cabeza. En general, la instrumentación de este tipo de ensayos es electrónica y todos los registros se toman de forma continua a lo largo del ensayo.

Las figuras 1 a 12 muestran distintos detalles sobre el montaje y tipología de los ensayos de micropilotes y pilotes instrumentados.





**Figura 1: Fijación de un sensor a la armadura del pilote**



**Figura 2: Colocación de los sensores de un pilote**



**Figura 3: Cables de los sensores sobresaliendo por la cabeza del micropilote**



**Figura 4: Ensayo a compresión micropilote instrumentado**



**Figura 5: Ensayo a tracción de un micropilote instrumentado**



**Figura 6: Ensayo a tracción de un micropilote inclinado e instrumentado (viga única)**





**Figura 7: Ensayo a tracción de un micropilote (placa de apoyo)**



**Figura 8: Ensayo de carga lateral de un micropilote**



**Figura 9: Ensayo de (carga lateral + momento) en un micropilote**



**Figura 10: Ensayo de (carga lateral + momento) en un duque de Alba con pilotes**



**Figura 11: Ensayo de compresión de un pilote (1500 T)**

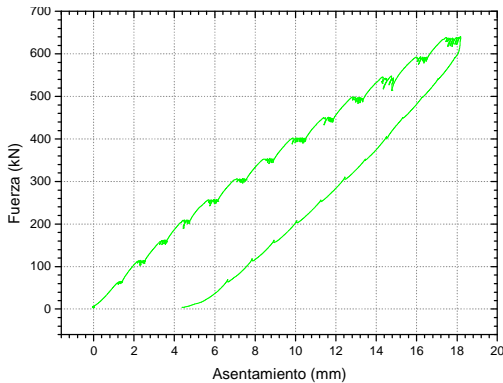


**Figura 12: Ensayo de compresión de un pilote (850 T)**

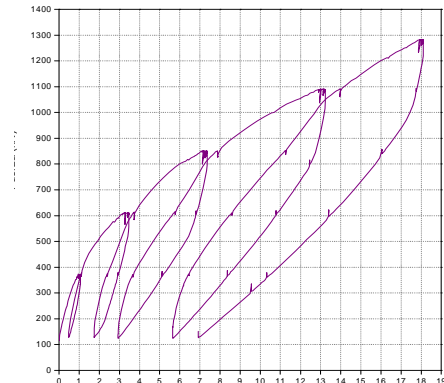
### 3. Resultados de las pruebas de carga

Cuando se realizan pruebas de carga con nivel de control reducido los principales resultados que pueden obtenerse son los siguientes:

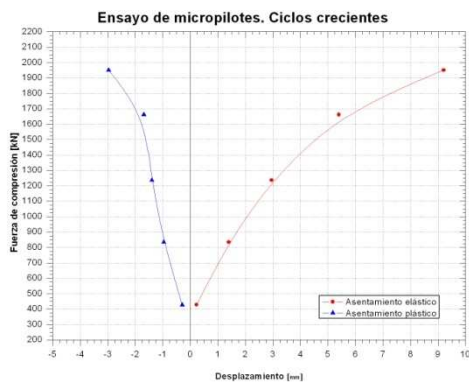
- Curva fuerza aplicada – movimiento en cabeza de elemento (Fig. 13 y 14)
- Curva fuerza aplicada – movimiento elástico – movimiento plástico (Fig.15)
- Mínima Capacidad de carga garantizada
- Asentamiento en cabeza a las cargas de proyecto y a la carga de ensayo



**Figura 13:**  
**Ensayo de carga escalonada incremental**  
**Curva carga- aplicada- movimiento en cabeza**



**Figura 14:**  
**Ensayo de ciclos incrementales de carga**  
**Curva carga- aplicada- movimiento en cabeza**



**Figura 15:** **Curvas fuerza aplicada- alargamiento**  
**elástico-alargamiento plástico**

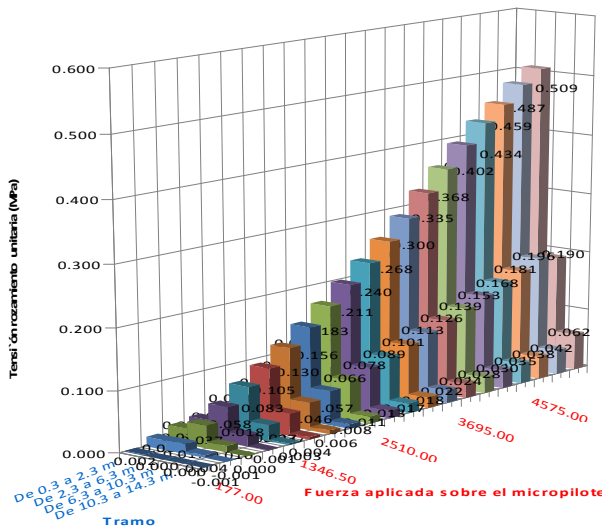


**Figura 16:** **Centro de control electrónico del ensayo**

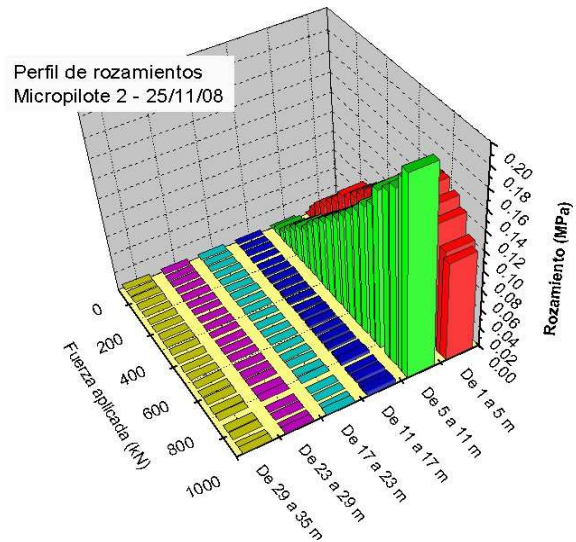
Cuando se realizan pruebas de carga con nivel de control completo, además de obtenerse los resultados anteriormente citados, pueden obtenerse los siguientes resultados:

- Curvas fuerza aplicada – fuerza transmitida a las distintas secciones instrumentadas
- Curvas fuerza aplicada – tensiones de transferencia desarrolladas
- Determinación de la capacidad última del elemento.





**Figura 17: Gráfico fuerza aplicada – profundidad – tensión de transferencia desarrollada**



**Figura 18: Gráfico fuerza aplicada – profundidad – tensión de transferencia desarrollada**

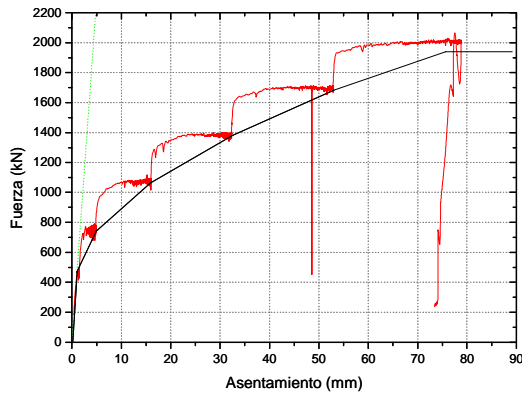
La figura 17 muestra la evolución de las tensiones de transferencia en función de la profundidad y de la carga aplicada. Se observa que las tensiones desarrolladas en los primeros metros son despreciables, que la tensión de transferencia en el segundo tramo (2,3 a 3,6m) crece de forma bastante lineal al ir aumentando la carga hasta llegar a ser 0,5MPa y que en los dos tramos inferiores la tensión va creciendo pero se mantiene en valores bajos. De este gráfico se deduce que el micropilote soporta sin problemas las fuerzas máximas del ensayo y que tiene una longitud correcta pues se activa totalmente para transferir cargas al terreno.

La figura 18 muestra el caso de un micropilote muy sobredimensionado. El diseño inicial tenía 35 m y suponía unas tensiones de transferencia admisibles muy reducidas. El ensayo de tres micropilotes permitió comprobar que los 11 primeros metros de micropilote bastaban para soportar con seguridad las cargas introducidas y que las tensiones de transferencia desarrolladas llegaban a ser de hasta 0,2 MPa sin dar todavía muestras de agotamiento. Los resultados de los ensayos permitieron optimizar el dimensionamiento de los micropilotes con los correspondientes ahorros económicos y de plazo de ejecución para la obra.

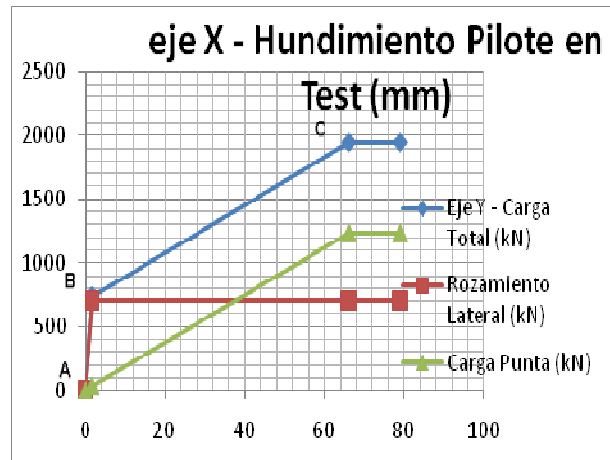
En el caso siguiente presentamos el ensayo de un pilote que no resistió la carga de prueba. El estudio de los registros obtenidos mediante la instrumentación en profundidad permitió comprobar la gran plasticidad del terreno y su baja resistencia a la compresión y su poca capacidad para soportar tensiones de transferencia. Como consecuencia del ensayo se decidió cambiar el sistema de cimentación inicialmente previsto.

El ensayo fue una prueba de carga escalonada incremental. El hundimiento se produjo a una carga inferior a la máxima prevista. Los hundimientos registrados durante los previos y consecutivos periodos de estabilización fueron muy grandes avisándonos con antelación del probable fallo. La figura 19 muestra la curva carga aplicada – hundimiento en cabeza del pilote. La figura 20 muestra uno de los resultados que se concluyeron: la carga introducida al pilote se transmitió al terreno por punta y por fuste casi desde el principio. La capacidad resistente a compresión en la punta del pilote se agotó rápidamente quizás ayudada por la existencia de detritus. La capacidad transmisora por fuste el pilote permitió resistir un poco mas de carga pero

finalmente se agotó. Tras producirse agotamiento de la capacidad del pilote, el hundimiento progresaba con la aplicación de cargas relativamente bajas. Manteniendo dichas bajas cargas hundimos el pilote una distancia de unos 100mm lo que constituye un hecho curioso considerando que el pilote tenía 750mm de diámetro.



**Figura 19:**  
Gráfico fuerza aplicada – hundimiento



**Figura 20:**  
Gráfico asentamiento – fuerza transmitida (total, por punta y por fuste)

#### 4. Una problemática frecuente en ensayos de micropilotes: la rotura de las uniones entre tubos

Comentaremos en este apartado un problema que hemos detectado con una cierta frecuencia en las pruebas de carga realizadas sobre micropilotes: la rotura de las conexiones entre los tubos de los micropilotes.

Las conexiones entre tubos consecutivos de micropilotes pueden realizarse de distintas formas. Algunas de las mas normales se muestran en la figura 21.



(1)



(2)



(3)



(4)

**Figura 21: Uniones de tubos de micropilotes**  
 (1) Unión machihembrada con manguito hembra-hembra  
 (2) Unión machihembrada  
 (3) Unión machihembrada con manguito macho-macho  
 (4) Unión con manguito exterior



En la normativa vigente se advierte sobre la existencia de distintos tipos de conexiones y se especifican condicionantes técnicos a considerar cuando se utilice cada uno de ellos. Como ejemplo representativo citaremos la “Guía para el proyecto y ejecución de micropilotes en obras de carretera” editada por la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento. En el apartado 3.6 de dicha guía, dedicado a la comprobación de la resistencia estructural de los micropilotes, se especifica que, salvo justificación expresa, el área de la armadura tubular deberá minorarse con un coeficiente dependiente del tipo de unión prevista. Las figuras 22 y 23 presentan las tablas correspondientes a los casos de micropilotes actuando a compresión y a tracción.

TIPO DE UNIÓN	$F_{u,c}$
Mediante manguitos exteriores doblemente roscados, sin disminución de sección	1,0
De rosca machihembrada con sección ensanchada	
De rosca machihembrada, sin sección ensanchada y con contacto a tope en ambos extremos	
Otras uniones diseñadas específicamente para no sufrir pérdidas de resistencia	0,5
Resto de casos	

**Figura 22: Coeficiente de minoración  $F_{u,c}$  para secciones de micropilotes a compresión**

TIPO DE UNIÓN	$F_{u,t}$
Mediante manguitos exteriores doblemente roscados, sin disminución de sección	1,0
De rosca machihembrada con sección ensanchada	
Otras uniones diseñadas específicamente para no sufrir pérdidas de resistencia	
Resto de casos	0,5

**Figura 23: Coeficiente de minoración  $F_{u,t}$  para secciones de micropilotes a tracción**

En varias ocasiones hemos detectado roturas de uniones durante la realización de pruebas de carga (en general a tracción). Las investigaciones sobre las causas de dichas roturas han provocado la realización de una serie de ensayos a tracción y a compresión sobre distintos modelos de uniones machihembradas representativos de los comercializados en España.

De las investigaciones y de los ensayos realizados puede concluirse que

- Se ha detectado una enorme variabilidad geométrica entre los modelos de uniones machihembradas comercializados en España que, lógicamente, debería originar una amplia variabilidad de comportamientos mecánicos.
- Las cargas de rotura a tracción de las uniones machihembradas ensayadas variaron entre el 35 y el 45% de la carga de rotura nominal del tubo que unían. (Se conocen resultados de 5 ensayos).
- En el único ensayo a compresión realizado la carga de rotura fue el 53% de la carga de rotura nominal del tubo.

Las anteriores conclusiones, a pesar de estar basadas en un número excesivamente reducido de ensayos, hacen que nos planteemos las siguientes cuestiones:

- ¿No debería considerar la normativa vigente un coeficiente reductor del orden de 0,4 para el caso de las uniones machihembradas trabajando a tracción y otro del orden de 0,5 para el caso

de las uniones machihembradas trabajando a tope en compresión? Hoy en día la normativa refleja unos coeficientes de 0,5 y 1,0 para los casos citados.

- Dada la variabilidad de uniones existentes ¿No deberían sustituirse los coeficientes de reducción generalistas indicados en la normativa vigente por unos coeficientes particularizados para cada tipo de unión determinados mediante ensayos?
- ¿Es lógico aceptar tipologías de unión que reducen drásticamente la capacidad mecánica del conjunto unido? En aplicaciones similares (empalmes de barras, tornillos, empalmes de postensado) lo normal es exigir que las uniones transmitan entre el 95 y el 100% de la capacidad mecánica de los elementos que unen. Hay uniones de tubos de micropilotes que tienen una eficiencia del 50% ¿Es lógico admitir ese tipo de uniones?

La utilización de uniones muy debilitadoras nos parece un anacronismo y hemos comprobado que es la causa de muchos problemas constructivos. Consideramos que dicho tipo de uniones debería evitarse.

Existen uniones normalizadas para tubos de micropilotes que proporcionan una aceptable continuidad de características mecánicas: los manguitos exteriores o las uniones machihembradas con sección ensanchada. Quizás debería especificarse la obligatoriedad de su uso.

Creemos que es necesario realizar muchos mas ensayos sobre este tema y, en función de los resultados que se obtengan, creemos que sería conveniente replantear la normativa vigente.

## 5. Conclusiones

La realización de pruebas de carga en pilotes o micropilotes instrumentados en profundidad constituye el mejor método existente para comprobar el mecanismo de transferencia de carga desde la estructura al terreno circundante.