

SOCIEDAD ESPAÑOLA DE  
MECÁNICA DEL SUELO  
E INGENIERÍA GEOTÉCNICA



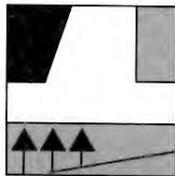
ASOCIACIÓN  
DE EMPRESAS DE LA  
TECNOLOGÍA DEL SUELO Y  
SUBSUELO

# JORNADAS TÉCNICAS SEMSIG-AETESS 1ª SESIÓN PILOTES PARA EDIFICACIÓN

Con la colaboración del

CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN  
DE OBRAS PÚBLICAS (CEDEX)

Madrid, 200



**SOCIEDAD ESPAÑOLA DE  
MECÁNICA DEL SUELO  
E INGENIERIA GEOTECNICA**



**ASOCIACIÓN  
DE EMPRESAS DE LA  
TECNOLOGÍA DEL SUELO Y  
SUBSUELO**

# **JORNADAS TÉCNICAS SEMSIG-AETESS 1ª SESIÓN PILOTES PARA EDIFICACIÓN**

**Con la colaboración del**

**CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN  
DE OBRAS PÚBLICAS (CEDEX)**

**Madrid, 2001**

# 1 PRESENTACIÓN

Con esta Jornada sobre Pilotes Para Edificación se inaugura la serie de sesiones técnicas, que, con la colaboración del CEDEX, organizan conjuntamente la Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica (SEMSIG) y la Asociación de empresas de la Tecnología del Suelo y del Subsuelo (AETESS).

El objetivo de dichas Jornadas, dedicadas a todos los profesionales relacionados con la ingeniería del terreno, es el de crear un foro de discusión donde se puedan debatir, a la luz de la normativa actual, los aspectos más importantes del diseño, ejecución y seguimiento de los distintos tipos de cimentaciones y estructuras de contención de tierras que se utilizan actualmente en obras civiles y de edificación.

Para cumplir este objetivo se ha previsto que el núcleo de cada sesión esté constituido por dos Mesas Redondas que, estando relacionada la primera de ellas con los aspectos de diseño y la segunda con la ejecución y control del tipo de obra seleccionada, sirvan para pulsar y recoger las opiniones de los asistentes en la Memoria de la Jornada que se publicará una vez celebrada ésta.

Cada Mesa Redonda ha sido precedida de un conjunto de presentaciones a cargo de expertos de reconocido prestigio en el campo de la Geotecnia, quienes han introducido, para su posterior debate, los distintos aspectos de las técnicas de obras consideradas y la normativa relacionada con ellas.

Madrid, 28 de febrero de 2001

Vicente Cuéllar Mirasol  
Presidente SEMSIG

Enrique Romero Ramos  
Presidente AETESS

## 2 INTRODUCCIÓN

Primero saludar y agradecer su presencia a todos los asistentes, con el deseo y la confianza de que estas horas serán interesantes para todos.

Hace ya algún tiempo que tuvieron lugar los primeros contactos entre la sociedad española de mecánica del suelo e ingeniería geotécnica y la asociación patronal de empresas y cimentaciones especiales, AETESS, con el propósito de colaborar en acciones que propiciarán la mejora de las aplicaciones en este sector. Fruto de estos contactos fue la creación del Comité Mixto SEMSIG - AETESS que ha venido trabajando en este sentido y que organiza estas Jornadas Técnicas que tengo el honor y la satisfacción de presentar.

Las en sí tiene una larga, brillante y suficientemente conocida trayectoria en todos los campos relacionados con la mecánica del suelo que hacen necesaria mayor presentación.

AETESS tiene, como una parte de su misión en defensa de los intereses de las empresas miembros, la promoción de la calidad en las cimentaciones especiales y la aplicación de las posibilidades que la tecnología nos ofrece en cada momento. Así en este mismo lugar se realizó la presentación del borrador de la Guía de Anclajes de la Dirección General de Carreteras, en cuya elaboración tuvo AETESS una importante participación.

Quiero continuación agradecer al cedes su valiosa colaboración no solo en cuanto al recinto en el que estamos sino también en todos los aspectos de logística y apoyo necesarios.

esta jornada, que con mucha ilusión comenzamos ahora coma será la primera de una serie de ellas, que Irán tratando los temas relevantes en la realización de cimentaciones especiales.

el Comité SEMSIG - AETESS eligió el tema *Pilotes para Edificación* teniendo en cuenta su oportunidad en estos momentos de gran desarrollo de la construcción para edificios de viviendas, apartamentos de vacaciones y edificios industriales.

entre la documentación que sea entregado, está una hoja de encuesta respecto a los temas posibles para las sesiones posteriores, la cual esperamos sea contestada por todos los asistentes.

La Jornada está dividida en dos partes: la primera sobre diseño, donde contamos con la participación de los profesores Carlos Oteo y Antonio Soriano, y la segunda sobre Ejecución y Control, donde intervendrán especialistas de las empresas. En cada una de las partes habrá una Mesa Redonda.

El programa está hecho para dar oportunidad a que las mesas redondas sean realmente vivas, para lo cual se ha reducido el tiempo de las intervenciones. La participación de los asistentes con su aportación de ideas es uno de los objetivos básicos de esta Jornada.

El coloquio de cada mesa redonda será grabado para su inclusión en el libro de la Jornada.

Este libro que contendrá las intervenciones de los profesores y especialistas que van a intervenir y los debates de las mesas redondas como será entregado a todos los asistentes.

Y sin más como palabra al profesor Antonio Soriano.

Enrique Romero Ramos  
Presidente de AETESS

## **3 CONTENIDO**

### ***3.1 Pilotes Hincados***

Antonio Soriano Peña. (UPM)

### ***3.2 Pilotes de Extracción***

Carlos Oteo Mazo (UPM)

### ***3.3 MESA REDONDA SOBRE DISEÑO***

### ***3.4 Hélice Continua con Registro de Parámetros***

Jacques Heilis (RODIO)

### ***3.5 Prefabricados***

Jorge Montemayor (TERRATEST)

### ***3.6 Entubados y Lodos***

Juan L. Ríos (PILOTES POSADA)

### ***3.7 Pruebas Dinámicas***

José Luis Arcos (RODIO KRONSA)

### ***3.8 Sistemas de Control***

Carlos Fernández Tadeo (CFT)

### ***3.9 MESA REDONDA SOBRE EJECUCIÓN Y CONTROL***

# ***Pilotes Hincados***

**Antonio Soriano Peña**  
**Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos**  
**Dpto. Ingeniería y Morfología del Terreno**  
**Universidad Politécnica de Madrid**

El proyecto de un pilotaje para establecer los cimientos de un edificio requiere seguir una serie de pasos que podrían ordenarse de la forma siguiente: reconocimiento del terreno (1), elección del tipo de pilote (2), dimensionamiento del pilotaje (3), instrucciones para la ejecución (4).

En estas notas se exponen, de manera breve, una serie de criterios que podrían guiar la labor del ingeniero en la ejecución de cada uno de los pasos mencionados. Se trata únicamente de una propuesta que puede servir como discusión y debate del tema en cuestión.

## **1. Reconocimiento del terreno. El informe geotécnico**

El solar debe reconocerse de manera que el terreno quede suficientemente bien conocido tanto en planta como en profundidad.

Las técnicas de reconocimiento que pueden usarse quedan bien descritas en muchos documentos que el ingeniero debe consultar. Concretamente se recomienda la lectura de dos recomendaciones o guías que se citan en las referencias (ROM 0.5-94 y Guía de cimentaciones de la D.G.C). Buena parte de los criterios expuestos aquí se han reproducido de estos textos redactados siendo ponente el autor de estas notas.

El aspecto que parece ser siempre más controvertido es el relativo a la intensidad de los reconocimientos. Cuántos sondeos deben hacerse y qué pruebas "in situ" y ensayos de laboratorio deben realizarse. Las ideas que deben guiar esta decisión son las siguientes:

- Para una situación normal, se deben realizar siempre al menos tres sondeos, cuya longitud sobrepase claramente las profundidades estimadas de las puntas de los posibles pilotajes.
- Para grandes áreas ocupadas y también en situaciones normales, conviene realizar sondeos mecánicos que no están separados entre sí más de 20 m aproximadamente y que cubran todo el área de la edificación.
- Conviene, además de los sondeos mecánicos, realizar ensayos de penetración continua. De tipo estático o de tipo dinámico, dispuestos en planta entre los sondeos. Un criterio razonable puede consistir en realizar un ensayo de este tipo cada 100 m<sup>2</sup> de ocupación en planta.

Para definir el número de ensayos de laboratorio es preciso clasificar, antes, los tipos de terreno existentes en el subsuelo. En términos generales, una formación particular (depósito de arenas, capa de arcilla, fondo rocoso, etc...) queda mínimamente definida en un determinado aspecto cuando, al

menos, se hacen dos determinaciones en laboratorio de la propiedad que controla el aspecto en cuestión.

En términos generales, se recomienda tomar al menos dos muestras en cada formación diferente de las que atravesase un determinado sondeo y no espaciar, dentro de un sondeo, la toma de muestras más allá de 5 m aunque la formación atravesada sea, aparentemente, muy homogénea.

Cuando se atraviesen formaciones arenosas y no se puedan tomar muestras inalteradas, es conveniente realizar ensayos SPT en los sondeos. Es recomendable hacer un registro continuo o casi continuo de este ensayo, de manera que se obtenga un valor del índice N cada metro de avance. Cuando el suelo es cohesivo, el ensayo SPT puede realizarse también aunque con espaciamientos mayores, del orden de 2 a 3 m, de esa manera se podrán tomar, además, las muestras inalteradas necesarias para caracterizar el terreno.

Todas las muestras tomadas en los reconocimientos deben ser sometidas a los ensayos de identificación más sencillos (granulometrías y plasticidad, si es el caso), sólo algunas (una de cada cinco y dos como mínimo de cada formación) deben ser sometidas a ensayos de identificación más completos (peso específico de partículas, análisis químicos y densidades extremas de arenas).

Todas las muestras inalteradas deben ser ensayadas para conocer su densidad seca y humedad natural.

Los ensayos de resistencia y deformabilidad deben realizarse únicamente con muestras poco alteradas o inalteradas. Cada formación de suelos o rocas debe ser ensayada, al menos, con dos ensayos de este tipo.

Para poder proyectar un pilotaje hincado conviene realizar ensayos de resistencia en laboratorio (triaxial preferentemente) con los suelos atravesados y en particular con los más próximos a las puntas de los pilotes. En el caso de rocas, cuando han de soportar pilotajes por punta conviene conocer su naturaleza, su grado de alteración, la intensidad de su diaclasado (RQD) y la resistencia a compresión simple de los fragmentos más sanos. Con estos datos se podrá estimar el posible avance de la hincada para empotrarse en la roca.

Es recomendable que en uno de los sondeos se realice la toma de muestras con mayor intensidad y que se ensayen los terrenos con más profusión, de manera que, al menos en una vertical, el terreno quede definido con mayor detalle.

En cualquier caso, se recomienda que la definición precisa de los ensayos de laboratorio a realizar se haga después de conocer el resultado de los primeros sondeos y que tal definición se concluya una vez estén disponibles los resultados de todos los trabajos de campo. Además, la definición específica de los ensayos más complicados (resistencia y deformabilidad) debe realizarse una vez identificados claramente (incluso con los resultados de los ensayos de identificación de laboratorio) los horizontes, estratos o niveles que se pretende caracterizar con la ejecución de tales ensayos.

El Informe Geotécnico contendrá toda la información geotécnica disponible, ordenándola en una Memoria principal y una serie de Anejos que faciliten su utilización posterior.

La información de detalle que debe figurar en Anejos dependerá de la amplitud de datos existentes. En las situaciones más usuales es recomendable ordenar la información de detalle en, al menos, dos Anejos.

### **a) Anejo de trabajos de campo**

Este Anejo contendrá la información relativa a:

- Situación detallada de los reconocimientos.

- Columnas litológicas y fotografías de testigos de sondeos.
- Definición de la localización de las muestras tomadas y observaciones sobre el procedimiento utilizado para tomarlas, transportarlas y almacenarlas.
- Resultados detallados de cada uno de los ensayos “in situ”.
- Datos de observación del nivel freático.
- Observaciones detalladas del técnico responsable de los trabajos de campo.

## **b) Anejo de ensayos de laboratorio**

Este Anejo contendrá la información de detalle correspondiente a:

- Relación de muestras con indicación de su procedencia y su naturaleza (alterada, inalterada tubosportatestigos, testigos parafinados, etc...).
- Informe sobre la apertura de muestras y descripción de su estado. Es recomendable incluir fotografías realizadas en el momento de la apertura.
- Relación detallada de ensayos realizados.
- Resultados de los ensayos debidamente ordenados.

La Memoria del Informe Geotécnico tratará al menos los aspectos siguientes:

- Propósito del informe geotécnico.
- Descripción de la obra, las tipologías estructurales previstas y una estimación de las cargas principales.
- Trabajos de campo, con referencias cronológicas de los distintos trabajos realizadas y descripción de los equipos empleados y personal que lo ha realizado.
- Trabajos de laboratorio, describiendo los procedimientos de ensayo empleados, los tipos de muestras analizadas y la cantidad de ensayos de cada tipo.
- Descripción de las condiciones geológico-geotécnicas del solar. Esta descripción debe ser realizada con ayuda de mapas, planos, perfiles geotécnicos, fotografías y esquemas o dibujos suficientes para la clara exposición de todos los detalles de interés.
- Características geotécnicas del terreno. Hecha la clasificación de los distintos materiales reconocidos se describirán, para cada uno de ellos, las características geotécnicas que se deducen de los ensayos de laboratorio y de los ensayos “in situ”. En términos generales, se tratará de establecer las causas de variación de los distintos parámetros mediante gráficos, figuras y correlaciones. Son de particular interés los diagramas de variación de los distintos parámetros en profundidad.

Si tras la consideración de toda la información disponible resultasen aspectos dudosos inadmisibles se deberá ampliar los reconocimientos y revisar el Informe Geotécnico o editar el complemento necesario.

## **2. Elección del tipo de pilote**

En ocasiones, la cimentación directa (zapatas superficiales o losas) no es conveniente. La presencia de espesores grandes de suelos blandos próximos a la superficie es una de las razones principales para proyectar una cimentación profunda, pero, además, existen otros motivos que pueden hacerla más recomendable.

Una vez decidida, si procede, una cimentación profunda conviene elegir el tipo de pilote más conveniente. Deben contemplarse las dos soluciones posibles: pilotes hincados o perforados.

Conviene decir que los pilotes perforados se pueden ejecutar casi siempre y que los pilotes hincados pueden ser difíciles de ejecutar cuando se han de atravesar zonas duras o con bolos o gravas gruesas ocasionales. Normalmente son las razones de precio y plazo las que ayudan a decidir el tipo de pilotaje

Los pilotes hincados en edificación suelen ser de hormigón armado, aunque también pueden ser de madera, de acero o mixtos (acero y hormigón). En ocasiones, cuando las condiciones de ejecución son difíciles, se puede recurrir a cimentar sobre micropilotes.

### 3. Dimensionamiento del pilotaje

Para dimensionar el pilotaje ha de partirse de las acciones que han de soportar los cimientos, después conviene calcular las cargas que ha de soportar cada pilote y finalmente se debe comprobar que dicha carga no sobrepasa ninguno de los tres valores siguientes: la carga de hundimiento convenientemente reducida con un coeficiente de seguridad, el tope estructural y la capacidad mecánica del pilote.

#### 3.1 Acciones sobre la cimentación

A efectos del cálculo de la estructura del edificio se suelen establecer una serie de hipótesis de carga. Para calcular los cimientos se deben establecer las hipótesis de carga siguientes:

1. Combinación cuasipermanente.- Es aquella en la que concurren las acciones permanentes, cuasipermanentes y algunas acciones variables, no accidentales.
2. Combinaciones transitorias.- Son aquellas en las que concurren las cargas permanentes y cuasipermanentes y una acción variable fundamental junto con otras acciones variables concomitantes. Existe una combinación transitoria por cada acción variable fundamental que se elija.
3. Combinaciones accidentales.- Son aquellas en las que figura alguna acción accidental o extraordinaria (no sísmica) junto con las acciones permanentes o casi permanentes y las posibles acciones variables compatibles con la situación accidental en cuestión.
4. Combinación sísmica.- Es aquella en la que concurre la acción sísmica con las acciones permanentes o casi permanentes y algunas acciones variables.

Para calcular el efecto conjunto de las acciones en una determinada combinación, los valores de cálculo de las acciones variables se multiplicarán por unos factores de combinación  $\Psi$  que, en general, serán los siguientes:

1. Combinación cuasipermanente.
 

Acciones permanentes y casi permanentes	sin reducción (1)
Acciones variables compatibles	$\Psi_2$
2. Combinaciones transitorias (una por cada acción variable fundamental)
 

Acciones permanentes y casi permanentes	sin reducción (1)
Acción variable fundamental	sin reducción (1)
Otras acciones variables compatibles	$\Psi_0$
3. Combinación accidental (una por cada acción accidental fundamental)
 

Acciones permanentes y casi permanentes	sin reducción (1)
Acción accidental	sin reducción (1)
Acción variable fundamental	$\Psi_1$
Otras acciones variables compatibles	$\Psi_2$

#### 4. Combinación sísmica

Acciones permanentes y casi permanentes	sin reducción (1)
Acción sísmica	sin reducción (1)
Acciones variables compatibles	$\Psi_2$

Los valores de los coeficientes  $\gamma$  deben tomarse de la normativa de acciones correspondiente. Los valores de las acciones no serán afectados por ningún coeficiente de mayoración, únicamente serán modificados por los coeficientes de combinación mencionados.

Para cada combinación de acciones ha de realizarse un reparto de cargas entre los pilotes del grupo. En general, este reparto requerirá un proceso iterativo. Los coeficientes de reparto entre pilotes dependen de la naturaleza del terreno y de la rigidez de los pilotes y del encepado. En general, para los primeros tanteos de proyecto y para ciertas situaciones sencillas que no necesitan ser resueltas con precisión, basta con la distribución de cargas que se obtiene al suponer que los pilotes están articulados en cabeza y que el encepado es infinitamente rígido.

Una vez consideradas todas las posibles acciones, directas o indirectas, realizadas las combinaciones de carga oportunas y repartidas las cargas entre los pilotes individuales, conviene determinar un valor representativo de la carga vertical que actúa sobre un pilote. Si hubiere pilotes de distinto calibre dentro de una misma obra, la carga representativa se determinará para cada uno de los tamaños que se usen.

Se entiende como carga vertical representativa, la mayor de las tres siguientes:

- La carga máxima sobre el pilote individual en la combinación de carga permanente o casi permanente. En esta combinación se incluirá el posible efecto del rozamiento negativo, si lo hubiera.
- La carga vertical sobre el pilote más solicitado en cualquier combinación de cargas transitoria dividida por 1.10.
- La carga vertical sobre el pilote más solicitado en cualquier sollicitación accidental o sísmica, dividida por 1.25.

La carga vertical así determinada se denominará “carga vertical representativa” o abreviadamente “carga de servicio”.

### 3.2 Carga de hundimiento

La resistencia al hundimiento de un pilote aislado se considerará, por simplificar el tratamiento, dividida en dos partes: la contribución de la punta y la contribución del fuste (Fig. 1). De esa manera se podrá escribir:

$$Q_h + W = Q_p + Q_f$$

$Q_h$  = Carga vertical que, aplicada en la cabeza del pilote, produce su hundimiento.

$W$  = Peso del pilote.

$Q_p$  = Parte de la carga que se supone soportada por la punta.

$Q_f$  = Parte de la carga que se supone soportada por el contacto pilote-terreno en el fuste.

A su vez, se suele suponer que ambas componentes de la resistencia son proporcionales a las áreas de contacto respectivas. Esto es:

$$Q_p = q_p \cdot A_p$$

$$Q_f = \int_0^L \tau_f \cdot C \cdot dz$$

donde:

- $q_p$  = Resistencia unitaria por la punta
- $A_p$  = Área de la punta
- $\tau_f$  = Resistencia unitaria por el fuste
- $L$  = Longitud del pilote dentro del terreno
- $C$  = Perímetro de la sección transversal del pilote
- $z$  = Profundidad contada desde la superficie del terreno

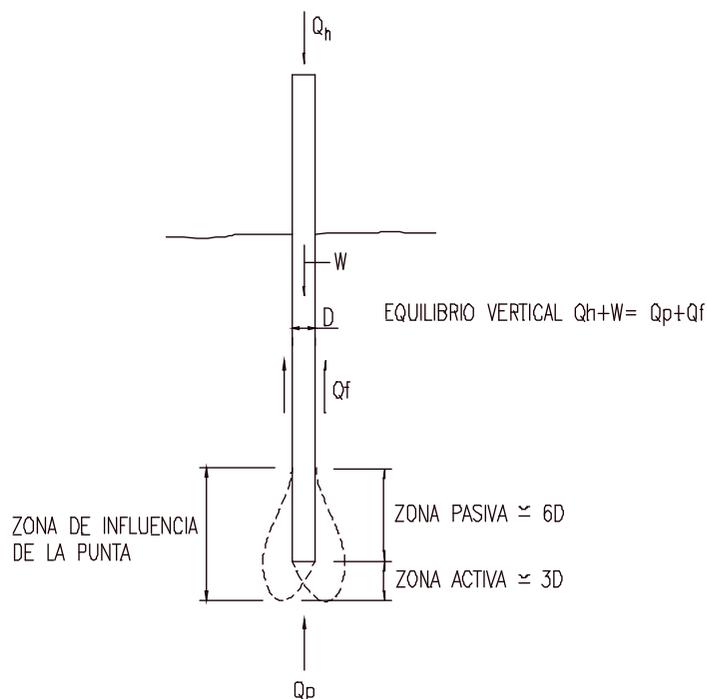


Fig. 1 – Esquema del hundimiento de un pilote aislado

La carga de hundimiento de un pilote vertical depende, pues, de un parámetro fundamental “ $q_p$ ” que define la resistencia unitaria por punta y por una ley de variación con la profundidad de otro parámetro clave, “ $\tau_f$ ” que cuantifica la resistencia por fuste. La evaluación de estos parámetros puede hacerse por métodos muy diversos, dependiendo del tipo de terreno y del tipo de pilote. Los de uso más frecuente y cuya aplicación se recomienda serán comentados a continuación.

### 3.2.1. Métodos basados en el SPT

El método de evaluación de la seguridad frente al hundimiento de pilotes basado en el SPT es adecuado para suelos granulares que no tengan gran proporción de gravas gruesas que puedan desvirtuar el resultado del ensayo<sup>1</sup> y se puede aplicar tanto a pilotes hincados como a perforados.

Según la experiencia actual, la resistencia por punta se puede evaluar, para pilotes hincados, con la expresión:

$$q_p = 0.4 N \quad (\text{MPa})$$

donde:

N = Valor medio del índice N del SPT. A estos efectos se obtendrá la media en la zona activa inferior y la media en la zona pasiva superior. El valor de N a utilizar será la media de las dos anteriores.

Del mismo modo, la resistencia por fuste en un determinado nivel dentro del terreno, para un pilote hincado, puede considerarse igual a:

$$\tau_f = 2,5 N \quad (\text{kPa})$$

En este caso, N es el valor del índice SPT al nivel considerado.

Se advierte que, en cualquier caso, los índices N del SPT deben obtenerse en condiciones similares a las del futuro servicio de la cimentación. Excavaciones o rellenos posteriores a la ejecución de los ensayos SPT pueden inducir cambios en el índice correspondiente, ya que el resultado del ensayo depende, entre otros factores, de la presión vertical efectiva al nivel del ensayo. Una forma de estimar el efecto en el valor de N de la posible diferencia de presiones causada por una excavación o un relleno puede hacerse suponiendo que N varía con la raíz cuadrada de la presión vertical efectiva. En cualquier caso no se utilizarán, a efectos de estos cálculos, índices N superiores a 50.

Para el caso de pilotes metálicos la resistencia por fuste será reducida al 60% del valor correspondiente a los pilotes de hormigón.

Excepción de este procedimiento basado en el SPT lo constituyen las arenas calizas orgánicas (conchíferas o coralinas) que puedan dar índices SPT altos y cargas de hundimiento de pilotes bajas, debido a la rotura de la cementación que se produce con las altas compresiones que pueden inducir los pilotes, particularmente con los pilotes tubulares metálicos hincados. En esas situaciones los ensayos de carga son la única vía posible para estimar con alguna confianza la carga de hundimiento. El control dinámico de la hinca también puede orientar en esa estimación.

La utilización del método del SPT en suelos cohesivos sólo puede hacerse con fines orientativos; la utilización de otro método alternativo es altamente recomendable.

En rocas o en gravas la ejecución del SPT debe conducir a rechazos sistemáticos y, por lo tanto, a una carga de hundimiento no evaluable por este procedimiento. En estos casos ha de utilizarse un método alternativo.

### **3.2.2. Método basado en los ensayos de penetración dinámica continuos**

Si en un suelo granular se dispone de resultados de ensayos penetrométricos dinámicos continuos, se pueden traducir los resultados correspondientes a índices SPT y utilizar después el método basado en el SPT.

Dada la posible variabilidad de la correlación existente entre unos y otros ensayos de penetración, conviene consultar la experiencia local o disponer, en cada obra concreta, de ensayos de contraste que refuercen esta correlación. En cualquier caso, el ingeniero tendrá una prudencia razonable al traducir los ensayos penetrométricos dinámicos a índices N del SPT correspondiente para calcular la

### 3.2.3 Método basado en ensayos penetrométricos estáticos

Con los penetrómetros estáticos se puede medir, de manera continua, la resistencia unitaria en la punta del cono “ $q_c$ ” y también en su fuste “ $t$ ” en cualquier tipo de suelo, dependiendo de la potencia del equipo de ensayo.

El valor de “ $q_c$ ” a utilizar será la media del valor medio de  $q_c$  correspondiente a la zona activa inferior y del valor medio de  $q_c$  correspondiente a la zona pasiva superior. Ver Fig. 1.

Los diagramas de resistencia que se obtienen con este ensayo pueden ser bastantes erráticos y por eso es necesario estimar un valor medio que represente el valor de  $q_c$  en la zona del entorno de la punta del pilote. El ingeniero debe ser prudente en la selección de este valor. Para ello se variará la zona donde se hace el promedio de resistencias. Por la parte superior se supondrá una amplitud comprendida entre 2 y 6 diámetros y por la inferior, entre 1 y 3 diámetros, eligiendo en esos intervalos aquél que conduzca al valor medio menor. Es aconsejable, además, eliminar aquellos datos que superen en más de un 30% el valor medio. A este valor medio, prudentemente estimado, se le denominará  $\dot{q}_c$ .

La carga unitaria de hundimiento por punta del pilote, en ese terreno, se puede suponer igual al 80% del valor así determinado. Esto es:

$$q_p = 0.8 \dot{q}_c$$

Si en el ensayo penetrométrico no se ha medido la resistencia unitaria por fuste, se podrá suponer que tal valor es igual a 1/200 de la resistencia por punta a ese mismo nivel, si el suelo es granular, e igual a 1/100, si el suelo es cohesivo. En cualquier caso, la resistencia por fuste obtenida de esta manera indirecta no será superior a 0,08 MPa (suelos cohesivos) o a 0,12 MPa (suelos granulares).

### 3.2.4. Métodos basados en otros ensayos de campo

Es posible realizar otros ensayos de campo distintos del SPT o los penetrómetros estáticos o dinámicos que simulen el efecto del hundimiento del pilote. Las experiencias recientes o de carácter local, en ese sentido, pueden ser de gran interés en algunas aplicaciones particulares.

En concreto, es posible utilizar presiómetros o dilatómetros que miden la presión horizontal necesaria en la pared de un sondeo para plastificar el terreno. Esa presión límite “ $p_l$ ” se ha relacionado, en cualquier tipo de terreno, con la carga unitaria de hundimiento por punta de un pilote “ $q_p$ ”. De manera aproximada, se puede suponer:

$$q_p = K (p_l - K_o p_o)$$

donde:

$p_o$  = presión efectiva vertical al nivel de cimentación en el entorno del apoyo (antes de cargar).

$K_o$  = coeficiente de empuje al reposo. Valor usual  $K_o = 0.5$ .

$K$  = Coeficiente de proporcionalidad que depende de la geometría del cimiento y del tipo de terreno.

El valor de  $K$  puede tomarse igual a 3,2 en suelos granulares e igual a 1,5 en suelos cohesivos. En cualquier caso, el valor de “ $p$ ” a utilizar en esa expresión debe ser la medida de los valores medios correspondientes a las zonas activa y pasiva en el entorno de la punta.

Como resistencia unitaria por fuste se puede tomar el siguiente valor:

$$\tau_r = \frac{1}{10} \cdot (p_l - K_o p_o)$$

donde  $p_l$ ,  $K_o$  y  $p_o$  tienen los significados del párrafo precedente.

En cualquier caso, el valor de  $\tau_r$  debe limitarse en función del tipo de terreno a los siguientes valores:

Suelos granulares	$\tau_r$ (máximo)	= 120 kPa
Suelos cohesivos	$\tau_r$ (máximo)	= 80 kPa

### 3.2.5 Cimentaciones con pilotes sobre roca

Es frecuente, en terrenos rocosos recubiertos por suelos, alcanzar la roca con la punta del pilote hasta empotrarse en ella. En caso de pilotes hincados no es viable, de forma práctica, conocer el grado de empotramiento y, por lo tanto, es preciso utilizar un procedimiento alternativo basado en la ecuación de la onda para estimar la carga de hundimiento.

### 3.2.6 Métodos basados en soluciones analíticas

Este procedimiento, de aplicación general, tiene un fundamento parcial en la teoría de la plasticidad y permite la obtención aproximada de la resistencia por punta y por fuste.

#### a) Suelos granulares

Por analogía con las fórmulas que se deducen de la teoría de la plasticidad al estudiar problemas de hundimiento, se supondrá que la carga de hundimiento por punta de pilotes en suelos granulares es:

$$q_p = 3 \sigma'_{vp} N_q \geq 20 \text{ MPa}$$

donde:

$\sigma'_{vp}$  = Presión vertical efectiva al nivel de la punta antes de instalar el pilote

$N_q$  = Factor de capacidad de carga definido por la expresión

$$\frac{1 + \text{sen}\phi}{1 - \text{sen}\phi} \cdot e^{\pi \text{tg}\phi} \text{ donde } \phi \text{ es el ángulo de rozamiento interno del suelo.}$$

El ángulo de rozamiento  $\phi$  debe obtenerse mediante ensayos de laboratorio realizados con muestras inalteradas o poco alteradas sometidas a las altas presiones que suelen existir en la zona de la punta de los pilotes.

En caso de que la longitud " $L_a$ " del pilote dentro de las arenas supere el valor:

$$L_a = 3 \cdot D \cdot e^{\pi \text{tg}\phi}$$

donde:

$D$  = Diámetro del pilote.

$\phi$  = Ángulo de rozamiento medio en la zona de la punta.

(hecho que puede ocurrir en pilotes largos), entonces se utilizará el valor de  $\sigma'_{vp}$  al nivel de profundidad  $L_a$  bajo la superficie de las arenas, teniendo así una consideración parcial del efecto de la profundidad crítica a partir de la cual deja de crecer la carga de hundimiento por punta.

La resistencia por fuste en suelos granulares se estimará con la expresión siguiente:

$$\tau_f = \sigma'_v \cdot f \cdot \operatorname{tg} \phi \leq 120 \text{ kPa}$$

donde:

- $\sigma'_v$  = Presión vertical efectiva al nivel considerado
- $f$  = Factor de reducción del rozamiento del fuste
- $\phi$  = Ángulo de rozamiento interno del suelo granular

Para pilotes prefabricados de hormigón se tomará  $f = 0.9$  y para pilotes de acero en el fuste se tomará  $f = 0.6$ .

#### b) Suelos cohesivos

La carga de hundimiento de pilotes verticales en suelos cohesivos, evaluada mediante fórmulas estáticas, ha de calcularse en dos situaciones que corresponden al hundimiento sin drenaje o a corto plazo y el hundimiento con drenaje o a largo plazo.

##### b.1) Carga de hundimiento a corto plazo

Si la carga que puede hundir el pilote se aplica rápidamente respecto a la capacidad drenante del terreno, la carga unitaria de hundimiento por punta “ $q_p$ ” será:

$$q_p = [9 - 6(D - 0.5)] s_u \leq 6 s_u \quad (\text{D en metros})$$

donde:

- $D$  = Diámetro real o virtual (igual área de punta) del pilote; si  $D < 0.5$  m, se tomará  $D = 0.5$  m al efecto de aplicar esta expresión.
- $s_u$  = Resistencia al corte sin drenaje del suelo cohesivo al nivel de la punta (entorno comprendido entre dos diámetros por encima y dos diámetros por debajo de ella).

En esas mismas condiciones la carga unitaria de rotura por fuste será:

$$\tau_f = \frac{100 s_u}{100 + s_u} \quad (\tau_f \text{ y } s_u \text{ en kPa})$$

La resistencia al corte sin drenaje del suelo, “ $s_u$ ”, se puede deducir mediante los ensayos de campo y laboratorio.

En pilotes con fuste de acero en contacto con el suelo cohesivo, el valor de  $\tau_f$  se afectará por un coeficiente reductor de 0.6.

##### b.2) Carga de hundimiento a largo plazo

En los suelos cohesivos se estimará la carga de hundimiento a largo plazo utilizando el ángulo de rozamiento efectivo deducido de los ensayos de laboratorio y despreciando la cohesión para evaluar la resistencia por punta. Para ello se utilizarán las expresiones correspondientes a los suelos granulares.

Para evaluar la resistencia por fuste se añadirá, a la componente friccional, la cohesión efectiva que se haya determinado en laboratorio. En este caso la resistencia por fuste no superará, salvo justifi-

### 3.2.7. Pruebas de carga

Este procedimiento es el que conduce a las estimaciones más precisas de la carga de hundimiento.

En general, las pruebas de carga son costosas, ya que exigen la aplicación de grandes fuerzas verticales que requieren elementos de reacción importantes (anclajes, pilotes a tracción, pesos muertos, etc.) o técnicas especiales (células de carga). Su ejecución, sin embargo, puede ser de interés en obras de cierta importancia y, en todo caso, su realización debe considerarse.

Cuando se realicen pruebas de carga para ayudar en la evaluación de las cargas de hundimiento, se podrán reducir los coeficientes de seguridad. Esa reducción será tanto más importante cuanto más extensas sean las pruebas de carga y más similares sean las condiciones de los pilotes ensayados a las reales. Con pruebas de carga adecuadas se podría llegar a utilizar los coeficientes de seguridad que se indican más adelante.

### 3.3 Comprobación de la seguridad

El proyecto del pilotaje debe cumplir varios requisitos de seguridad. Entre ellos los siguientes:

- a) Seguridad frente a hundimiento. La relación entre la carga de hundimiento calculada según se indica entre la carga representativa definida en 3.1 debe ser superior a los valores que se indican en la tabla siguiente:

**Tabla 1.- Coeficientes de seguridad mínimos recomendados**

<b>Procedimiento de análisis utilizado en la estimación de la carga de hundimiento</b>	<b>Coeficiente de seguridad frente al hundimiento</b>
Método del SPT en suelos granulares Método basado en el penetrómetro estático.	3 2.5
Métodos basados en datos de penetrómetros dinámicos continuos y uso de correlaciones.	3.5
Método basado en fórmulas analíticas y en sayos de laboratorio para medir el ángulo de rozamiento (o de laboratorio ó campo para medir la resistencia al corte sin drenaje de arcillas)	3
Basado en ensayos de carga	2

- b) La carga representativa definida en 3.1 no debe sobrepasar el “tope estructural” que se haya establecido en función de la experiencia en el uso de cada tipo determinado de pilote.

Los valores del tope estructural que se recomiendan para pilotes hincados son los siguientes:

**Tabla 2.- Valores recomendados para el tope estructural de los pilotes hincados**

$$Q_{\text{tope}} = \sigma \cdot A \quad , \quad A = \text{área de la sección transversal}$$

Tipo de pilote	Valores de $\sigma$
Hormigón pretensado o postensado	0.30 ( $f_{ck} - 0.9 f_p$ )
Hormigón armado	0.30 $f_{ck}$
Metálicos	0.33 $f_{yk}$
Madera	5 MPa

c) Como elemento estructural, el pilote soportará los esfuerzos calculados, como cualquier otra parte de la estructura.

## 4. Instrucciones para la ejecución

Una vez decidido el tipo de pilote, su profundidad de hincada y después de haber comprobado que la seguridad es suficiente, conviene analizar el proceso de hincada y definir en el proyecto, las instrucciones que han de regir durante la ejecución del pilotaje.

### 4.1 Las curvas de hincada

Se define como “curva de hincada” a la expresión gráfica de la relación que existe entre la resistencia a la hincada y el “rechazo”. Como “rechazo” se debe entender el avance de la hincada o penetración del pilote debido a un golpe de maza. En obras de edificación es frecuente controlar el número de golpes de maza necesario para avanzar 20 cm ( $N_{20}$ ). Es evidente que el rechazo (s) es:

$$s \text{ (cm)} = \frac{20}{N_{20}}$$

Las curvas de hincada pueden prepararse en la fase de proyecto mediante el uso de alguno de los siguientes procedimientos:

- Fórmula de Hiley
- Ecuación de la onda

### 4.2 Procedimientos de control

El proyecto del pilotaje debe especificar el procedimiento de control de ejecución correspondiente. En lo referente al control del avance de la hincada, aparte de las prescripciones de buena práctica de las que se habla en otras ponencias de esta jornada, conviene observar el rechazo, al menos en la parte final de la hincada.

En obras de importancia puede ser interesante, además, realizar un control electrónico de la hincada donde se miden fuerzas de impacto y velocidades del movimiento que permiten estimar la resistencia al avance del pilote, la eficacia del sistema de hincada y la integridad del pilote.

En algunas ocasiones puede ser interesante realizar pruebas de carga sobre pilotes ya construidos para precisar la capacidad de carga realmente conseguida.

### 4.3. Requisitos de seguridad

El proyecto debe definir los equipos de hinca, las curvas de hinca correspondientes, el procedimiento de control de la hinca y finalmente los criterios de aceptación

Se propone que, como criterio de aceptación, se establezca que el coeficiente de seguridad, definido como relación entre la carga de hundimiento que se obtiene de la curva de hinca y la carga representativa del pilote sea el que se indica en la Tabla 3 adjunta.

**Tabla 3.- Coeficientes de seguridad a comprobar durante la construcción**

Procedimiento de análisis utilizado en la estimación de la carga de hundimiento	Coeficiente de seguridad frente al hundimiento
a) Con control del avance y aplicación de la fórmula de Hiley.	$(6 - s) \odot 3$
b) Con control de avance y aplicación de la ecuación de la onda.	$(5 - s) \odot 2.5$
c) Con control electrónico de la hinca.	2
d) Con control electrónico de la hinca y contraste con pruebas de carga.	1.7

s = avance por golpe al final de la hinca, expresado en milímetros.

# ***Pilotes de Extracción***

**Carlos S. Oteo Mazo**  
**Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos**  
**Dpto. Ingeniería y Morfología del Terreno**  
**Universidad Politécnica de Madrid**

## **1.- Introducción.**

La utilización de cimentaciones profundas en la edificación española se ha desarrollado, en las dos últimas décadas, de forma clara e incesante. Por un lado, la construcción en zonas consideradas anteriormente como suburbanas, al ampliarse las ciudades y ocupar zonas de antiguos vertederos (tierras y basura) incontrolados y, por otro, al aumentar las luces y alturas en los diseños, lo que lleva a cargas mayores.

Además, la presencia de espesores de relleno importantes (pero no despreciables: del orden de 3 m (y el abaratamiento de algunos tipos de pilotajes (como los barrenados), hace que la solución más económica (y en cualquier caso, de menor riesgo) sea la utilización de pilotes de pequeño diámetro, en vez del pozo clásico, que puede conllevar a mucha excavación y mucho consumo de hormigón.

En la Figura 1 puede verse la típica solución de pozo y en la Figura 2 la alternativa de uso de pilotes de pequeño diámetro en vez de pozos, en condiciones de mayor seguridad y menor costo, como hemos podido personalmente comprobar en más de un caso concreto, en edificios de viviendas, en Madrid o recientemente, en unas cocheras para Metrosur en la zona de Cuatro Vientos (Madrid).

Eso nos lleva a que el diseño no es sólo un problema de cálculo –diámetro y longitud– sino de elección del sistema constructivo adecuado. Esta idea la hemos defendido desde hace muchos años: Primero debemos pensar en el tipo de pilotaje que puede emplearse en una determinada obra y, después, el definir completamente sus dimensiones (por supuesto, no antes de que esté claro el proceso constructivo y sus efectos sobre el terreno).

## **2.- Condicionantes**

Es decir, en un planteamiento clásico, deberíamos definir –para cargas verticales de compresión– la resistencia por el fuste,  $f_s$ , y por la punta,  $q_p$ . Sin embargo, el diseñador debe preguntarse qué efectos introduce la instalación del pilote en ambas.

Por ejemplo, en la resistencia por el fuste puede influir:

- El sistema de sostenimiento de la excavación en los pilotes “in situ”. Si se emplea una hélice no continua, el terreno puede que se mantenga sólo, pero habrá una decompresión que será mayor en el caso de haber utilizado una entibación metálica tubular y, además, introducir una tubería perdida, reti-

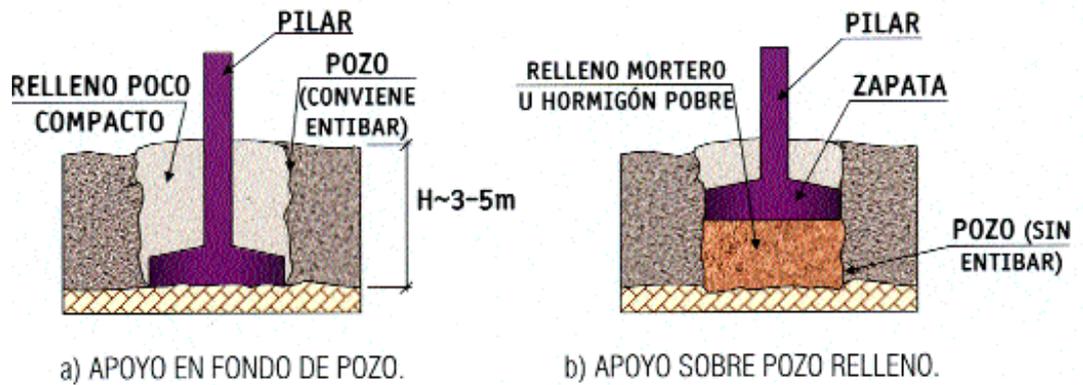


Fig. 1.- Cimentaciones clásicas en pozo

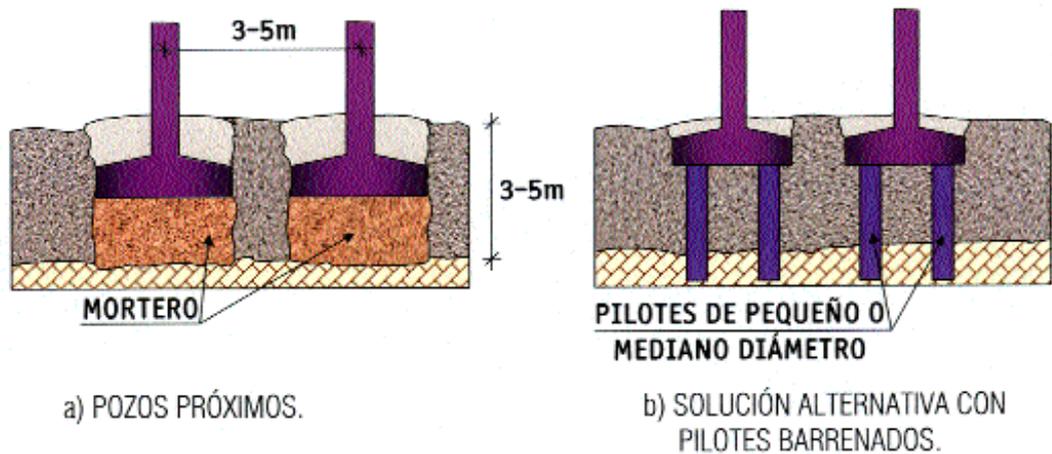


Fig. 2.- El Pilote de pequeño diámetro como solución alternativa a la de pozos

rando la de entibación. Por el contrario, si el pilote se excava con lodos bentoníticos (cuyo nivel se mantiene en superficie), el empuje de éstos impide la decompresión, con lo que el terreno está en mejor estado que en los casos anteriores. También puede haber decompresión si, aunque se emplee una tubería de sostenimiento, se excava por delante de ella o se introduce después de excavar. Esto nos llevaría –aunque no sea habitual– a hablar de un coeficiente de relajación de fuste,  $\theta$ , que debería tener diferentes valores, según el proceso constructivo utilizado. A veces esto no se tiene en

cuenta porque se castiga a la fuerza a la resistencia de fuste, aunque sea siempre la primera que se moviliza, lo que hace que a la punta llegue una parte pequeña de la carga en cabeza (Fig. 3)

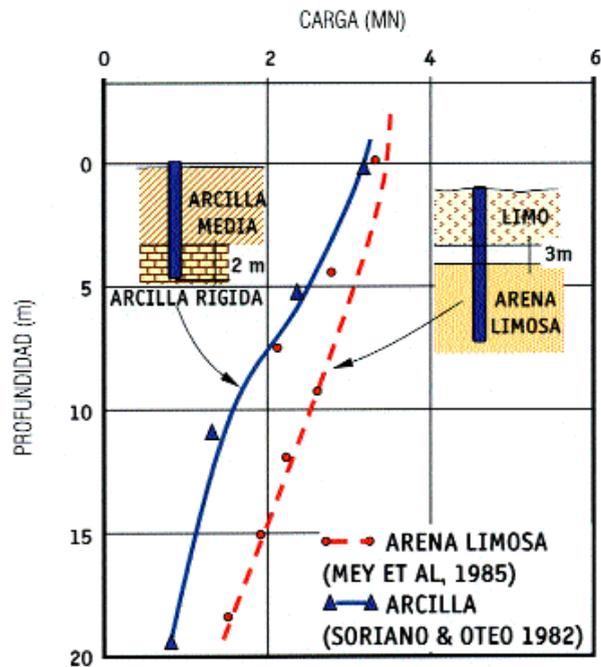


Fig. 3.- Distribución de la carga a lo largo del fuste del pilote en dos casos representativos.

- En el caso de pilotes hincados. o de desplazamiento, pueden haber efectos contradictorios: a) En arenas flojas se puede producir compactaciones excesivas que aumentan la resistencia de fuste. Recordamos un caso –hace unos 25 años– en un edificio de Murcia en que se usaron pilotes de desplazamiento (con sistema similar al clásico tipo Franki), hincándose un pilote si y otro no, hasta una capa dura, pasando arenas flojas. A continuación se hincaron los tubos de los pilotes intermedios y todos quedaron, sistemáticamente, 1 ó 2 m más altos que los primeros, sin alcanzar la teórica capa dura. b) En arenas limosas y limos, la hincada de pilotes prefabricados puede originar –durante ese proceso– tensiones que den lugar a licuaciones o licuefacciones temporales, haciendo desaparecer –frente a las cargas dinámicas de hincada– gran parte de la resistencia por fuste. Sin embargo, poco tiempo después, la aplicación de cargas estáticas permite considerar la presencia nuevamente de resistencia por fuste. Esta recuperación, en el Muelle de Carbones de la Térmica de Algeciras, fue de unas 240 t de resistencia adicional en el fuste, como pudimos comprobar hace unos 18 años mediante medidas con el Analizador de Hincada Dinámica (P.D.A.) del Profesor Goble y ensayos de carga estática en pilotes Raymond ( $\phi$  91,5 cm), debidamente instrumentados.
- La alternancia de cargas –de compresión a tracción y viceversa– produce una cierta fatiga en la resistencia por fuste que obliga a reducir ésta del orden del 60 – 70%, efecto que también pudimos comprobar en los ensayos anteriores, realizados en la Bahía de Algeciras.

En cuanto a la resistencia por punta puede influir:

- La presencia de capas más blandas, próximas a la zona de la punta. Incluso en los pilotes hincados puede temerse este efecto, cuando existen varios pilotes, ya que el efecto de grupo agranda el “bulbo de presiones” o zona de influencia práctica de los pilotes, con lo que el asiento del pilote en grupo puede asentar mucho más de lo previsto (incluso considerando ese efecto de grupo en terreno homogéneo).

- La limpieza de fondo, ya que el pilote puede apoyarse en detritus de excavación que se han depositado en el fondo de excavación durante las operaciones de introducción de armadura (Figura 4). En el caso de la cimentación del puente de ferrocarril de Amposta (pilotes  $\phi$  2.000 mm, de unos 40 m de longitud, entubados y excavados a través de arena y gravas), exigimos un desarenado del fluido del interior de la entubación (agua y bentonita) de hasta el 2% (exigencia muy fuerte). Ello no impedía que se depositara la arena en suspensión en el fondo del taladro, con un espesor de 70 – 90 cm (volumen de arena equivalente al 1,5 – 2% del volumen excavado, o sea, la arena en suspensión). Para evitar este problema, ya se había previsto en el diseño el no intentar una limpieza total (lo que habría sido imposible de conseguir), sino que se dejaban tubos con la armadura para hacer prospecciones sísmicas o de comprobación de la calidad de hormigonado y realizar inyecciones de la zona de junta con “jet-grouting”, lo que permitía no sólo evitar la influencia del detritus depositado, sino mejorar las gravas de apoyo y cargar algo más los pilotes (Figura 5).
- Que no se dimensione un auténtico empotramiento que permita contar con toda la resistencia de punta posible. Por ejemplo, en arenas  $q_p$  aumenta linealmente –aproximadamente– con la profundidad,  $Z$ , hasta una valor de  $Z = Z_0$  a partir del permanece prácticamente constante (Efecto Kerisel). Según Vesik el valor  $Z_0$  es del orden de 10 diámetros de pilote en arenas densas y de unos 20 diámetros en arenas flojas. Sin embargo, es muy habitual considerar un empotramiento de tres diámetros, lo cual es una práctica que puede considerarse como válida en materiales arcillosos duros y margas, aunque la resistencia máxima se alcanza con un valor del orden de 5 – 6 diámetros. Ahora bien, en materiales rocosos no es imprescindible introducirse tres diámetros (lo cual puede ser muy penoso y costoso) para contar con una resistencia adecuada; hasta atravesar la zona alterada e introducirse ligeramente en el material rocoso, de forma que se perturbe lo menos posible la roca. En el caso de pilotes “in situ”, el uso excesivo de trépanos conduce –como en el caso de pilotes hincados con poderosos azuches– a dañar la roca, fragmentarla, abrir diaclasas, etc. y conseguir un apoyo sobre un material discontinuo más parecido a una grava gruesa que a una roca, más o menos continua, etc.

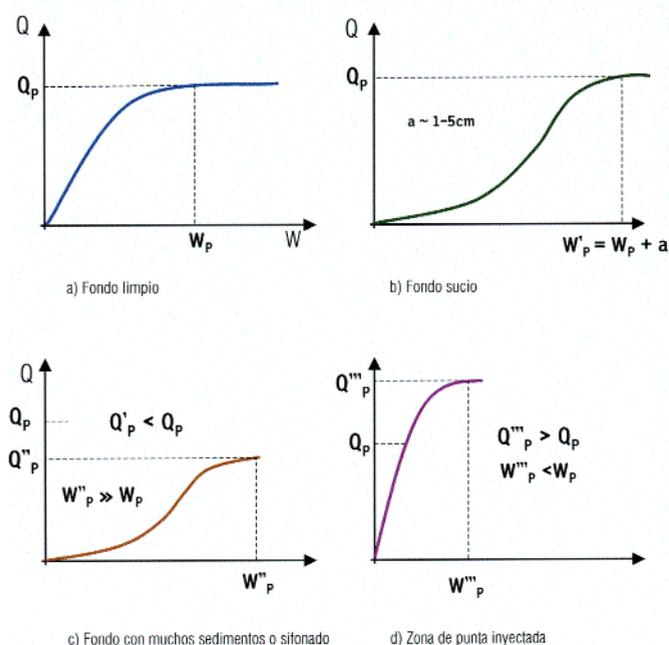


Fig. 4.- Posible influencia en la resistencia de punta de los efectos constructivos.

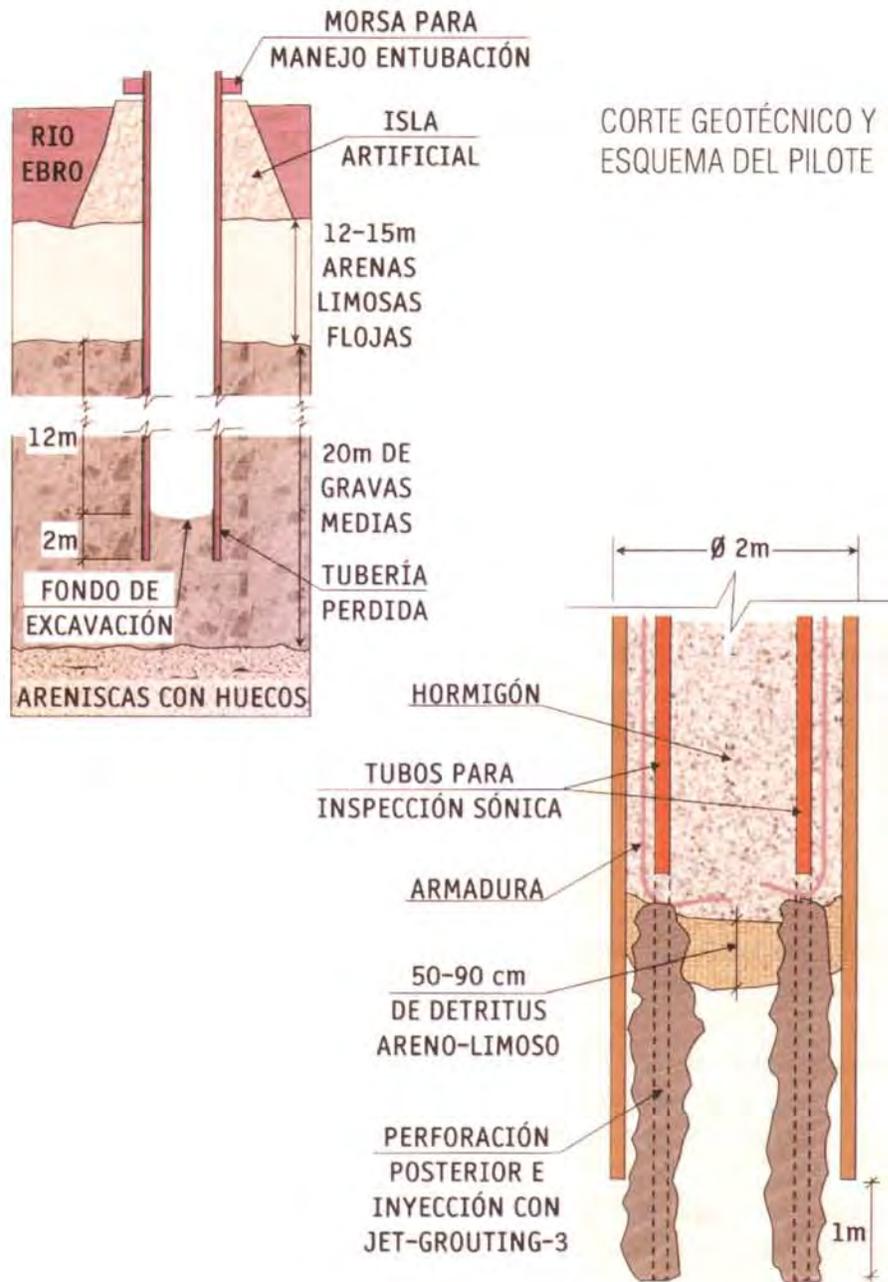


Fig. 5.- Pilotajes "in situ" utilizados en la cimentación de las pilas principales del Viaducto de Amposta para el Euromed.

- En edificación, en que, actualmente, se utiliza mucho el pilote barrenado de pequeño diámetro, debe de distinguirse entre el de hélice continua (que sostiene las paredes y hormigón por el hueco central) y el de hélice discontinua que, generalmente, deja peor la punta por falta de limpieza adecuada, por riesgo de que deje caer detritus de las paredes, etc.

### 3.- Diseño para cargas verticales a compresión

La formulación habitualmente usada es:

$$Q_H = Q_p + Q_F = q_p \cdot A_p + \sum_i^n f_{si} \cdot A_{li}$$

Siendo:

$A_b$  = Área de la base

$A_l$  = Área lateral del pilote que atraviesa la capa de espesor  
 $L_i$  ( $= \pi D \cdot L_i$ ), considerando la existencia de  $n$  capas

$Q_p$  = Resistencia total por punta

$Q_f$  = Resistencia total por fuste

La carga admisible o de trabajo, de forma clásica, se puede tomar, desde el punto de vista geotécnico, como:

$$Q_{adm} = \frac{Q_p \cdot A_p}{F_p} + \frac{\theta}{F_f} \sum_{i=1}^n f_{s,i} \cdot \pi \cdot D \cdot L_i$$

Los coeficientes  $F_p$  (seguridad frente a hundimiento por punta) y  $F_f$  (seguridad frente al agotamiento de la resistencia por fuste) son distintos, porque las resistencias por fuste y punta se movilizan con asientos  $-W_p$  y  $W_f$ , respectivamente— diferentes. Suelen tomarse:

a) Pilotes hincados:  $F_p = 3$                        $F_f = 2$

b) Pilotes "in situ":  $F_p = 3-4$                        $F_f = 2,0 - 1,5$

En pilotes de extracción con poca limpieza de punto debe usarse el  $F_p = 4 \cdot 1$  que puede bajar a 3 en pilotes con mayor garantía de esa limpieza.

El coeficiente  $\theta$  depende, como ya se ha dicho, del proceso constructivo. Valdría del orden de 1 si la construcción no supone relajación lateral (uso de bentonita, tubería de entibación perdida) y podría bajar a 0,7 – 0,8 en el caso de excavación con relajación.

Los valores de  $W_p$  están en el orden de 6 – 12% del diámetro del pilote,  $D$ , mientras que  $W_f$  es del orden de 0,5 – 1,0% de  $D$ . Con estos valores puede considerarse que la curva carga-desplazamiento del pilote es la representada en la Figura 6.

En el caso de arcillas puede tomarse:

$$q_p = N_p \cdot C_u$$

$$f_s = \alpha \cdot C_u$$

Siendo:  $C_u$  la resistencia al corte sin drenaje del terreno;  $N_p$  igual a 9 en diámetros de hasta 1,25 – 1,5 m y del orden de 8 para diámetros del orden de 2,0 m;  $\alpha$  puede tomarse a partir de la Figura 7<sup>a</sup>. En la resistencia por fuste de arcillas también se produce un cierto efecto Kerisel (fig.7b), aunque no es tan importante como en las arenas (influye sobre todo en la deformabilidad de fuste).

En el caso de arenas se puede tomar (en base a diversas recomendaciones, entre ellas el Código A.P.I., redactado a partir de los resultados teórico-experimentales de A. Vesik):

$$q_p = N_q \cdot \sigma'_v$$

$$f_s = \beta \cdot \sigma'_v$$

Siendo:  $\sigma'_v$  = la presión efectiva sobre planos horizontales a la profundidad de la punta del pilote (con un empotramiento límite, a efectos de cálculo, de 10 D en arenas densas y 20 D en arenas flojas);  $\beta$  y  $N_q$  coeficientes que pueden tomarse en función del rozamiento,  $\varphi$ , de la arena:

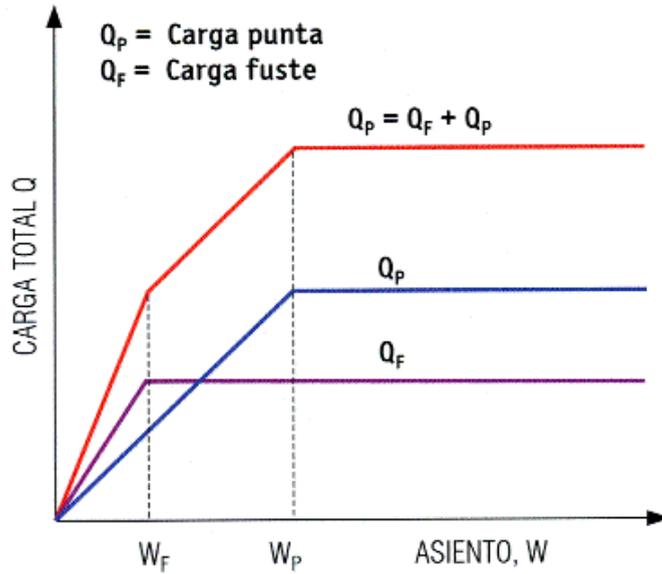


Fig. 6.- Distribución simplificada de la carga a lo largo del pilote.

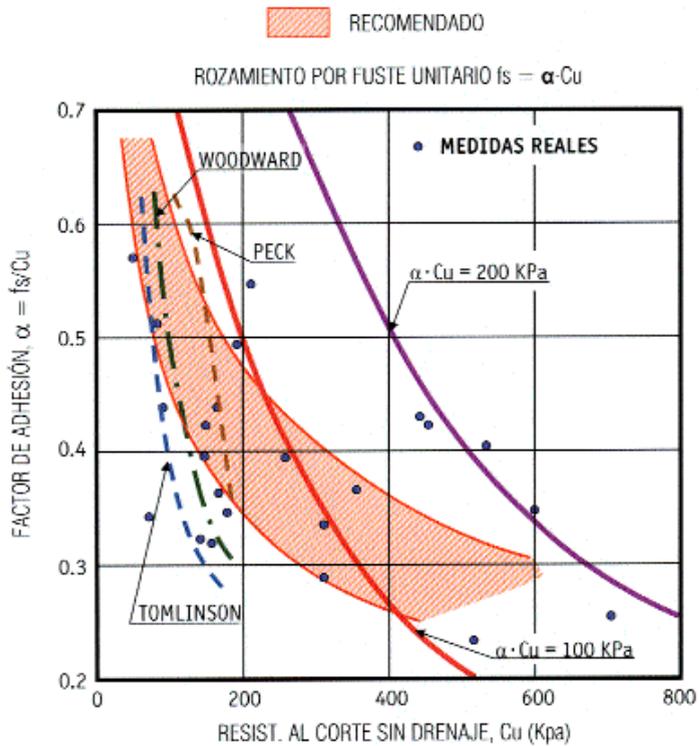


Fig. 7.a.- Resistencia por fuste en arcillas

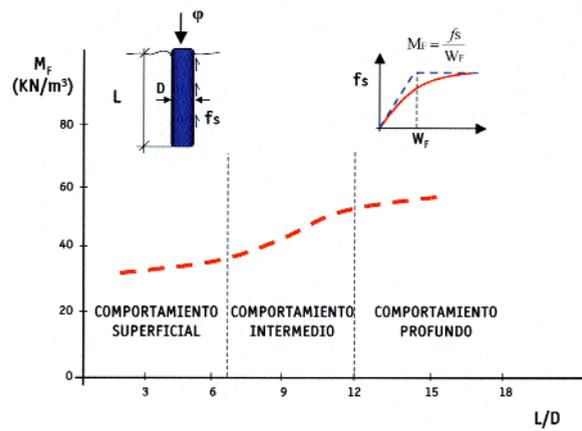


Fig. 7.b.- Efecto Kerisel en el fuste de arcillas rígidas (Rogel, 1987), en función de su esbeltez.

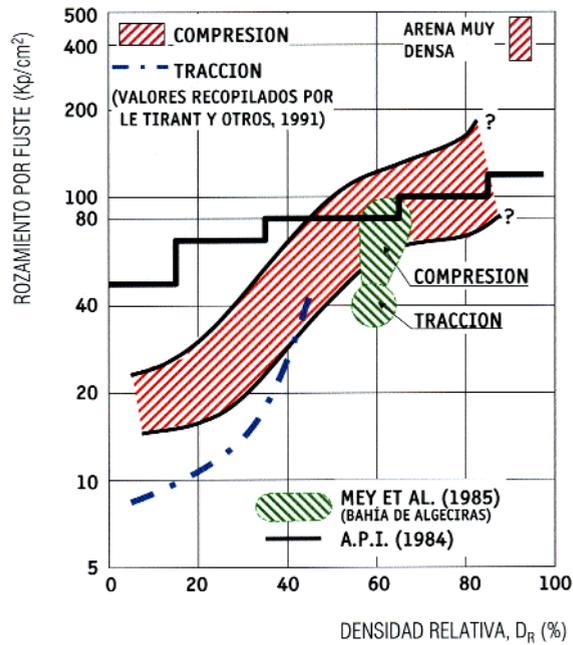


Fig. 8.- Rozamiento unitario en pilotes en arena (Oteo 1991)

$\varphi$ (°)	$N_q$	$\beta$
25	18	0,25
30	30	0,30
35	50	0,40
40	80	0,50

El rozamiento lateral,  $f_s$ , en arenas puede también deducirse a partir de los datos experimentales incluidos en la Figura 8, en la que se incluyen también datos españoles. Como se ve en esa figura, los valores recomendados por el Código A.P.I. son algo superiores a los reales para densidades relativas bajas ( $D_r < 50\%$ ), pero ello es poco significativo dado que estas densidades son anormalmente bajas.

La carga admisible,  $Q_{adm}$ , deducida desde criterios geotécnicos, no debe superar el llamado “tope estructural”,  $\sigma_{ie}$ , o presión media máxima a la que se permite trabajar el hormigón. En la Norma Tecnológica de Pilotajes (del antiguo Ministerio de la Vivienda, hoy integrado en el de Fomento, elaborada hacia 1973, pero aún vigente para obras oficiales de edificación), la máxima presión media de trabajo es del orden de 375 t/m<sup>2</sup> ó 3.750 KN/m<sup>2</sup>, valor que, hoy día, se considera muy conservador: La normativa francesa para obras de edificación no permite –sin justificación– pasar de los 5.000 KN/m<sup>2</sup> (incluyendo el peso propio del pilote, medida que no suele ser tomada en cuenta en España). En diversas obras civiles reales (viaductos de ferrocarril y carretera, pilas pilote de estaciones de Metro de Madrid), hemos superado estos topes claramente, con presiones medias de trabajo de 5.500 a 6.500 KN/m<sup>2</sup>, con controles de la calidad y continuidad del hormigonado y del estado de la punta (mediante sondeos). Podría adoptarse un criterio en función del diámetro (cuyo mayor tamaño permite una mayor limpieza de fondo), de acuerdo con la fig. 9. En resumen podría adoptarse:

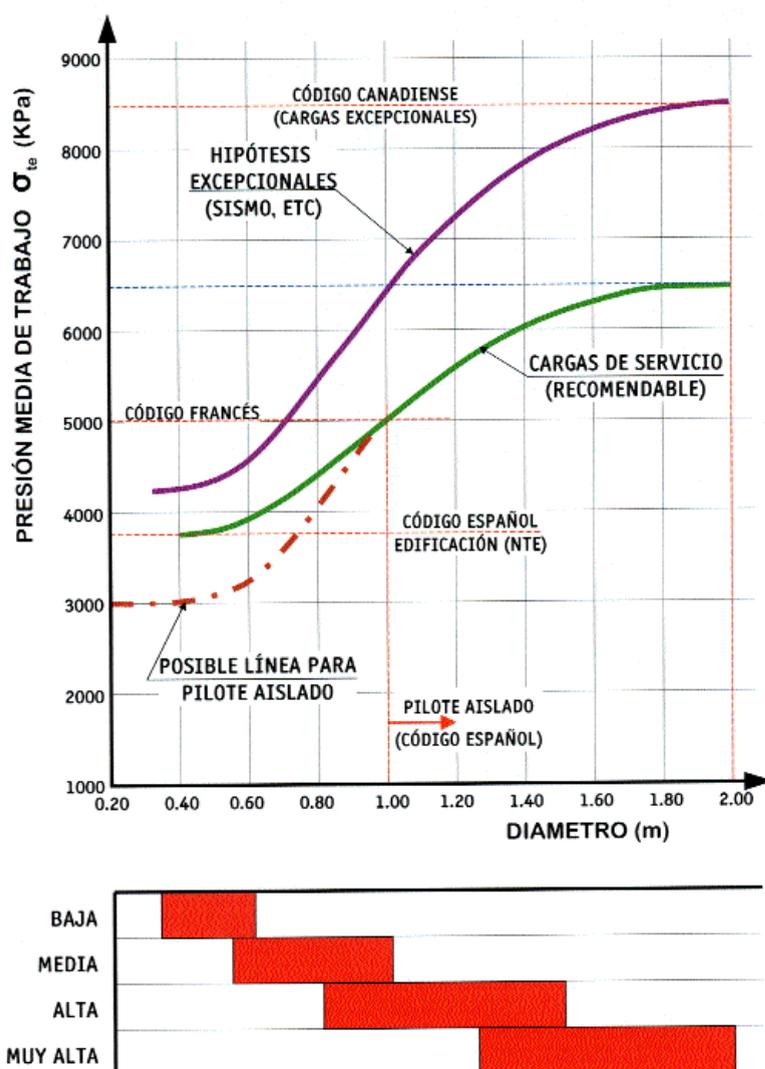


Fig. 9.- Posibles presiones medidas de trabajo en pilotes y niveles de control posibles y recomendables.

- Pilotes de pequeño diámetro ( $\phi < 800$  mm) y poco control:
- Obras sin control especial:  $\sigma_{te} = 4.500 - 5.000$  KN/m<sup>2</sup>
- Pilotes con diámetro medio a alto ( $\phi > 800$  mm) y  $\sigma_{te} = 3700 - 4500$
- Obras con control medio alto:  $\sigma_{te} = 5.000 - 5.500$  KN/m<sup>2</sup>
- Obras con control exhaustivo (transparencia sísmica y sondeo en punta):  
 $\sigma_{te} = 5.500 - 6.500$  KN/m<sup>2</sup>
- Obras bien controladas y situación extraordinaria (hipótesis de sismo, etc):  
 $\sigma_{te} = 7.500 - 8.000$  KN/m<sup>2</sup>

La carga del pilote que se compara con  $Q_{adm}$  y con  $\sigma_{te} \times \Omega$  ( $\Omega$  = área del pilote en su cabeza) sería la carga derivada del cálculo estructural sin mayorar.

Actualmente empieza a haber tendencia a utilizar cargas mayoradas, con lo que la carga de trabajo,  $P_t$ , afectada por un coeficiente de mayoración,  $F_t$ , que podría variar entre 1,35 y 1,50 (según el tipo de hipótesis, la provisionalidad de la obra, etc.). Este valor debería compararse con el deducido minorando la carga de hundimiento:

$$P_t \cdot F_t \leq \frac{Q_p}{F_p} + \frac{Q_f}{F_f}$$

Los coeficientes  $F_p$  y  $F_f$  serían menores que los antes citados ( $F_p$  puede ser del orden de 1,5 – 1,75 y  $F_f$  del orden de 1 – 1,25). En los borradores del Eurocódigo Geotécnico se dan valores de  $F_p$  y  $F_f$  más bajos que los indicados, lo que, a nuestro juicio, es muy atrevido.

#### 4.- Resistencia a tracción.

En el caso de edificación es raro encontrar pilotes a tracción, salvo en estructuras muy elevadas, inclinadas o que incluyan cables tesados. En ese caso, la carga admisible sería:

$$Q_{adm,t} = \frac{\psi}{F_a} \cdot \sum_{i=1}^n f_{si} \cdot \pi \cdot D \cdot L_i + W_p \frac{1}{F_b}$$

Siendo  $f_{si}$  la resistencia por fuste a compresión;  $\psi$  un coeficiente para tener en cuenta la alternitud de cargas compresión-tracción (del orden de 0,65 – 0,7);  $W_p$  el peso propio del pilote;  $F_a$  del orden de 2 y  $F_b$  del orden de 1,5.

#### 5.- Esfuerzos parasitos

Existen dos tipos principales de esfuerzos parásitos: a) Rozamiento negativo. B) Empujes laterales debidos a sobrecargas superficiales.

El rozamiento unitario negativo en el fuste puede calcularse a partir de la expresión (fig.10).

$$F_s, \text{neg} = \sigma'_v \cdot \beta$$

En  $\sigma'_v$  es la tensión efectiva en el terreno en el punto del fuste considerada y  $\beta$  un coeficiente que puede valer del orden de 0,25 en arcillas y limos blandos y del orden de 0,10 en arenas flojas.

En el caso de empujes laterales pueden tomarse de acuerdo con lo indicado en la fig. 10.

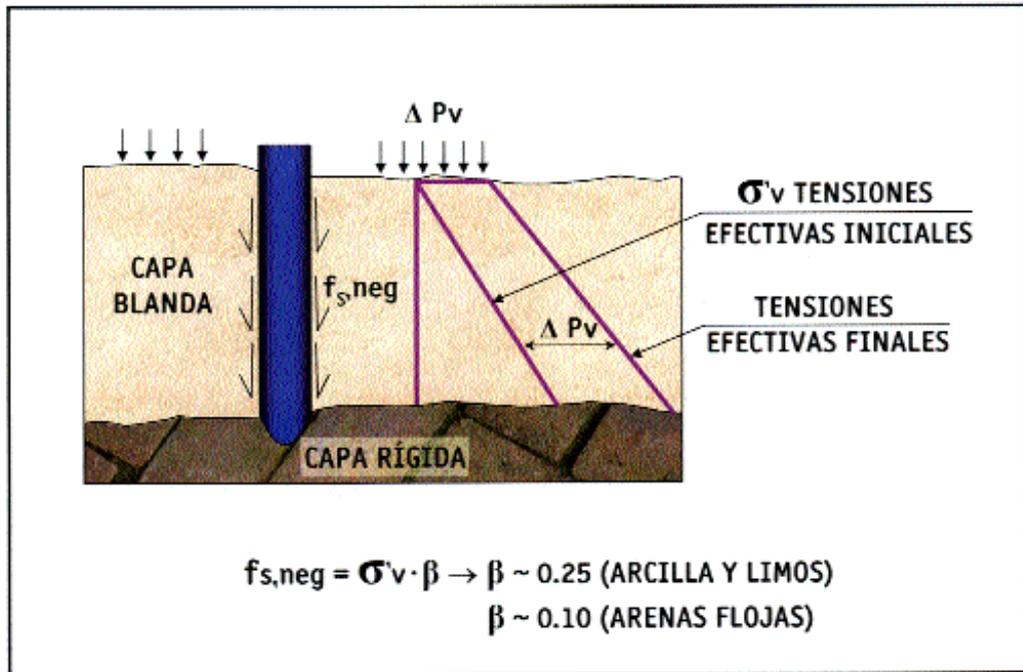


Fig. 10.a.- Rozamiento negativo

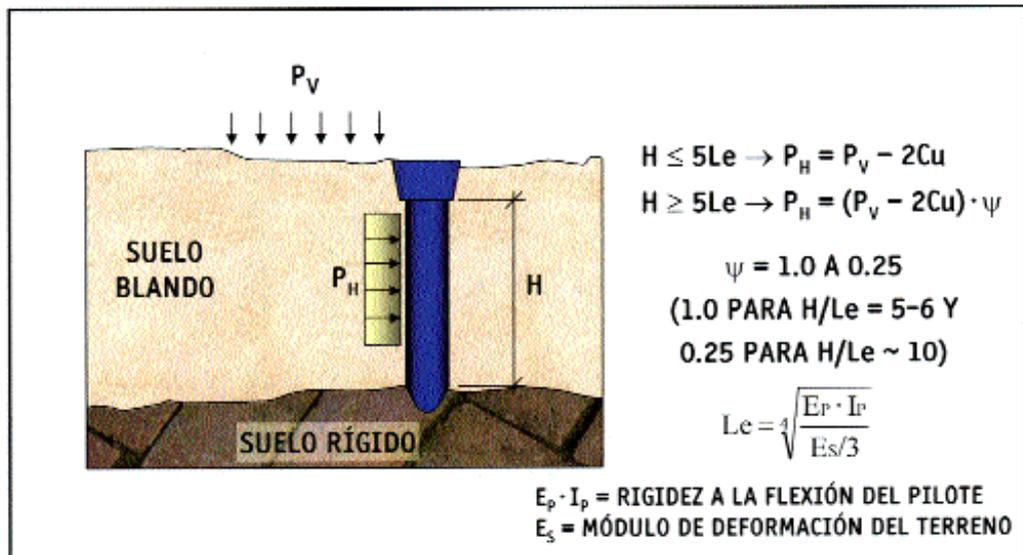


Fig. 10.b.- Empujes laterales

Fig. 10.- Esfuerzos parásitos

## 6.- Cimentaciones profundas especiales.

Aunque no se trate de pilotajes propiamente dichos, pueden distinguirse algunos tipos especiales de cimentaciones profundas que se emplean en algunos casos especiales:

- Columnas de grava, realizadas con vibroflotadores y que, desplazando parcialmente un terreno blando, lo sustituyen por grava compactada en forma de columna. Se trata de “pilotes blandos” que tienen una deformación propia algo mayor que los pilotes de hormigón. Pueden diseñarse trabajando a presiones medias de unas 500 – 1.000 KN/m<sup>2</sup>, debidamente encepadas por grava, sobre la que se apoye una zapata convencional. Se ha utilizado este sistema en el apoyo y cimiento de terraplenes (apoyados las columnas o no en estratos duros), como cimiento de tanques de combustibles, de naves industriales, etc., habiéndose llegado a apoyar pilas de puentes sobre ellas, como lo hemos hecho en la Autovía de Aragón (Figura 10a).
- Columnas de jet-grouting verticales y/o inclinadas, a manera de pseudopilotes, sirviendo de mejora del terreno o para reforzar cimentaciones a media ladera, con riesgo de deslizamientos (Figura 11b). En estos casos, el diseño suele ser empírico, pero se puede contar con columnas de unos 40 – 60 cm (jet-1) hasta 1,0 – 1,5 m (jet-3), trabajando a unos 1.500 KN/m<sup>2</sup>.
- Túneles hormigonados, como en el actual intercambiador de Nuevo Ministerios (Metro de Madrid – RENFE), actualmente en construcción, en que hemos efectuado verdaderos túneles

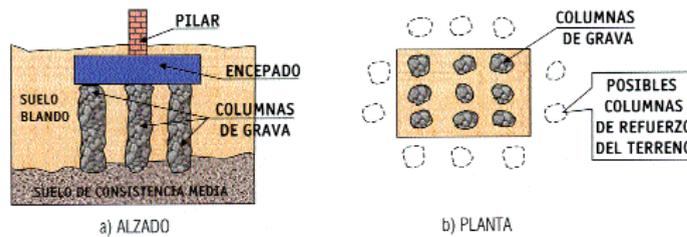


Fig. 11.a.- Utilización de columnas de grava como “Pilotes” blandos

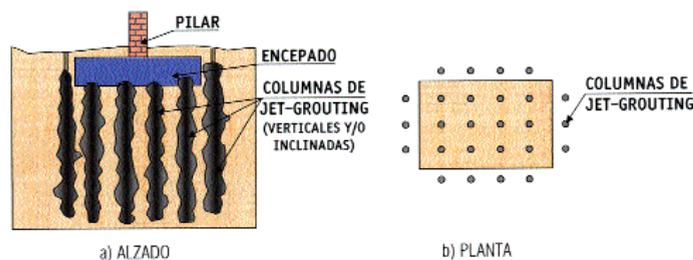


Fig. 11.b.- Utilización de columnas de Jet-Grouting como pilotes o como tratamiento previo del terreno en suelos con cavernas y huecos

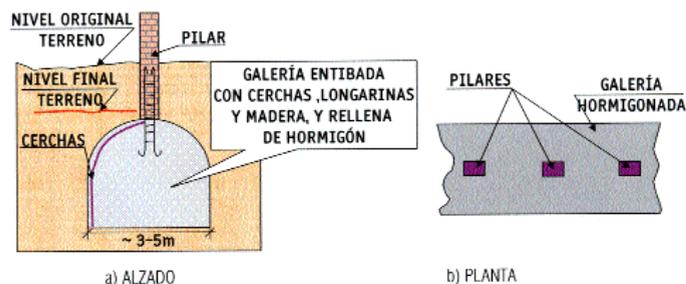


Fig. 12.- Cimentación realmente profunda (galería excavada en túnel y hormigonada).

(galerías excavadas, de unos 4-5 m de anchura, con sostenimiento de cerchas y madera), que se hormigonan y conectan, mediante pozos, a futuros pilares. Se puede cementar sólo la base del túnel con una malla, quedando armadas, transversalmente, por las cerchas y trabajando a 500 – 700 KN/m<sup>2</sup> en terrenos como el “tosco arenosos” de Madrid (Figura 12).

- Pilotes de madera, carriles de acero, etc., hincados en terreno blando, para desplazar el terreno y compactarlo, colocando encima (y debidamente confinada) una zapata convencional, lo que permite dar a la zapata presiones de unas 200 KN/m<sup>2</sup>, según el modelo clásico e histórico empleado por los romanos, los constructores de las catedrales, etc.

## 7.- Pilotes en Recalces de Edificaciones

Uno de los usos característicos de los pilotes –de pequeño diámetro– es el poder ser usados en el recalce de edificios. Se trata de los llamados micropilotes, ejecutados a rotación y hormigonados “in situ” con mortero o lechada de cemento. Ello permite desde atravesar cimientos antiguos –de formar que las cargas del edificio se transmitan al micropilote por adherencia entre el hormigón de los antiguos cimientos y el nuevo material– hasta el construir el micropilote cerca del antiguo cimiento y conectarle a él con un nuevo encepado y los correctores adecuados (Figura 14).

Además, el micropilote –en definitiva, una perforación con diámetro entre 100 y 230 mm, es decir, más o menos como un sondeo– puede ser rellanado con mortero o lechada de una sola vez o puede permitir el ser inyectado repetidamente a lo largo de su longitud mediante válvulas o “manguitos”, de forma que su diámetro exterior se ajuste a la calidad del terreno y se consiga una adherencia micropi-

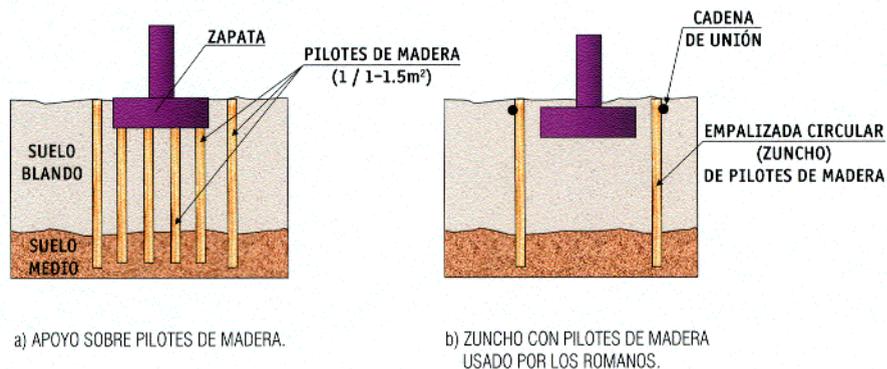


Fig. 13.- Utilización de pilotes de madera

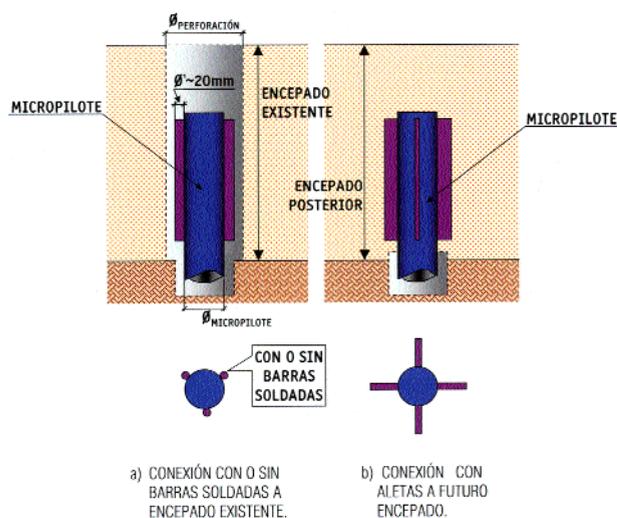


Fig. 14.- Ejemplo conexiones de Micropilotes a encepados

lote-suelo de calidad (micropilotes de inyección repetitiva). En la figura 15 se muestra un esquema de estas posibilidades. La armadura de un micropilote debe ser, a nuestro juicio, siempre tubular, aunque se puede reforzar con alguna barra aislada.

Según el Borrador actual del futuro Manual de Diseño y Construcción de Micropilotes elaborado por AETESS para la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento, en el caso de micropilotes para absorber cargas verticales, el diseño se haría de la siguiente forma:

- a) Se parte de la carga nominal sobre el micropilote deducida del cálculo,  $P_N$ , y se le aplica un coeficiente de mayoración  $F_1$ , función del tipo de obra (Ver tabla adjunta). Se obtiene así la carga de diseño,  $P_D = P_N \cdot F_1$

$$b) P_D \leq \left( \sum_{i=1}^n f_{s,i} \cdot \pi \cdot d \cdot L_i \right) \frac{1}{F_2} + q_p \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{1}{F_3}$$

Tipo Obra	$F_1$
Poca responsabilidad	1,25
Poca responsabilidad pero con importancia económica	1,40
Gran responsabilidad social y económica	1,50

Siendo  $d$  el diámetro del micropilote;  $L_i$  la longitud que atraviesa el micropilote en el terreno  $i$ ;  $f_u$  el rozamiento unitario máximo entre fuste y terreno;  $q_p$  la resistencia por la punta del micropilote. Si

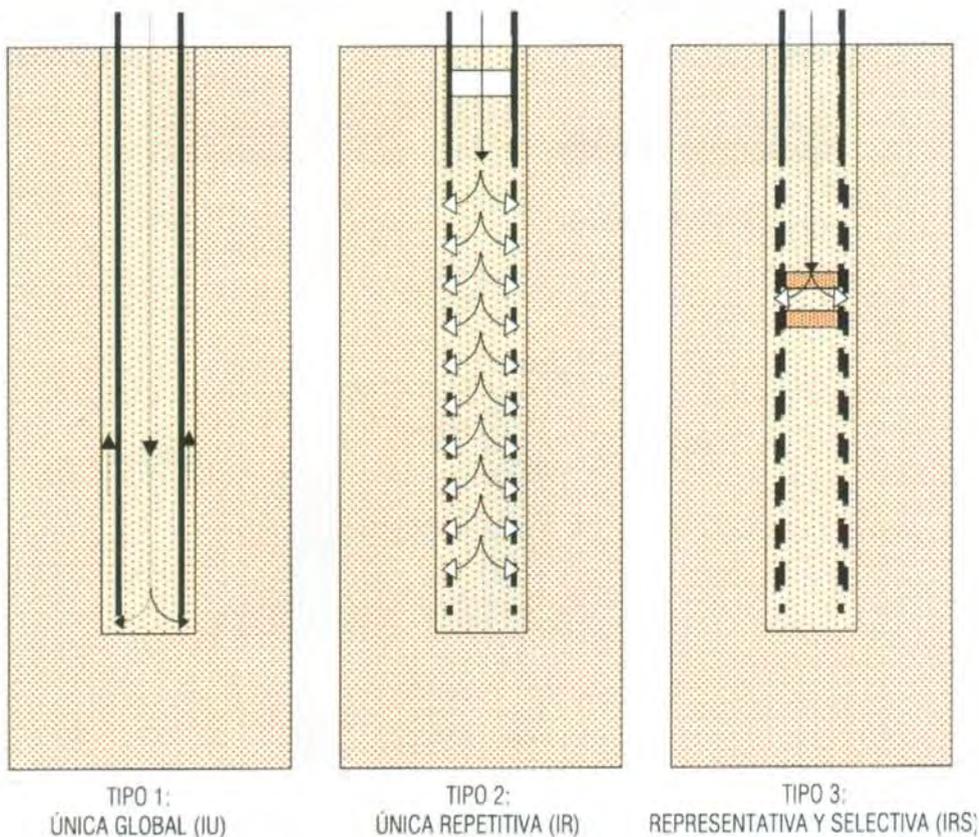


Fig. 15.- Tipos de micropilotes

no se conoce bien  $q_p$  el segundo sumando de la expresión anterior puede tomarse como un 15% del primero. El valor de  $f_s$  puede tomarse como  $\varepsilon \cdot f_0$ .  
 $\varepsilon$  puede tomarse igual a 1 para con inyección sencilla y 2 para inyección repetitiva.

Tipo de terreno	$F_0$ (MPa)
Arena y gravas flojas	0,10
Arena y gravas densas	0,35
Arcillas y limos blandos	0,08
Arcillas y limos rígidos	0,18
Margas	0,30

c) Los valores de  $f_{ii}$  pueden tomarse de las tablas adjuntas, así como los valores de  $f_3$  y  $f_4$ . En la fig. 16 pueden verse varios casos de valores reales de  $f_s$  deducidos de pruebas de carga.

En el caso de pilotes trabajando a cortante y flexión, como es el típico caso en el que se utilizan para reforzar y evitar deslizamientos (Figura 17), pueden adoptarse configuraciones como la de la Figura 18. En estos casos es conveniente utilizar micropilotes armados con tubo metálico de unos 15 – 20  $cm^2$  de sección transversal y que sean de inyección repetitiva, inyectados a través de válvulas distanciadas, como máximo, 1 m. Estos casos pueden estudiarse considerando los pilotes como pasadores o con la técnica de elementos finitos, utilizando Códigos numéricos como el PLAXIS (Figura 19).

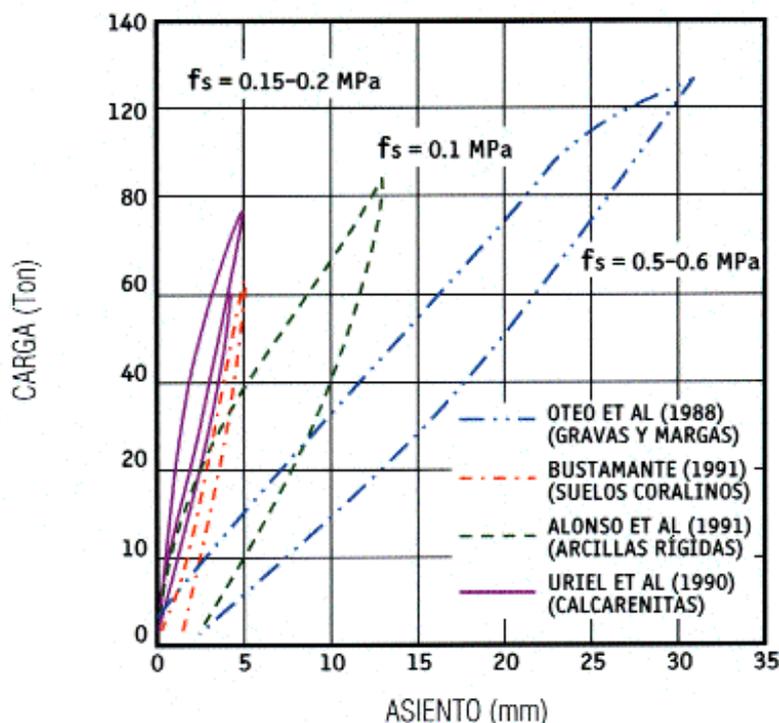


Fig.16.- Comportamiento de micropilotes en varios tipos de suelos

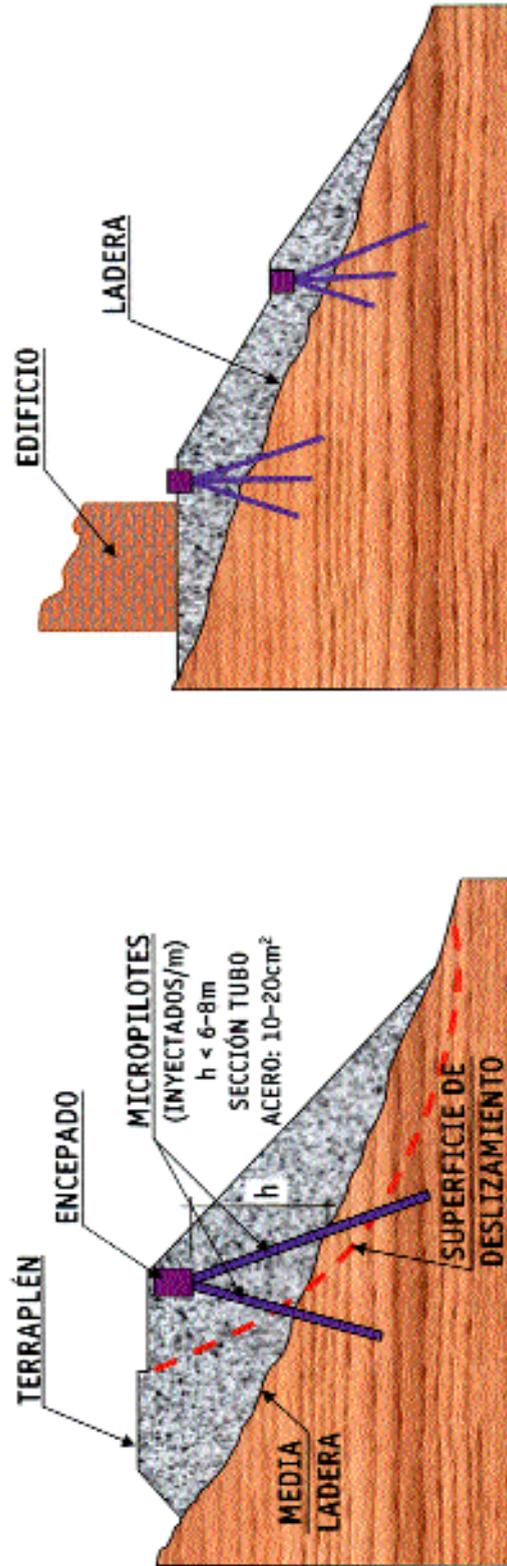


Fig. 17.- Uso de micropilotes como pasadores para reforzar el gterreno en deslizamientos.

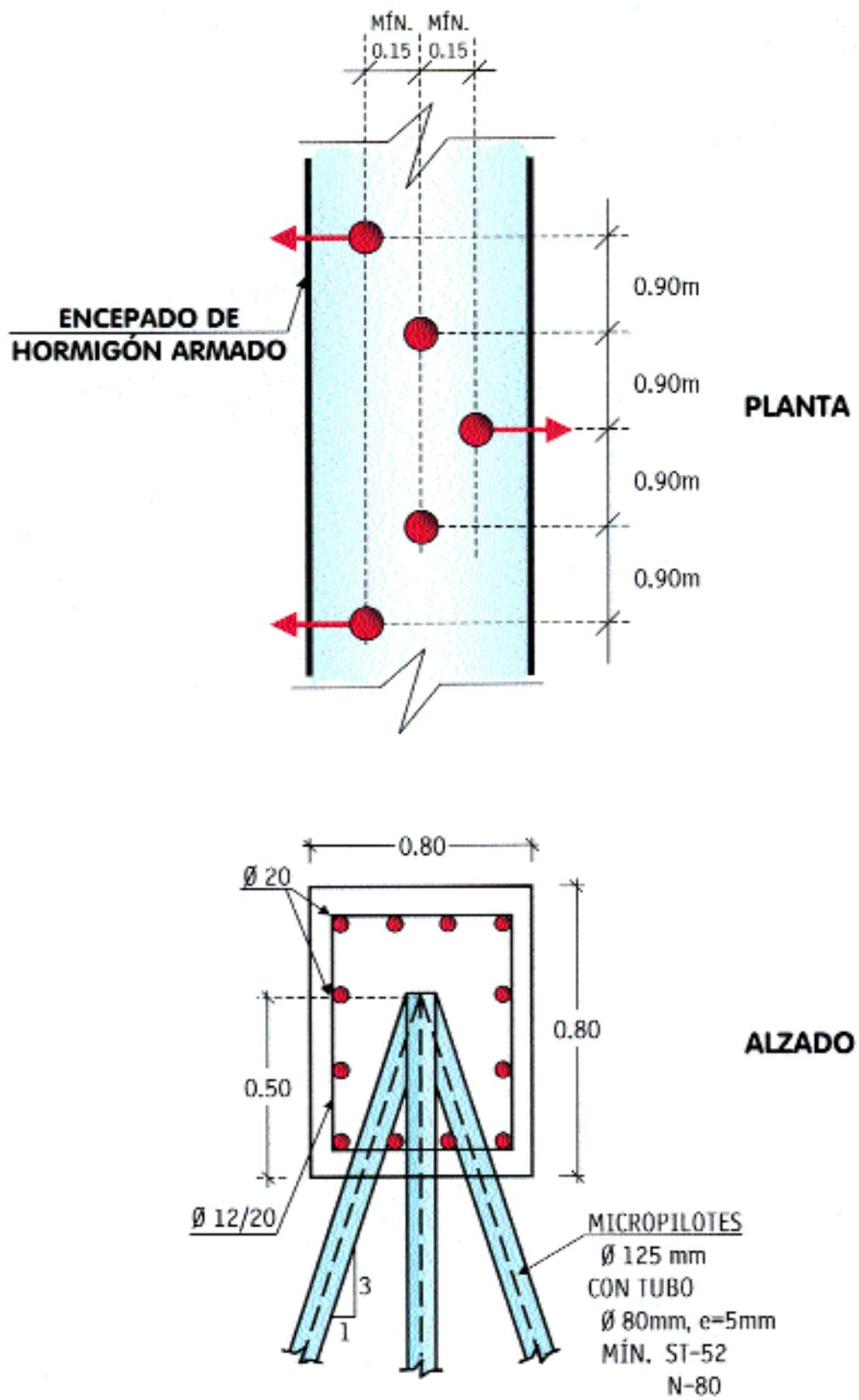
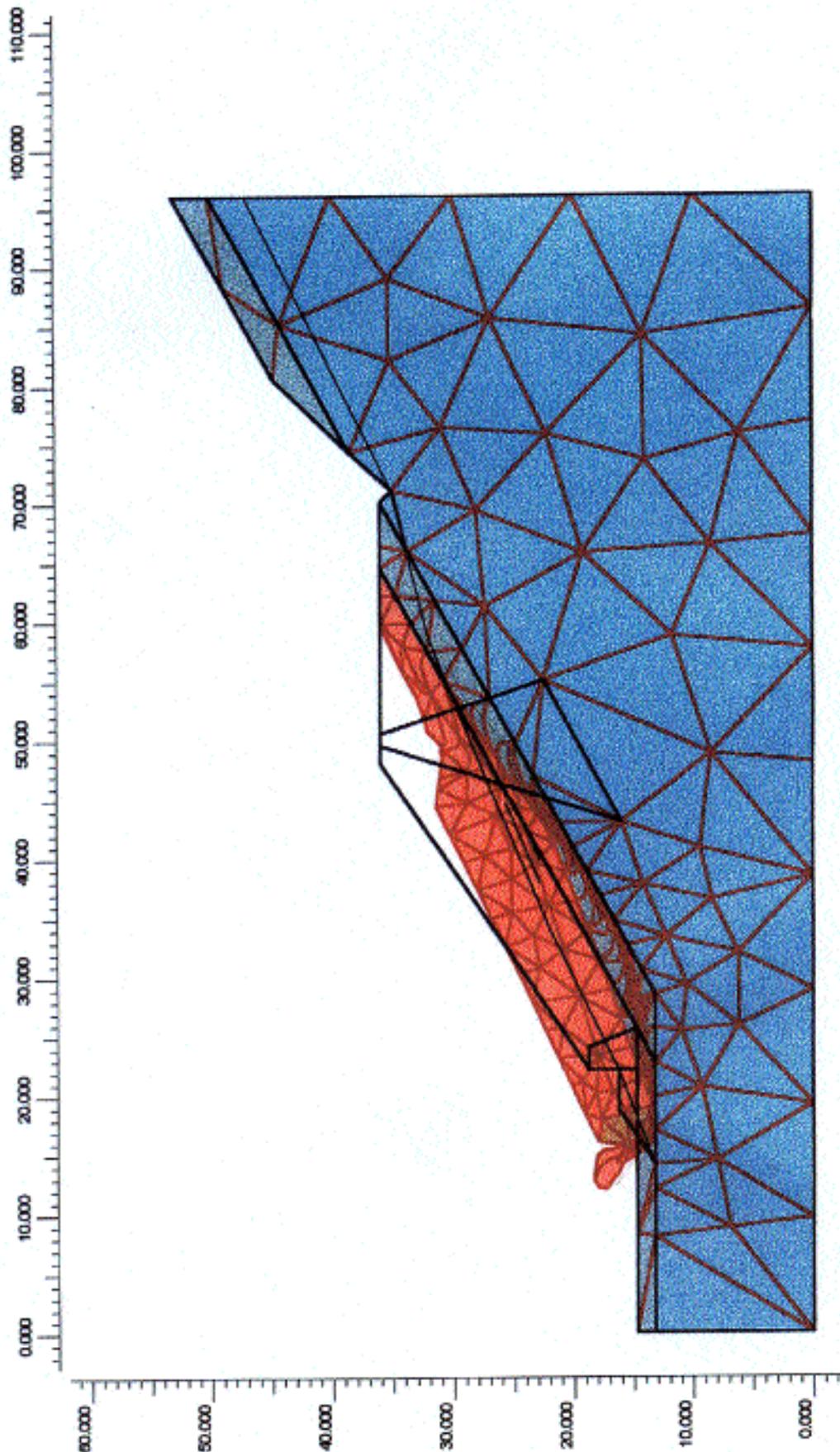


Fig. 18.- Encepado tipo de barreras de micropilotes contra deslizamientos



Deformed Mesh  
 Extreme total displacement 134,79 m  
 (displacements scaled up 50,000\*10<sup>-3</sup> times)

Fig. 19.a.- Situación inicial. Coeficiente de seguridad ~ 1.0

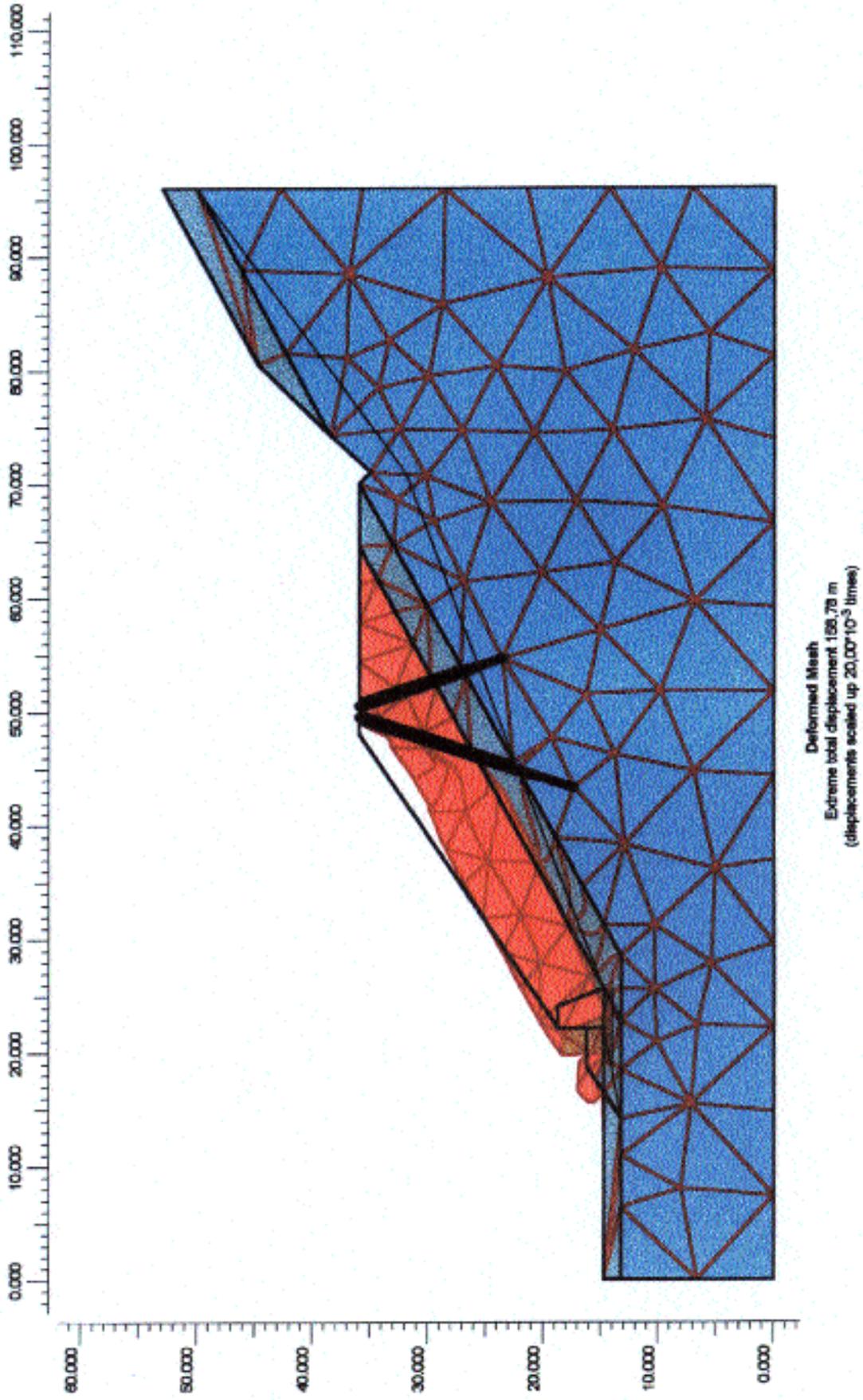


Fig. 19.b.- Refuerzo con micropilotes coeficiente de seguridad ~ 1.25

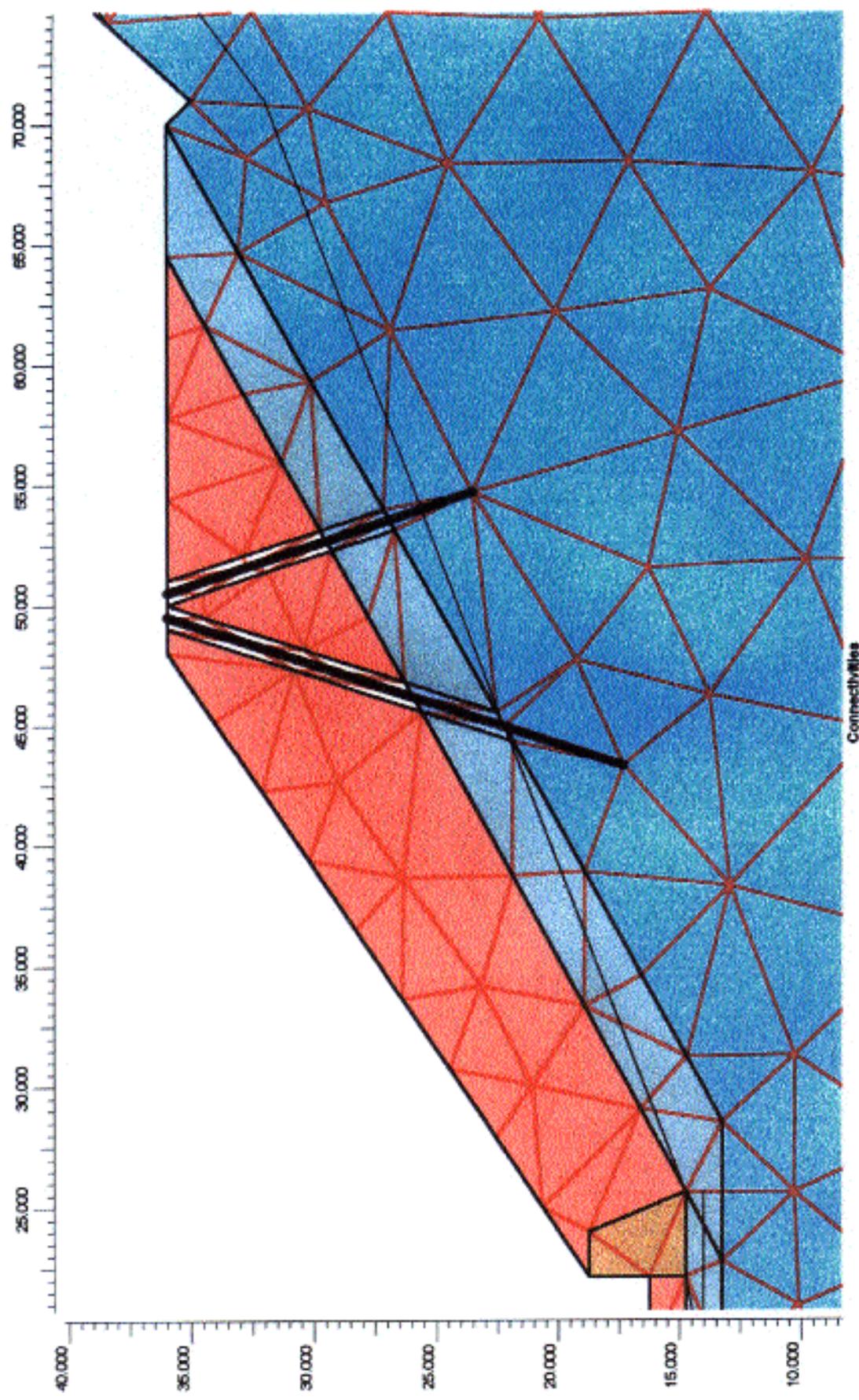
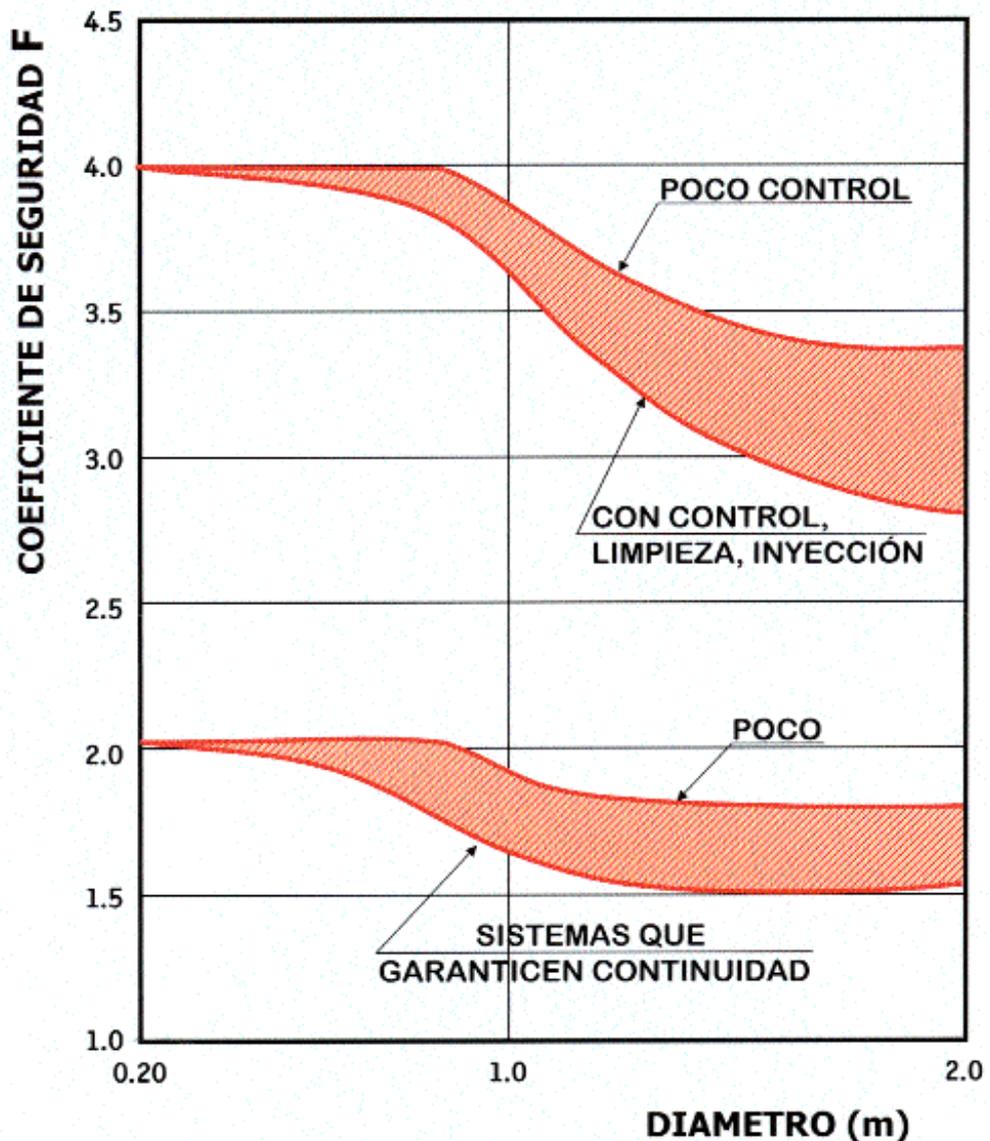


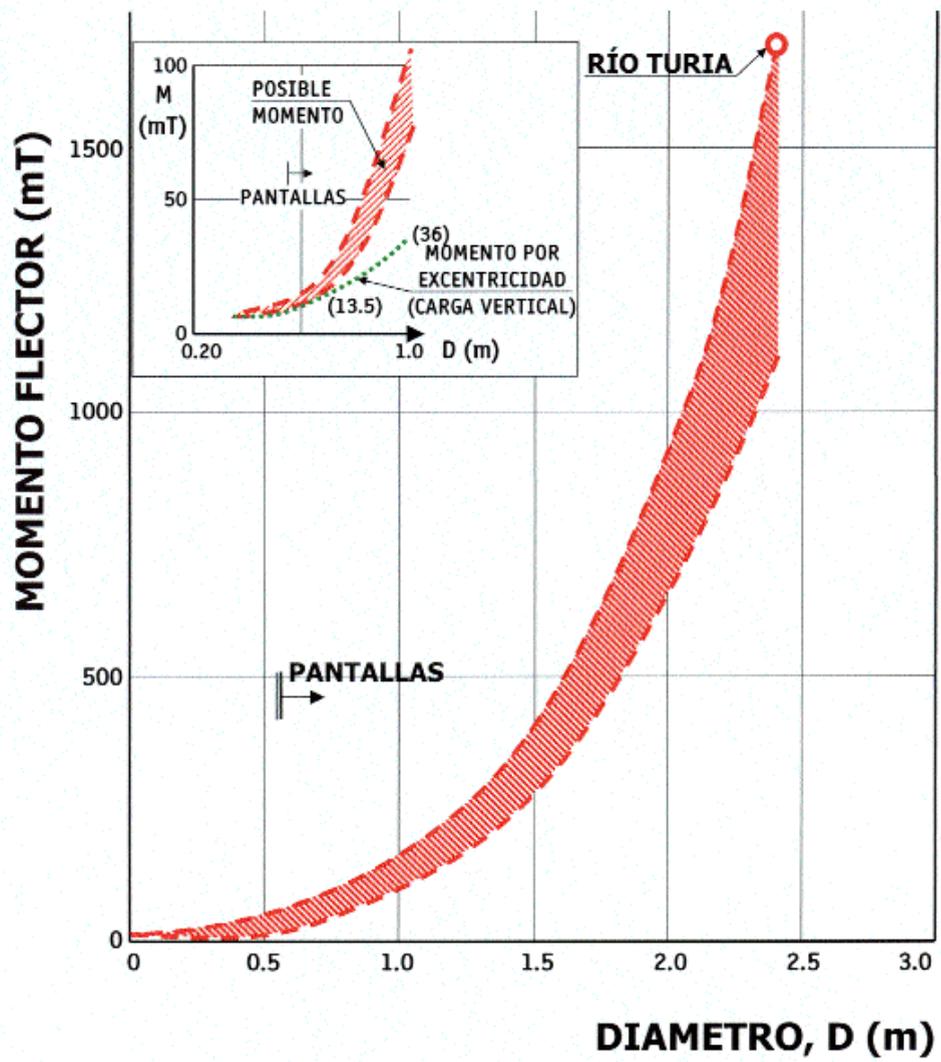
Fig. 19. c.- Detalle de la malla para la utilización del código plaxis

## 8.- Recapitulación

Como final de estas páginas queremos insistir en tres ideas:

- El diseño, a nuestro juicio, no está sólo en la determinación de las dimensiones (diámetro y longitud) de un pilotaje, sino en establecer cómo va a conseguirse que se plasme en el terreno. Es decir, en pensar como se va a proceder a hincar (y qué control durante la hinca, para deducir la carga de hundimiento en cada momento) o, como se va a conseguir sujetar las paredes durante la perforación y hormigonado del pilote en los del tipo "in situ".
- El método de cálculo debería de tener en cuenta la forma de construcción y como ésta afecta al terreno; a través de coeficientes empíricos que afecten a la resistencia de fuste (para tener en cuenta la relajación en la perforación, la recompresión o la solifluxión debida a la hinca, etc. y a la de punta (limpieza de fondo, compactación de arenas, etc.).
- La determinación del tipo estructural o tensión media de trabajo del material del pilote ha sido "castigada" habitualmente en edificación. El debido control de ejecución y comprobaciones "a posteriori" (control sónico de transparencia, por ejemplo), debe permitir elevar coste tope a valores similares a los que se emplean en obras de Ingeniería civil.





# MESA REDONDA SOBRE DISEÑO

**Moderador:** D. Vicente Cuéllar Mirasol  
(*Presidente de la SEMSIG, Director del Laboratorio de Geotecnia, CEDEX*)

**Miembros de la mesa:** D. Antonio Soriano (*E.T.S.I.C.C.P. de la U.P.M.*); *ponente*  
D. Carlos Oteo (*E.T.S.I.C.C.P. de la U.P.M.*); *ponente*  
D. Pedro Sola (*Geocisa*)  
D. José María Herrador (*Kronsa*)

Esta primera mesa redonda abierta se dedicó a la discusión sobre el diseño de pilotes para edificación. Varias de las cuestiones surgieron con motivo de las ponencias previas de D. Antonio Soriano y D. Carlos Oteo, las cuales se incluyen en este volumen.

Abrió la mesa redonda **Dña. Ana M<sup>a</sup> García Gamallo**, (E.T.S.A. de la U.P.M.). En primer lugar, dijo estar de acuerdo con la postura de D. Antonio Soriano y D. Carlos Oteo en lo relativo a que debiera de omitirse el cálculo de la cimentación en el informe geotécnico. Además, apuntó que no concibe un informe geotécnico sin un conocimiento previo del proyecto. Apuntó que ésto está ocurriendo muy a menudo, lo que ha dado lugar a fracasos “estrepitosos”. Sugirió que tal vez pudiera tener origen en la falta de comunicación entre los arquitectos y las empresas que redactan los informes geotécnicos. A su modo de ver, no es “a causa de las prisas”, dado que desde que se redactan el Proyecto Básico y el de Ejecución transcurre casi un año hasta que se concede la licencia de obra. Formuló las siguientes preguntas:

- ¿Cuáles son los motivos de tal desconexión entre el que redacta el informe geotécnico y el Proyecto?
- ¿Se puede concebir un informe geotécnico sin el conocimiento previo del Proyecto?

Respondió en primer término **D. Carlos Oteo**. Indicó que conoce motivos de toda índole. Señaló que en ocasiones los informes geotécnicos se encargan tarde. Lo ilustró con una experiencia personal reciente: un promotor, que contaba con un proyecto básico de viviendas y con un informe geotécnico, solicitó su colaboración. Al revisar el informe, se pudo deducir que su autor tan sólo conocía del proyecto el emplazamiento y que se trataba del anteproyecto de una serie de chalets, pero no los detalles del proyecto ni de las edificaciones; Las propuestas de posibles soluciones de cimentación las discutió con el promotor, “no con el verdadero responsable del diseño, el arquitecto”, con lo que la transmisión de las recomendaciones no se hizo debidamente. A su juicio, quizás el error radique en que “este asunto cae en manos del promotor y sea éste quien lo lleve adelante”, de tal modo que al proyectista se le informa “a posteriori” de la cimentación definitiva.

Apuntó que en el caso de que surja algún problema, puede ocurrir que, siendo el arquitecto quien firma el proyecto, éste no haya intervenido en los detalles de la cimentación. Es más, en ocasiones, los daños se reclaman al seguro del arquitecto. Oteo propone como posible solución a este conflicto que “el proyectista exija el contacto con un proyectista geotécnico o tener en su oficina un diseñador de cimentaciones”.

Intervino a continuación **D. Antonio Soriano**. En lo que respecta al posible desconocimiento del proyecto por parte de quien redacta un informe geotécnico, indicó que “*la clave está en que quienes hacen hoy los informes geotécnicos para las obras de edificación tienen bastante competencia entre ellos*”; y que “*es una cuestión de precio, puesto que los proyectistas, como es lógico, pagan lo menos posible por hacer estos estudios*”. Señaló que “*en España no hay muchas personas que puedan hacer un buen informe geotécnico, preocupándose también por la estructura y entendiendo cómo es el cálculo estructural. Se sabe cómo hacerlo bien, pero resulta caro. Hay informes geotécnicos que están firmados por profesionales que no debieran firmarlo.*”

Finalmente, **Dña. Ana María García Gamallo**, indicó que ha comprobado que en numerosas ocasiones los informes geotécnicos no incluyen ensayos de laboratorio, “que brillan por su ausencia”. Reiteró que no es por falta de tiempo. A su modo de ver, se debe a que *“las empresas que hacen informes disponen, bien de maquinaria, bien de laboratorios, una de las dos cosas, por lo que procuran reducir costes al subcontratar los servicios de los que no disponen”*. Apostilló, a modo de protesta de esta situación, que ésto da lugar a una información muy limitada a la hora de abordar los cálculos.

Tomó la palabra de nuevo **D. Antonio Soriano** para comentar que, basándose en su experiencia, coincide en que no suele ser el motivo de tal desconexión la falta de tiempo. Hay obras en las que el informe geotécnico está diferido de la construcción del edificio casi un año. En ese intervalo hay tiempo para rectificar. Insistió en que, a su juicio el origen del problema es *“económico y de competencias profesionales”*.

La segunda intervención estuvo a cargo de **Dña. Begoña Muñoz** (INTEINCO). Discrepó respecto al origen de la desconexión entre el proyecto y el diseño de las cimentaciones. Afirma que en sus 10 años de experiencia, ha sido muy raro el informe geotécnico que no *“corriera prisa”* y que *“tal vez los encargan en el último momento o que no se acuerdan de éste hasta que hay que visar el proyecto”*.

Respondió, por alusiones, **D. Antonio Soriano**. Para explicar por qué opina lo contrario dijo que, si bien *“corre prisa el informe geotécnico, y hay que darlo, sucede que desde que se emite el informe geotécnico hasta que se hace la construcción pasa mucho tiempo, y yo creo que es una obligación del buen informe geotécnico conseguir las últimas pesetas para ir a la obra cuando se empieza y confirmarlo”*

**D. Carlos Oteo** comentó que en muchos informes se aprecia que los ensayos los encarga alguien que no está al corriente de la obra a proyectar, incluso se deja a criterio del Jefe del Laboratorio los ensayos a realizar. Esto puede dar lugar a ensayos inadecuados e información escasa para el proyecto. Por otra parte, señaló que hay quien piensa que sólo son datos de cierta entidad aquellos provenientes de triaxiales o de edómetros. Expuso que ensayos, los de identificación, tales como granulometría y humedad, pueden contar tanto o más para el proyecto en cuestión. Manifestó que en ocasiones él ha prescindido de ensayos de corte directo (más frecuentes que los triaxiales en laboratorios homologados) en los que las humedades de las tres probetas son tan dispares (tal vez por no tener suelo suficiente, se toma de muestras de otras zonas) que no son representativos. A su entender, es fundamental que el informe geotécnico incluya, al menos, una descripción detallada del terreno. Expuso un caso personal: en la memoria del proyecto de una depuradora se indicaba que el terreno de cimentación estaba constituido por arcillas duras y expansivas, con el consiguiente riesgo de levantamiento de la depuradora. La cimentación se estudió en el proyecto partiendo de estas premisas. (Se llegó a hacer un concurso entre los contratistas para saber quién aportaba mejor solución contra la expansividad bajo los decantadores.) Sin embargo, en un apéndice se adjuntaba un breve informe geotécnico, que, al parecer, no lo leyó prácticamente nadie, el cual, acertadamente, describía la existencia de un terreno blando, fangoso y con notable presencia de materia orgánica por el fuerte olor; hecho que Oteo corroboró en la visita de la zona de implantación. Finalmente, hubo que diseñar de nuevo la cimentación, transformándose en un caso con peligro de grandes asientos.

Además, añadió que con frecuencia el presupuesto para los ensayos de laboratorio no está en la debida proporción con los reconocimientos de campo y que por ello debiera ser algo mayor.

Un comentario de **D. Manuel Beteta** (AEPO) señala que: *“un informe geotécnico debería incluir, además de las características del terreno, unas conclusiones y recomendaciones a nivel general, y no entrar en detalles del dimensionamiento de las cimentaciones; el problema es que el informe geotécnico luego no acaba en manos de otro geotécnico para su interpretación, y así poder realizar las correspondientes recomendaciones en base a la información disponible del edificio; el informe acaba en manos de otros técnicos que buscan en éste el dimensionamiento de los pilotes y consideran que el informe es ‘malo’ o ‘incompleto’ si no incluye nada al respecto”*.

Añadió que *“con respecto a la ‘mala calidad’ de algunos informes geotécnicos, creo que el problema*

*principal es económico ya que se adjudica a la empresa más barata, incluso si el técnico que lo firma no es el más adecuado; una forma de corregir este problema sería aprobar una disposición donde el coste del informe sea de un cierto porcentaje con respecto al valor total de la obra”.*

**D. Luis Moral** (CALCONSA, Sevilla) intervino para plantear dos cuestiones encaminadas *“a unificar criterios, en relación a las incertidumbres surgidas en las oficinas de control técnico, en vistas a la aplicación del seguro decenal de la L.O.E.”.*

En primer lugar, respecto a las cuantías mínimas en pilotes, declaró que no le constaba que éstas quedaran recogidas en la EHE. No obstante, indicó que conoce las recomendaciones de la NTE, pero en ese sentido no tenía certeza de que la cuantías ahí recogidas estuvieran en vigor, por lo que solicitó una confirmación.

En segundo lugar, pidió a los ponentes que valoraran la siguiente reflexión: en su opinión, la utilización de topes estructurales de 50 kp/cm<sup>2</sup> con hormigones que en la actualidad son de al menos de 250 kp/cm<sup>2</sup> (lo que significa un coeficiente de seguridad respecto al hormigón de 5) puede ser acertada, puesto que recoge en buena lógica el espíritu de la NTE, que reguló un tope estructural de 35 kp/cm<sup>2</sup>, cuando entonces, lo habitual eran hormigones de 175 kp/cm<sup>2</sup>. También va en consonancia con los topes estructurales de 80-100 kp/cm<sup>2</sup> que en la actualidad se asignan a pilotes prefabricados con hormigones de al menos 400 kp/cm<sup>2</sup>. Por tal motivo, entiende que la resistencia del hormigón ha de condicionar al tope estructural.

Cerró su intervención declarando estar de acuerdo con **D. Antonio Soriano** en que *“los informes geotécnicos han de ser asépticos en cuanto a las conclusiones y estar muy relacionados con el proyecto”.*

Respondió en primer lugar, **D. Antonio Soriano**, quien señaló que en los pilotes hincados *“debe analizarse la hincada y comprobar que soportan las tracciones generadas”.* Recordó que las cuantías escasas provocan fisuras; añadió que esta armadura colabora muy escasamente en los esfuerzos de compresión. A su juicio, los pilotes hincados deberían ir un poco más armados que lo habitual, aunque cree que, en general, no es un problema preocupante y que las cuantías indicadas en la NTE son razonables. Finalmente, apuntó que en cualquier caso, *“es una cuestión a resolver conjuntamente con los proyectistas de estructuras”.*

A continuación, **D. Carlos Oteo** expuso que evidentemente, la calidad del hormigón ha mejorado (de 175 a 250 kp/cm<sup>2</sup>), hecho que ha de tenerse presente para establecer el tope estructural. Ahora bien, *“no es solamente un coeficiente de seguridad del hormigón, es un coeficiente de seguridad a la “ignorancia”, a la limpieza [de la excavación] y todo ello va unido”.* Afirmó que se ha de replantear el límite del tope estructural, pero en relación al diámetro del pilote, así como a la forma de realización del pilotaje, que son factores de influencia global.

Por otro lado, indicó que, desde el punto de vista normativo, únicamente está regulado en la NTE (en cuanto a diseño); no obstante, citó la existencia de diversas recomendaciones, algunas de ámbito autonómico. También recordó que en cuanto a ejecución y recepción (sin que se hable de topes estructurales, por no ser Pliego de Diseño), fueron aprobados recientemente sendos artículos del PG-3 (Orden Circular 326/00), para pilotes hincados e “in situ” y que fue motivo de otra Jornada Técnica en el mismo foro el año pasado. Concluyó citando los planes conjuntos de AETESS y la Dirección General de Carreteras (DGC), que van a dar como fruto diversas Guías o Recomendaciones (anclajes, micropilotes,...) de diseño y ejecución. Está previsto una Guía de pilotes en la que quizá se recomienden topes estructurales superiores; recalcó que en la actualidad sólo existe la NTE en cuanto a diseño de pilotes y que se redactó hacia 1973.

A continuación, **D. Pedro Sola** puso de relieve que en base a su experiencia de ejecución y diseño de pilotes, se ha encontrado con que *“las normativas o recomendaciones existentes en España no son muy aplicables a nuestra actividad, en el sentido de que son muy generales”.* En referencia a la EHE, declaró que los temas relacionados con pilotes, con el encepado, con recubrimientos y con punzona-

miento (en pilotes de desplazamiento) no están tratados suficientemente, puesto que no tienen en cuenta las peculiaridades geotécnicas, y se tratan desde un punto de vista estructural. En referencia al tope estructural, agregó que en el ámbito de la edificación, por lo general, los esfuerzos son verticales, pero que en otros casos, los esfuerzos horizontales pueden condicionar el pilote, y en definitiva, reducir el tope estructural. En ese sentido, declaró que uno de los propósitos de AETESS, en colaboración con la DGC, consiste en la redacción de una serie de Recomendaciones o Guías de buena práctica que recojan los procedimientos apropiados de ejecución.

Seguidamente, **D. José María Herrador** expuso que, como miembro de un comité de redacción de recomendaciones de fabricación de hormigón prefabricado, le han encomendado la parte de pilotes prefabricados. Señaló que *“son necesarias unas cuantías mínimas que eviten fisuras provocadas por las tracciones generadas durante la hinca (cuya magnitud se comprueba con un analizador electrónico de hinca)”*. Después de repasar numerosas normativas extranjeras, así como abundante documentación, José María Herrador, ha adoptado recomendar una cuantía del 1.25 %, coincidente con la NTE. Lo ha sustentado en el hecho de que las diversas normativas extranjeras regulan cuantías del mismo orden (0.8 % la British Standard, 1.25 a 1.30% otras normas). Además, ha constatado por su propia experiencia que la fisuración es muy escasa con estas cuantías.

Después intervino **D. Fernando Da Casa** (Departamento de Arquitectura de la Universidad de Alcalá). Manifestó: *“comparto la idea de D. Antonio Soriano de que el informe geotécnico no debería incorporar recomendaciones de diseño”, máxime, “cuando muy frecuentemente se desconoce el proyecto, suceso de difícil solución”*. Sin embargo, en su opinión, *“el informe geotécnico debiera incorporar un apartado de conclusiones que resaltara las particularidades del terreno, para facilitar el trabajo al proyectista de la edificación, con menos manejo en la interpretación de los resultados de los ensayos de laboratorio”*. A su juicio, el proyectista o arquitecto ha de interpretar tales particularidades para concebir la cimentación de la edificación.

En segundo lugar, advirtió de que hay un problema grave, a raíz de la obligatoriedad por parte de la CAM y el Colegio de Arquitectos de incluir un informe geotécnico en todo proyecto de edificación. Ésto puede dar lugar a situaciones como la que seguidamente narró, puesto que *“el colegio de Arquitectos se contenta con que se den 4 datos en el informe geotécnico”*. Señaló que *“de hecho, a mí me han aceptado un papel con “4 parámetros”, indicando que se habían efectuado una serie de reconocimientos, sin especificar cuáles; y sin embargo, me rechazaron un estudio geotécnico a base de catas y de pruebas de carga en el terreno”*.

Finalmente, apunto que sería interesante la publicación de unas recomendaciones con unos criterios para valorar la distribución o reparto de cargas entre el fuste y la punta en función del tipo de terreno, *“para que compañeros o técnicos no especializados en la materia o que quieran especializarse no caigan en el riesgo de hacer una valoración equivocada”*.

Contestó **D. Antonio Soriano** que *“el análisis de los datos geotécnicos permitirá decidir en un determinado pilote cuál será la resistencia por punta y cuál la resistencia por fuste”*. Indicó que, aunque él no había mostrado las fórmulas, sí lo había hecho Carlos Oteo para pilotes “in situ”, “las cuales son comunes y están claras”. En alusión a su ponencia previa, apuntó que *“cuando un técnico dispone de los datos geotécnicos de un solar, sabe en una estimación, cual es una resistencia y cual es la otra. Cuando se hace el análisis de la hinca, se puede suponer en primera instancia que toda la resistencia es por punta, sea la que sea, lo que dará una solución analítica; y esa solución es bastante buena. Pero si quiere considerar otra distribución, porque ya sabe que parte de esa resistencia va a ser por fuste durante la hinca, en base a su experiencia o a datos publicados, tienen que recurrir a otro procedimiento numérico y obtener otras curvas de hinca, pero, he de añadir, que son bastante parecidas. El tema de qué parte está por punta y qué parte está por fuste, en el proceso de la hinca del pilote es un dato importante, pero no el más importante y se puede tener en cuenta”*.

La siguiente participación corrió a cargo de **D. Antonio Santos** (Laboratorio de Geotecnia, CEDEX) quien aportó dos comentarios. El primero en relación a la concepción de los estudios geotécnicos y el segundo, respecto a la cuestión fuste-punta en pilotes, que a su juicio se presta bien a debate.

En relación al estudio geotécnico, señaló: *“aunque se habla del Informe Geotécnico, pudiera referirse con más propiedad a los Informes Geotécnicos. En obras públicas existe una secuencia (Proyecto de Factibilidad, Anteproyecto, Proyecto e incluso Proyecto Constructivo) que está muy marcada. En edificación parece que, de inmediato, se desemboca en la construcción del edificio”*. A su modo de ver, debería haber una fase preliminar, puesto que existe la figura del promotor, que *“ha de considerar sus inversiones desde el primer momento”*. En un núcleo urbano, este informe preliminar puede consistir básicamente en *“un mirar alrededor y ver lo que se ha hecho en zonas aledañas”*; en sitios más distantes o de más extensión, podría consistir en un reconocimiento preliminar del terreno.

Apuntó que en la fase de detalle del informe geotécnico, ha de conocerse, no sólo el proyecto de edificación, sino también las secuencias constructivas y las cargas previsibles a aplicar al terreno. Esto facilitaría el encargo de los ensayos de laboratorio pertinentes, especialmente en muestras intactas, que en la línea de lo expuesto por los ponentes, estos ensayos *“deben reproducir lo que uno espera que va a pasar”* y que, por tal motivo, este tipo de ensayos se han de incluir en esta fase.

En lo concerniente a la cuestión fuste-punta, Antonio Santos se ofreció a mostrar en algún momento de la Jornada una figura con un caso muy especial. Se trata de un pilotaje instrumentado y seguido durante 15 años, el cual pasó de trabajar inicialmente a tracción, a trabajar básicamente como pilote-columna (con el 80 % transmitido a la punta). Quiso poner de relieve el hecho de que los ensayos de carga en pilotes son ensayos “rápidos”. Seguidamente manifestó que ha presenciado ensayos de carga de pilotes que atravesaban rellenos, en los que no llegaba carga ninguna a la punta para las condiciones de servicio del pilote. Apuntó que su comportamiento es así, *“pero tan sólo en los primeros tiempos”*. Ahora bien, *“los terrenos tienden a asentarse; entonces, probablemente las cargas en el pilote tienden a descender en el tiempo”*. Al final de la 2ª Mesa Redonda, Antonio Santos completó sus comentarios con ayuda de la figura citada.

Siguió la intervención de **D. Juan Luis Ríos** (Pilotes Posada), quien manifestó que en la actualidad se ha pasado a una nueva situación administrativa a causa del Seguro Decenal, al cual se han incorporado las empresas de control. Cree que *“es el momento de hacer una reflexión, y tanto los Profesores Soriano y Oteo, así como otros compañeros, ya lo han adelantado, en el sentido de que tiene que hablarse ya de una mayor implicación de los técnicos en el diseño de las cimentaciones profundas”*. Añadió que *“hasta ahora, se hacían unos sondeos para el informe geotécnico, que el arquitecto desconocía”*. Entiende que el *“arquitecto o ingeniero, proyectista en general, debe implicarse mucho más en el sondeo, en el informe y en el proyecto de esa cimentación especial”*. Sostiene que esto ha de ser así, porque *“las empresas especialistas se ven inmersas en problemas donde no debieran de intervenir para nada; se nos demanda, por parte de técnicos de cualificación similar a la nuestra, que actuemos como proyectistas en lugar de constructores especialistas”*. Agregó que *“estamos dentro de una organización empresarial que se dedica a construir lo que teóricamente nuestros compañeros han diseñado y calculado”*. Hizo hincapié en que *“es un problema importante, por lo que hay que potenciar que existan de verdad proyectistas y calculistas de cimentaciones especiales, a los cuales los arquitectos han de acudir para que su proyecto sea coherente”*. Y así, *“los que nos dedicamos a construir, tengamos interlocutores o hablemos el mismo idioma cuando aparece algún problema concreto, para no abocarnos a hablar a veces con personas que desconocen lo que ellos mismos han firmado”*. Por último, señaló que *“cuando hay un problema real y se acaba en el juzgado, los jueces tratan de encontrar responsables, y en la mayor parte de las ocasiones las empresas nos vemos implicadas en estas situaciones; creo que nuestra implicación no corresponde a todo el conjunto del proceso de una obra de edificación”*.

El moderador, **D. Vicente Cuéllar**, agradeció esta intervención y señaló que había quedado muy clara la separación de papeles que **D. Juan Luis Ríos** solicita e invitó a **D. Antonio Soriano** a que respondiera.

**D. Antonio Soriano** señaló que se alegraba de que este asunto se pusiera de relieve, puesto que *“es una cuestión que me tiene quemado desde hace muchos años”*. Es partidario de que *“ha de especificarse claramente quién es el proyectista de la cimentación: si es el equipo que proyecta todo el conjunto, mejor; si ese equipo está cojo por que no tiene proyectista, ha de buscarlo desde el primer día”*.

Puede ocurrir que dicha empresa no tenga equipos de reconocimiento ni equipo de laboratorio, pero ha de encargarse de indicar qué reconocimientos han de hacerse, dirigirlos y responsabilizarse de sus resultados". Después viene el proyecto de la cimentación. En definitiva, "tiene que haber un proyectista con sus ayudas, un técnico que hace reconocimientos geotécnicos y ensayos de laboratorio (que puede encargarse a un segundo técnico) y tiene que haber claramente quien ejecute una obra que dé unas garantías de lo que le han mandado ejecutar, pero no algo que ha proyectado éste, o que ha medio-proyectado él". Propuso que "por pequeña que sea la obra, habría que mantener este esquema claramente" e incluso, piensa que "todo el colectivo está de acuerdo en esto; tan sólo hace falta ponerlo en marcha".

Posteriormente, **D. José Luis Rojo** (Rodio) preguntó a los ponentes de la mesa acerca de las perspectivas de la Normativa Española en relación a la europea, sobre cuál es la evolución de los Eurocódigos, y si creen que existirá influencia mutua entre las normativas.

**D. Carlos Oteo** respondió que veía muy mal la situación porque, a su juicio, la participación española en todo ese conjunto de cosas "está por los suelos". Indicó que existen dos grupos: por un lado, un comité de redacción del Eurocódigo, formado por José M<sup>a</sup> Rodríguez, Francisco Travesedo y Antonio Santos; Además, agregó que el Eurocódigo está estancado, aunque pendiente de aprobación, y añadió que los miembros españoles se opusieron a la aprobación, fundamentalmente por el tratamiento de los coeficientes de seguridad. El segundo grupo corresponde a los comités que participan en la redacción de normas de ejecución, que van acompañando los Pliegos. Oteo señaló que en estos temas "estamos completamente descolgados". Dijo que estos comités se encauzan a través de AENOR; que en concreto, él es el Presidente del Comité de Ejecución y que lo convocará en breve para disolverlo. Esto se debe a que no encuentran el menor apoyo de financiación para los viajes a Europa, y por tal motivo, lleva más de dos años parado. No obstante, AETESS ha intentado financiarlo, pero ha sido imposible. Concluyo que España no está interviniendo por falta de apoyo, y que la participación es nula. Apuntó que en el pasado se hacía bajo el patronazgo de las empresas del sector, hecho que en la actualidad se ha vuelto imposible.

**D. Vicente Cuéllar** discrepó de la intervención de D. Carlos Oteo. Afirmó que el CEDEX está haciendo una labor importante en ese sentido, de hecho, indicó que "no hay una reunión para la redacción del Eurocódigo que se convoque a nivel europeo, a la que no vaya un representante español, el cual viaja sufragado por el CEDEX y, en ocasiones, por AETESS en temas de normas de ejecución de obras geotécnicas". Como ejemplo citó a **D. José Manuel Martínez Santamaría** y otros representantes del CEDEX que han viajado a las reuniones de los comités. Otra cosa, indicó, "es que haya disminuido la actividad a nivel europeo".

**D. Carlos Oteo** apuntó que tal vez fuera exagerado calificar de nula la actividad, pero que quizá ésta se haya reducido al 20 % de la que había hace años.

A continuación, **D. Vicente Cuéllar** repasó sucintamente la intervención española en la redacción del Eurocódigo 7, que a su juicio, fue muy digna. Indicó que la delegación española manifestó su desacuerdo con el texto del Eurocódigo por considerar que contenía serias deficiencias. A pesar de ello, en el plazo de unos meses se reuniría el Pleno para aprobar definitivamente el texto. Además, invitó a D. Antonio Santos, presidente del Comité Español del Eurocódigo 7, a que comentase la participación española.

**D. Antonio Santos** indicó que, aunque se habían celebrado muchas reuniones, éstas eran "diálogos de sordos". Por su parte, Antonio Santos dijo que había promovido la formación de un subgrupo que englobara a los países mediterráneos, cuyos problemas son diferentes a los países que formaban el "núcleo duro". Ninguna de las propuestas que se formularon llegaron a término. Básicamente, se recibió como respuesta "que cada 5 años se revisaría el Eurocódigo, momento en el cual podrían hacerse las alegaciones pertinentes". Alertó de que, a su juicio, el Eurocódigo supone una amenaza para el proyectista, pues recoge una larga serie de consideraciones como Principios Fundamentales, que han de incluirse explícitamente en el proyecto de las cimentaciones. Esto conduciría a un proyecto eterno. Es más, en el caso de que pase algo "el proyectista se la carga". Lo ilustró con uno de los artículos,

que enuncia: *en el planteamiento de la cimentación se deberán tener en cuenta las construcciones futuras que la puedan afectar*. Pese a denodados intentos, no ha habido forma de modificar en el Eurocódigo 7 principios como el citado. Finalmente, anticipó que el Comité Español va a emitir un segundo voto negativo, lo cual desgraciadamente no cambiará las cosas, y definitivamente se aprobará el Eurocódigo. Invitó a los asistentes a la Jornada a que transmitieran todas sus reclamaciones al grupo español para presentarlo como complemento a sus alegaciones en las reuniones europeas.

**D. José María Herrador** agregó que Alemania y Austria también se han opuesto al texto del Eurocódigo 7. España votó en contra fundamentalmente por motivos de seguridad. La delegación alemana justificó su oposición también por motivos de seguridad, aunque en el fondo, dio la impresión de que su origen radica en su reticencia al empleo de normas que no sean DIN.

Expuso que *“partiendo del desarrollo de la práctica española en cimentaciones, la aplicación de determinadas combinaciones de coeficientes de seguridad parciales regulados en el Eurocódigo, puede llevar a situaciones inseguras; en cambio, el Eurocódigo reabunda innecesariamente en una larga lista de efectos a considerar en el diseño de las cimentaciones”*. Agregó que la complejidad de aplicación del Eurocódigo quedó patente con una encuesta de la ECCC (Asociación europea de cimentadores). Consistió en proponer el diseño de 10 cimentaciones sencillas, basándose en la interpretación que cada país hace del Eurocódigo. Al contrastar los resultados de los diversos países, se advirtió que las discrepancias eran brutales. Citó el ejemplo de una cimentación profunda en un terreno homogéneo de gravas; unos opinaban que era necesaria una longitud de pilote de 7 m, en tanto que otros, más de 20 m. Discrepancias similares aparecieron en tonelajes de anclajes y en pantallas.

**D. Antonio Santos** apostilló que, en definitiva, hay una Directiva Europea, que recuerda a los antiguos Decretos-Ley, porque es inamovible, y según la cual quedaría establecido el Eurocódigo como Norma Europea, con todo lo que eso conlleva.

*En este sentido, una consideración escrita de D. Fernando Da Casa señala que “ya que, como hemos visto, el Eurocódigo 7 no es la Normativa que se considera ideal para este campo, sería de gran interés desarrollar una especie de libro - manual - recomendaciones de la buena práctica constructiva para las cimentaciones especiales con la consideración de la problemática que puede aparecer, dirigido a evitar futuras patologías por problemas de diseño o ejecución. De mucho interés sería contar con casos prácticos problemáticos. En resumen, sería ir más allá del proceso teórico que ya conocemos con múltiple bibliografía. Se podría crear el compromiso de colaboración para esto por los presentes interesados. Pueden contar ya con nuestra contribución (en la medida de nuestro conocimiento y experiencia docente).”*

La última intervención corrió a cargo de **D. Hernán Patiño** (Alumno colombiano del Máster Internacional de Mecánica del Suelo e Ingeniería de Cimentaciones del CEDEX). En relación a los pilotes hincados, que generan un desplazamiento horizontal, se refirió a los suelos muy blandos, de resistencia a la compresión simple máxima de 1 T/m<sup>2</sup>, propias de las arcillas de Bogotá. Expuso que hay dos creencias encontradas: la primera, que a largo plazo la consolidación de la arcilla que circunda al pilote hincado puede aumentar su capacidad de carga; y la segunda, que postula que la hinca destruye la estructura de la arcilla, por lo que a largo plazo puede peligrar su capacidad. Dicho esto, preguntó a los miembros de la mesa si tenían alguna experiencia al respecto.

**D. Carlos Oteo** respondió que es difícil, al menos en España, encontrar terrenos tan blandos. El caso más parecido son las marismas de Huelva, con resistencias ligeramente superiores. Allí se experimentó que al poco tiempo de hincar pilotes cortos, éstos se hundieron. En efecto, afirmó que existe el remoldeo, esto es, la alteración de la estructura de la arcilla. En definitiva, el terreno se cuelga del pilote por rozamiento negativo e hinca al propio pilote. Esto también sucede con las arcillas de Santander y las arcillas de Noruega. La práctica habitual consiste en hincarlos hasta que se apoyen en un sustrato competente; además se suele tener la precaución de entubarlos y seleccionar el mayor diámetro posible para soslayar en cierta medida el efecto del rozamiento negativo.

Cerró esta primera mesa redonda **D. Vicente Cuéllar**. Agradeció la participación de todos los asistentes y anunció la segunda mesa redonda, que comenzaría tras una pausa.

## CONTESTACIÓN DE LAS PREGUNTAS FORMULADAS POR ESCRITO

Aparte de las cuestiones debatidas durante la primera mesa, se formularon otra serie de preguntas por escrito y fueron contestadas por los ponentes a posteriori, las cuales se recogen a continuación.

Nombre: **D. Manuel Beteta** (AEPO)

Pregunta:

En la formulación presentada para la resistencia por fuste en arcillas se corresponde con cálculos a “corto plazo”. Si los suelos mayoritarios que existen en España son “duros” (margas, yesos, limolitas, ...), ¿no deberían calcularse en presiones efectivas?

Respuesta de **D. Carlos Oteo**:

El empleo de parámetros a “corto plazo” en arcillas duras es habitual por la facilidad de realizar ensayos de compresión simple y obtener la cohesión sin drenaje (suponiendo que el rozamiento sin drenaje es cero, lo que no es cierto en un material preconsolidado), lo cual queda del lado de la seguridad. Además, muchos de estos suelos no están saturados, lo que obligaría a estudiarlos en tensiones efectivas, pero como si fueran semisaturados. Razones por las que se acude a las simplificaciones indicadas. De todas formas, si se dispone de parámetros a largo plazo, se pueden calcular los pilotes teniendo en cuenta la cohesión y rozamiento efectivos (ver Geotecnia y Cimientos II, de Jiménez Salas y otros).

Nombre: **D. Raúl Sainz Gómez** (Laboratorio de Ensayos Navarra, S. A.)

Pregunta:

Ruego que se amplíen las cuestiones de diseño al caso de acciones horizontales en el encepado: cargas admisibles y asientos.

Respuesta de **D. Carlos Oteo**:

Dado el tiempo disponible, no hemos entrado en estas cuestiones que, en edificación, no suelen tener transcendencia. De todas formas, en “Geotecnia y Cimientos III”, libro dirigido por el difunto Profesor Jiménez Salas, hay varios capítulos (del propio Jiménez Salas y míos) que tratan sobre estos temas, incluyendo sistemas de cálculo simplificados (para cargas horizontales, muy utilizados en España desde hace casi 30 años) y diversos métodos y ábacos para estimar asientos en pilotes.

Respuesta de **D. Antonio Soriano**:

El proyecto de cimentaciones de edificios con pilotes hincados sometidos a esfuerzos horizontales es un caso frecuente. Las acciones horizontales normalmente son las debidas al viento y al sismo. Estas cargas han de distribuirse entre los pilotes. Existen procedimientos más o menos complejos en la literatura técnica que deben usarse según la complejidad del caso. Primero se deben determinar los esfuerzos en cabeza, que suelen ser los más críticos. Después, en la zona enterrada del pilote. La comprobación de la seguridad debe hacerse como en cualquier otro cálculo estructural.

Cuando las cargas horizontales son especialmente importantes, puede pensarse en la colocación de pilotes hincados.

La carga horizontal admisible debe fijarse, no sólo considerando la capacidad estructural que se necesita en el pilote para transmitirla al terreno, sino también considerando la propia capacidad del terreno para soportarlas.

Tanto el cálculo estructural como el cálculo de presiones horizontales en el terreno pueden hacerse siguiendo las recomendaciones que se dan en la ROM 0.5 (Puertos del Estado) o en la guía de "cimentaciones de carreteras" (Dirección General de Carreteras) o en muchos otros textos (Geotecnia y Cimientos; Editorial Rueda).

Los asientos admisibles en edificios suelen establecerse en varios aspectos: asientos totales, asientos diferenciales y, en edificios altos, inclinaciones. Existen normas de buena práctica que indican valores admisibles de esos parámetros. Su transcripción aquí sería larga.

Aprovechando la contestación a esa pregunta, se quiere hacer mención expresa de un tipo de cimentación en ocasiones interesante. Es la cimentación de edificios sobre losas pilotadas. Siendo este tipo de cimentación relativamente novedoso, es posible que en su proyecto se puedan cometer algunos errores. Para que el lector de estas notas no cometa algunos de los conocidos por el autor, quieren mencionarse algunos que simultáneamente ha encontrado en el proyecto de una de estas cimentaciones.

Se trata de una estructura cimentada con pilares espaciados entre sí 7 m y que, según el ingeniero que sugirió el tipo de cimentación, podría soportar distorsiones angulares (asiento diferencial dividido por distancia) del orden del uno por mil. Este valor parece muy exigente, pues es frecuente admitir valores de incluso el doble. Pero ese no es el error que se quiere comentar.

Al calcular el uno por mil de 7 m, el ingeniero obtuvo 7 cm y ese sí es un error grave. Siguió el ingeniero argumentando que el asiento diferencial suele ser del orden de la cuarta parte del total, lo cual es una hipótesis razonable, para concluir que la estructura podría asentar 28 cm.

No hay que saber mucho sobre asientos admisibles para comprender que ese asiento es demasiado alto y salvo circunstancias muy especiales, no debe admitirse.

No se sabe qué asiento esperaba el ingeniero para la cimentación en losa sin pilotes, pero debía ser incluso mayor que el indicado porque recomendó que se hincasen pilotes y que la losa se apoyase sobre sus cabezas.

El segundo error fue la disposición de los pilotes, pues se decía que se colocaran con espaciamientos de 3.5 m, la mitad que la separación de pilotes. Uno bajo cada pilar y otro en el centro de cada cuadrado de losa, entre los pilares. Es difícil que una losa soporte una carga concentrada en su punto medio. La recomendación implica una falta de sensibilidad al cálculo estructural importante.

El tercer error, quizás el más llamativo, es el procedimiento de cálculo de la carga que actuaría en los pilotes. En estos casos es imprescindible un cálculo conjunto losa-terreno-pilotes. Partiendo de la carga total, debe hacerse un reparto que no es evidente. En este caso, el proyectista decidió que lo único necesario era imponer a la cabeza del pilote un desplazamiento de 28 cm y concluir que la carga necesaria en su cabeza era, lógicamente, la carga de hundimiento. Con el número de pilotes dispuesto y con la carga estimada en los mismos, la carga total correspondiente (cálculo que no llegó a realizar el ingeniero) superaba en varias veces el peso total del edificio y sus sobrecargas.

Lógicamente el proyectista de la estructura nunca siguió esta serie de recomendaciones.

Las cimentaciones mixtas de edificios mediante losas pilotadas en las que se cuenta con la colaboración de ambos elementos (reacción del terreno bajo la losa y cargas sobre los pilotes) es un tema suficientemente complejo que no puede abordarse con ligereza.

Nombre: **D. José Miguel Solas Alados** (TRACIM, S. L.)

Preguntas:

a) Longitud mínima de pilotes según el tipo de subsuelo

- b) Empotramiento mínimo en roca
- c) Pilotes CPI-4: Longitud mínima de entubación

Respuesta de **D. Carlos Oteo:**

a) Es habitual considerar una longitud mínima de 3 diámetros como “empotramiento” en la capa consistente de apoyo, tras atravesar los terrenos flojos que han llevado al diseño del pilotaje. Pero esa longitud no es más que una indicación. Según los criterios del Laboratorio de Delft debería ser de un mínimo de 3 ó 4 D en arenas y 8 D en arcillas, a fin de movilizar la resistencia de punta (y además, lo que sea necesario para movilizar la resistencia de fuste adecuada para absorber la carga exterior).

b) Aunque también suele hablarse de 3 D, la realidad es que en rocas de calidad hemos buscado un buen apoyo de la punta y hemos introducido el pilote (0.5 a 1) D, siempre que el sistema de perforación no altere considerablemente la roca (por ejemplo, con rotación). Entre esas cifras debe establecerse dicho empotramiento, pero, insistimos, teniendo en cuenta la roca (su naturaleza, fracturación, etc.) y el sistema de perforación.

c) La entubación se coloca para sostener las paredes del terreno, mientras se perfora, con lo que su longitud debe ser tal que salve toda la zona floja. Como los módulos de tubería suelen ser de 6 m, a veces se entuba esta magnitud y se continúa la excavación, pero ello es posible si por debajo hay terreno estables.

Nombre: **D. Hugo Carrión Moreno**

Pregunta:

¿Las tolerancias que fijan los criterios de aceptación de los pilotes prefabricados, más restrictivas que las de los pilotes normales deben ser independientes de la situación final de los mismos, o se debería analizar cada caso concreto?

Respuesta de **D. Antonio Soriano:**

Las tolerancias que fije el pliego de condiciones particulares de la obra para aceptar la posición final de un pilote hincado deben entenderse como aquellas que conducen a la situación segura. En muchas ocasiones se hará referencia a algún pliego común donde se fijen esas tolerancias. Pero siempre es posible en un determinado proyecto, establecer justificadamente otros límites de aceptación más o menos amplios. Y también es posible, dentro de un proyecto y en función de las circunstancias especiales de un determinado apoyo, modificar puntualmente las condiciones de aceptación. Esto último exigiría un recálculo de la cimentación considerando las desviaciones realmente ocurridas.

Nombre: **D. Enrique Gómez Berlínches** (Laboratorios I.C.I. Madrid, S. L.)

Preguntas:

- a) Hasta llegar a la conclusión del uso de pilotes, ¿quién o qué entidad (oficina técnica de control, aseguradora, laboratorio, etc., ...) es la que debe decir los ensayos a realizar en el estudio geotécnico?
- b) ¿Por qué no hay una unificación de criterios a la hora de pedir los ensayos que debe llevar un estudio geotécnico? (sobre todo en la edificación a pequeña escala o a nivel de particulares: chalets, viviendas unifamiliares, etc., ...).

Respuesta de **D. Antonio Soriano.**

- a) Es evidente que esa decisión la ha de tomar el proyectista del edificio. Él es el responsable de la

calidad del proyecto. Para ello, si su experiencia no fuera suficiente, debe asesorarse de un técnico que la tenga.

- b) No es fácil unificar criterios en cuanto a qué ensayos deben realizarse. En esta Jornada se ha hablado algo de ello. En las recomendaciones ya publicadas (NTE, por ejemplo) se dan ideas. Es previsible que, en el futuro, existan más detalles, más normativas, en este aspecto, pero no ha de esperarse que exista una solución única, estándar. El reconocimiento necesario depende de muchos factores específicos de cada solar concreto.

Nombre: **D. Christof Reinert** (Münchener Reaseguro)

Pregunta:

Situación actual del nuevo código técnico de la edificación (CTE); ¿De qué manera abarca el nuevo CTE el tema de la cimentación, más concretamente, la cimentación profunda?.

Respuesta de **D. Vicente Cuéllar** (Director del Laboratorio de Geotecnia, Presidente de la SEMSIG)

El esquema general del estudio para la elaboración del Código Técnico de la edificación se basa en el trabajo coordinado entre las distintas administraciones públicas, particularmente las de la Administración General del Estado, instituciones y equipos de especialistas, dirigido por la Dirección General de la Vivienda, la Arquitectura y el Urbanismo del Ministerio de Fomento y con el soporte de una estructura de trabajo creada a tal efecto.

La estructura del Trabajo arranca de un comité para el desarrollo del Código Técnico de la Edificación. Este comité, participado por la Dirección General de la Vivienda, la Arquitectura y el Urbanismo y el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, será durante todo el proceso, el máximo responsable de las decisiones relacionadas con la elaboración del Código.

De dicho comité depende un grupo de coordinación, participado igualmente por el Ministerio de Fomento, el Instituto Eduardo Torroja y representantes de las comunidades autónomas a través de la Comisión Técnica para la calidad de la Edificación.

En lo que se refiere al tema de cimentaciones, el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, elaborará, a petición del Instituto Eduardo Torroja, un programa de trabajo con el fin de poder presentar a finales del presente año un borrador que se pueda discutir a nivel de comités de expertos, ingenierías y constructoras con el fin de que el Ministerio de Fomento pueda publicar la primera versión del Código en mayo del 2002.

En dicho borrador se tratarán desde un punto de vista metodológico los siguientes aspectos:

- I). Resistencia última de cimentaciones superficiales, profundas y semiprofundas
- II). Cálculo de asentos de cimentaciones superficiales, profundas y semiprofundas
- III). Empujes sobre muros
- IV). Estabilidad de excavaciones
- V). Coeficientes parciales de seguridad

# ***Hélice continua con Registro de Parámetros***

**Jacques Heili**  
**Ingeniero Civil**  
**RODIO**

En edificación la tipología de pilotes “In situ” más utilizada son los pilotes de hélice continua, pilotes a rotación en seco, pilotes con lodos o con entubación provisional. Los diámetros suelen oscilar entre 350 mm y 1000/1200 mm.

Los problemas que se presentan generalmente están asociados con el control de calidad durante la ejecución de los mismos, ya que es un tema no siempre bien resuelto.

## **1. El Pilote STARSOL**

El sistema “STARSOL” para ejecución de pilotes. Este pilote ha sido desarrollado dentro del grupo Soletanche- Bachy al que RODIO pertenece. Los objetivos de partida del nuevo pilote, que debía tomar en lo posible los puntos fuertes de los tipos anteriores intentando reducir sus puntos débiles.

- Utilizar el principio de la barrena continua que tiene una ventaja significativa respecto a entubados y lodos en términos de rendimientos.
- Para atravesar capas duras o empotrarse en las mismas se recurre a aumentar el par motor de la maquinaria. Además se coloca un útil de corte bajo el eje que solucione el ángulo muerto de ataque de la barrena continua tradicional, donde se suele colocar el tapón perdido.
- Para mejorar la calidad del hormigonado se recurre a un tubo interior a modo del sistema “tremie” muy contrastado por la práctica.
- Asimismo, y para que el nuevo procedimiento sea económicamente competitivo frente a los anteriores mejorando el rendimiento, se parte de maquinaria más potente y más compacta que la usual, consiguiendo un incremento de las dimensiones del pilote (empotramiento y/o diámetro) con pequeña merma de la velocidad.
- El último aspecto en el que se avanza es en el control de calidad, tanto durante la perforación como en el hormigonado.

Los elementos principales que forman este equipo son:

- Un equipo portante (grúa) equipado con un grupo hidráulico (power pack)
- Un mástil guía.
- Una cabeza de rotación hidráulica.
- Una barrena continua fija alrededor de un primer tubo exterior.
- Un segundo tubo central, con desplazamiento por el interior del primero.
- Un sistema de gatos que permite desplazar verticalmente el tubo central con respecto al tubo exterior con un recorrido relativo máximo de metro y medio.
- Un ordenador que controla una serie de captadores que registran las operaciones de perforación y hormigonado.

Se han diseñado equipos que ejecutan diámetros comprendidos entre 0,55 y 1,00 m. La profundidad máxima que se puede alcanzar con la maquinaria actual es de unos 30 – 32 m y la potencia total instalada es del orden de unos 200 C.V.

## **2. EL Proceso de Ejecución del Pilote STARSOL**

La ejecución de un Pilote STARSOL sigue la siguiente secuencia:

### *1. Perforación*

Con los gatos completamente estirados, el útil piloto del tubo central contiene completamente al tubo interior, del que sólo sobresale el útil de ataque al final de la barrena. Durante la perforación giran conjuntamente penetrando en el suelo.

La existencia de útiles de corte sobre la superficie de ataque (contrariamente a la barrena clásica) y el par motor de la maquinaria permiten atravesar capas con resistencia a la compresión de hasta 20 Mpa según la naturaleza del material. Cuando se alcanza la profundidad requerida se detiene la rotación.

### *2. Comienzo del hormigonado.*

Actuando sobre los gatos se eleva el conjunto barrena, cabeza de rotación y tubo exterior unos pocos centímetros, respecto a la posición de la piña de perforación que mantiene su posición.

En el ascenso, el tubo exterior descubre dos ventanas alojadas en el tubo central. Por estas ventanas, se empieza a bombear hormigón a presión.

Cuando se observa una subida de presión, se continúa levantando el conjunto barrena, cabeza de rotación y tubo exterior hasta cerrar completamente los gatos.

El hormigón continúa bombeándose por el tubo central, que se comporta como un verdadero sistema tremie. La distancia entre la base del tubo sumergido y la base de la barrena alcanza su valor máximo de 1,50 m cuando los gatos alcanzan su longitud mínima.

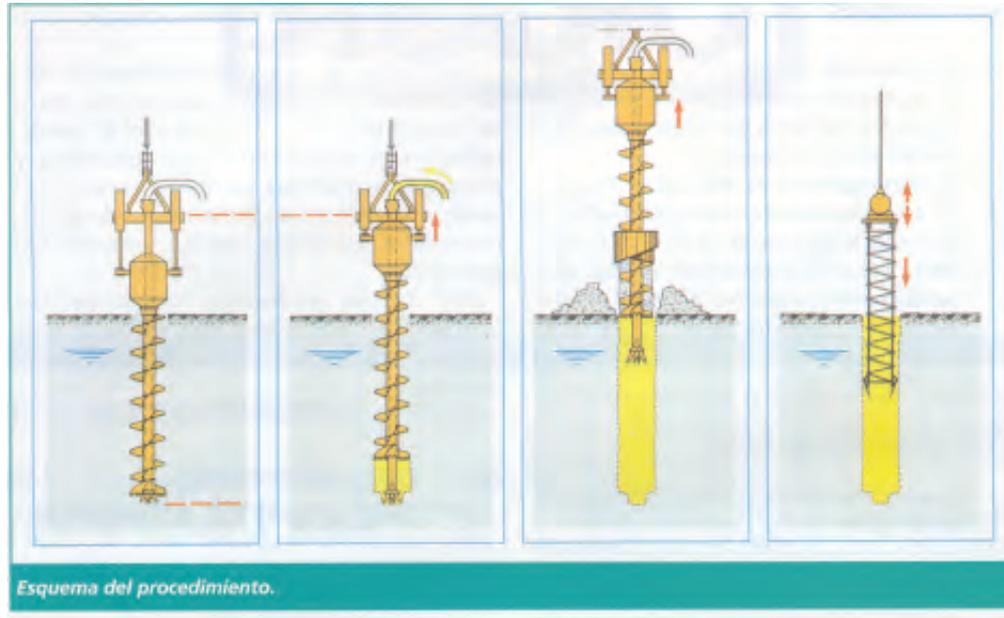
Una vez cerrados completamente los gatos, la elevación de la cabeza, la barrena y los dos tubos es simultánea, desplazándose conjuntamente respecto al mástil guía.

La correcta ejecución del proceso de hormigonado está asegurada por el sistema “tremie” en el que el aporte de nuevo hormigón se realiza a través de las ventanas siempre en el seno del hormigón ya bombeado, y los detritos que puedan desprenderse durante la elevación de la barrena se mantienen siempre sobre la superficie del hormigón subiendo con ella. El descabezado del pilote elimina este hormigón contaminado.

Además se establece un control permanente de la presión y volumen de hormigón. El control permanente de la presión permite asegurar que no hay cortes en la sección. La aplicación continua de presión produce en los suelos malos un aumento del diámetro efectivo de los pilotes. En cualquier suelo el efecto de la presión asegura la continuidad del contacto entre el hormigón y el suelo a lo largo del fuste mejorando el rozamiento lateral. El control automático del volumen inyectado y su comparación instantánea con respecto al teórico por observación directa en una pantalla sita en la cabina del maquinista permite detectar en tiempo real la aparición de problemas como cavidades o grietas, la identificación precisa de en qué cota se producen y proceder, si fuese necesario, a su reparación repitiendo el tramo de pilote cuestionado mediante reperfusión y reinyección.

### 3. Colocación de las armaduras

Una vez hormigonado el pilote se coloca la armadura en jaulas. Ocasionalmente se puede utilizar un sistema de vibradores que se ha puesto a punto para facilitar la colocación de mayores longitudes ayudando a la naturaleza del hormigón convenientemente aditivado.



### 4. Controles durante la ejecución del STARSOL

En la actualidad los controles de calidad durante la perforación y hormigonado para los sistemas expuestos son inexistentes en la barrena continua y se limitan a llevar un control del volumen del hormigón real con relación al teórico y éste dependiendo de la cota estimada en hormigonado.

Después del hormigonado son comunes para cualquier tipo de pilote incluido el STARSOL los siguientes controles:

- Ensayos de ultrasonidos
- Ensayos de impedancia mecánica
- Testificación continua

Los ensayos de carga son excepcionales por su elevado coste económico; en general, se utilizan más para conocer y/o comprobar el comportamiento del terreno o como verificación en casos en que se reducen los coeficientes de seguridad.

En cualquier caso, se trata de controles a posteriori cuando el hormigón ya ha endurecido. Cuando se detectan anomalías, es siempre delicado establecer un buen diagnóstico sobre las causas, sobre la importancia del defecto y sobre las consecuencias en la capacidad portante. Tienen como objetivo validar pilotes (o series de pilotes), y en caso de no aprobarse, debe sustituirse el pilote rechazado por otro/s de acción equivalente.

El principio del sistema **ENBESOL** (utilizado en la ejecución de los pilotes STARSOL) es asegurar el control de calidad durante la ejecución y no después. El control comienza con la perforación. Durante el descenso de la barrena se mide la velocidad de avance y la potencia utilizada; durante la retirada de la barrena se mide la presión del hormigón y su volumen. Todas las medidas van relacionadas con

la profundidad. Si, con la información suministrada para cada pilote, se observa algún comportamiento inadecuado o dudoso, se identifica este problema en tiempo real y localizado con precisión entre dos cotas, y en caso necesario se puede repetir el tramo de pilote afectado.

Una serie de sensores tienen la misión de captar los datos físicos esenciales y transmitirlos a un ordenador que los transforma en datos numéricos y los trata inmediatamente. La salida de los datos se refleja tanto en valores numéricos como en forma de curvas y se exponen delante del maquinista.

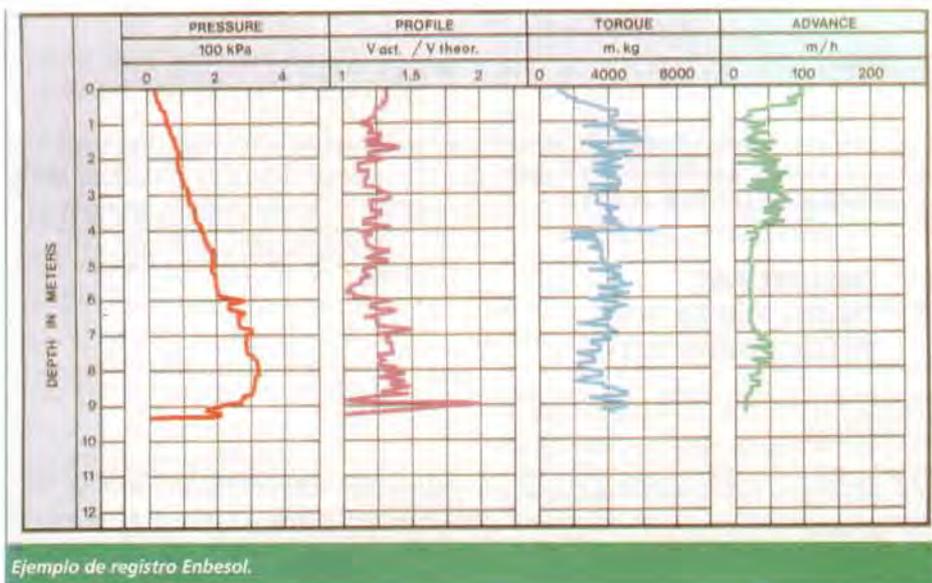
Durante la perforación la velocidad de perforación junto con la medida del par de rotación asociado a cada profundidad dan una idea de la dureza de las capas atravesadas.

Con estos datos se pueden detectar las cotas de cambios de capas que tengan comportamientos mecánicos diferentes (asegurar una longitud de empotramiento definida en proyecto) apoyando con medidas objetivas a la apreciación subjetiva del especialista. Además la posibilidad de listar los datos permite comprobaciones y análisis posteriores.

Durante la elevación de la barrena se mide el volumen de hormigón. Un programa incorporado relaciona los volúmenes reales medidos con los teóricos y lo refleja en una curva fácil de leer. El especialista sabe que debe estar siempre con una relación superior a 1 (de 1,15 a 1,20), y que debe evitar los saltos bruscos en la curva de hormigonado, pues es el que maneja la retirada de la barrena.

Igualmente durante el proceso de hormigonado, la presión de inyección del hormigón debe ser positiva, pues significa que la columna interior está llena de hormigón; sólo al comienzo del hormigonado, la presión del hormigón bombeado puede ser negativa.

El **ENBESOL** proporciona cuatro curvas que constituyen la ficha de ejecución de cada pilote.



## 5. Conclusiones

En los dos años que aplicamos esta técnica en España hemos realizado alrededor de 10 obras con éxito (en algunas de ellas se han realizado pruebas de carga).

Asimismo, el CEDEX ha realizado una prueba de carga muy instrumentada, con el fin de confirmar todo lo expuesto anteriormente. Esta prueba fue realizada en Marzo de 1.999 y transcribimos literalmente sus principales conclusiones:

*“Los pilotes efectuados por el procedimiento patentado STARSOL representan una mejora importante en relación con el control de calidad de ejecución en comparación con los pilotes tradicionales efectuados mediante barrena continua.*

*El procedimiento permite efectuar un seguimiento continuo de parámetros de perforación y hormigonado. Por otro lado la potencia de los equipos empleados permite incrementar la velocidad de perforación en comparación con otros equipos tradicionales limitando la degradación y descompresión del terreno próximo al pilote.*

*Pueden resaltarse las siguientes conclusiones en relación a la prueba de carga efectuada para estudiar la resistencia estructural de estos pilotes:*

- El pilote ha presentado una rotura estructural en cabeza bajo una tensión vertical de 231.9 Kp/ cm<sup>2</sup>, similar a la resistencia característica del hormigón empleado (250 Kp/ cm<sup>2</sup>). La rotura se ha producido en la zona superior libre del pilote, no habiéndose producido zonas de debilidad en el mismo.*
- A ese nivel de tensiones presenta un margen de seguridad importante tanto por fuste como por punta. Esta última parece haberse movilizado en un porcentaje muy reducido, y en relación con la resistencia por fuste, únicamente la mitad superior del pilote parece estar próxima al agotamiento.*
- Las tensiones cortantes movilizadas en el fuste del pilote son muy elevadas, alcanzando valores superiores a 2-3 Kp/cm<sup>2</sup> sin haber alcanzado los valores límite.*

*Los estudios realizados confirman el buen comportamiento de estos pilotes. Dada la importante mejora en el control de ejecución de estos pilotes con relación a los pilotes de barrena continua tradicionales, consideramos que los pilotes efectuados por este procedimiento podrían dimensionarse considerando resistencias estructurales superiores a las habituales para este tipo de pilotes, con las consideraciones que se recogen en el capítulo 6 (...60 Kp / cm<sup>2</sup> ...) del presente informe”.*

## **DESCRIPCION DE UNA OBRA EJECUTADA CON ESTE TIPO DE PILOTES: CIMENTACION DE UN TANQUE CRIOGENICO EN TARRAGONA.**

El proyecto contemplaba la cimentación un tanque criogénico para almacenamiento de gas propano. Las bajas temperaturas hacen a los materiales muy frágiles y por tanto con muy poca tolerancia a asientos diferenciales. El diámetro era de 65 m e imponía la necesidad de garantizar el comportamiento estricto y uniforme de la cimentación que, por su área, implicaba perfiles sensiblemente diferentes.

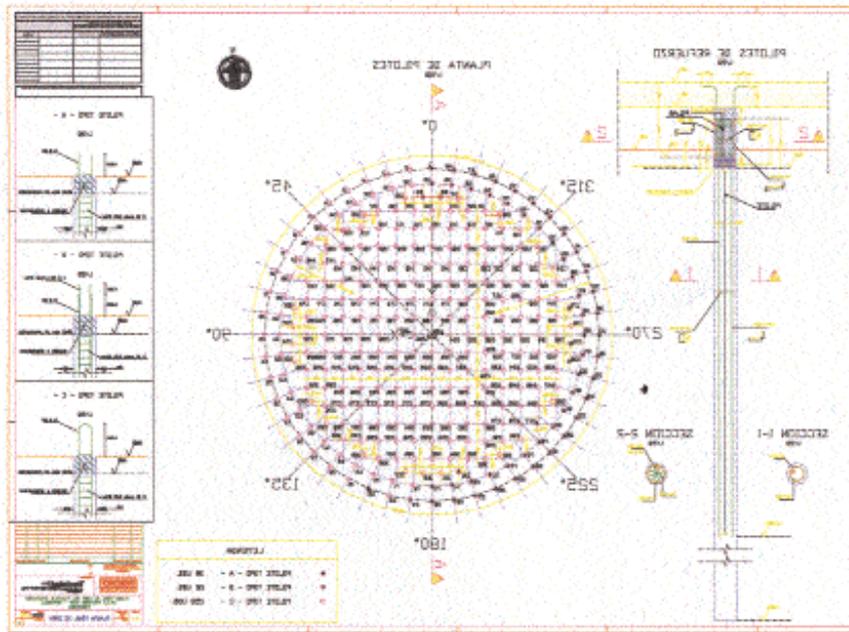
RODIO colaboró con la Ingeniería en el desarrollo del proyecto y de sus especificaciones de control.

Consistió básicamente en la ejecución de 313 pilotes tipo STARSOL <sup>3</sup> 620 mm de **28 m** de profundidad dispuestos como recoge el plano adjunto.

El corte de suelo genérico estaba representado por:

- una capa superior de arenas y gravas con bolos ocasionales y SPT de 8 golpes, de espesor 4 m
- bajo ésta aparecía una capa de limos de 2 m de potencia y bajo ésta otra de fangos de 2 m, ambas con golpes del orden de 1- 3 golpes.
- A partir de los 8 m de profundidad existía una capa de 9 m de arenas más densas (golpeo SPT entre 16 y 30 golpes) con intercalaciones centimétricas de gravas cementadas.
- Por debajo aparecían las margas, que se muestrearon hasta los 50 m, con grados de alteración diferentes, que daban lecturas de la  $q_c$  en el piezocono de entre 5 y 30 Mpa.

En producción real se invirtieron 32 días naturales, lo que ha significado un rendimiento industrial de  $313 / 32 = 9.78$  pilotes/ día ó **274 m por turno.**



Plano de la cimentación



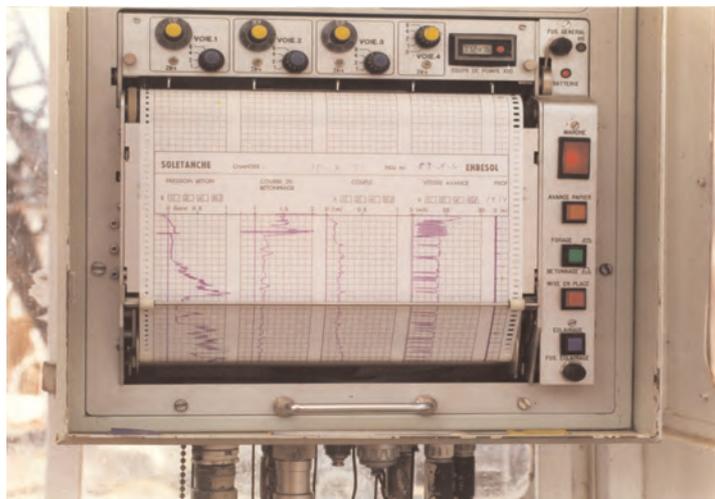
Equipos trabajando en obra



*Detalle del tubo de hormigonado*



*Detalle de la cabina con el monitor*



*Registrador de parámetros Enbesol*

# *Prefabricados*

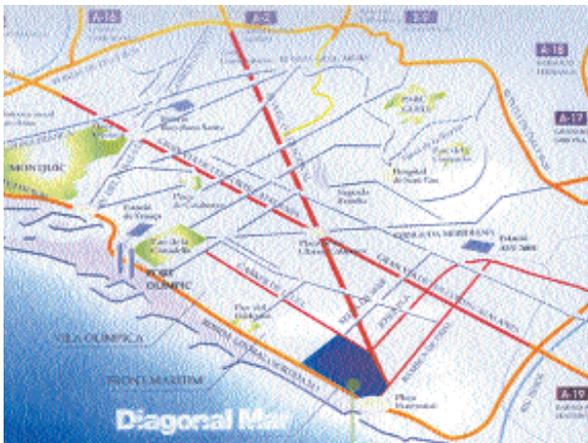
**Jorge Montemayor García**  
**Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos**  
**Director Filial Cimentaciones**  
**TERRATEST TÉCNICAS ESPECIALES, S.A.**

## 1. INTRODUCCIÓN

Como ejemplo de la aplicación de la técnica de los pilotes prefabricados en la construcción se comenta a continuación el caso de la Cimentación mediante pilotaje prefabricado de un Conjunto Residencial y Centro Comercial en Diagonal Mar (Barcelona).

### 1.1 Ubicación. Entorno

El solar objeto de las obras ejecutadas se sitúa al Nordeste de Barcelona, en la margen derecha del Río Besós, tiene forma triangular, de unos 13.000 m<sup>2</sup> de superficie y se encuentra situado entre las calles Josep Plá y Taulet, denominándose Illa de Llac.



Se encuentra englobado dentro del Plan de Promoción urbanística denominado Diagonal Mar, promovido inicialmente por las inmobiliarias HINES y el GRUPO HABITAT, situándose adyacente al Centro Comercial en construcción (en el momento de la ejecución de las obras, otoño 1999, se encontraba en fase de excavación máxima a la cota  $-18'00$  m.), donde se ha ejecutado una pantalla perimetral continua anclada como contención de la excavación y se ejecutaron, igualmente y simultáneamente a la ejecución de los trabajos que se describen, pilotes prefabricados hincados para la cimentación central del mismo.

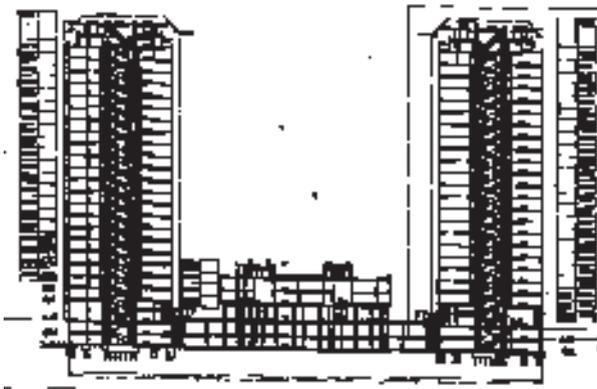


Cualquier solución de cimentación debía tener en cuenta la proximidad a dicha pantalla en fase máxima de excavación y la posible afección a los anclajes que arriostraban la misma.

## 1.2. Tipología de Edificación

Las estructuras del complejo residencial están conformadas por dos torres de 26 forjados y cubierta, gemelas de gran esbeltez (planta de 35 x 25 m.), cuatro edificios continuos con 10 forjados de altura y zona de dos forjados con planta sótano.

La solución estructural de las torres se ejecutó en base a hormigón armado de alta resistencia H-500, estando los esfuerzos pésimos recogidos por unas pantallas centrales ubicadas en el núcleo de escaleras y ascensores que transmiten una carga global de unas 7.500 Tons., recogiendo el resto de los pilares (20), cargas entre 800 y 1.000 Tons.



A cota de cimentación se encuentran confinadas por un muro continuo estanco de hormigón armado, que suponía una sobrecarga de 9 T/MI., situado a unos 3'0 m. por debajo del Nivel Freático.

Los edificios de 10 plantas siguen idéntica filosofía estructural con cargas transmitidas en base de encepados obviamente muy inferiores, si bien su magnitud hacía necesaria la ejecución de una cimentación profunda, que se resolvió igualmente mediante pilotes prefabricados.

Respecto a los edificios de 2 plantas, cuya cota de cimentación se mantiene uniforme con el conjunto, se resolvieron geotécnicamente mediante losa de cimentación. Todos los cálculos estructurales fueron realizados por D. Jesús Jiménez (NB-35).

El Centro Comercial, de forma triangular y una superficie aproximada de 40.000 m<sup>2</sup>, consta de 5 sótanos (la losa del último se sitúa a la cota -16,50 m), que implicó la realización de un recinto estanco mediante pantallas empotradas en el estrato profundo impermeable.

La cimentación de la zona central (interior) del edificio se resolvió mediante pilotes prefabricados hincados.

## 1.3. Características Geotécnicas

La información geotécnica disponible se remonta a varios estudios geotécnicos realizados desde el Año-92, tomándose para la ejecución de la obra el estudio encargado al efecto a la empresa JOLSA, que participó además como Asistencia Geotécnica de los trabajos.

Los materiales existentes corresponden a un potente depósito de suelos cuaternarios de origen deltaico con diversos ambientes sedimentarios, desde típicamente fluviales o aluviales hasta claramente litorales, extendiéndose hasta 50 ó 60 m. de profundidad, recubriendo el sustrato impermeable margarcilloso.

Superficialmente aparece un relleno arenoso del orden de 1 m. de potencia apareciendo, por debajo, tres estratos claramente diferenciados:

### ESTRATO SUPERIOR ARENOSO PRÁCTICAMENTE SIN FINOS:

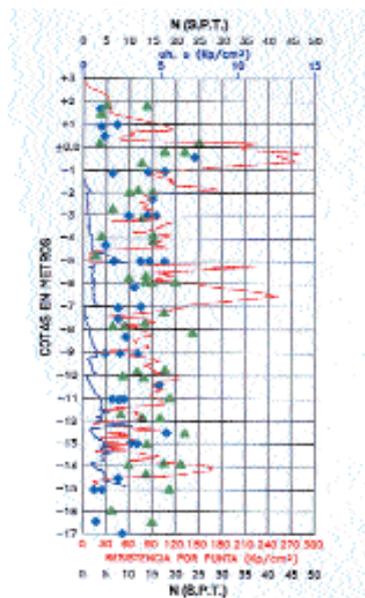
Se trata de arena fina de media a bien graduada, de compacidad floja o medianamente densa con valores N de S.P.T. variables entre 4 y 17, con una potencia de unos 8'0 m.

### ESTRATO INTERMEDIO ARENOLIMOSO O LIMOARENOSO CON NIVELES LIMOARCILLOSOS INTERCALADOS:

Dichos niveles son en general milimétricos o centimétricos, aunque en ocasiones alcanzan potencias mayores, la potencia total de dicho estrato de unos 25'0 m., mayoritariamente se trata de arena fina limosa con una elevada dispersión de valores de SPT (variables de 5 a 20) aunque bajo la cota -18 se encuentran valores superiores a 20. Respecto a las intercalaciones de limos arcillosos, aparecen en forma de lentejones con potencia centimétrica y consistencia moderadamente firme ( $C_u$  variable de 0'40 a 0'45 Kg/cm<sup>2</sup>).

### ESTRATO INFERIOR DE GRAVA ARENOSA:

Se trata de un potente depósito de gravas arenosas de compacidad medianamente densa y muy densa con valores de SPT variables de 20 a 60 golpes, encontrándose a partir de las cotas -28 a -31 m.



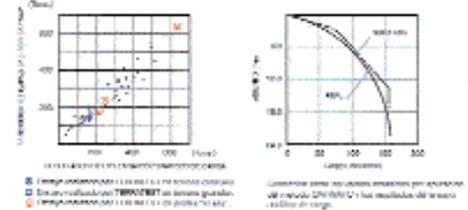
## 1.4. Selección de Alternativas: Pilotaje Prefabricado

Dentro de las diferentes opciones se evaluaron como posibles la ejecución de pilotes "in situ" de gran diámetro, la ejecución de módulos portantes realizados al amparo de lodos tixotrópicos, pilotes de barrena continua y la ejecución de pilotes prefabricados hincados.

Los parámetros resistentes del terreno que se adoptaron para el cálculo dentro de cada estrato fueron:

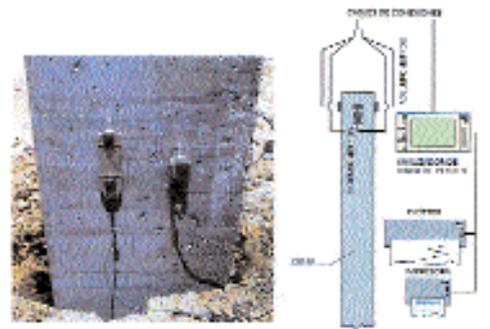
- Resistencia por fuste en el estrato superior e intermedio: 4'5 T/m<sup>2</sup>.
- Resistencia por fuste en el estrato de gravas: 6 T/m<sup>2</sup>.
- Resistencia por punta en el estrato de gravas: 800 T/m<sup>2</sup>.

suponiendo un empotramiento de 8 diámetros y con el condicionante de no perforar estratos de arcilla que pudieran influir en la carga de trabajo o asientos, con ello resultaban necesarios, para tensiones de trabajo próximas al tope estructural (40 Kg/cm<sup>2</sup>), empotramientos del orden de 1'5 m. en el estrato de gravas.



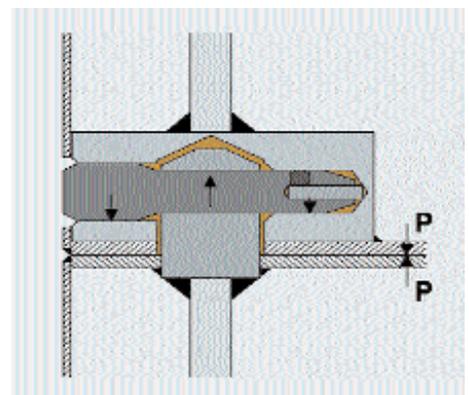
Para el cálculo de los pilotes prefabricados se tuvieron en cuenta los resultados de las pruebas de carga dinámica efectuadas a escasos metros del solar en la misma promoción inmobiliaria.

Los resultados de dichas pruebas, ampliamente contrastadas con ensayos de carga estáticos, arrojaban valores medios de resistencia movilizada por fuste unitarias del orden de 7 T/m<sup>2</sup> en el estrato superior de arenas, obteniéndose resistencias por fuste acumuladas mínimas de 240 Tons. a los 24'0 m., movilizándose de 370 a 400 Tons. para el total de la longitud hincada de los pilotes 33 – 34'0 m.



El motivo de la obtención de dichos parámetros resistentes para pilotes de desplazamiento, muy superiores a los que se utilizan para pilotes “in situ”, se razona por su propia puesta en obra, que conlleva la compactación y mejora del terreno circundante (frente a la decompresión que se genera en la excavación de pilotes realizados “in situ”).

Por otra parte, la posibilidad de efectuar controles muy superiores a los que se pueden realizar en pilotes ejecutados “in situ”, tanto del propio material del pilote, elaborado bajo un estricto Manual de Aseguramiento de la Calidad según ISO 9000, así como el empleo sistemático de pruebas de carga dinámica, al ser no destructivas unida a la inmediatez de resultados, realizadas con el Analizador de Hincada de Pilotes en el entrono del 2 al 3% de los pilotes, permite utilizar coeficientes de seguridad del entorno de dos, (Normativa ROM 0,5-94; Eurocódigo TC-288; etc.)



Los pilotes de barrena continua fueron descartados por la agresividad del terreno, imposibilidad de colocar armaduras de refuerzo en toda su longitud, mayores cuantías necesarias de encepados y vigas riostras, dificultad de control en obra y mayor plazo global de ejecución.

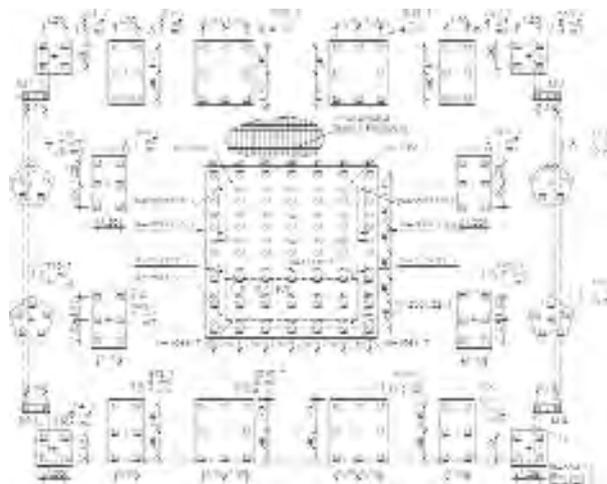
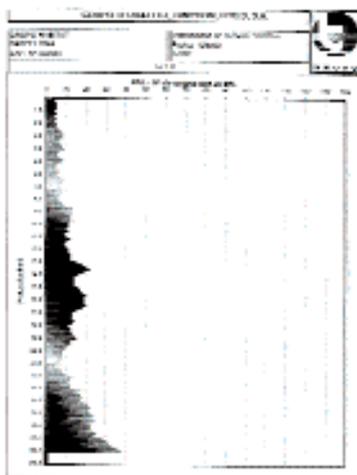
Una vez analizados los anteriores aspectos, unidos a la necesidad de ejecución de muretes guía en los pilotes "in situ", así como el coste de la retirada de detritus y la imposibilidad de colocar la plataforma de trabajo próxima al nivel freático debido a la carga necesaria de bentonita (1'5 m.), lo que retrasa notablemente los plazos globales de ejecución, determinaron la elección como sistema de cimentación la del Pilotaje Prefabricado Hincado, por su mayor control de calidad y de ejecución, así como por el coste global de la cimentación, contrastado además en ejecuciones similares con referencias anteriores al Año-85 en torres de más de 35 plantas.

## 1.5. Proyecto y Procedimiento Constructivo

La realización del Proyecto, supervisada por la Empresa responsable del seguro decenal SECOTEC, incluía el cálculo de los esfuerzos pésimos por pilote, realizándose un cálculo por elementos finitos mediante el programa Hércules del encepado central de 49 pilotes, obteniéndose una distribución de cargas muy homogénea en todos los pilotes debido a la rigidez de las pantallas y del encepado, así como a la deformación de los pilotes frente a las cargas solicitadas, estimándose un asiendo de unos 5 mm. en cabeza de pilote sin tener en cuenta el acortamiento elástico del hormigón.

Respecto al procedimiento constructivo, que fue aceptado tanto por los Arquitectos autores del Proyecto, BST, como por la Dirección de Obra, CTEC, incluía la realización de pilotes-penetrómetro en cada uno de los pilares y en el encepado central, pilotes que serían comprobados a continuación con el Analizador de Hinca (al objeto de correlacionar rechazos con el resto de los pilotes del encepado), la ejecución de pruebas de carga dinámicas en el 20% de los pilotes de las torres, reduciéndose al 2% en el resto de la obra, así como la ejecución de unas medidas previas de vibración para monitorizar, tanto topográficamente como por medio de sensores sísmicos, las posibles influencias sobre la pantalla continua anexa.

A tal fin se tomaron medidas de la velocidad de las partículas y frecuencia de vibración en tres direcciones y a diversas distancias del punto de hinca, (7 m., 26 m., 38 m. y 45 m.), obteniéndose en todos los casos valores de velocidad media y frecuencia admisibles e inferiores a los que provocaban, por ejemplo, las cucharas bivalvas de perforación de pantalla o los trailers de movimientos de tierras.



Asimismo, se hizo viable el rebajamiento hasta cota inferior de encepado de la plataforma de trabajo, no factible con otros sistemas de ejecución, mediante el empleo de la técnica de well-point.

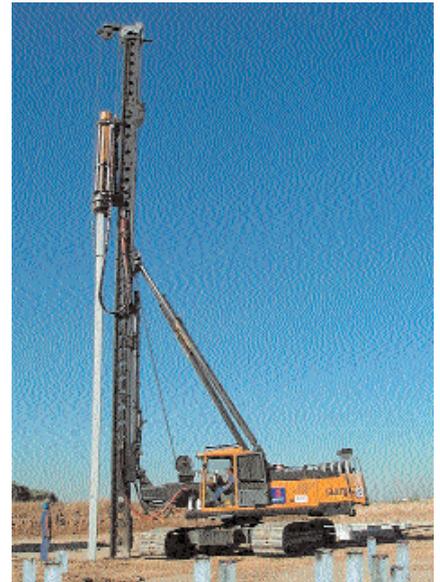
Durante la ejecución de los trabajos, con los ensayos y pruebas realizadas, se comprobó como con 26'0 m. de longitud hincada resultaban valores de resistencia movilizada suficientes frente a las cargas actuantes, no obstante en el núcleo central y debido a las intercalaciones limoarcillosas más compresibles que aparecían en algunos sondeos a dichas cotas, se decidió continuar la hinca hasta la capa de gravas, resultando longitudes hincadas de unos 29'0 m. de media.

La medición final resultante en las torres fue de unos 11.000 Ml. de pilote, para cuya ejecución, con un equipo de hinca hidráulico de alta eficacia equipado con maza de 6 Tons., se emplearon dos meses y medio.

Con objeto de completar la ejecución de los trabajos de pilotaje, se empleó un sistema de descabezado hidráulico evolucionado, que permite obtener unos rendimientos diarios de unos 60 a 80 uds. (en función de la sección), con elevada calidad de terminación y limpieza de obra.

En el caso del Centro Comercial, y dado el rebaje de la plataforma a la cota -16'50, se emplearon pilotes prefabricados de longitud variable entre 13 y 18 m., resultando una profundidad media de 16'6 m., para una medición total de 17.500 Ml.

Asimismo, se completó la cimentación con la realización de 40 ensayos dinámicos de carga, y el descabezado hidráulico de los pilotes, para un periodo total de ejecución de 4 meses.





## 2. Fabricación



Los pilotes TERRA se fabrican en nuestras factorías de Cartagena y Sevilla, desde las cuales se envían a las diferentes obras, (tanto dentro como fuera de España), se fabrican desde una longitud mínima de 5 m hasta una máxima de 12 m, siendo empalmados para longitudes mayores mediante la junta de unión tipo ABB.

Ambas instalaciones están diseñadas para producir pilotes de Categoría I (de acuerdo con la Norma Tecnológica NTE CPP/78), disponen de los medios más modernos, manejados por personal altamente cualificado.

Se realizan controles sistemáticos de recepción de los materiales (cemento, agua, áridos, armaduras, juntas, azuches y collares), controles de fabricación (preparación de moldes, dosificación del hormigón en planta automática, resistencia del hormigón, del acero, y control del curado), controles de almacenamiento (cuidado y manejo de los pilotes) y finalmente el control de expedición que garantiza que todos los pilotes enviados a las obras cumplen con las exigencias de calidad pedidas.

El procedimiento Técnico de Fabricación de Pilotes TERRA, incluido en el Manual de Aseguramiento de la Calidad de TERRATEST, permite garantizar el suministro de pilotes de muy alta tecnología (Hormigón de 450 Kp/cm<sup>2</sup>), gran capacidad de resistencia frente a los agentes químicos, tanto sulfatos como agua marina (al fabricarse con cemento CEMI, 42,5-SR (RC-97), y gran compacidad (por los automatismos de puesta en molde y vibrado del hormigón).

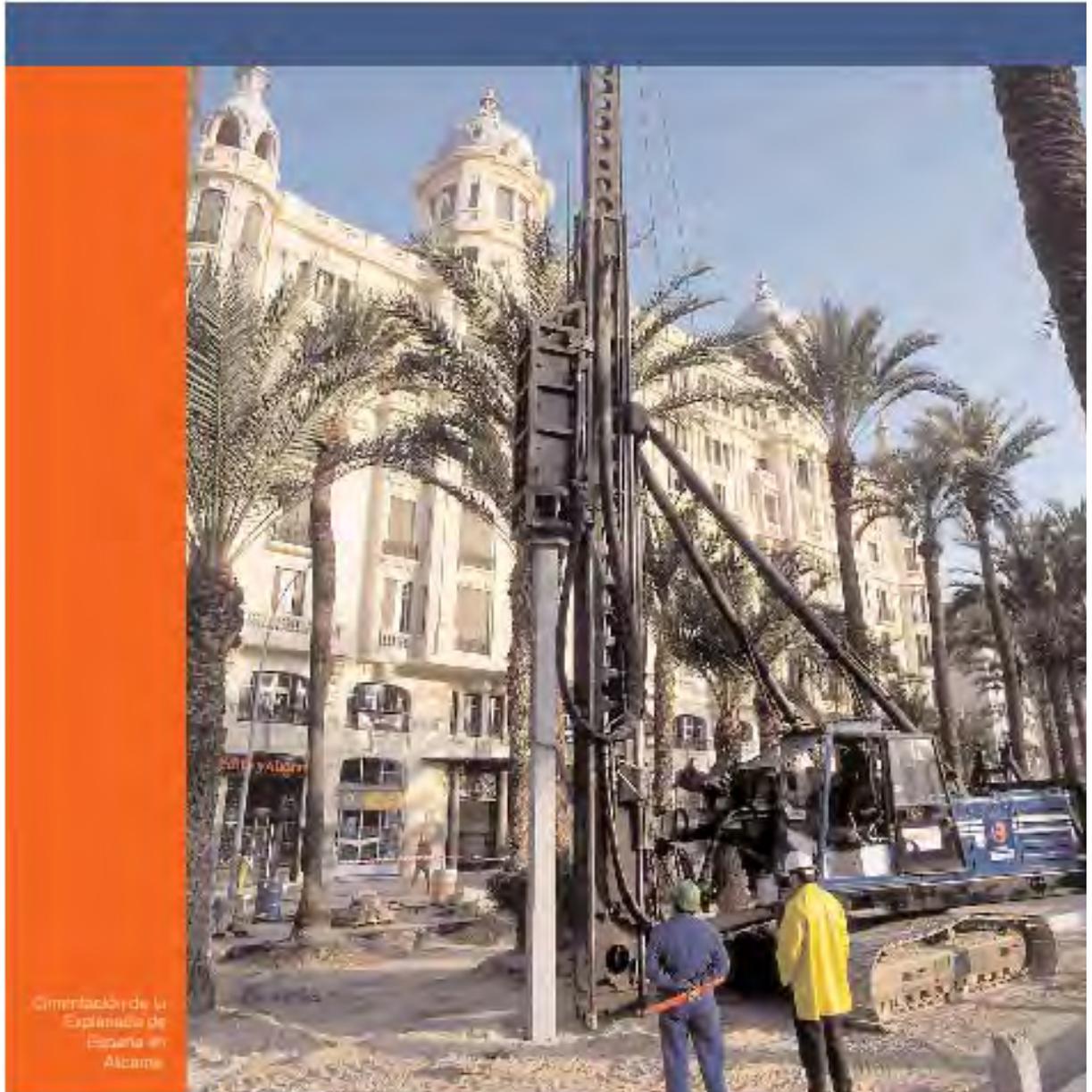


Vista general Factoría de Cartagena



Vista general Factoría de Sevilla

### 3. Hinca



La hincada de los pilotes se realiza con modernos equipos de caída libre, donde una maza de peso variable entre 4 y 6 Toneladas es elevada bien por un sistema simple de cable, o bien mediante los más avanzados métodos de accionamiento hidráulico, de elevado rendimiento y control.

Estos equipos son totalmente autónomos (por lo que no necesitan prestaciones auxiliares) y de fácil movimiento al ir montados sobre grúas de orugas.

Previamente se efectúa la planificación de la obra, en donde se analiza la secuencia de hincada de los pilotes de prueba, la zona de apilado, etc.

Los pilotes de prueba (pilotes-penetrometros) servirán de referencia para definir las profundidades óptimas de los pilotes, como confirmación de lo previsto.

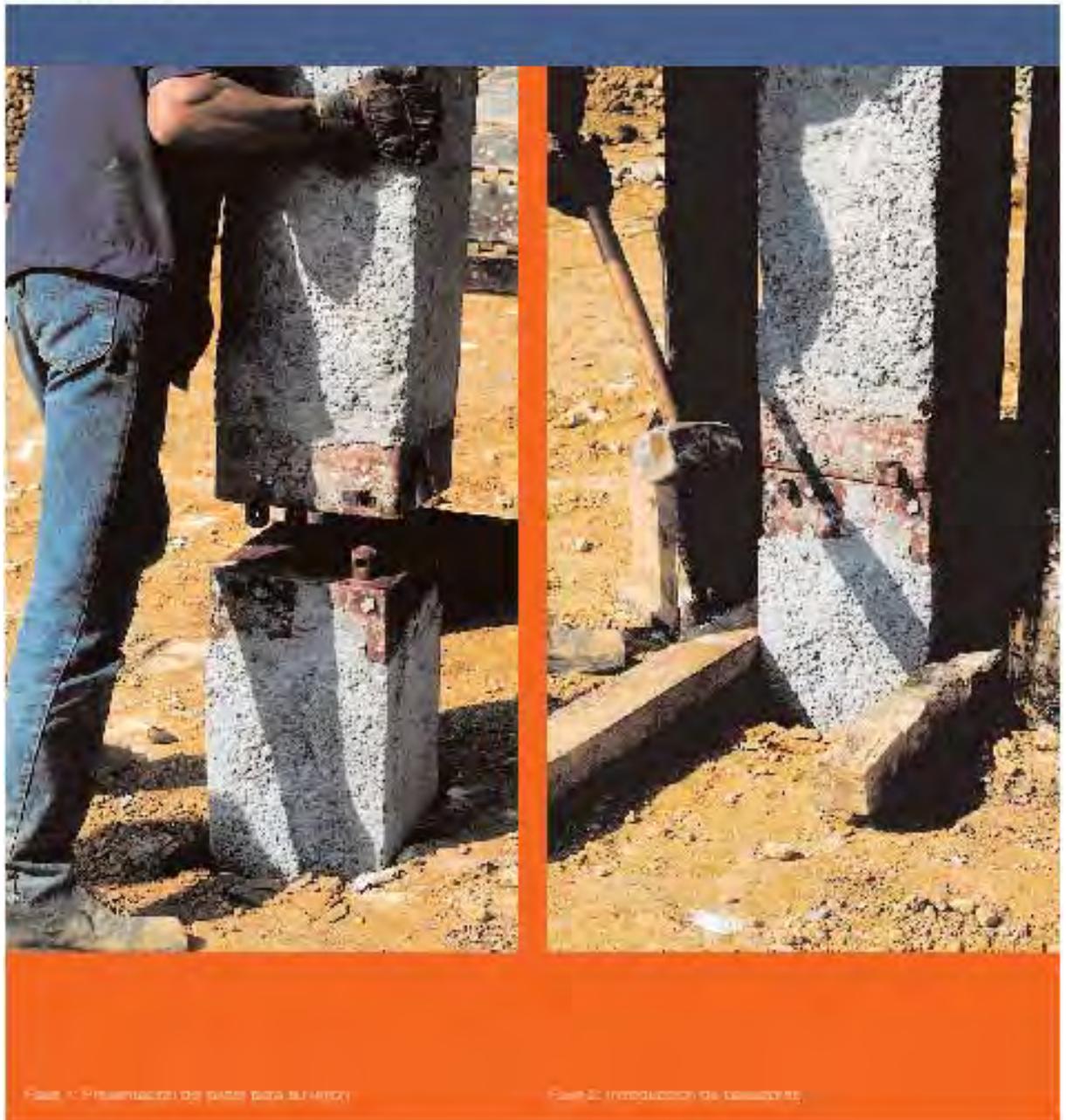
Estación de  
Autobuses de Teruel



Cimentación mediante  
pilotaje prefabricado  
Terra para el parque  
Oceanográfico  
Universal en iuCiudad  
de las Artes y de las  
Ciencias (Valencia)



## 4. Juntas ABB



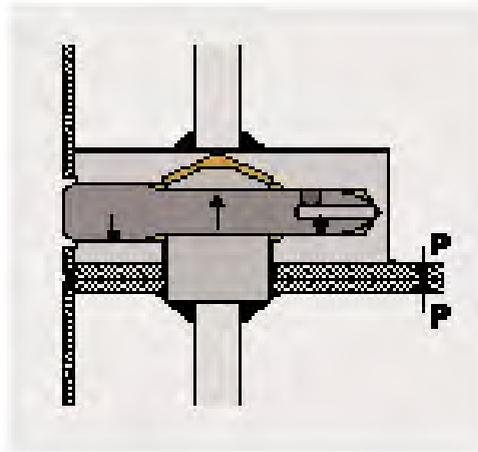
La junta ABB es el elemento que permite la unión de diferentes tramos de pilotes para alcanzar la profundidad necesaria.

Las juntas se fabrican con materiales de alta calidad. Están calculadas para resistir mayores esfuerzos incluso que la propia sección tipo de pilote, como han demostrado los distintos ensayos a flexión, compresión y tracción realizados a las mismas.

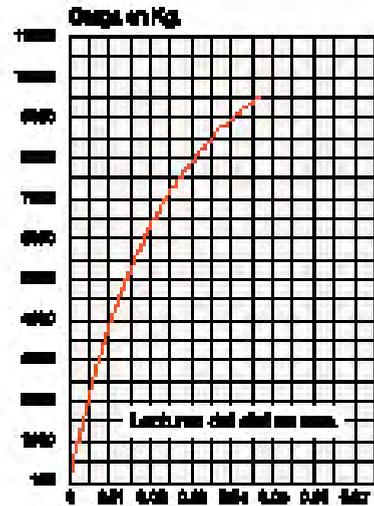
Todos los elementos que la componen quedan totalmente recubiertos por hormigón y protegidos del medio circundante, a excepción de la chapa exterior que carece de función estructural una vez hormigonado el pilote.

Además todos los elementos de conexión se encuentran embebidos en una grasa protectora contra la corrosión (certificada por el Instituto de Técnica Aeroespacial), y ajustadas las piezas que la componen, de forma que una vez unidos los diferentes elementos, se genera una pretensión que asegura una perfecta transmisión de esfuerzos.

Las cualidades anteriores, junto con su fácil puesta en obra y la posibilidad de inspección visual de la junta, hacen de este elemento constructivo (patentado en numerosos países) una garantía de calidad en consonancia con la del propio pilote, como demuestra en la práctica su uso continuado desde hace más de 50 años



Compresión entre tramos en la conexión de la Junta



Extracto del Certificado U60-1088 14.3 1960-AP



Ensayo de rotura a una junta

## 5. Control

### Control en Factoría

Los pilotes prefabricados TERRA se controlan sistemáticamente tanto durante su fabricación en factoría como durante su instalación en Obra.

Se efectúan los siguientes controles:

#### - De recepción de los materiales:

Agua, cemento, áridos, armaduras y aditivos, realizándose los ensayos que prescribe la Norma EHE.

#### - De resistencia y geometría:

De los pilotes, azuches, collares y juntas.

#### - De fabricación:

- Preparación de los moldes.
- Adecuada instalación de las armaduras.
- Correcta dosificación y colocación del hormigón.
- Vibrado.
- Manejo.
- Curado.

#### - De resistencia y consistencia del hormigón:

Ensayos a 24 h, 7 días y 28 días con resistencias mínimas de 175, 375 y 450 Kg/cm<sup>2</sup> respectivamente.

### Control en Obra

#### - Medida de Rechazo:

Sobre todos y cada uno de los pilotes TERRA se mide el ilRECHAZOli, que es la penetración del pilote en una serie de 10 golpes dados con la maza del equipo de hincas a una altura determinada. A través de la medida del mismo se controla que se ha alcanzado la capacidad de carga que debe soportar el pilote.

#### - Pruebas estáticas de carga:

En este tipo de ensayos y con la ayuda de otros pilotes o anclajes como reacción, se somete al pilote a cargas superiores a la máxima de servicio, observándose su comportamiento y obteniéndose la curva carga-asiento.



Ensayo de rotura y compresión de probetas de hormigón.



Pruebas de carga estática sobre pilote prefabricado.

- Analizador de Hincas de Pilotes (AHP):

Usado cada vez con mayor frecuencia, por su **bajo coste** y **elevada rapidez**. Este ensayo, avalado por una gran experiencia a nivel mundial, permite de una forma rápida y no destructiva analizar tanto las condiciones del terreno como el desarrollo de la hincas, controlando **la integridad del pilote y su capacidad de carga**. Se consigue en muchos casos mejorar el diseño de la cimentación en cuanto a secciones y longitudes, con la **optimización** de los coeficientes de seguridad.

- Analizador de Integridad de pilotes (AIP):

Se emplea para controlar específicamente la integridad de los pilotes. Está basado también en la teoría de la propagación de onda de choque a través de los mismos. De una forma sencilla, y **con un equipo de mano**, es posible chequear un gran número de pilotes en una sola jornada midiendo reducciones o incrementos de la sección del pilote.

- Control de Vibraciones:

Cuando el entorno en que está situada la obra lo requiera, es posible controlar la **transmisión de vibraciones y onda aérea** que provoca la instalación de los pilotes. Su cuantificación permite confirmar los criterios de hincas y adecuarlos al entorno.

- Control de Parámetros de la Hincas:

En un número estadístico de los pilotes de la obra (preferiblemente en los pilotes de prueba) es posible, mediante un equipo totalmente automatizado, controlar los parámetros de la hincas de pilotes, tales como altura de caída del martillo, número de golpes (avance) cada 20 cm, energía transmitida, duración del proceso de hincas, etc.



Ensayo con el Analizador de hincas de pilotes.



Ensayo de integridad PIT



Control de Vibraciones y onda aérea durante la hincas.



Diagrama de hincas de pilote. Descriptivo del rechazo.

## 6. Descabezado de Pilotes



Para facilitar las labores posteriores a la hinca de los pilotes prefabricados TIPO **TERRA**, se dispone de descabezadores hidráulicos de pilotes, que de forma **sencilla, rápida y económica**, agilizan los trabajos de demolición de la longitud de pilote necesaria *para la conexión de los mismos con los encepados*, **completando así la solución de cimentación**.

Los descabezadores hidráulicos disponibles, **técnicamente desarrollados para no dañar la estructura del pilote**, son de dos tipos:

-**D-300**, con capacidad para descabezar pilotes de secciones T-235, T-270, y T-300.

-**D-350**, con capacidad para descabezar pilotes de secciones T-300 y T-350.

Los descabezadores son operados mediante una *retroexcavadora hidráulica giratoria* con presión de suministro de aceite no inferior a 300 bares, caudal de 24 l/min. y con capacidad de elevación entre 7 y 12 toneladas (en general retroexcavadora de unas 25 toneladas de peso).

Para realizar el descabezado, en el caso particular que el encepado se vaya a ejecutar bajo la plataforma de trabajo, se deberá acondicionar el terreno.

Los **rendimientos son elevados** (incluso superiores a 100 Ud./día) proporcionando una **eficiente progresión de la obra**.

## 7. Características Técnicas

Cimentación de hotel y apartamentos en Isla Canela Ayamonte (huelva)



Los pilotes prefabricados TERRA están capacitados para absorber esfuerzos verticales de compresión en el entorno de los 125 Kp/cm<sup>2</sup>, al tratarse de pilotes de Categoría I, prefabricados con todos los controles en instalaciones fijas según la Norma Tecnológica NTE-CPP 78.

Se fabrican en todos los casos con hormigones de resistencia característica 450 Kp/cm<sup>2</sup>, (HA-45 según Norma EHE. Instrucción para el proyecto y la Ejecución de Obras de Hormigón en Masa o Armado).

Asimismo se emplea siempre cemento CEM I. 42,5-SR (RC-97), que hace que los pilotes sean resistentes a los sulfatos y al agua de mar.

Van armados en toda su longitud, y en sus esquinas, con cuatro u ocho barras de acero corrugado y calidad mínima AEH-400 (límite elástico 4100 Kp/cm<sup>2</sup>).

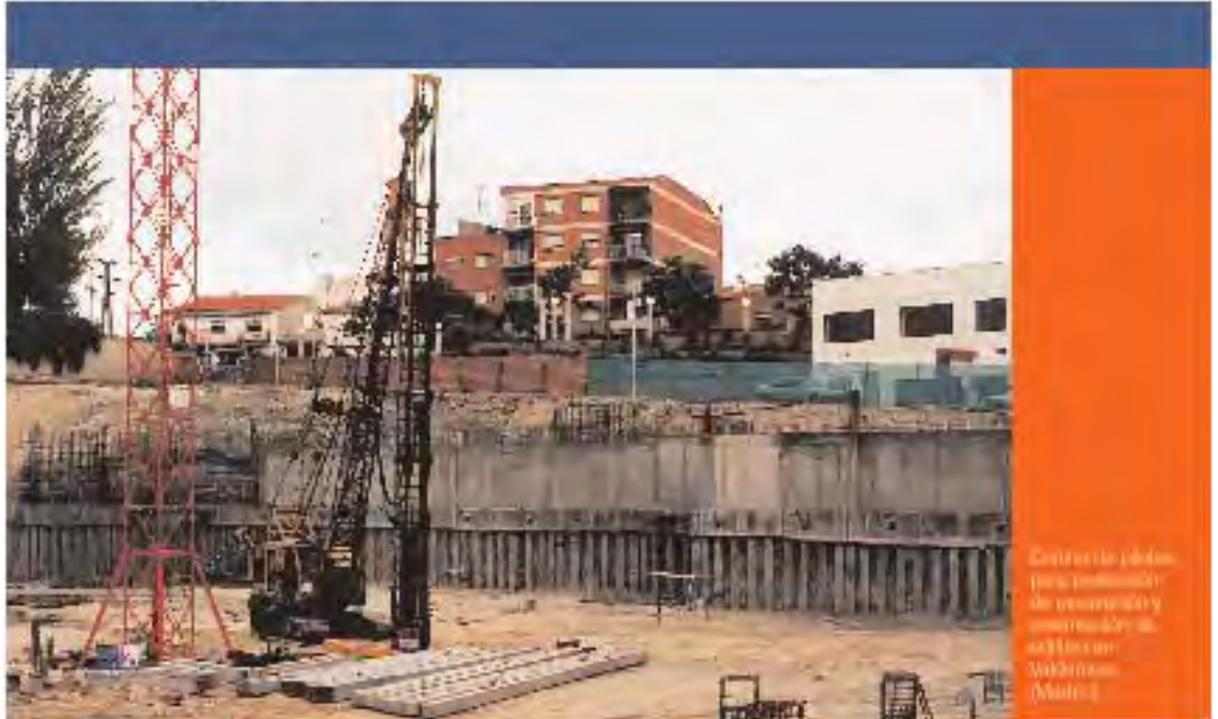
Zunchados también a lo largo de toda su longitud mediante una armadura transversal en acero AE-215L (límite elástico 2200 Kp/cm<sup>2</sup>), de 6 mm de diámetro. El paso es de 16 cm, reduciéndose a 8 cm en los 0,80 m próximos a los extremos y en la zona de los ganchos de izado.

### Cuadro de Características técnicas

	T-200*	T-235	T-270	T-300	T-350
Sección (cm <sup>2</sup> )	400	552	729	900	1225
Armadura longitudinal (AEH-400)	4 ø 16	4 ø 16	4 ø 20	4 ø 20	8 ø 16
Armadura Transversal (hélice) (AE 215 L)	ø 6 a 16 cm				
Capa estructural (Tn.) (NTE CPP-78)	50 Tn.	71 Tn.	94 Tn.	115 Tn.	154 Tn.

En casos especiales, y bajo pedido se pueden fabricar con otros armados. (\* Con producción limitada)

## 8. Obras singulares



La tipología de los pilotes prefabricados TERRA, el elevado rendimiento y la autonomía de los equipos de hincas, así como el cuidado con el **medio ambiente** del sistema, permiten la realización de obras de características muy especiales:

- Obras marítimas (pantalanés, muelles, etc.)
- Estructuras que requieren pilotes inclinados, como viaductos.
- Grandes superficies (depuradoras, centros comerciales, etc.).



Cimentación de Pantalanés en el puerto deportivo de Fuengirola (Málaga)

## Obras singulares. Edificios Industriales



Cimentación mediante pilotes prefabricados y descabezado de pilotes de nueva nave almacén frigorífico para Hero España. Alcantarilla (Murcia)



Cimentación mediante pilotes prefabricados Terra del nuevo silo de azúcar de 75.000 Tn de carga útil en la Fábrica de Benavente (Zamora)

Obras singulares. Edificios Públicos



Obra de construcción de Centro Comercial WESCOM mediante pilotes prefabricados. Zona en Ronda de Huelva (Murcia)



Obra de construcción de Nuevo Estadio Deportivo mediante pilotes prefabricados. Zona en Huelva

## Obras singulares. Depuradoras



Cimentación de la nueva Estación Depuradora de Huelva

## Obras singulares. Estructuras



Ampliación de estructuras en la Ronda Sur de Huelva

# ***Entubados y Lodos***

**Juan Luis Rios González**  
**Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos**  
**Director Gerente**  
**PILOTES POSADA S.A.**

Una vez analizados por mis compañeros de mesa los sistemas de BC, y pilote prefabricado, me corresponde hablar sobre los pilotes más clásicos y de aplicación más universal, los pilotes de extracción con empleo de entubación recuperable, sin entubación con lodos tixotropicos, o pilotes barrenados sin entubación.

Dado que el tema que ha escogido esta jornada se refiere a cimentaciones profundas en la edificación, indicar que estos tipos de pilote se emplean en diámetros pequeños entendiéndose por tales diámetros comprendidos entre 50 cm. y 1,0 m., dado que las cargas a soportar en edificación suelen cubrirse con estos diámetros que les permiten capacidades portantes comprendidas entre 60 y 250 Tm.

Dicho esto empezaré por definir este tipo de pilote.

- En general se define como cimentaciones por pilotes hormigonados "in situ" con entubación recuperable o con empleo de lodos bentoníticos las realizadas a base de hormigón armado cuya ejecución se ha efectuado introduciendo previamente una tubería metálica en el terreno, o empleando lodos que por sus propiedades tixotropicas, pueden evitar el desmoronamiento de las paredes del suelo. En algunas ocasiones es necesario utilizar una técnica mixta con entubación hasta una cierta profundidad, continuando posteriormente con empleo de lodos.

## **Proceso Constructivo**

Al tratarse nuestro tema, de pilotes en la edificación obviaremos el empleo de pilotes con entubación perdida debido a su alto coste que obligaría a acudir a soluciones más económicas, y las centraremos en los pilotes:

- 2.1.- Entubación recuperable.
- 2.2.- Sin entubación, excavados con bentonita ó polímeros.
- 2.3.- Mixtos con empleo de entubación recuperable y lodos ó polímeros.
- 2.4.- Mixtos con empleo de entubación y barrena continua.
- 2.5.- Perforados sin entubación.

### **2.1 Entubación recuperable**

La contención de las paredes de la excavación se realiza con una camisa metálica que se introduce a rotación directamente con la propia máquina cuando se trata de profundidades menores de 12-14 m. según el tipo de suelo y equipo, o con empleo de morsa hidráulica y empleo de camisas empalmadas

mediante roscas estancas cuando las profundidades son mayores.

Una vez que se introduce la camisa se procede a la extracción del suelo alojado en su interior, mediante el empleo de barrenas cortas (suelos coherentes) cucharas o buckets en el caso de suelos finos (arenas, limos ...) o excavaciones realizadas en agua.

La excavación ha de realizarse de forma acompasada con la entubación, sobre todo si hay posibilidad de desprendimientos importantes, evitando excavar por debajo del fondo de la camisa. Lógicamente esta recomendación no es válida en el supuesto de encontrar capas intermedias muy compactas, obstáculos, o rocas que obliguen al empleo del trépano o al empotramiento final del pilote.

Cuando se esté realizando la excavación por debajo del nivel freático se debe de mantener el nivel del agua en el interior de la entubación por encima del nivel freático, observando un cuidado especial en el supuesto de estar excavando materiales granulares finos que puedan producir sifonamiento. En estos casos es necesario la aportación continua de agua desde el exterior, que compense el agua que se extrae en las operaciones de vaciado del material interior del pilote. Una vez alcanzado el nivel de punta de pilote, y en función de las exigencias del proyecto, se procede al empotramiento del mismo que en función de la naturaleza del terreno se realizará con empleo de:

a) *Barrenas o útiles especiales, alojados en el propio kelly de perforación.* Este proceso es posible gracias al desarrollo en los últimos años de los motores hidráulicos, que empleados en las cabezas de rotación de las máquinas llegan a alcanzar valores de los pares de rotación que en algunos casos alcanzan valores de 30000 Kg x m, lo cual permiten perforaciones en roca de  $R_u = 250 \text{ Kg/m}^2$  y mayores según sea la naturaleza y estatigrafía de la roca.

Los útiles de perforación pueden ser barrenas con apéndices de widia o verdaderas coronas especiales capaces de extraer "casi" testigos continuos.

Este método es el más aconsejado en el caso de cimentaciones de edificaciones urbanas, debido a la ausencia de ruidos, vibraciones o golpes que tanto abruman a los vecinos.

b) *Trépanos.* Cuando la roca donde se deba empotrar el pilote sea de una dureza tal que no se pueda perforar por el método anterior, se emplearán los trépanos que deberán ser de cruz para poder romper con mayor eficacia, procediendo posteriormente a un repaso con la barrena especial o trepano circular para dotar de forma a la punta del pilote.

Una vez alcanzada la profundidad requerida por el proyecto o cumplida la exigencia de empotramiento, se procederá a la limpieza de fondo con la utilización de cucharas, buckets o un sistema de inyección inversa.

## **Colocación de materiales**

Después de la limpieza de fondo se procede a la colocación de la armadura considerando que la punta quede recubierta y utilizando separadores longitudinales que garanticen el centrado y el recubrimiento longitudinal.

Colocada la armadura se procede al hormigonado continuo del pilote, a través de una tubería rosca de  $\varnothing 200 \text{ mm}$ . colocada hasta el fondo de la perforación que se irá retirando pero siempre dejando un resguardo mínimo de 2,0 m. sumergido en el hormigón para evitar que se produzcan cortes o discontinuidades, sobre todo en las pequeñas discontinuidades del suministro producido por el cambio de hormigonera o cualquier incidencia sufrida en la operación.

Esta extracción de la tubería de hormigonar, debe de acompañarse con la retirada de la camisa recuperable cuya punta siempre se debe mantener por debajo del nivel del hormigón para impedir cortes

debido a la entrada de agua o contaminación en los bordes del pilote por desprendimiento de los suelos adyacentes que darían lugar a pérdidas en la sección teórica y estructural del pilote.

Esta operación se realiza a tiro directo con la máquina en pilotes cortos o con el apoyo de “morsa” hidráulica utilizada para la introducción de la tubería en el supuesto de pilotes largos.

## **2.2 Pilotes sin entubación, excavadas con bentonita o polímeros**

*Excavación.* En este tipo de pilote la excavación se realiza al amparo de las propiedades tixotrópicas de los lodos bentoníticos, utilizando barrenas cortas, cucharas o buckets para la retirada de tierras y aportando lodos de una manera continua, manteniendo continuamente el nivel de los mismos por encima del nivel de excavación para impedir el derrumbe de las paredes.

En este tipo de pilote es fundamental la limpieza de la punta del pilote, donde se acumulan restos de la excavación y en muchos casos los procedentes de la decantación de las partículas más finas del suelo, razón por la que es imprescindible la utilización de bombas de fondo para retirada del lodo usado y regeneración de un lodo nuevo menos contaminado de partículas finas.

## **Colocación de materiales**

El proceso de colocación de materiales es sensiblemente análogo al del método anterior, en cuanto a la colocación de la armadura, procediéndose a continuación a la introducción del hormigón a través de la tubería de hormigonar y la retirada del lodo bentonítico desalojado por la introducción del hormigón. En esta operación es muy importante controlar la calidad del lodo, por lo que se recomienda controlar la viscosidad (medida en el Marsh, que debe ser mayor que la del lodo fresco pero inferior a 45 s), y el contenido de finos que debe ser inferior al 3% retenido en tamiz 0,08 UNE. Si el lodo no cumpliera estas condiciones, se debe de proceder a una regeneración del mismo antes del inicio de las operaciones de colocación de las armaduras y del hormigón.

La ejecución de este tipo de pilote, en edificación, implica la instalación de una central de lodos con la necesidad de espacio que esto conlleva, y la eliminación de los mismos; con el traslado a vertedero, lo cual cada vez presenta mayores problemas debido a que las legislaciones medioambientales se están haciendo más duras y en muchas ocasiones difíciles de cumplir, por esta razón sobre todo en USA se viene proponiendo la sustitución de la bentonita por el empleo de polímeros que cumplen la función tixotrópica de la primera.

El empleo de estos polímeros procede de la experiencia en la industria petrolera, y actúa:

- Evitando el desmoronamiento de las paredes al infiltrarse en el terreno uniéndolas por atracción iónica.
- Reanimando y uniéndolas los sólidos en suspensión, propiciando la decantación al fondo de la excavación, lo cual facilitará la limpieza de la punta.
- Se disuelve al entrar en contacto con el calcio del cemento con lo que se favorece el contacto entre terreno y hormigón.

Nuestra experiencia con estos productos ha sido satisfactoria, en su comportamiento, en la facilidad de colocación e instalación de equipo de preparación, y en su eliminación ya que se puede tratar con cloro u otro oxidante que producirá su desintegración en agua que se puede eliminar por las redes de saneamiento.

En cualquier caso, hay que realizar un control importante en sus propiedades durante el uso porque

las mezclas muy contaminadas de cemento pueden presentar problemas de formación de partículas encapsuladas de polímero en forma de pelotitas que pueden dar al traste con su funcionamiento. En cuyo caso habría que tratarlo con otros productos o tirarlo.

Actualmente estos productos son caros, y solo se utilizan en situaciones determinadas por falta de espacio para instalaciones de bentonita, problemas de vertido o aplicaciones puntuales.

### **2.3. Pilotes mixtos con entubación recuperable y lodos o polímeros**

Se acude a esta técnica cuando se encuentran capas intermedias de rocas ó terrenos muy compactos, que impiden el avance de la entubación recuperable, o en el tratamiento de punta en el empotramiento del pilote con objeto de que no se desmorone y se pueda realizar una buena limpieza de fondo.

También se puede utilizar los polímeros para decantar las partículas finas en suspensión en el agua, en el caso de pilotes de gran profundidad, con objeto de que estos caigan al fondo del pilote y se puedan extraer con los “buckets” normales ó mediante la limpieza de punta del pilote por el método de recirculación.

En este apartado puedo comentarles nuestra experiencia en la obra “Elevación de la vía del F.F.C.C. de la línea Cádiz- Sevilla, en Jerez”, en la que realizamos pilotes de Ø 1.500 de 32 m., donde el suelo estaba formado por alternancias de capas arenas limosas, algunas muy compactas, pero que en contacto con el agua se desmoronaban quedando las partículas en suspensión.

El pilote se entubaba en toda su longitud, tardándose en realizar la excavación aproximadamente 6 horas, manteniéndose en todo momento la camisa por debajo de la perforación y lleno de agua.

Al llegar a cota final se comprobaba la medida interior de la excavación y se procedía a colocar la armadura, operación en la que se tardaba 2,5 horas, y se volvía a realizar la comprobación de profundidad observándose que se había producido una disminución de la misma en 2,0 m. debido a la decantación de los finos, lo cual obligaba a la retirada de armadura y volver a limpiar el fondo, teniendo que repetirse esta operación varias veces por el mismo problema.

Cuando se realizaron los ensayos sónicos de los primeros pilotes, aparecieron defectos en el fuste y en la punta, lo cual hizo extremar la ejecución clavando la tubería , dejando decantar 1 día el pilote lo que nos llevaba a hacer un pilote cada 2,5 días. Finalmente decidimos el empleo de polímero, que después de varios ajustes en la dosificación nos llevó a poder decantar en aproximadamente 2 horas pudiendo iniciar la operación de hormigonado a las 8 horas, con un esfuerzo en la retirada del tubo razonable, y alcanzando una producción de un pilote cada 12 horas de trabajo y con la calidad deseada según comprobaciones de los ensayos sónicos efectuados.

### **2.4 .- Mixtos con empleo de entubación y barrena continua**

Dentro del grupo de pilotes “in situ” y como sistema mixto de entubación y barrenado, aparece recientemente el sistema C.S.P. (Continuous Secants Piles), como alternativa a la construcción de pantallas continuas construidas para la excavación de sótanos en obras urbanas de edificación.

El sistema consiste en la realización de unos pilotes alternos (primarios) sin armar y unos pilotes secantes a ellos ( secundarios ) armados. Los primeros, se puede decir que realizan la función de “taponamiento” mientras que los segundos, son los estructurales destinados a soportar los esfuerzos horizontales y verticales .

La separación en planta de los pilotes es variable en función de la granulometría del suelo y la presencia de agua, y por tanto la necesidad de estancamiento, pero como cifra orientativa se puede considerar un solape en el pilote primario de un mínimo de 15 cm. para garantizar la continuidad.

Para la correcta situación en planta de los pilotes se construye un murete guía de hormigón con la forma en planta exacta del perímetro de los pilotes primarios y secundarios, actuando a la vez este murete como soporte de los suelos en superficie y guía inicial de la perforación.

La excavación se realiza mediante el empleo de una barrena continua alojada en el interior de una camisa, introduciéndose ambas de una manera simultánea en el suelo mediante rotaciones independientes.

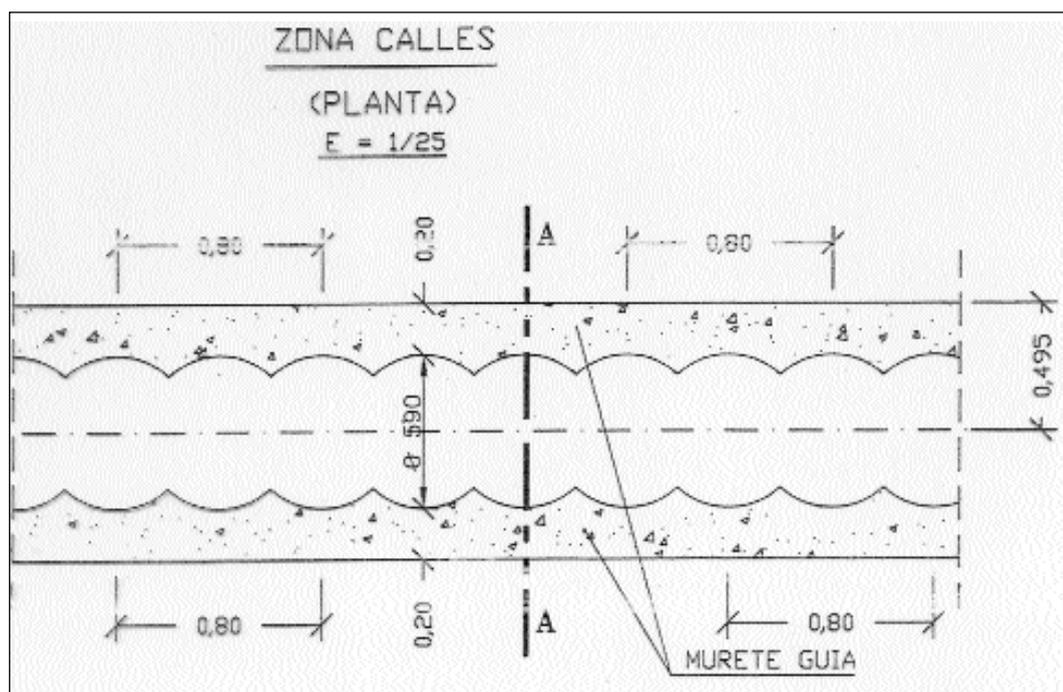
Durante la perforación, la camisa que sirve de guía se mantiene en posición avanzada respecto a la barrena que va realizando el vaciado interior de la misma.

La secuencia operativa consiste en la ejecución de los pilotes primarios rellenos de hormigón o mortero y la subsiguiente ejecución de los pilotes secundarios prestando atención al solape entre ellos. La ejecución de los pilotes secundarios puede realizarse después de varios días de la terminación de los primeros dependiendo de la potencia de los motores de rotación que accionan el giro y empuje de la camisa.

Una vez hormigonados los pilotes secundarios se procede a la colocación de una jaula de armadura tradicional o un perfil en H, que se introducirá en el hormigón por su propio peso o mediante el empleo de un pequeño vibrador colocado sobre la armadura.

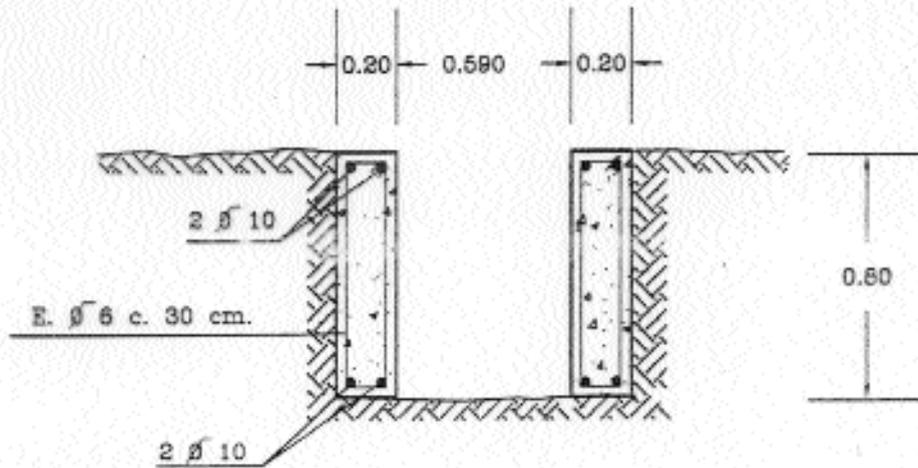
Para lograr una ejecución satisfactoria de los pilotes secundarios es necesario el empleo de hormigones ricos en finos, con dosificación de 350-450 Kg. de cemento/m<sup>3</sup>, relaciones agua cemento de 0,45 que empleándose garantizan conos de 18 a 22 y con resistencia de 250 Kg/cm<sup>2</sup>, empleándose generalmente aditivos fluidificantes para facilitar las operaciones mencionadas mientras que para los pilotes primarios dependiendo de la sección solapada y el grado de estanqueidad necesaria, se pueden utilizar morteros de dosificación de cemento superiores a 180 Kg/m<sup>3</sup>, siendo posible en este caso la utilización de equipos tradicionales de barrena continua, si bien es imprescindible una ejecución cuidadosa para garantizar que los pilotes secundarios no se desvíen, y se logre el contacto efectivo y continuo entre los pilotes primarios y secundarios.

Este sistema facilita la realización de contenciones en obras urbanas sin la necesidad de utilizar lodos, disminuyendo los ruidos y vibraciones y con la posibilidad de atravesar capas compactas que las cucharas de las pantallas no podrían excavar, sin la utilización de empleo de trépano.

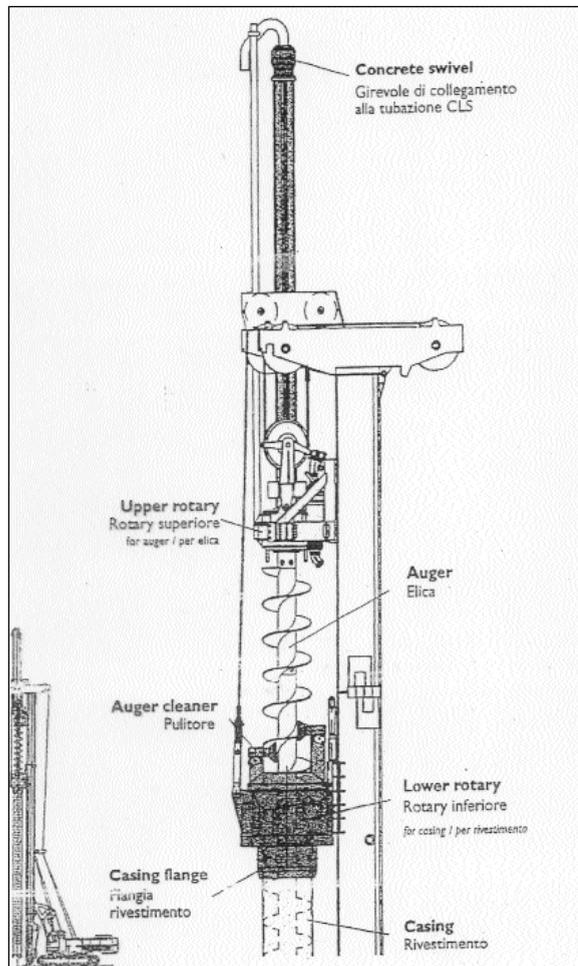


**ZONA CALLE**  
**SECCION A - A (MURETE GUIDA)**

E= 1/25



**HORMIGON H-150**  
**ACERO AEH-500**





incidir continuamente en el cuidado de la limpieza de fondo, ya expresada, en la colocación de la armadura siempre con separadores, y la colocación de hormigón con tuberías de hormigonar para evitar la disgregación de los aridos, observando continuamente la posible caída de tierras durante la ejecución de las tareas.

Como resumen de la ejecución de estos tipos de pilotes, debemos de tener en cuenta que para conseguir sus ventajas:

- Ausencia de golpes y vibraciones.
- Posibilidad de atravesar terrenos con intercalaciones de materiales compactos ó rocas; terrenos con rellenos intermedios o de materiales granulares de gran tamaño con presencia de niveles freáticos altos.
- Baja afección a las cimentaciones colindantes.

Debemos de cuidar su ejecución para disminuir los riesgos de:

- Mal apoyo por falta de limpieza ó aflojamiento en la punta.
- Defectos de hormigonado que produzcan pérdida de sección o posibles cortes en los pilotes.
- Lavado del hormigón, que dañe su capacidad estructural.

## **NORMATIVA VIGENTE**

La construcción de pilotes “in situ” está regulada por distintas normas nacionales y europeas, donde se indican los criterios de admisión ó rechazo, referentes a desviaciones, inclinaciones y condiciones de materiales. En este punto nos limitaremos a citar los de aplicación en nuestro país y que salvo error son:

- Europeas.- EN-1936-1966 incluida en el Eurocódigo 7.
- N.T.E.: Norma Tecnológica de la Edificación en su apartado.

C.P.I. “Pilotes in situ”, con la denominación:

C.P.I.-4: Grupo de pilotes de extracción con entubación recuperable.

C.P.I.-6: Grupo de pilotes perforados sin entubación con lodos tixotrópicos.

C.P.I.-7: Grupo de pilotes barrenados sin entubación.

- EHE.- Instrucción de hormigón estructural.

## **Control Postconstructivo**

Realizados los pilotes con los controles de ejecución apuntados y las recomendaciones ó exigencias en las distintas normas, relativas a situación en planta, desviaciones, inclinaciones, calidad del hormigón y de las armaduras, puede quedar la duda de la situación final de los mismos en cuanto a:

- ¿La sección del pilote es la prevista? (y por tanto se puede respetar el diámetro tomado en el cálculo).
- ¿La longitud del pilote es la indicada?
- ¿La continuidad del pilote y la calidad del hormigón es tal que permite confiar que es capaz de soportar las cargas a que están destinados?
- ¿El apoyo del pilote es correcto?

Tradicionalmente se respondía a estas preguntas con la realización de ensayos destructivos (extracción de testigo con diámetro 3 ó 4 veces el tamaño máximo del arido) o con pruebas de carga.

Este tipo de ensayos en los pilotes de edificación eran muy difíciles de realizar, los primeros porque los diámetros pequeños no permiten la perforación sin riesgo de salirse de su sección, y los segundos por la dificultad física de su realización y su coste.

En los últimos años se han desarrollado una serie de técnicas apoyadas en el empleo de aplicaciones informáticas, que sin ocasionar daños al pilote pueden dar la información requerida en cuanto a sección, longitud y continuidad.

Los métodos más frecuentes son:

- Método sónico.
- Método sísmico con transparencia.
- Método de impedancia.
- Método del eco.

Sin entrar a describir cada uno de ellos, que considero motivo de la intervención de algún experto, solo indicar que los dos primeros implican la colocación de unos tubos alojados en las armaduras, lo que exige que la sección del pilote debe ser importante, pues en caso contrario dificultaría la colocación del hormigón, razón por la que solo se emplea en diámetros mayores de 80 cm., quedando por tanto como más usuales los dos últimos, que pueden ser aplicados con comodidad y sencillez, pero que precisamente por esto y por el pequeño coste del equipo necesario, es muy importante el conocimiento y experiencia de los técnicos que realicen los ensayos y su interpretación, pues en más de un caso se han producido situaciones de alarma infundada que originaron múltiples problemas entre los distintos técnicos y agentes que intervienen en las obras de edificación.



# ***Pruebas Dinámicas.***

**José Luis Arcos Álvarez**  
**Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos**  
**KRONSA**

## **Pruebas dinámicas en pilotes.**

### **Aplicación de la ecuación de onda unidimensional a ensayos en pilotes.**

#### **Introducción.**

El pilotaje es, con frecuencia, la mejor solución para muchos de los problemas de cimentación. Sin embargo, se suelen utilizar altos coeficientes de seguridad en el cálculo debido a las incertidumbres existentes sobre el terreno, el pilote y método de ejecución. Mediante los ensayos de integridad y capacidad portante de los pilotes estas incertidumbres pueden eliminarse, por lo que se podrían obtener soluciones más económicas. Una de las formas más extendidas de comprobar la integridad y capacidad portante de los pilotes está basada en la aplicación de la ecuación de onda.

La solución de la ecuación de onda unidimensional viene aplicándose a la hincas de pilotes desde poco después de la Segunda Guerra Mundial. En 1950 Smith publicó unas primeras notas sobre el desarrollo de una solución numérica para el problema de la propagación de onda aplicado a la hincas de pilotes y, ya en 1957, se utiliza el que puede haber sido la primera aplicación de los ordenadores digitales a un problema de ingeniería civil: el programa "Wave Equation". Hoy en día, el programa GRL-WEAP (Globe y Rausche, 1976) se usa ampliamente en todo el mundo y ha dado pie a la aparición de otras aplicaciones informáticas similares.

En este artículo se hace una revisión a los métodos de control de pilotes basados en la ecuación de onda, dividiéndolos en función de la energía aplicada en el impacto generador de la onda, esto es, diferenciando entre ensayos de alta y baja deformación en el pilote.

Los ensayos de baja deformación ("low strain test") permiten el análisis de la integridad estructural del pilote, deducir sus anomalías en dimensión o calidad del material. La fuente generadora de la perturbación es el impacto de un martillo de mano.

Los ensayos de alta deformación (high strain test), además de comprobar la integridad del pilote son verdaderas pruebas de carga (pruebas de carga dinámicas) utilizadas en la estimación de la capacidad portante del pilote, incluso diferenciando resistencias por punta y fuste en toda la longitud del pilote.

## Ensayos de baja deformación.

### Aplicación al estudio de la integridad estructural del pilote.

#### Ensayo de Eco y Ensayo de Impedancia Mecánica

Asimilando el pilote a un elemento prismático (varilla), se sabe que las ondas de presión originadas por el impacto de un martillo se propagan a lo largo del pilote con una velocidad de onda,  $c$ , de valor:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

donde  $E$  es el módulo de elasticidad dinámico y  $\rho$  la densidad. En el hormigón esta velocidad varía entre 3500 y 4000 m/s.

En su camino descendente por el pilote, la onda sufre una disipación de energía por amortiguamiento debido al propio material del elemento prismático. Si, además, el elemento prismático está rodeado de material, como sucede en un pilote en todo su fuste al estar rodeado de suelo, la pérdida de energía de la onda es mucho mayor. El amortiguamiento de la señal depende entonces de la relación de rigideces entre suelo y pilote. Si el terreno que rodea al pilote es un suelo, relativamente mucho más blando que el propio pilote, una gran cantidad de la energía se transmite a lo largo del pilote sin disiparse lateralmente.

La onda se transmite de este modo hacia la punta del pilote donde parte de la energía se transmite al terreno bajo la punta y parte se refleja. El análisis de la onda reflejada (Eco) permite obtener información sobre los cambios de las características mecánicas a lo largo del pilote.(Figura 1).

Cualquier cambio brusco en las características mecánicas del pilote hace que la energía de la onda se parta en una parte que se transmite, siguiendo su camino, y una parte que se refleja, tomando un sentido de propagación opuesto al que traía. Las características mecánicas de un pilote son su densidad ( $\rho$ ), el área de su sección transversal ( $A$ ) y el módulo de elasticidad dinámico ( $E$ ) o la velocidad de propagación ( $c$ ). Estas características se pueden tratar conjuntamente bajo el nombre de impedancia  $Z$ . Cualquier fenómeno de refracción y reflexión de ondas se puede poner en función de las impedancias.

La impedancia se puede escribir:  $Z = \rho \cdot c \cdot A = \frac{E \cdot A}{c}$

La densidad es un parámetro que suele variar relativamente poco. Son, pues, la velocidad de propagación  $c$  y, sobretudo, el área  $A$  de la sección transversal del pilote los que más afectan al valor de la impedancia.

Los cambios de impedancia se producen, lógicamente, en zonas de cambio de calidad del hormigón (zonas con coqueras, zonas contaminadas,...), en zonas de cambio de sección (estricciones y bulbos) y, por supuesto, en la punta del pilote.

En un pilote sin defectos, el único cambio de impedancia se produce en la punta del pilote. En la punta, parte de la onda se refleja volviendo a alcanzar la cabeza del pilote tras un tiempo  $t$ , que puede ser medido. Conociendo la velocidad de propagación de la onda en el hormigón, que es de unos 3800 m/s, se puede calcular la longitud del pilote ( $L$ ) como :

$$L = \frac{c \cdot t}{2};$$

La profundidad de cualquier otra anomalía se puede detectar conociendo el tiempo  $t'$  que tarda en recibirse el eco producido al alcanzar la onda esa anomalía:

$$h = \frac{c \cdot t'}{2};$$

Las reflexiones en la punta pueden presentar distinta o igual polaridad que la onda incidente. Si la punta del pilote está empotrada la onda reflejada presenta distinta polaridad; si la punta está libre, la onda reflejada tiene igual polaridad. En casos de cambio de sección, se registra en cabeza un eco de distinta polaridad si el reflejo se produce en un bulbo o ensanchamiento; y será de igual polaridad si se trata de un estrechamiento. (Figura 2).

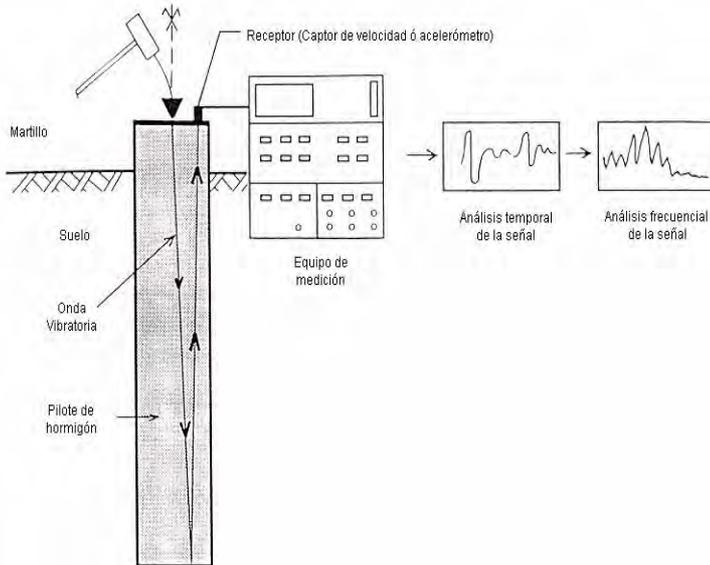


Figura 1. Realización del ensayo de eco.

El ensayo se realiza, como se ve en la figura 1, golpeando con un martillo sobre una superficie plana y pulida preparada en el pilote descabezado. En otra superficie pulida se implanta un sensor de velocidad (geófono) o un acelerómetro. La señal recibida por el sensor se registra y trata en un equipo electrónico.

Para evitar la pérdida de señal por amortiguamiento, la mayoría de los equipos disponen de un sistema de ganancia automática que amplifica exponencialmente la señal con el tiempo transcurrido. A pesar de ello, a veces resulta realmente difícil distinguir el eco de la señal del ruido de fondo.

La digitalización de la señal permite la aplicación de filtros de frecuencias de paso alto y bajo, que eliminan los "ruidos de fondo" que distorsionan la información que buscamos. Actualmente, se trabaja en filtros de "wavelet" que permiten el filtrado de bandas específicas de frecuencias en zonas temporales limitadas, en lugar de eliminar unas frecuencias determinadas en toda la longitud temporal de la señal. La figura 4 muestra el tratamiento de una señal con los filtros digitales, hasta descubrir un defecto en el pilote.

Otra forma de interpretar el ensayo de eco es realizar el análisis de la onda en el dominio de la frecuencia, en lugar de en el de tiempo (figura 5). Para ello se hace la hipótesis de que el pilote vibra como una varilla con unas frecuencias preferenciales (modos propios de vibración).

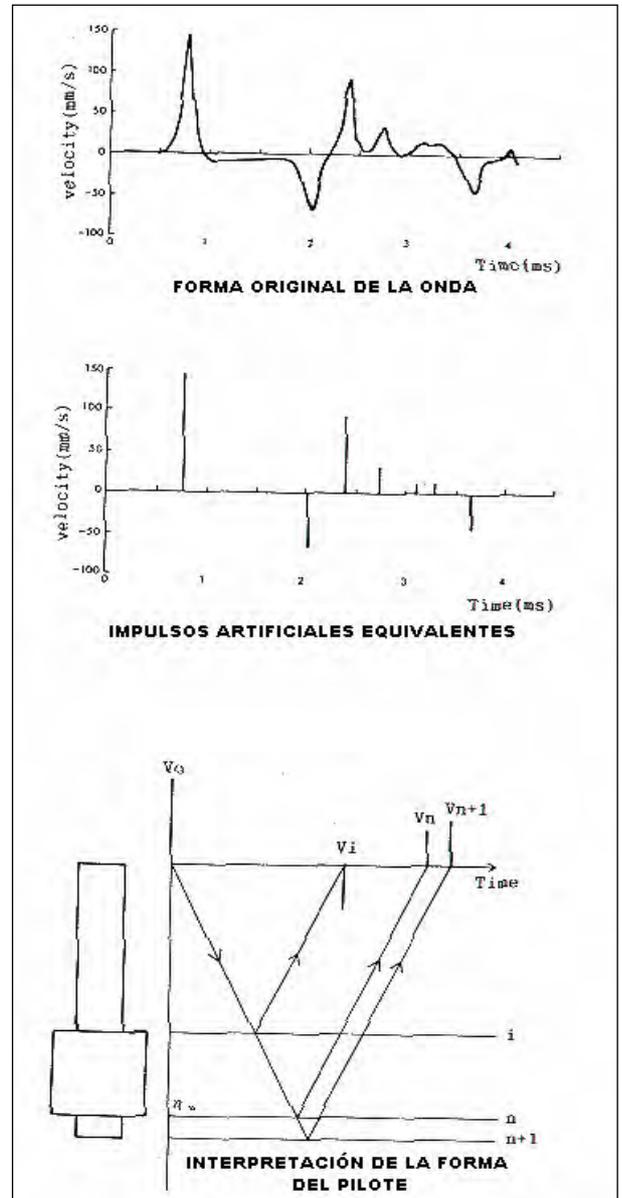


Figura 2. Cambios de polaridad de la onda, en los cambios de impedancia.

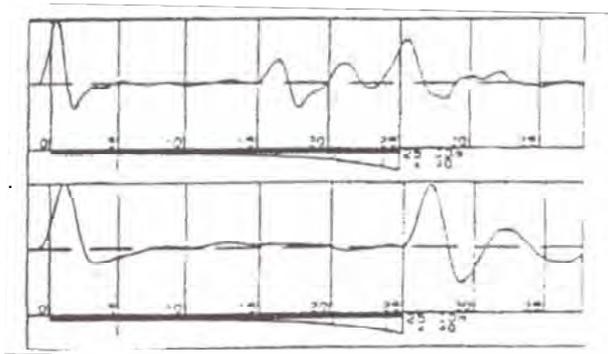


Figura 3. Análisis de la señal de un ensayo de eco en el dominio del tiempo:

*Pilote con defecto –registro en la parte superior*  
*Pilote sano – registro de la parte inferior.*

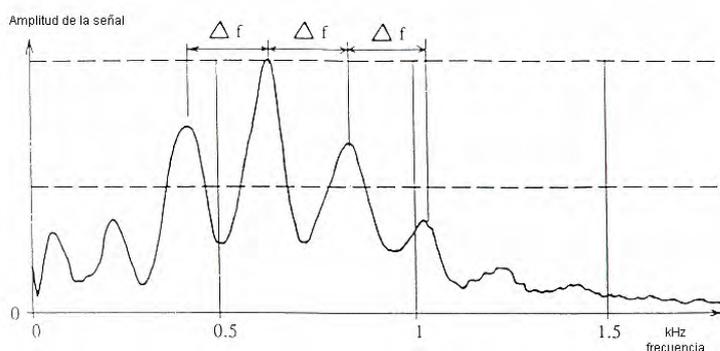
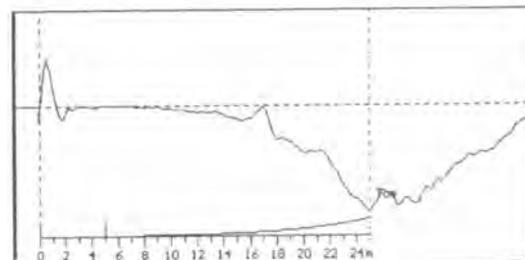


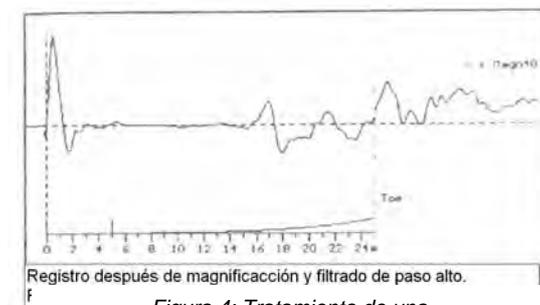
Figura 5. Análisis de la señal en el dominio de la frecuencia.



Registro original de un ensayo de integridad



Registro después de aplicar una magnificación exponencial



Registro después de magnificación y filtrado de paso alto.

Figura 4: Tratamiento de una señal con magnificación y filtrado.

Entre dos frecuencias propias consecutivas hay siempre un desfase:

$$\Delta f = \frac{c}{2 \cdot L}$$

Midiendo  $\Delta f$  se puede calcular la longitud del pilote como:

$$L = \frac{c}{2 \cdot \Delta f}$$

Si, además de instrumentar el pilote con un acelerómetro, instalamos otro acelerómetro en el martillo de golpeo, cuya masa es conocida, podemos disponer también del valor de la fuerza de impacto. La respuesta del pilote, analizada en el dominio de la frecuencia, constituye un ensayo específico denominado **Ensayo de Impedancia Mecánica**.

Como la amplitud de la onda de velocidad depende de la magnitud del impacto, es conveniente normalizar la curva dividiendo por la fuerza aplicada en la cabeza del pilote. Esa curva, función de transferencia de velocidad producida por una fuerza, recibe el nombre de Movilidad (M). El análisis de la curva de movilidad permite además conocer otros parámetros del pilote. (Figura 6).

A pequeñas frecuencias, la curva de movilidad suele ser una recta. La pendiente de esa recta proporcional a la Flexibilidad ( $1/K$  = inversa de la Rigidez Mecánica) del pilote.

$$M = \frac{V}{F} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{1}{K}; \quad K = 2 \cdot \pi \cdot \frac{f}{M}$$

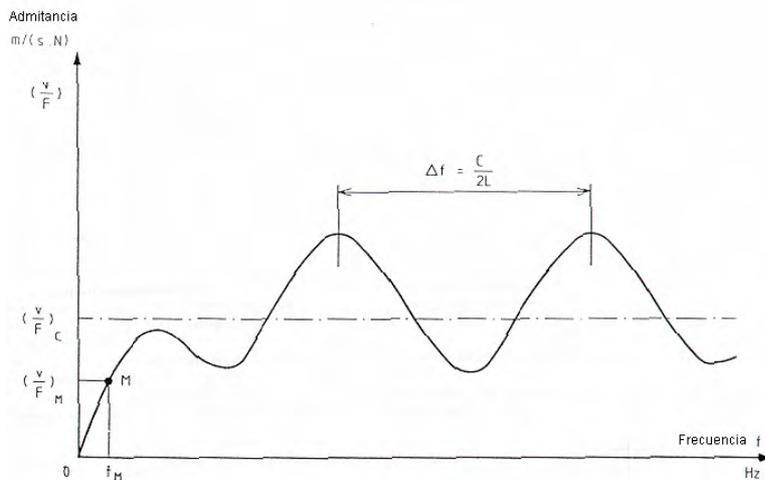


Figura 6. Gráfico de Admitancias

En un pilote, la rigidez  $K$  depende principalmente de su diámetro, su longitud y de las propiedades del hormigón y del terreno que le rodea. En un mismo terreno, pilotes del mismo diámetro y de longitudes similares suelen presentar rigideces muy parecidas. Si dentro de un grupo de pilotes, alguno de ellos presenta una rigidez muy inferior al resto, puede ser indicativo de algún tipo de rotura. En algunos casos donde las curvas de movilidad son difíciles de interpretar, el valor de la rigidez puede ser de mucha utilidad para identificar pilotes rotos.

Además, a partir de la primera resonancia, el valor de la movilidad oscila en torno a un valor medio que se conoce como admitancia característica  $N$  y que es el inverso de la impedancia característica del pilote:

$$N = \frac{1}{Z} = \frac{1}{\rho \cdot c \cdot A} = \frac{c}{E \cdot A} ;$$

Este valor teórico de la admitancia característica se puede comparar con el obtenido del gráfico para tener una idea de la calidad del hormigón o de un aumento o disminución de sección del pilote.

Las ventajas e inconvenientes del ensayo de Impedancia son muy similares a las del ensayo de Eco; no obstante, este ensayo dispone de más datos para realizar la interpretación, como son la rigidez dinámica y la admitancia característica. Siempre que se realice un ensayo de Impedancia conviene analizar simultáneamente la curva de Eco para obtener una interpretación común de los registros de Eco y Movilidad.

## Ensayos de alta deformación.

### Aplicación al cálculo de la capacidad portante de un pilote. Pruebas de carga dinámicas.

Las pruebas de carga estáticas constituyen un método por el que se puede comprobar la integridad y capacidad portante del pilote. Sin embargo las pruebas estáticas son tremendamente caras y lentas en su preparación y ejecución, por lo que sólo es posible realizarlas en un ínfimo número de pilotes dentro del conjunto de una obra.

En la actualidad, el desarrollo de la informática y la electrónica aplicadas al análisis de la ecuación de onda han permitido la toma de medidas de alta precisión de los valores de fuerza y velocidad que se desarrollan durante el impacto de la maza de hinca en la cabeza del pilote. De esta forma, mediante el método desarrollado por el Case Institute of Technology, Cleveland, Ohio, U.S.A., se pueden obtener la capacidad portante, las tensiones que sufre el pilote y la energía del impacto, sin las incertidumbres que se engloban bajo coeficientes de seguridad en las fórmulas de hinca. La proliferación de estas técnicas ha hecho que, hoy en día, en todo el mundo, sean el procedimiento normal de control en los trabajos de pilotaje hincado, empezándose a utilizar también en el pilotaje in situ.

### Equipo de medida.

Los métodos de control electrónico de la hinca de pilotes se basan en la medida de los valores de deformación y velocidad que se producen en la cabeza del pilote a partir del momento del impacto del

martillo. Este impacto recorre toda la longitud del pilote en forma de una onda de presión cuya señal se registra mediante dos tipos de sensores: transductores de deformación y acelerómetros.

La figura 7 muestra un esquema del sistema de registro. La señal obtenida por el transductor de deformación nos permite obtener la señal de fuerza:  $F = E \cdot A \cdot \epsilon$ , y la señal del acelerómetro se integra para obtener la velocidad con que se mueve la cabeza del pilote:  $V = \int a \cdot dt$ .

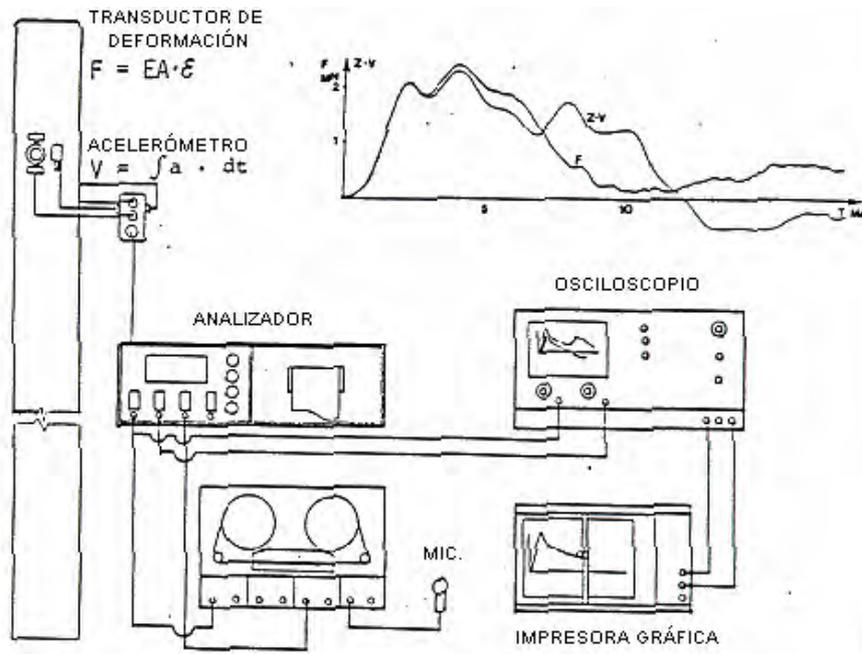


Figura 7. Esquema del sistema de registro.

El tratamiento de la señal se realiza actualmente en equipos digitales muy compactos como el PDA (Pile Driving Analyzer) de la fotografía de la figura 8.



La disposición habitual es la que se muestra en las fotografías de la figura 9, con dos parejas de acelerómetros y transductores de deformación en caras diametralmente opuestas de un pilote, de forma que el valor registrado sea la media de la pareja de sensores del mismo tipo de manera que se compensen las desviaciones por la posible excentricidad del impacto. En la figura 9, se muestran, abajo a la izquierda, las posibles disposiciones a adoptar según el tipo de pilote a ensayar.

Figura 8. PDA ("Pile Driving Analyzer")

### Propagación de las ondas de presión. Ecuaciones fundamentales - Desarrollo teórico.

Cuando el martillo golpea la cabeza de un pilote, ésta se comprime y las partículas son aceleradas. La compresión entonces se desplaza por todo el pilote.

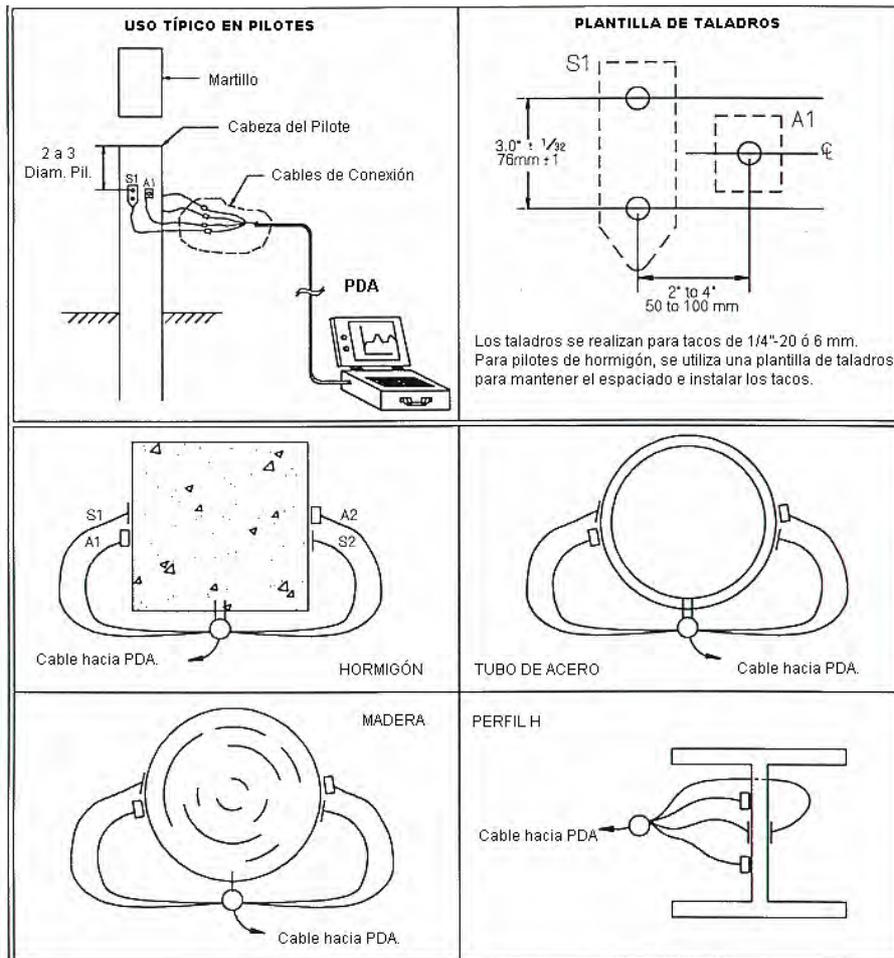
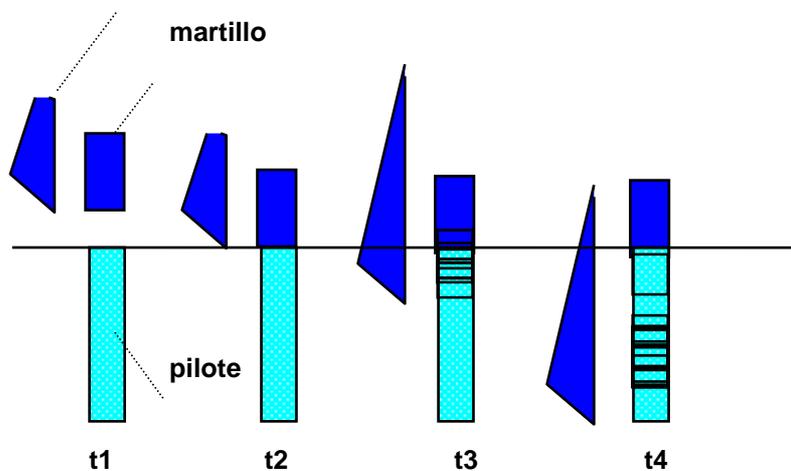


Figura 9. Disposiciones de los sensores según el tipo de pilote a ensayar

La propagación de la onda de un impacto de martillo a lo largo de un pilote puede asimilarse al caso unidimensional, con deformación plana, en el que la tensión es uniforme en toda una misma sección transversal.

**onda de compresión por el impacto**



Tomando fuerzas en un elemento del pilote de longitud diferencial, se obtiene:

$$F_1 - F_2 = m \cdot a$$

$$\frac{\partial \cdot \sigma}{\partial \cdot x} \cdot dx \cdot A = dm \cdot a$$

$$\frac{\partial \cdot \sigma}{\partial \cdot x} \cdot dx \cdot A = dx \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial \cdot t^2}$$

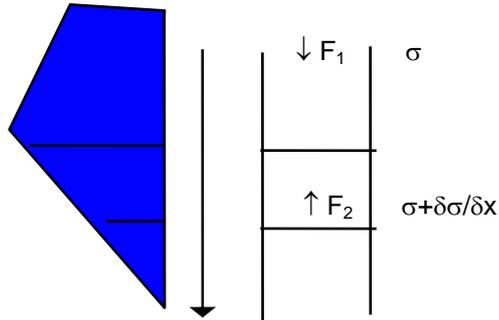
Por elasticidad,

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = E \cdot \frac{\partial \cdot u}{\partial \cdot x}$$

de lo que se obtiene:

$$\frac{\partial^2 \cdot u}{\partial \cdot t^2} = \frac{E}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial \cdot x^2} \quad (1.)$$

si llamamos  $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ ; queda:  $\frac{\partial^2 u}{\partial \cdot t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial \cdot x^2}$ , conocida ecuación de onda en una dimensión.



De la ecuación de onda se deduce que las vibraciones se desplazan en la dirección longitudinal del pilote a una velocidad  $c$ .

Es importante distinguir entre la velocidad de propagación de la onda ( $c$ ) y la velocidad instantánea de las partículas en la zona tensionada ( $V$ ).

$$\frac{\Delta u}{\Delta t} = u' = V \quad \frac{\Delta x}{\Delta t} = x' = c$$

Cuando aplicamos una compresión uniforme  $\sigma$ , de duración  $t_n$ , solo una zona del pilote sufrirá la compresión inicialmente. Esta compresión se transmitirá a las zonas sucesivas a medida que transcurra el tiempo, a la velocidad con que se propaga la onda en ese medio ( $c$ ):  $\Delta x = c \cdot \Delta t$

La compresión ( $\sigma$ ) de esa zona del pilote producirá una deformación ( $\varepsilon$ ), siendo:  $\varepsilon = \frac{\Delta u}{\Delta x} = \frac{\sigma}{E}$

se tiene:  $\frac{\Delta u}{\Delta t} = u' = V = \sigma \cdot \frac{c}{E}$ , esto es:  $F = \frac{E \cdot A}{c} \cdot V$

que demuestra el hecho, característico de la mecánica de ondas, de que la fuerza es proporcional a la velocidad con que vibran las partículas.

La constante de proporcionalidad se conoce como "impedancia" ( $Z$ ) del pilote, siendo un término que depende exclusivamente de la forma del pilote y el material que lo compone.

Dado que  $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ , la impedancia del pilote la podemos expresar de diversas formas:

$$Z = \frac{E \cdot A}{c} = \rho \cdot c \cdot A = \frac{m \cdot c}{L}$$

En cuanto a la ecuación de onda (1) es fácil comprobar que las funciones del tipo  $f(x+ct)$  y  $f(x-ct)$  son soluciones de ella. Todas las soluciones de este tipo cumplen que la función toma valores idénticos en puntos espaciados equidistancias  $\Delta x$ , con un desfase de tiempo  $\Delta t$ . Esto es, lo que ocurre en un punto  $x_1$  es lo mismo que ocurre en otro punto  $x_2$  al cabo de un tiempo  $\Delta t = \Delta x / c$ , con  $\Delta x = x_2 - x_1$ . Por ello, se dice que la onda se desplaza con velocidad  $c$ .

Si la longitud de un pilote se mide sobre el eje x, con el sentido positivo hacia abajo:

La función  $f(x-ct)$  será una onda descendente:  $\downarrow$ , y

La función  $f(x+ct)$  será una onda ascendente:  $\uparrow$ .

Un tipo general de solución de la ecuación diferencial puede ser de la forma:

$u = \downarrow f(x-ct) + \uparrow f(x+ct)$ , por ejemplo:

$$u = \frac{A}{2} \cdot \cos\left(\frac{\omega}{c}(x + c \cdot t)\right) + \frac{A}{2} \cdot \text{sen}\left(\frac{\omega}{c} \cdot (x - c \cdot t)\right)$$

$$u = \frac{A}{2} \cdot \left(\cos\left(\frac{\omega}{c} \cdot x\right) \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) + \text{sen}\left(\frac{\omega}{c} \cdot x\right) \cdot \cos(\omega \cdot t)\right) +$$

$$+ \frac{A}{2} \cdot \left(\cos\left(\frac{\omega}{c} \cdot x\right) \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) - \text{sen}\left(\frac{\omega}{c} \cdot x\right) \cdot \cos(\omega \cdot t)\right)$$

$$u = A \cdot \cos\left(\frac{\omega}{c} \cdot x\right) \cdot \text{sen}(\omega \cdot t),$$

función que, como se había comentado, toma valores idénticos en un determinado punto x cada intervalo de

tiempo T: 
$$T = \frac{2 \cdot \pi}{\omega}$$

Al tiempo T se le llama periodo propio;  $f=1/T$  es la frecuencia propia y  $\omega$  la frecuencia angular.

Si la solución general de la ecuación de onda eran dos ondas viajando a lo largo del pilote en direcciones opuestas:  $u = \downarrow f(x-ct) + \uparrow f(x+ct)$ , podemos expresar la fuerza F y la velocidad V de un elemento de pilote descompuesta en las correspondientes a la onda ascendente y a la descendente:

$$F = -E \cdot A \cdot \frac{\partial \cdot u}{\partial \cdot x} = -E \cdot A \cdot \frac{\partial \cdot (\downarrow f)}{\partial \cdot (x-ct)} - E \cdot A \cdot \frac{\partial \cdot (\uparrow f)}{\partial \cdot (x+ct)} = \downarrow F + \uparrow F \quad (2.)$$

$$V = \frac{\partial \cdot u}{\partial \cdot t} = -c \cdot \frac{\partial \cdot (\downarrow f)}{\partial \cdot (x-ct)} + c \cdot \frac{\partial \cdot (\uparrow f)}{\partial \cdot (x+ct)} = \downarrow V + \uparrow V \quad (3.)$$

$$Z = \frac{E \cdot A}{c} \quad , \text{ se tiene:}$$

$$\downarrow F = \downarrow V \cdot Z \quad (4.) \quad \text{y}$$

$$\uparrow F = -\uparrow V \cdot Z \quad (5.)$$

Lo que indica que, para ondas viajando hacia abajo, el signo de la fuerza y la velocidad son el mismo, mientras que es opuesto en ondas con sentido ascendente.

De las ecuaciones (2), (3), (4) y (5) se deduce:

$$\downarrow F = \frac{F + Z \cdot V}{2} \quad (6.)$$

$$\uparrow F = \frac{F - Z \cdot V}{2} \quad (7.)$$

**Ecuaciones que se pueden utilizar para obtener separadamente las amplitudes de las ondas ascendente y descendente a partir de los valores de la fuerza total ( $F$ ) y velocidad total de las partículas ( $V$ ), que pueden registrarse por medio de transductores de deformación y acelerómetros, respectivamente.**

Un conjunto de masa puntuales unidas por muelles puede servir como modelo muy simplificado para comprender el desplazamiento de la onda por el pilote. En las figuras 10 y 11 se observan dos casos diferentes en las que la punta del pilote (masa inferior) se encuentra fija o libre, respectivamente.

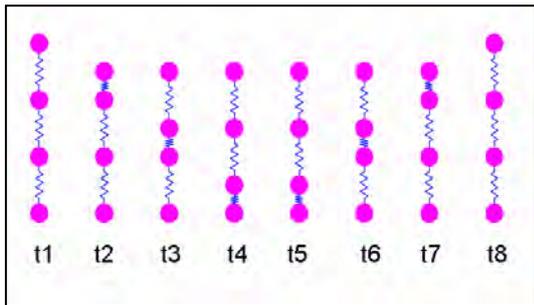


Figura 10. Modelo simplificado de transmisión de onda en sistema con punta empotrada

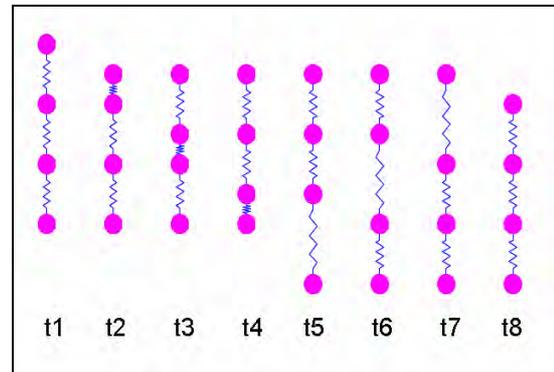


Figura 11. Modelo simplificado de transmisión de onda en sistema con punta libre.

Si la punta está empotrada, la onda de compresión descendente se refleja como otra onda idéntica de compresión ascendente. Sin embargo, si la punta está libre, la onda ascendente reflejada es una onda de tracción y el resultado final es el descenso del pilote.

La amplitud onda de compresión generada por el impacto del martillo puede asimilarse a una forma rectilínea con dos tramos de diferente pendiente. Uno primero, de mayor pendiente, hasta llegar a un máximo en el que la pendiente es más reducida y de sentido contrario hasta llegar a anularse.

Cuando esta onda alcanza la punta del pilote, comienza a reflejarse con una amplitud igual a la incidente. Esto es así hasta que la onda incide en la punta con una magnitud igual a la mitad de la resistencia total del terreno. Entonces, la reflexión se reduce a la diferencia entre la resistencia total del terreno menos la amplitud de la onda incidente ( $+\uparrow F_2 = RT - \downarrow F_1$ ). Si producimos una fuerza incidente con el martillo ( $\downarrow F_1$ ) mayor que la resistencia total del terreno ( $RT$ ), la onda reflejada hacia la cabeza del pilote ( $\uparrow F_2$ ) llegará a tomar valores negativos.

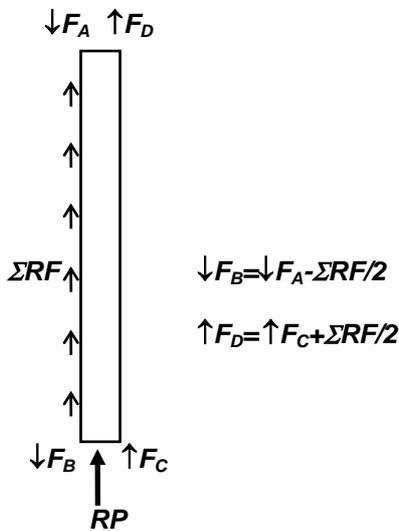
En la figura 12 se observa como en un registro de onda de un impacto real pueden reconocerse las formas características de la onda reflejada que resultan de utilizar la forma rectilínea simplificada.

Usando las ecuaciones 6 y 7 que permiten obtener la onda incidente ( $\downarrow F_A$ ) separadamente de la reflejada ( $\uparrow F_B$ ), puede obtenerse la resistencia total del terreno por suma de ambas:  $RT = \downarrow F_A + \uparrow F_B$ . Entre los valores incidente y reflejado medidos debe existir una diferencia de tiempo  $t = 2 \cdot L / c$ , tiempo que tarda la onda en recorrer el camino que va desde la cabeza hasta reflejarse en la punta y volver a la cabeza.

Se debe tener en cuenta que cuando una tensión viene producida por una carga dinámica, la deformación que induce es igual a la relación entre la velocidad de las partículas y a velocidad de onda ( $\epsilon = V/c$ ). En este caso, aparecen fuerzas de amortiguamiento y la deformación total se compone de dos partes, una estática y otra dinámica. Además, debe tenerse en cuenta que a medida que las condiciones dejan de ser elásticas, pasando a ser plásticas, el comportamiento de propagación de la onda deja de ser unidimensional.



De modo que la fuerza en el pie del pilote puede calcularse, siguiendo la notación del siguiente esquema, como:



$$RP = \downarrow F_B + \uparrow F_C = \left( \downarrow F_A - \frac{\Sigma RF}{2} \right) + \left( \uparrow F_D - \frac{\Sigma RF}{2} \right) \quad (13.);$$

y la Resistencia Total del pilote como:

$$RT = RP + 2 \cdot \left( \frac{\Sigma RF}{2} \right) = \downarrow F_A + \uparrow F_D ; \text{ que a partir de}$$

las relaciones:  $\downarrow F = \frac{F + Z \cdot V}{2}$  y  $\uparrow F = \frac{F - Z \cdot V}{2}$   
puede ponerse en su forma conocida:

$$RT = \frac{F_A + F_D}{2} + \frac{m \cdot c}{2 \cdot L} \cdot (V_A - V_D) \quad (14.)$$

### Métodos de interpretación.

Existen dos métodos diferentes de interpretación de los registros de fuerza y velocidad obtenidos en el pilote bajo impactos de alta deformación:

- El primero permite un cálculo inmediato de la capacidad portante durante la prueba (método Case y método TNO), y
- El segundo, más riguroso, requiere la modelización matemática del pilote y el terreno y un proceso iterativo variando múltiples parámetros hasta conseguir el ajuste de la señal modelizada con la señal captada por los sensores (método CAPWAP y método TNOWAVE).

### Métodos directos.

Los métodos directos calculan la capacidad portante como la componente estática ( $R_{stat}$ ) de la resistencia total del suelo ( $R_{tot}$ ), para lo que se requiere restarle a ésta última la componente dinámica ( $R_{dyn}$ ) que se solo ocurre durante la hincia del pilote debido a los efectos de amortiguamiento e inercia:  $R_{stat} = R_{tot} - R_{dyn}$

La figura 14 muestra un ejemplo de análisis por el método Case. En la parte superior, se reproducen los registros de fuerza y velocidad, ambos medidos cerca de la cabeza del pilote, como función del tiempo  $F(t)$  y  $v(t)$ .

La fuerza  $F(t)$  se calcula a partir de la deformación,  $\epsilon(t)$ , medida por los extensómetros:

$$F(t) = E \cdot A \cdot \epsilon(t),$$

siendo:  $E$  = el modulo de eladsticidad dinámico del material del pilote, y

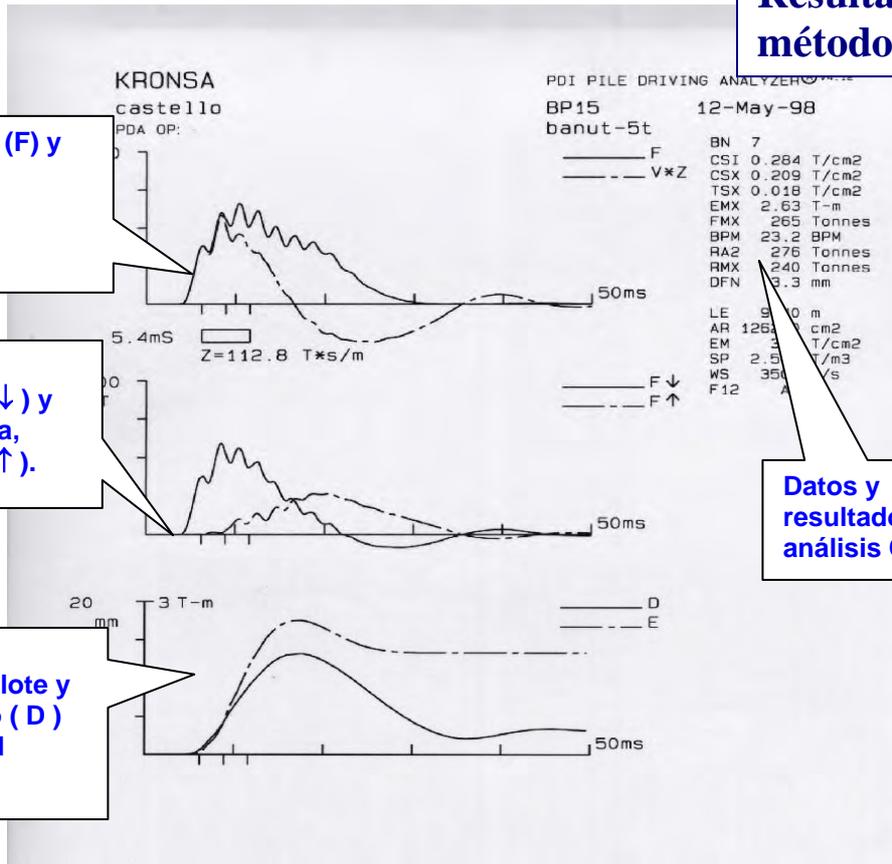
$A$  = el área de la sección transversal del pilote.

## Resultados del método CASE

Curvas de fuerza (F) y velocidad (V) registradas por extensómetros y acelerómetros

Onda de fuerza descendente (F↓) y la onda reflejada, ascendente, (F↑).

Energía (E), transferida al pilote y desplazamiento (D) de la cabeza del pilote,



Datos y resultados del análisis CASE

Figura 14. Curvas y resultados del método Case.

La velocidad se obtiene de los registros de los acelerómetros, tras integrar una vez en el tiempo. En tanto en cuanto no existen resistencias externas (resistencias por fuste) que se opongan al movimiento del pilote, o mientras no existan cambios de sección que produzcan reflexiones,  $F(t)$  y  $v(t)$  permanecen proporcionales. El factor de proporcionalidad es la impedancia mecánica del pilote  $Z = EA/c$ . Cuanto mayores diferencias se aprecian entre las curvas  $F(t)$  y  $v(t)$ , mayor es la resistencia del suelo en el fuste del pilote.

La resistencia total del suelo se puede calcular a partir de las gráficas de fuerza y velocidad de las ondas incidente-descendente (1) y reflejada-ascendente (2), como se dedujo en la ecuación 14:

$$R_{tot} = \frac{F_1 + F_2}{2} + \frac{m \cdot c}{2 \cdot L} \cdot (V_1 - V_2).$$

El **método Case** asume que la componente dinámica de la resistencia  $R_{dyn}$  es proporcional a la velocidad de la punta del pilote  $v_b$ :  $R_{dyn} = J_c \cdot Z \cdot v_b$ .

La velocidad de la punta del pilote se obtiene de:  $v_b = v_1 + (F_1 - R_{tot})/Z$

El **método TNO** calcula la resistencia dinámica separadamente por fuste  $R_{sdyn}$  y por punta  $R_{bdyn}$ .  
 $R_{dyn} = R_{sdyn} + R_{bdyn}$ .

$R_{bdyn} = v_b \cdot A \cdot C_b$ , siendo:  $C_b$  el parámetro relativo al amortiguamiento;  $A$ , el área de la sección transversal; y  $v_b$ , la velocidad de la punta del pilote.

$R_{sdyn} = v_s \cdot O \cdot C_s$ , siendo  $C_s$  el parámetro de amortiguamiento;  $O$ , el área lateral del pilote embebido en el terreno; y  $v_s$ , la velocidad del fuste del pilote.

La velocidad del fuste del pilote se obtiene de:  $v_s = 1/2 \cdot (v_1 + F_1/Z) - 1/2 \cdot (F_3/Z - v_3)$ .  $F_3$  y  $v_3$  se miden en el punto donde se hace máxima la diferencia entre fuerza y velocidad.

Los rangos de variación de los parámetros de ambos métodos, según el tipo de terreno son:

Suelo	$J_c$ [-]	$C_s$ [MN/m/s/m <sup>2</sup> ]	$C_b$ [MN/m/s/m <sup>2</sup> ]
Arena	0,05-0,20	0,02-0,010	0,4-2,0
Limo arenoso	0,15-0,30	0,005-0,015	1,0-3,0
Limo	0,20-0,45	0,010-0,025	2,0-5,0
Arcilla arenosa	0,40-0,70	0,020-0,040	4,0-8,0
arcilla	0,60-1,10	0,025-0,040	5,0-10,0

### Métodos iterativos usando modelos matemáticos.

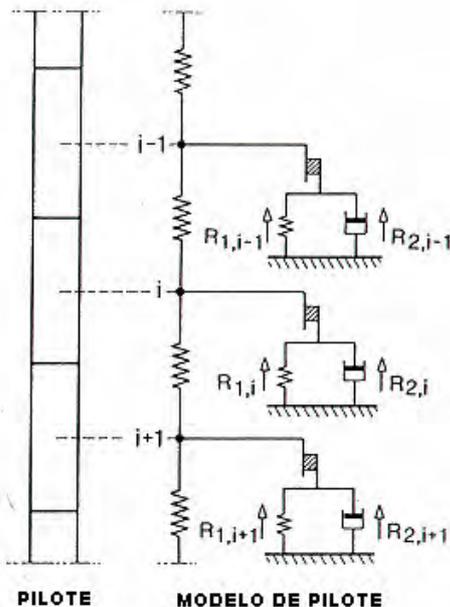
Los métodos basados en modelización matemática utilizan, al igual que los métodos directos, las curvas de fuerza y velocidad registradas en la cabeza del pilote. La teoría de la onda unidimensional permite la estimación de la resistencia del suelo y el cálculo de la respuesta del pilote bajo un impacto del martillo de hinca.

La modelización de la resistencia del suelo consiste en un muelle elastoplástico, mientras que la parte dinámica de la resistencia se simula por medio de un amortiguador viscoso lineal.

La resistencia de fuste se modeliza en puntos discretos a lo largo del pilote, pudiendo así permitirse una resistencia variable a distintas profundidades.

### El método CAPWAP (CAsE Pile Wave Analysis Procedure).

Las fuerzas de reacción del suelo son fuerzas pasivas y, hasta ahora se ha tenido suficiente precisión al considerarlas como función exclusiva del movimiento del pilote. Se asume además que la reacción del suelo tiene dos componentes, una estática (elasto-plástica) y otra dinámica (amortiguamiento lineal). De esta forma el modelo del suelo puede representarse en cada punto con tres incógnitas (elasticidad, plasticidad y viscosidad).



El análisis dinámico del método CAPWAP se realiza con el procedimiento introducido por Smith. Este procedimiento divide el pilote en un número discreto de masas puntuales, muelles y amortiguadores (figura 21). De esta forma, existen tres veces más incógnitas que elementos de pilote.

Inicialmente se asumen unos parámetros para cada elemento de suelo y se introduce el movimiento del pilote obtenido a partir del registro de aceleración en la cabeza del pilote. Los resultados que se obtienen no son solamente los movimientos del pilote y las resistencias del suelo, sino también la fuerza *calculada* en la cabeza del pilote.

Esta fuerza en la cabeza del pilote *calculada* puede compararse con la fuerza *medida* en la cabeza del pilote mediante los transductores de deformación. Normalmente

Figura 15.

estos dos registros no coinciden y es necesario seguir un procedimiento iterativo hasta que sean suficientemente aproximados el uno al otro. Para conseguirlo es necesario ir variando los parámetros del suelo en cada punto hasta que sea imposible mejorar el ajuste entre los dos registros. Los parámetros del suelo así obtenidos se consideran entonces los correctos. El resultado final del análisis CAPWAP son, por tanto, la magnitud y localización a lo largo del pilote de las resistencias estática y dinámica. La resistencia estática puede utilizarse para predecir la curva del comportamiento que tendría el pilote en el caso de una prueba estática de carga.

La figura 16 muestra los resultados de un análisis CAPWAP: el ajuste entre las curvas medidas y calculadas, los valores de resistencia por punta y fuste en los elementos de pilote y la curva que predeciría el comportamiento del pilote bajo una prueba de carga estática.

## Resultados método CAPWAP

Ajuste de los parámetros de un modelo matemático pilote - suelo por comparación con los valores registrados por los sensores

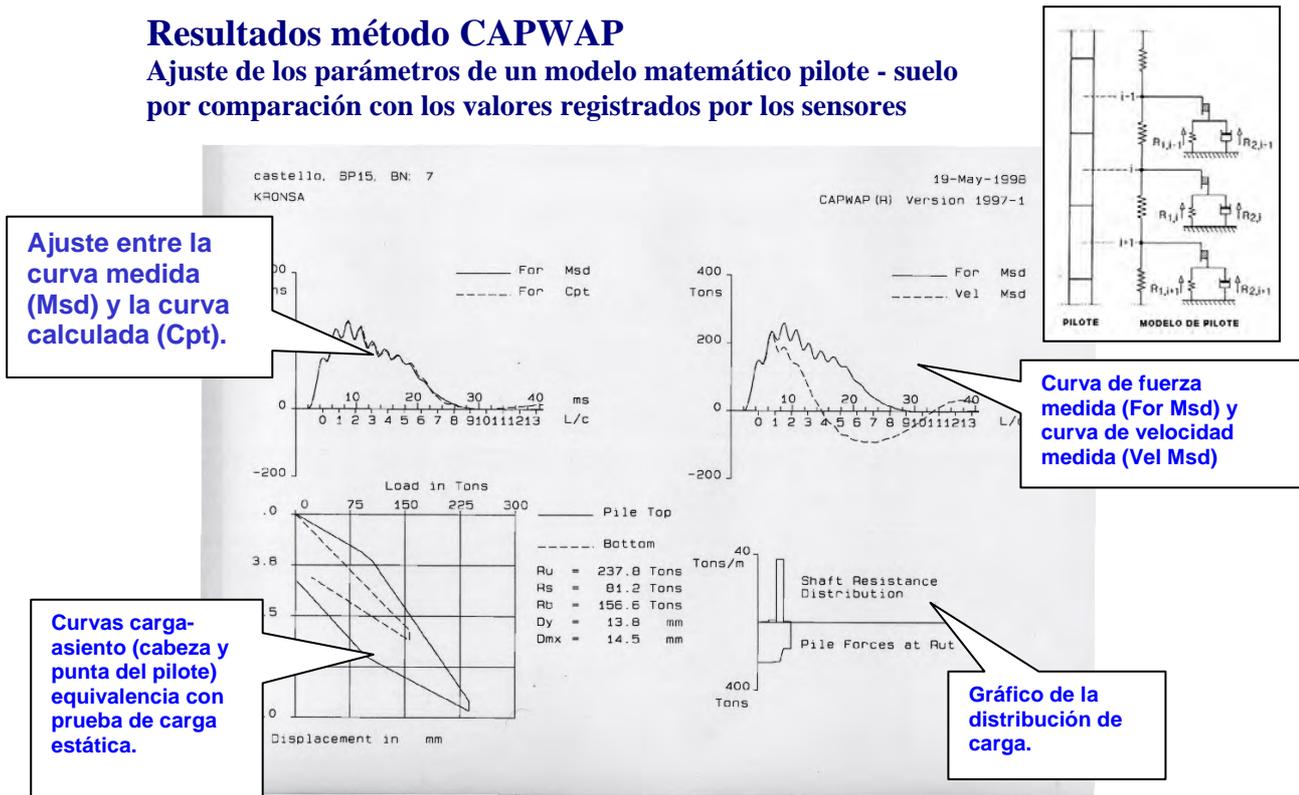


Figura 16. Gráficos de CAPWAP. Análisis y ajuste de curvas. Equivalencia con prueba de carga.

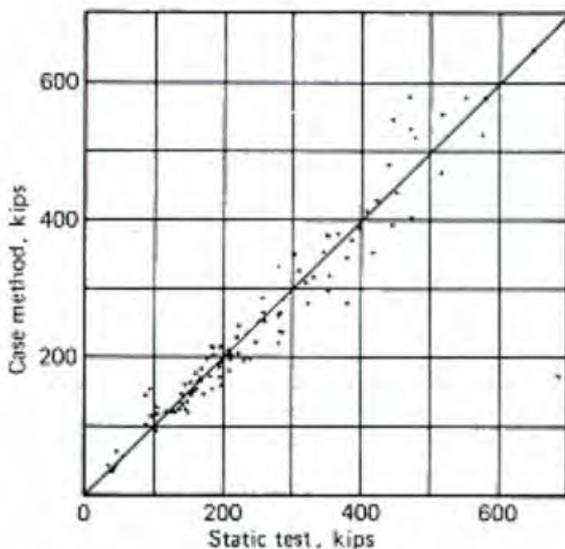


Figura 17. Comparación de resultados en pilotes analizados dinámicamente y estáticamente.

Hasta la actualidad, todos los usuarios del Analizador de Hinca han comparado sus resultados con los de pruebas estáticas de carga. En la figura 17 se adjunta un gráfico que permite ver la buena correlación de ambos ensayo, que confirman la fiabilidad del método.

## ***Bibliografía:***

### ***Artículos:***

Proceedings of the Sixth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles. Sao Paulo – Brasil, 11-13 sept-2000. Ed.:  
A.A.Balkema/Róterdam/Brookfield/2000.  
[www.balkema.nl](http://www.balkema.nl).

### ***Normativa:***

AFNOR. "Sols: reconnaissance et essais. Auscultation d'un element de fondation. Partie 2: Méthode par réflexion", norma NF P 94-160-2.

AFNOR. "Sols: reconnaissance et essais. Auscultation d'un element de fondation. Partie 4: Méthode par impédance", norma NF P 94-160-4.

ASTM. "Standard Test Method for Low Strain Integrity Testing of Piles". Designation: D 5882-96.

ASTM. "Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Piles". Designation: D 4945-89.

### ***Internet***

GRL & Pile Dynamics Home Page: [www.pile.com](http://www.pile.com).

Home Page PDI Engenharia: [www.pdi.com.br](http://www.pdi.com.br). (español).

CFT y asociados. <http://members.es.tripod.de/cftasoc/>.

Alliance of Deep Foundation Testing Professionals APTLY: [www.insitutech.com/aptinfo.html](http://www.insitutech.com/aptinfo.html).

TNO: [www.tno.nl](http://www.tno.nl)

[www.geoforum.com](http://www.geoforum.com)

# ***Sistemas de Control***

**Carlos Fernández Tadeo  
Emilio Téllez García  
CFT & Asociados, S.L.**

**RESUMEN:** Son tres los métodos utilizados en nuestro país para comprobar la integridad estructural de pilotes mediante sistemas no destructivos:

- a) El método sónico mediante martillo de mano que genera una onda sónica que baja por el fuste del pilote, rebota en la punta y es captada por un acelerómetro. También se le conoce como "ensayo de impedancia mecánica" o "sonic echo" (en inglés).
- b) El método de cross-hole ultrasónico, que consiste en hacer descender un emisor y un receptor de ultrasonidos por dos conductos huecos paralelos en el interior del fuste del pilote, registrándose el tiempo que tarda la onda en recorrer la distancia entre ambos. También se le conoce como "sondeo sónico" o "ensayo por transparencia sónica".
- c) El tercer método es el ensayo dinámico mediante un impacto importante sobre la cabeza del pilote. Generalmente se realiza en pilotes prefabricados utilizando el mismo martillo de hincas, siendo al mismo tiempo un ensayo de integridad estructural del pilote y un ensayo rápido de carga. En todo el mundo se está ya utilizando también sobre pilotes hormigonados "in situ".

El incremento de la demanda de estos ensayos en nuestro país ha provocado que estos salgan del ámbito de unos pocos especialistas para entrar de lleno en el abanico de servicios de los laboratorios generalistas de ensayos de materiales de construcción. Sin embargo, con frecuencia no se obtienen los niveles de calidad esperados en la realización de los ensayos, debido a que no siempre los equipos comprados tienen la tecnología óptima y a que las personas que los utilizan e interpretan no disponen muchas veces de la suficiente experiencia y preparación.

## **1. Generalidades**

Los ensayos de integridad de pilotes suministran informaciones sobre las dimensiones físicas, la continuidad o la consistencia de los materiales empleados en los pilotes, y no suministran información directa sobre el comportamiento de los pilotes en condiciones de carga.

Estos ensayos no pretenden reemplazar a los ensayos estáticos de carga, sino que constituyen una fuente adicional de información sobre los pilotes construidos. Significan una potente herramienta de trabajo para poder determinar experimentalmente la existencia de defectos en los pilotes con rapidez y economía, por lo que son utilizados básicamente como control de calidad generalizado de los pilotes.

En el caso de detectarse anomalías mediante los ensayos de integridad, la dirección de obra puede recurrir a otros métodos para intentar investigar las causas, la naturaleza y la extensión de la ano-

malía, y determinar si el pilote es apto para el uso que se pretende. Los métodos empleados tradicionalmente en estos casos son la excavación alrededor del pilote y los sondeos con extracción de testigo continuo del fuste del pilote. La realización de sondeos solo permite obtener datos del testigo extraído y de las paredes del sondeo, cuya posición con respecto al eje del pilote es difícil de conocer exactamente cuando la profundidad es grande.

Los resultados de los ensayos de integridad necesitan ser interpretados por personal experimentado. Las modernas técnicas electrónicas e informáticas permiten un procesamiento y un tratamiento de las señales que facilitan la posterior presentación e interpretación de los resultados. No se puede esperar que los ensayos de integridad identifiquen todas las imperfecciones existentes en un pilote, pero son una potente herramienta principalmente como salvaguardia contra defectos importantes. Los ensayos de integridad pueden identificar defectos de menor importancia que no afecten gravemente al pilote, por lo que resulta fundamental la experiencia del técnico responsable de la interpretación.

Las pruebas de carga permiten conocer el comportamiento real de los pilotes en el terreno, sometidos a cargas generalmente superiores a las de servicio. Se realizan en la fase de proyecto de la cimentación, o en la fase de construcción, como comprobación del diseño realizado. Dadas las elevadas cargas a aplicar, usualmente del orden de cientos de toneladas, son ensayos muy costosos, por lo que la tendencia es a realizarlos cada vez menos y solo en obras de elevado presupuesto. Los modernos ensayos rápidos de carga, de coste muy inferior, permiten la realización de pruebas de carga en obras de presupuestos medios, que se benefician así también del diseño más ajustado que admiten las normas cuando se realizan ensayos de carga.

## 2. Métodos de Ensayo de Integridad Estructural

Las nomenclaturas existentes son variadas y contradictorias en la literatura técnica y en la publicidad de las casas suministradoras de equipos y de las empresas que realizan ensayos, utilizándose palabras como "sónico", "sísmico" y "dinámico" con diferente significado según los autores, por lo que los nombres utilizados a continuación pueden no coincidir con los que aparezcan en otros documentos, aunque trataremos de hacer referencia más al método en sí que al nombre.

Son tres los métodos de ensayo de integridad de pilotes más difundidos, que también se emplean en nuestro país:

- El más utilizado internacionalmente consiste en golpear la cabeza del pilote con un martillo de mano y obtener mediante instrumentación el movimiento de la cabeza del pilote como consecuencia de la onda de tensión generada. Es un método dinámico que induce una baja deformación en el pilote, denominándose generalmente "método sónico", aunque también se le nombra como "sísmico", "ensayo de integridad de baja deformación", "sonic echo" (en inglés) o "ensayo de impedancia mecánica". Se aplica a cualquier tipo de pilote, no requiere ninguna preparación especial en el mismo, ni necesita equipo pesado, por lo que resulta económico y de gran rendimiento (Figuras 1, 2 y 3).
- Otro método muy conocido consiste en hacer descender un emisor y un receptor de ultrasonidos por dos conductos huecos paralelos en el interior del fuste del pilote, registrándose el tiempo empleado en recorrer la distancia entre ambos. Es también un método dinámico que induce una baja deformación en el pilote, denominándose generalmente "cross-hole ultrasónico", aunque también se le denomina "sondeo sónico", "sondeo sísmico", "ensayo sísmico paralelo", "cross hole sonic logging" (en inglés) o "ensayo por transparencia sónica". Requiere que se dejen dos o más tubos embebidos en el hormigón, o que se realicen taladros en el hormigón endurecido. Una vez realizado esto, el ensayo es rápido y no precisa equipos pesados (Figuras 4, 5 y 6). Este método se utiliza también en muros pantalla de hormigón armado.
- El tercer método es el que dispone de más tradición, consistiendo en dejar caer una masa importante sobre la cabeza del pilote protegida por una sufridera, instrumentándose la cabeza del pilote para obtener la fuerza y la velocidad en función del tiempo. Es un método utilizado preferentemente en pilotes hincados, ya que aprovecha la misma energía proporcionada por el martillo de hinca.

Es un método dinámico que induce una fuerte deformación en el pilote, denominándose generalmente "ensayo de respuesta dinámica" o simplemente "ensayo dinámico", aunque algunos autores no lo incluyen entre los ensayos de integridad. En pilotes hincados no requiere preparación especial ya que se utiliza el mismo martillo de hinca y la instrumentación es sencilla, pero en otros tipos de pilotes si que requiere medios pesados, ajenos a los de ejecución del pilote, para disponer sobre el mismo una masa considerable con una cierta altura de caída. En la actualidad se han desarrollado sistemas más sencillos y transportables de dar la energía necesaria para el ensayo.

En la Tabla 1 figuran algunos de los parámetros característicos de los diferentes tipos de ensayos descritos, comparados también con los ensayos estáticos de puesta en carga.

Los ensayos de integridad de pilotes tienen reconocimientos por parte de instituciones científicas y técnicas de prestigio internacional como las siguientes:

**TABLA 1**

ENSAYOS				
	SÓNICOS	DINÁMICOS	SEMIESTÁTICOS	ESTÁTICOS
Masa martillo	0,5-5 kg	2000-10000 kg	2000-5000 kg	N/A
Deformación máxima en pilote	$2 \cdot 10^{-6}$	$500-1000 \cdot 10^{-6}$	$1000 \cdot 10^{-6}$	$1000 \cdot 10^{-6}$
Velocidad máxima en pilote	10-40 mm/s	2000-4000 mm/s	500 mm/s	$10^{-3}$ mm/s
Fuerza máxima	2-20 kN	2000-10000 kN	2000-10000 kN	2000-10000 kN
Duración de la fuerza	0,5-2 ms	5-20 ms	50-200 ms	$10^7$ ms
Aceleración del pilote	50 g	500 g	0,5-1 g	$10^{-14}$ g
Desplazamiento del pilote	0,01 mm	10-30 mm	50 mm	> 20 mm
Longitud onda relativa (*)	0,1	1,0	10	$10^8$

(\*) Relación entre la longitud de onda de la fuerza aplicada y el doble de la longitud del pilote.

- The Institution of Civil Engineers, de Londres, que en su especificación para pilotajes (Specification for piling) describe diferentes métodos y efectúa recomendaciones para su utilización.
- La Sociedad Geotécnica Alemana, en sus Recomendaciones para Ensayos Dinámicos de Pilotes, elaboradas por su Comité Técnico núm. 5.
- El Eurocódigo 7 "Proyecto Geotécnico" (Norma UNE-ENV 1997-1) en su capítulo sobre cimentaciones por pilotaje recomienda el uso de ensayos de integridad en ciertos casos, principalmente en los pilotes cuya calidad sea sensible a los procedimientos de colocación.

- La norma austriaca B 4440 Parte 1 recomienda el empleo generalizado de ensayos de integridad, y lo exige en determinados casos.
- La ASTM dispone de una norma para el ensayo dinámico (ASTM D 4945), y otra para el ensayo de baja deformación con martillo de mano (ASTM D 5882).
- Las "Recomendaciones Geotécnicas para el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias" (ROM 0.5-94) de Puertos del Estado, admite reducciones importantes en el coeficiente de seguridad frente al hundimiento en el caso de pilotes hincados con control mediante ensayos dinámicos (Figura 7).
- El código francés DTU n1 13.2 sobre "Trabajos de Cimentación Profunda" admite incrementos significativos en las cargas admisibles de los pilotes por razón estructural, en el caso de "control reforzado", que incluye un muestreo significativo mediante ensayos de integridad estructural (Figura 8). Las disposiciones del código francés están recogidas literalmente en el libro de José A. Jiménez Salas "Geotecnia y Cimientos", principal manual español sobre cimentaciones.
- La norma francesa NF P 94-160 describe los diferentes métodos de ensayo de integridad de pilotes.
- La norma australiana AS2159-1995 sobre pilotes describe los ensayos de integridad y los requisitos para su correcta realización.
- Las recomendaciones para el proyecto de cimentaciones mediante pilotes hincados de la American Society of Civil Engineers (ASCE) y del US Army Corps of Engineers contemplan reducciones significativas en los coeficientes de seguridad para la capacidad portante de los pilotes, en el caso de realizarse ensayos dinámicos durante la hinca (Figura 9).
- La Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento, en la nueva redacción del Artículo 671 del PG3 "Cimentaciones por pilotes de hormigón armado moldeados in situ" menciona las pruebas de carga, los "ensayos sónicos" y los de "impedancia mecánica" como medios de control de calidad a disposición del Projectista y del Director de las Obras.

### 3. Métodos Rápidos de Ensayo de Carga

El método más conocido es el mismo ensayo dinámico del capítulo anterior, tercer método para la comprobación de la integridad estructural de pilotes. Está descrito en la norma ASTM D 4945-89 y es utilizado en todo el mundo, tanto en pilotes hincados como en pilotes perforados.

En pilotes prefabricados la carga se aplica con el mismo martillo de hinca empleado. En pilotes perforados y hormigonados "in situ" hace falta buscar una carga cualquiera con un peso entre 1 y 1,5 % de la carga de prueba estática y una altura de caída entre 2 y 3 m. Es decir, para una carga de prueba de 500 t, se necesita una masa de 5-7 t suspendida con una grúa.

La cabeza del pilote se prepara usualmente realizando un recocado de hormigón dentro de una camisa metálica, en el que se colocan los sensores de velocidad y deformación, con una superficie plana en el extremo superior protegida por una chapa metálica y una sufridera sobre la que se produce el impacto. La carga se eleva con una grúa y se deja caer sobre el pilote, registrándose en un ordenador portátil la fuerza y la velocidad en la cabeza del pilote en función del tiempo (Figuras 10, 11 y 12). Es importante que la energía del impacto sea suficiente para movilizar la capacidad resistente del suelo. Por ello es usual aplicar 4 ó 5 golpes con altura de caída creciente, registrándose los parámetros de la respuesta del pilote.

Los resultados obtenidos se tratan en el ordenador con programas informáticos que incorporan diferentes fórmulas o métodos numéricos para estimar la capacidad de carga y presentar los resultados

obtenidos de manera rápida, incluso en la misma obra. Es práctica usual realizar al menos un ensayo estático de carga de tipo convencional en un pilote ensayado dinámicamente, con objeto de correlacionar la resistencia estática y dinámica del pilote. En el caso de que exista ya experiencia local en pilotes similares con parecidas condiciones del subsuelo, se puede obviar el ensayo estático de carga.

El otro método rápido de ensayo de carga es el denominado "Statnamic". La carga se aplica de manera casi estática, con duración del orden de 100 milisegundos, mientras que en el método dinámico era de pocos milisegundos, por lo que no se produce onda de choque ni efectos dinámicos, que en determinados casos pueden llegar a dañar al pilote. Se empuja el pilote de manera suave hasta la carga de prueba prevista, obteniéndose una curva carga-asiento directa e instantáneamente. La aceleración que sufre el pilote es de 1 g, mientras que en el ensayo dinámico es de 100 a 1000 g.

Para conseguir aplicar una carga importante de esta manera suave, se utiliza un ingenioso sistema (ver fig. 13) consistente básicamente en una cámara de combustión colocada en el centro de la cabeza del pilote, en la que se produce la ignición controlada de un combustible. La fuerza generada levanta un pistón sobre el que apoyan unos contrapesos importantes, del orden del 5 al 10% de la carga estática de prueba. Por el principio de acción y reacción, una fuerza centrada de igual magnitud comprime el pilote.

Los contrapesos pueden ser construidos "in situ", con materiales locales (hormigón o acero), de tipo modular, de manera que se pueden apilar sobre el pistón en piezas manejables de no más de 3 t de forma circular, con un hueco en el centro para dejar pasar un eje centrador, que sirve también de vía de escape de los gases de la combustión. El conjunto queda dentro de un contenedor cilíndrico exterior de chapa relleno de grava, que, al producirse la ignición y levantarse los contrapesos, rellena los espacios creados y amortigua la caída posterior de los contrapesos. Últimamente se han desarrollado bastidores metálicos que simplifican la operación de frenado y sujeción de los contrapesos.

La instrumentación consiste en una célula de carga que mide directamente la fuerza aplicada a la cabeza del pilote y en un sensor de desplazamientos por láser colocado en la cabeza del pilote, sobre el que incide un rayo láser de referencia desde 20 m de distancia. Se obtiene de este modo una curva carga-deformación de manera instantánea en la pantalla del ordenador portátil que recibe las señales. En la figura 14 se comparan los resultados obtenidos con dos pruebas estáticas de carga y una Statnamic en pilotes con carga de trabajo 1,55 MN (158 t) ensayados con carga de prueba 200 % de la de trabajo, 3,1 MN (316 t). Como se puede ver, los resultados son idénticos.

Se puede ensayar un pilote al día, con un costo sensiblemente inferior al de una prueba estática convencional.

En el "Libro Homenaje a José Antonio Jiménez Salas. Geotecnia en el año 2000" publicado por el Ministerio de Fomento, el Cedex y la Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica, se incluye un artículo de H.G. Poulos sobre métodos de ensayo de carga de pilotes, en el que se analiza los diferentes métodos y se concluye que el ensayo Statnamic es el que suministra más información sobre el comportamiento del pilote bajo carga.

#### **4. Método Sónico Utilizado por CFT & Asociados**

En el ensayo sónico de integridad de pilotes que realiza CFT & Asociados se utiliza un equipo desarrollado por el Instituto TNO de Holanda, que cuenta con más de veinticinco años de experiencia en este tipo de ensayos, habiendo ensayado millones de pilotes, y habiendo detectado centenares de pilotes con defectos más o menos serios.

El ensayo es del tipo de martillo de mano, cuyo golpe envía una onda de compresión a lo largo del fuste del pilote. Esta onda es reflejada por las discontinuidades del pilote, por su punta, o por cambios de sección o variaciones del terreno que lo rodea. Los movimientos consiguientes de la cabeza del

pilote son captados por un acelerómetro. La señal del acelerómetro es amplificada y digitalizada por un sistema electrónico y convertida en medida de velocidad, que se presenta inmediatamente en la pantalla de un microcomputador portátil. La curva obtenida se puede archivar en el disco duro del equipo para su posterior tratamiento e impresión mediante ploter o impresora. El gráfico de velocidad de un pilote continuo aparece en la pantalla como una línea relativamente recta con dos picos. El primero de ellos es el causado por el impacto del martillo, mientras que el segundo es causado por la reflexión en la punta del pilote. El programa informático incorpora diferentes técnicas para mejorar y explotar las señales obtenidas, tales como suavizar y promediar los golpes de martillo, la obtención de la curva media de varios pilotes, y la amplificación de la señal con la profundidad de manera lineal o exponencial para compensar los efectos de pérdida de señal con la profundidad.

Los pilotes no requieren ninguna preparación especial, únicamente se necesita que se haya realizado ya el descabezado en el momento del ensayo, para que el golpe del martillo se realice sobre hormigón sano y la onda no refleje en discontinuidades o coqueas del hormigón poco compacto existente en la cabeza del pilote antes del descabezado. La edad mínima del hormigón en el momento del ensayo es de siete días, para garantizar un grado de endurecimiento y un módulo de elasticidad que permitan que la onda se propague. En ocasiones se han conseguido obtener buenas señales a edades incluso más tempranas. Los ensayos no producen ninguna interferencia en la marcha de la obra, ya que se pueden ensayar grupos de pilotes a medida que se van construyendo y descabezando, y suele bastar un día o dos de preaviso para la realización de los ensayos. El rendimiento es elevado, y en condiciones óptimas se pueden ensayar más de 100 pilotes al día.

El ensayo sónico también se puede utilizar en pilotes de cimentaciones antiguas, realizando previamente una cata por el lateral del encepado y dando el golpe del martillo y captando la onda en un lateral del pilote.

El ensayo se realiza según la norma ASTM D 5882-96.

## **5. Método Ultrasónico "Cross-Hole" Utilizado por CFT & Asociados**

Los ensayos se realizan con el equipo UMQA4, que utiliza tecnología puntera en el mundo. El método se basa en registrar el tiempo que tarda una onda ultrasónica en propagarse desde un emisor a un receptor que se desplazan simultáneamente por dos tubos paralelos sujetos a la armadura del pilote. El tiempo medido es función de la distancia entre el emisor y el receptor y de las características del medio atravesado.

En el caso de existir defectos en el camino de las ondas tales como inclusiones de tierra, oqueades, coqueas u otros que hagan alargar el tiempo de recorrido, en la gráfica del ensayo queda reflejada la variación y la profundidad a que se ha producido.

Los datos son almacenados de manera digital en el equipo, y las gráficas pueden ser impresas directamente en la obra o revisadas e impresas en gabinete. En figuras 4, 5 y 6 se puede ver un esquema de funcionamiento y unas gráficas típicas.

Para la realización del ensayo se precisa que en los pilotes el constructor deje instalados tubos para poder introducir las sondas hasta la profundidad que se quiera ensayar. Los requisitos para estos tubos son los siguientes:

- Los tubos deben ser preferentemente de acero, con diámetro mínimo 40 mm y preferiblemente 50 mm. Se pueden emplear tubos de plástico en pilotes cortos, pero es muy fácil que se deterioren durante el hormigonado y queden inservibles.
- Los empalmes deben realizarse con manguitos roscados, ya que las uniones soldadas pueden producir rebabas que dificulten el paso de las sondas o deterioren los cables.

- Los extremos inferiores deben cerrarse herméticamente por medio de tapones metálicos, para impedir la entrada de elementos extraños y para evitar la pérdida del agua que deben contener durante el ensayo. Los extremos superiores deben también cerrarse para evitar la caída accidental de material hasta el momento de realización del ensayo. Sobresaldrán al menos 40 cm del hormigón del pilote.
- Los tubos deben llenarse de agua dulce limpia previamente al ensayo, y deberá comprobarse que no tienen obstrucciones, ni se producen pérdidas de agua.
- El número de tubos por pilote, según la norma francesa DTU 13.2, es el siguiente:
  - 2 tubos para diámetros de pilote inferiores o iguales a 60 cm.
  - 3 tubos para diámetros de pilote hasta 120 cm.
  - 4 tubos para diámetros de pilote superiores a 120 cm.

Los pilotes deben estar accesibles y sin presencia de agua. El hormigón no tiene, en general, menos de una semana en el momento del ensayo. Es recomendable disponer de un plano con la identificación de los pilotes, su longitud aproximada, e información sobre posibles incidencias durante su construcción. En condiciones óptimas, se pueden realizar más de 130 m de ensayo a la hora.

El ensayo se realiza según la norma NF P 94-160-1.

## 6. Situación Actual en España

El mercado de los ensayos de integridad de pilotes se va ampliando paulatinamente en nuestro país. Ya no se concibe una construcción importante cimentada mediante pilotes en la que no se utilice alguno de los métodos de ensayo disponibles para comprobar la integridad estructural de los pilotes. La práctica totalidad de los pilotes de gran diámetro de las estructuras de las líneas de ferrocarril en construcción y de las nuevas carreteras y autovías se está ensayando mediante la técnica de "cross-hole" ultrasónico a través de tubos embebidos en el hormigón del pilote. es también cada vez mayor el número de pilotes de edificación que se ensaya mediante el método sónico, analizando las ondas sónicas generadas por el golpe de un martillo de mano en la cabeza del pilote.

El incremento de la demanda de ensayos ha provocado que estos salgan del ámbito de unos pocos especialistas, para entrar de lleno en el abanico de la oferta de los laboratorios generalistas de ensayos de materiales en construcción. Sin embargo, con frecuencia no se obtienen los niveles de calidad esperados, debido a que no siempre los equipos comprados tienen un nivel tecnológico óptimo y a que las personas que los utilizan e interpretan no disponen muchas veces de la suficiente experiencia y preparación.

Para garantizar el éxito en los ensayos de integridad de pilotes son tres los requisitos básicos:

- Equipos de un adecuado nivel tecnológico, con el respaldo de centros internacionales de I+D de reconocido prestigio y experiencia.
- Operadores expertos en el manejo de los equipos y en las tecnologías geotécnicas, siendo indispensable para ello una titulación universitaria en geología o ingeniería civil.
- Supervisores especialistas expertos en la interpretación de ensayos, con formación, actualizada permanentemente en contacto con las fuentes origen de la tecnología y con la práctica de ensayos.

En la práctica se están diferenciando paulativamente los campos de aplicación de los dos métodos. Los motivos son de tipo económico más que técnico, realizándose los ensayos ultrasónicos "cross-hole" casi exclusivamente en pilotes de gran diámetro, debido a que la colocación de tubos embebidos y la mayor lentitud de ejecución los hace mas caros. En pilotes con diámetros de hasta 60 cm, usuales en edificación, el ensayo ultrasónico "cross-hole" proporciona poca información, ya que se colocan solo dos tubos y la zona ensayada es únicamente el perfil entre los dos tubos. En pilotes de

mayores diámetros se colocan tres o cuatro tubos embebidos y se obtienen por tanto tres o seis perfiles, lo que suele ser suficiente para identificar los defectos, que no acostumbran a afectar a la sección completa.

Los ensayos sónicos con martillo de mano son utilizados principalmente en el control de calidad generalizado de pilotes de diámetros medios a pequeños. Por una parte debido a que su rendimiento es grande, y en este tipo de obras suele haber muchos pilotes, y por otra porque los defectos suelen afectar a la sección completa del pilote y su detección con este sistema es inmediata.

## 7. Conclusiones

Los ensayos de integridad de pilotes constituyen una potente herramienta de trabajo para poder determinar experimentalmente la existencia de defectos en los pilotes. El método sónico con martillo de mano está siendo empleado en el control de pilotes, sin que sea preciso ninguna preparación especial del pilote ni interferir con la marcha de la obra, dada la sencillez y rapidez del ensayo y su economía. El método ultrasónico "cross-hole" está siendo empleado en el control de pilotes de gran diámetro, siendo la única preparación previa necesaria el dejar tubos embebidos en el hormigón del pilote.

Los modernos ensayos rápidos de carga permiten abaratar un método de diseño y comprobación de las cimentaciones mediante pilotes, que hasta ahora estaba reservado para obras de elevado presupuesto.

Tanto los ensayos de integridad estructural como los ensayos rápidos de carga disminuyen el margen de incertidumbre existente en la construcción de cimentaciones profundas. La norma geotécnica española más moderna (ROM 0.5-94) admite ya reducciones muy importantes de los coeficientes de seguridad empleados en el cálculo de pilotes, en el caso de realizarse ensayos de estos tipos, lo cual implica un abaratamiento de las cimentaciones en un grado muy superior al coste de los ensayos.

## 8. Referencias Bibliográficas

Arnau Rodríguez, J.M., Fernández Tadeo, C. y Correa Lloreda, L. "Ensayo de control de integridad en pilotes". Cimbra. Enero 1993.

Fernández Tadeo, C. y Arnau Rodríguez, J.M. "Ensayo de integridad estructural de pilotes utilizando sistema portátil de gran rendimiento". IV Jornadas Técnicas de Laboratorios Acreditados. A.N.L. Sevilla, 1992.

Arnau Rodríguez, J.M., Fernández Tadeo, C. "Ensayos de integridad de pilotes en la construcción de la Autopista A-19, tramo Sant Pol de Mar". Symposium Nacional sobre Control de Calidad de Materiales de Hormigón Armado. Madrid, 1993.

Fleming, W.G.K., Weltman, A.J., Randolph, M.F., Elson, W.K. "Piling Engineering". Blakie, Londres, 1992.

Holeyman, A.E. "Keynote Lecture: Technology of pile dynamic testing". Proceedings of the Fourth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles. La Haya, 1992.

Institution of Civil Engineers. "Specification for piling". Thomas Telford, Londres, 1988.

Middendorp, P. y Reiding, F.J. "Determination of discontinuities in piles by TNO Integrity Testing and signal matching techniques". Proceedings of the 3rd. International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles. Ottawa, 1988.

Rausche, F., Likins, G., Shen Ren Kung, "Pile integrity testing and analysis". Proceedings of the Fourth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles. La Haya, 1992.

Reiding, F.J. "Computer-integrated pile test equipment". Proceedings of the Fourth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles. La Haya, 1992.

Seitz, J.M. "Pile integrity by low strain impacts. A state-of-the-art". Proceedings of the Fourth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles. La Haya, 1992.

England, M. "A guide to low-strain integrity testing". Cementation Piling and Foundations Ltd.

Jimenez Salas, J.A., y otros "Geotecnia y Cimientos III". Madrid, 1980.

Chandra Prakash, Rastogi, P.C., Sharma, A.K. "Assessment of shape and quality of bored concrete piles by integrity testing". Indian Geotechnical Journal. 1993.

Australian Standard AS2159-1995, " Piling - Design and installation".

American Society of Civil Engineers (ASCE), "Design of Pile Foundations". Nueva York, 1993.

AFNOR, norma P11-212, "DTU 13.2 Fondations profondes pour le bâtiment". Paris, 1992.

American Society for Testing and Materials. "Test Method for High Strain Dynamic Testing of Piles". ASTM D 4945-89.

American Society For Testing and Materials. "Standard Test Method for Low Integrity Testing of Piles", ASTM D 5882-96.

American Society for Testing and Materials. "Standard Test Method for Piles Under Static Axial Compressive Load", ASTM D 1143-81 (1994)

AFNOR. "Sols: Reconnaissance et essais. Essai statique de pieu isolé sous compression axiale", norma NF P 94-150 (1991)

Middendorp, P. y Reiding, F.J. "Stanamic. A Cost Effective Alternative for Test Loading of Piles and Caissons". 9 ARC, Bangkok, 1991.

Puertos del Estado. "Recomendaciones geotécnicas para el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias". ROM 0.5-94.

AFNOR. "Sols: reconnaissance et essais. Auscultation d'un élément de fondation. Partie 1: Méthode par transparence", norma NF P 94-160-1 (1993).

Arroyo, M. y Sainz de Baranda, B. "Pruebas de carga dinámica y estática sobre un pilote de extracción ( $\geq 650$  mm): comparación de resultados". Boletín Soc. Esp. Mecánica del Suelo (1997).

Finno, R.J., Gassman, S.L., Osborn, P.W. "Non-Destructive Evaluation of a Deep Foundation Test Section at the Northwestern University National Geotechnical Experimentation Site, June 1997". Northwestern University, Evanston, Illinois. Report Submitted to the Federal Highway Administration.

Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) "Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico. Parte 1: Reglas generales", norma española experimental UNE-ENV 1997-1, marzo 1999.

Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras. O.C. 326/00. Texto revisado del artículo 671 del PG3 "Cimentaciones por pilotes de hormigón armado moldeados in situ", febrero 2000.

Poulos, H-G "Pile load test methods-applications and limitations". Libro homenaje a J.A. Jimenez Salas. Ministerio de Fomento, CEDEX y Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica, enero 2000.

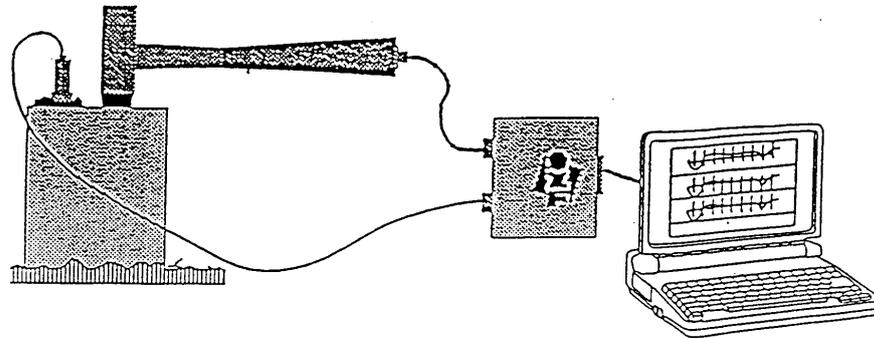


Figura 1: Disposición del ensayo sónico con martillo instrumentado

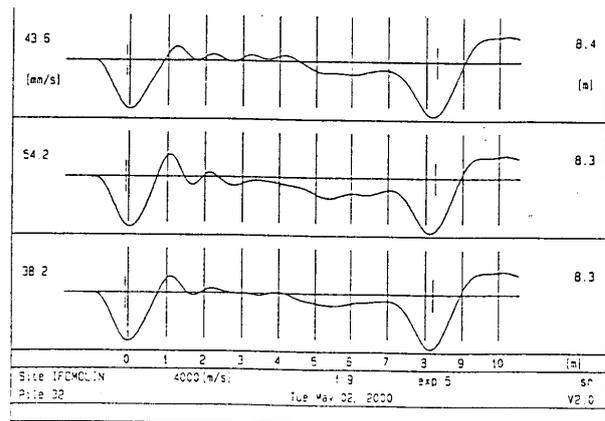
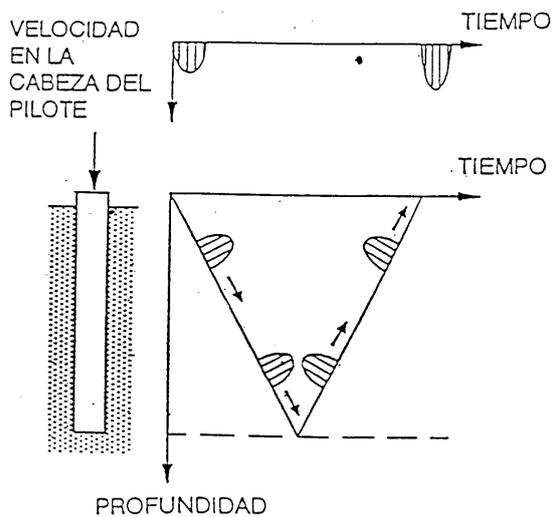


Figura 2: Ondas sónicas viajando a lo largo del pilote

Figura 3: Gráficas resultado del ensayo sónico

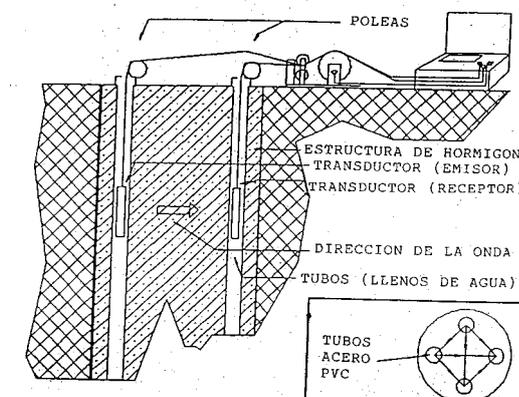


Figura 4: Configuración típica de ensayo ultrasónico "cross-hole"

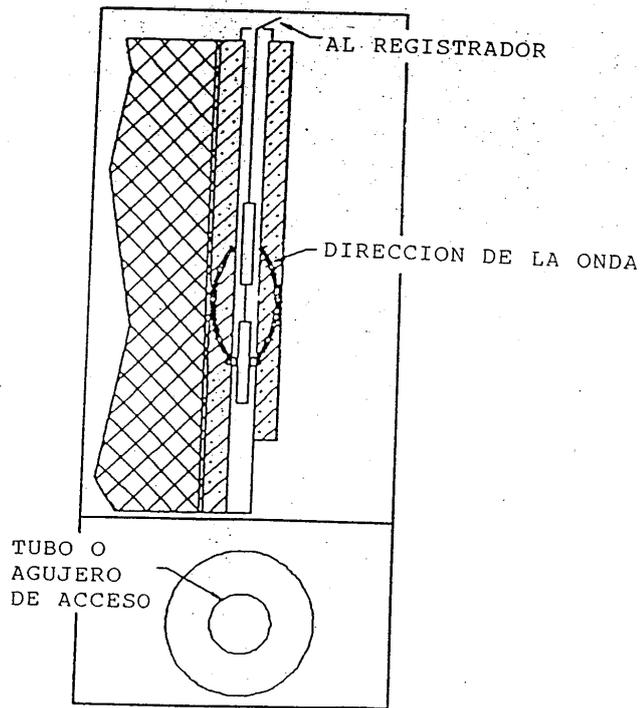


Figura 5: Configuración con un solo tubo embebido en el pilote

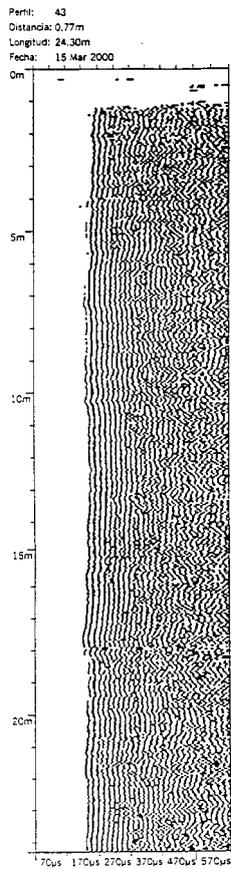


Figura 6a: Gráfica de cross-hole ultrasónico en hormigón homogéneo

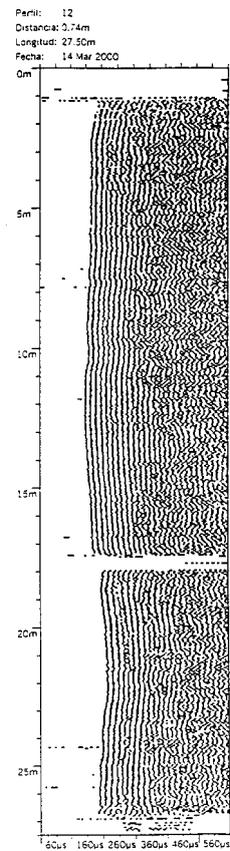


Figura 6b: Gráfica de cross-hole ultrasónico en hormigón no homogéneo

TABLA 3.6.1. COEFICIENTES DE SEGURIDAD MINIMOS RECOMENDADOS

Procedimiento de análisis utilizado en la estimación de la carga de hundimiento	Coeficiente de seguridad frente al hundimiento	
	Situaciones persistentes y transitorias (no accidentales) de largo plazo	Situaciones accidentales y transitorias de corto plazo
Cualquier tipo de pilotaje*		
Método del SPT en suelos granulares	3	2.5
Método basado en el penetrómetro estático	2.5	2
Métodos basados en otros ensayos penetrométricos continuos y otros ensayos de campo	3.5	3
Método basado en la resistencia a compresión simple de la roca (sólo para pilotes empotrados en roca)	3	2.5
Método basado en fórmulas analíticas y ensayos de laboratorio para medir el ángulo de rozamiento (o de laboratorio o campo para medir la resistencia al corte sin drenaje de arcillas)	3	2.5
<i>Pilotes hincados</i>		
a) Con control del avance y aplicación de la fórmula de Hiley	$(6 - s) \downarrow 3$	$(5 - s) \downarrow 2.5$
b) Con control de avance y aplicación de la ecuación de la onda	$(5 - s) \downarrow 2.5$	$(4 - s) \downarrow 2$
c) Con control electrónico de la hinca	2	1.6
d) Con control electrónico de la hinca y contraste con pruebas de carga	1.7	1.4
<p>NOTA: * El contraste con pruebas de carga permite utilizar coeficientes de seguridad mínimos de 1.7 frente a situaciones persistentes y transitorias (no accidentales) de largo plazo, y de 1.4 frente a situaciones accidentales y transitorias de corto plazo, dependiendo de la intensidad y calidad del contraste (Ver 3.6.4.8).</p> <p>s = avance por golpe al final de la hinca, expresado en milímetros</p>		

Figura 7: Tabla de la ROM 0.5-94

DTU 13.2	
CONTROL REFORZADO	
Pilote sondeado simple armado	
- ENSAYO DE TRANSPARENCIA SONICA	
1 de cada 8 pilotes (mínimo)	
<=60 cm	2 tubos
60<Ø<=120 cm	3 tubos
>120 cm	4 tubos
- ALTERNATIVA	
1 de cada 10 por tansparencia sónica	
1 de cada 8 por método sónico	
- LAS CARGAS ADMISIBLES POR RAZÓN ESTRUCTURAL SE PUDEN AUMENTAR EN UN 20%	

Figura 8: Control reforzado de pilote sondeado simple armado en DTU 13.2

## ASCE

### DESIGN OF PILE FOUND

Table 4 - 1. Factor of safety for pile capacity

Method of Determining Capacity	Loading Condition	Minimum Factor of Safety	
		Compression	Tension
Theoretical or empirical prediction to be verified by pile load test	Usual	2.0	2.0
	Unusual	1.5	1.5
	Extreme	1.15	1.15
Theoretical or empirical prediction to be verified by pile driving analyzer as described in paragraph 5-4A	Usual	2.5	3.0
	Unusual	1.9	2.25
	Extreme	1.4	1.7
Theoretical or empirical prediction not verified by load test	Usual	3.0	3.0
	Unusual	2.25	2.25
	Extreme	1.7	1.7

Figura 9: Coeficientes de seguridad para pilotes hincados (ASCE)

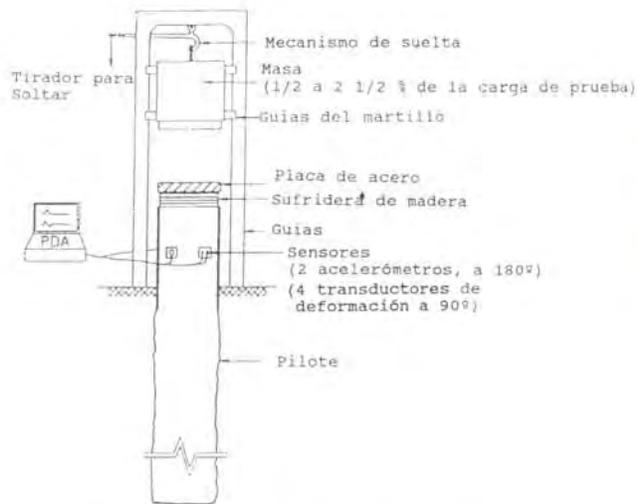


Figura 10: Esquema típico de ensayo dinámico



Figura 11: Ensayo dinámico de un pilote

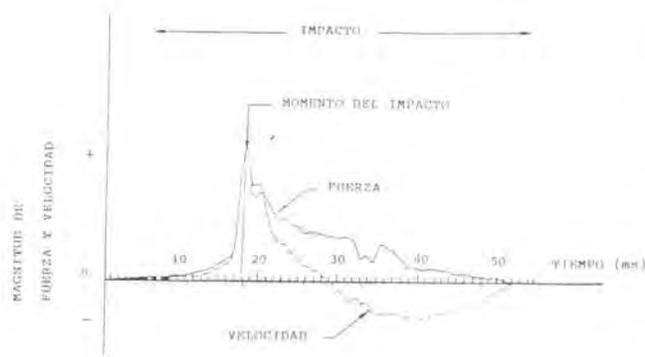


Figura 12: Registro de fuerza y velocidad en un ensayo dinámico

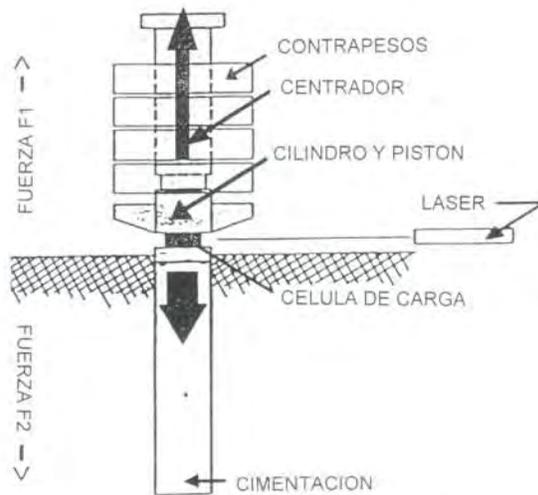


Figura 13: Esquema conceptual del ensayo Statnamic

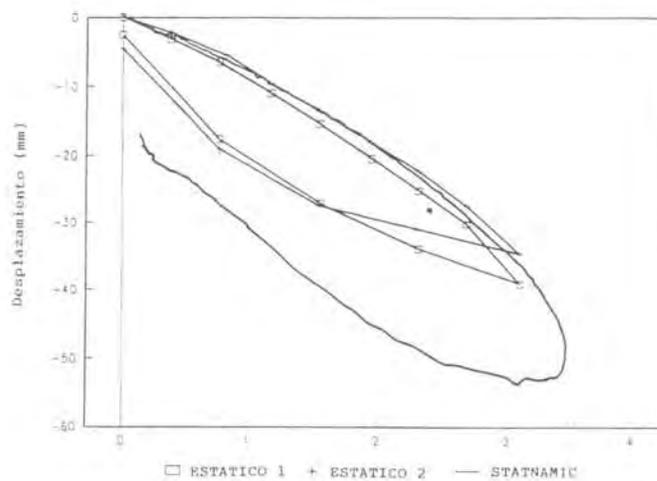


Figura 14: Curva carga - desplazamiento

# MESA REDONDA SOBRE EJECUCIÓN Y CONTROL

Moderador: D. José Luis Rojo Gómez (*Rodio*)

Ponentes: D. Jacques Heili (*Rodio*)  
D. Jorge Montemayor (*Terratest*)  
D. Juan L. Ríos (*Pilotes Posada*)  
D. José Luis Arcos (*Kronsa*)  
D. Carlos Fernández Tadeo (*CFT & Asociados*)

El moderador, D. José Luis Rojo, da paso al coloquio. Empieza con las preguntas escritas por los asistentes durante la exposición de las ponencias, algunas de las cuales están dirigidas a la mesa anterior, a cuyos ponentes se remiten para incorporarlas posteriormente al documento escrito. Dos preguntas no tienen autor: se solicita que se identifiquen los autores. Se comienza con la última participación, SISTEMA STATNAMIC:

**D<sup>a</sup> Eva Marín Martínez (Geocisa):** ¿El ensayo Statnamic puede realizarse en España en estos momentos? ¿Existe normativa para el ensayo internacionalmente aceptada?

**D. Carlos Fernández Tadeo (ponente):** Sí. Lleva 10 años de ejecución en el mundo y está muy extendido sobretodo en EEUU, Canadá y Asia. En estos momentos se hace un ensayo cada día en el mundo, y es un ensayo rápido (se realiza prácticamente en un día). En España no hay ningún equipo: uno estuvo a punto de venir de Holanda a una obra en Barcelona hace un par de meses, que no encontró financiación finalmente, y también estuvo a punto de intervenir en otra obra en Andalucía; pero el equipo está disponible.

No existe todavía normativa, porque existe un único fabricante mundial, que tiene la patente (fabricante canadiense de equipos para pilotes y empresa holandesa de software). Pero sí hay una gran aceptación en EEUU y Asia, donde se utiliza mucho, y está reconocido por autoridades competentes (Department of Transportation en EEUU, que se ocupa de puentes y carreteras) porque da buenos resultados en muchos suelos, y correlaciona bien con ensayos estáticos. Poulos lo menciona en su artículo en el Libro Homenaje a Jiménez Salas, donde afirma que Statnamic es el ensayo en pilotes que más información suministra en las pruebas de carga. En conclusión: no existe normativa, pero sí un reconocimiento internacional muy amplio.

El moderador da paso al tema de PILOTES PREFABRICADOS:

**D<sup>a</sup> Ana María García Gamallo (ETS Arquitectura, UPM):** ¿Qué métodos de control utilizan para conocer el comportamiento de las juntas en los pilotes prefabricados? ¿Cómo aplican los resultados de esos métodos?, ¿se tiene en cuenta la localización (profundidad) de la junta?

**D. Jorge Montemayor (ponente):** (muestra una transparencia) La junta de unión ABB empleada usualmente por nosotros en los prefabricados consta de tetones en cada pilote, que entran en un bloque en la otra parte. La unión entre bloque y tetón se hace a través de pasadores que entran hasta el fondo del tetón y del bloque. Hay una ligera excentricidad entre la sección del bloque y la del tetón, de forma que se crea una pretensión en la junta al introducir el pasador (para volver a tener deformación nula, necesitamos una tracción de 6 tn). Se ensaya individualmente cada bloque, tirando con una tracción de 16 tn para estudiar las deformaciones, se ensaya la rosca de unión entre la armadura de solape (que no es una junta mecánica, no es un mecanismo que una pilotes: funciona por solape de la armadura del pilote con la armadura de la junta, pero no une mecánicamente los dos tramos de pilote), se hacen ensayos de cada una de esas uniones individuales; y al pilote completo se le hacen

ensayos de flexión, con extensómetros instrumentados, y se comprueba que no hay apertura de fisuras ni de grietas en la sección de la junta. A la junta siempre se le exige que tenga mayor resistencia que la del propio pilote. También se hacen ensayos de compresión para comprobar que aguante sin problemas los esfuerzos durante la hinca; tiene ensayos de corrosión, incluso de los materiales que lo componen, y otro tipo de ensayos son los individuales de cada uno de los elementos que componen la junta. La forma de aplicar estos ensayos es no tener en cuenta la resistencia de la junta entre pilotes, puesto que siempre se le exige una resistencia mayor que la del propio pilote; salvo en estructuras de pontonas o muelles, donde se tiene en cuenta su longitud para que la junta no quede en la carrera de marea. Aunque hay un caso: el puerto deportivo de Vigo, con una junta de patente sueca de más de 60 años, ejecutada por nosotros hace 28 años aproximadamente, con algunas juntas dentro de carrera de marea y sin ningún daño de corrosión. No obstante, siempre se intenta que las juntas queden enterradas y no en carrera de marea.

**D. Pablo Arcas Pedregosa (Terratest):** ¿Cuál es la tensión máxima de trabajo a la que se solicitan los pilotes prefabricados?

**D. José Luis Arcos (ponente):** Según la Norma Tecnológica: N.T.E. – C.P.P. / 1978, en el caso más favorable, el Tope Estructural del pilote queda limitado a una carga de 125 Kp/cm<sup>2</sup>, referido a la sección total del pilote. A esto estamos limitados pese a que en la fabricación de los pilotes se utilizan hormigones de 425 a 500 Kp/cm<sup>2</sup>. La diferencia de resistencia de los 125 a los 425 Kp/cm<sup>2</sup> se requiere únicamente para soportar los impactos del martillo durante la hinca, que llegan a ocasionar compresiones en el pilote de hasta 350 Kp/cm<sup>2</sup>.

**D. Jorge Montemayor (ponente):** Obviamente esto viene motivado porque no hay una Normativa moderna que permita cargar los pilotes a una tensión superior.

Interviene el moderador indicando que hay un par de preguntas muy generales sobre Normativa:

**D. Borja Sainz de Baranda (Terratest):** ¿Se emplea el análisis de la ecuación de la onda en el diseño inicial de las cimentaciones y en los proyectos, y se compara con los resultados a posteriori a escala real?, ¿existe alguna Normativa vigente al respecto?, ¿existe alguna Normativa vigente que contemple además los ensayos de control mediante el analizador electrónico de hinca y/o ensayo de integridad de pilotes?

**D. David Mozas Cerrada (Ingeniero de caminos):** Puesto que se aumentan los controles tanto de ejecución de los pilotes prefabricados como elemento estructural, así como de la situación final de los mismos desde el punto de vista geotécnico ¿existe alguna Normativa que permita reducir los coeficientes de seguridad habitualmente usados en cimentaciones?

**D. Jorge Montemayor (ponente):** Sobre la tensión de trabajo limitada a 125 Kp/cm<sup>2</sup>, es lo que fija la NTE, que es del año 1978, en su última edición, para pilotes prefabricados en instalaciones fijas de categoría I. Para pilotes prefabricados en obra, limita a la tensión de trabajo máxima a 90 Kp/cm<sup>2</sup>. Obviamente, esta limitación de tensión de trabajo viene fijada por una limitación claramente estructural del pilote en la Norma, no es una formulación que venga relacionada con el terreno, los métodos de hinca o los procesos de ejecución. Si yo construyo un pilote que trabaje por punta sobre roca, con una resistencia de unos 700 Kp/cm<sup>2</sup> de resistencia característica del pilote, puede llegar a tener de tensión de trabajo sin ningún problema (como recoge la Normativa británica, por ejemplo) 150 Kp/cm<sup>2</sup>, o incluso 175 Kp/cm<sup>2</sup> si se utiliza azuche para roca. Actualmente, lamentablemente, la NTE limita la tensión máxima de trabajo a 125 Kp/cm<sup>2</sup>, pudiendo ser muy superior.

Respecto a la normativa referente a los ensayos electrónicos de hinca e integridad del pilote, la única normativa vigente que hay es la Orden Circular de Carreteras, de revisión del PG3, que sí contempla los ensayos de control con el analizador electrónico de hinca y ensayo de integridad estructural de pilotes. Pero lo hace desde el punto de vista de ejecución y control, no desde el punto de vista del diseño, como sería por ejemplo hacer unas pruebas previas de hinca en el terreno para ver la capacidad portante del terreno en base a los ensayos dinámicos de carga, y en base a esos resultados poder estu-

diar y definir la cimentación. La NTE no contempla nada de esto, y no hay ninguna normativa vigente ahora mismo que pueda dar ninguna idea al respecto. Sí en los Eurocódigos: en el Eurocódigo 7, que es el que España ha votado que no, y de la parte de ejecución y para pilotes de desplazamiento sí hay un Eurocódigo específico, desarrollado en el TC-288, donde sí se recoge parte de esta normativa como elemento de diseño. Consiste en hacer unas pruebas previas en pilotes, y como estamos haciendo un ensayo no destructivo sobre pilotes definitivos, que permiten hacer en torno a 10 pilotes/día de media y obtener los resultados en dos o tres días, tenemos unos ensayos previos en la obra que nos permiten conocer la capacidad portante de los pilotes y, por tanto, definir el proyecto con mucha mayor precisión y menos incertidumbre que tomar un análisis previo en base a unas ecuaciones y unas fórmulas carga-asiento en las que estamos estimando bastantes parámetros. En diseño inicial no hay Normativa, tan sólo la ROM 0.5 94 donde sí está reflejado, pero no hay normativa vigente en edificación.

Los coeficientes de seguridad en cuanto a pilotes prefabricados están limitados por dos aspectos:

- 1) desde el punto de vista estructural: los prefabricadores de pilotes están gestionando grupos de trabajo para desarrollar Normativa, y están tendiendo a valores de coeficientes que se puedan limitar a 1,35 para combinación pésima de cargas (1,40 como mucho) en vigas de puentes y elementos estructurales de alta tecnología. Todos los controles que tienen los pilotes prefabricados, en nuestro caso bajo por un Manual de Calidad certificado por AENOR, permiten reducir los coeficientes de seguridad desde un punto de vista estructural como elemento de hormigón.
- 2) desde el punto de vista geotécnico: hemos visto un avance que nos ha hecho Antonio Soriano anteriormente donde, en los casos en que se utilice un control electrónico de hinca, el coeficiente de seguridad puede reducirse a 2, teniendo en cuenta que con los ensayos dinámicos se están midiendo siempre resistencias al hundimiento mínimas, lo que quiere decir que tenemos mayor coeficiente de seguridad. Luego, con el valor de coeficiente de seguridad de 2 para el caso de carga de hundimiento global, estamos con unos márgenes de seguridad mucho mayores para el nivel de conocimientos que tenemos del pilote de los que tendríamos en el caso de pilotaje in situ. Lamentablemente, la única Normativa española vigente que recoge esto es la ROM, que es una recomendación para obras marítimas: ni en carreteras ni en edificación ni ningún otro tipo se refleja esta posibilidad concreta de reducción del coeficiente de seguridad frente a la carga de hundimiento.

**D. Carlos Fernández Tadeo (ponente):** Quería añadir que, efectivamente, las normativas en España empiezan a mencionar los ensayos, pero no recogen en toda su amplitud las consecuencias derivadas del coeficiente de seguridad o incremento del tope estructural. Pero en el libro de Jimenez Salas, que es como la Biblia de la geotecnia, en el capítulo de pilotaje están recogidos desde hace muchos años los incrementos en los topes estructurales cuando se hacen ensayos de integridad, copiado de una Norma francesa que cita textualmente. Esto es algo todavía no muy aprovechado por los proyectistas, que en algunos casos (Asociación de Consultores de Estructuras de Barcelona) introducen ya los ensayos de integridad, y relativamente asociados a incrementos del tope estructural. Pero por aquí va la vía: desde el momento en que se realizan unos ensayos de comprobación de cómo ha quedado la estructura del pilote, se reduce el margen de incertidumbre, luego lo lógico es reducir los coeficientes de seguridad que estamos aplicando a la capacidad estructural del pilote. Es importante que los proyectistas o directores de obras no tengan miedo a especificar estos ensayos. Aunque no hay normativa, sí hay sitios (aporto una dirección web en mi ponencia) donde se especifica cómo realizar estos ensayos, los criterios de aceptación y rechazo, qué hacer cuando un ensayo da mal... la Normativa algún día vendrá, pero ahora ya hay elementos. Algo importante es que si se especifican en el proyecto los ensayos, también se incluyan en el Presupuesto, pues en otro caso no se realizan.

PILOTES ENTUBADOS:

**D. Juan Antonio García Prado (Serinco):** ¿Se pueden alcanzar profundidades de 40 m con entubación recuperable en arenas finas con nivel freático?, ¿cuáles son las máximas profundidades?

**D. Juan L. Ríos (ponente):** Sí se puede, todo depende del equipo disponible. En este caso hay que tener dos consideraciones siempre presentes:

- a) la sedimentación de las partículas en suspensión, mencionadas anteriormente.
- b) las arenas finas: cuando se trabaja con sobrecargas tan importantes, ejercen una presión lateral muy fuerte contra la camisa recuperable, que a veces dificulta seriamente su extracción.

Yo aconsejaría utilizar polímeros como decantadores, porque acelerarán la decantación natural de las partículas en suspensión. De esta forma se puede hacer una limpieza mejor de la punta y, además, cuanto menos tiempo esté metida la camisa recuperable en este tipo de suelo, habrá que hacer un esfuerzo mucho menor para poder extraerla.

Referente a las máximas profundidades admitidas, puede considerarse que a partir de 40 m son palabras mayores para el tipo de equipo que hay que utilizar. En cualquier caso, siempre hay que ir con una morsa hidráulica muy sobrada para que pueda arrancar la camisa recuperable. A veces es mayor problema la recuperación de la camisa que la propia decantación de las partículas.

**D. Jorge Montemayor (ponente):** Hay que tener en cuenta también el diámetro del pilote.

**D. Juan L. Ríos (ponente):** Estoy hablando de diámetros grandes, claro, iguales o superiores a 1,5 m. Porque en diámetros pequeños, de los que habitualmente se utilizan en edificación, normalmente no se llega a profundidades de este estilo.

PANTALLA DE PILOTES SECANTES:

**D. José Madruga Jiménez (Rodio):** ¿Cómo se asegura la estanqueidad en este tipo de pantallas cuando se realizan excavaciones debajo del nivel freático (vaciados)?

**D. Juan L. Ríos (ponente):** Pueden suceder dos cosas: que necesitemos una estanqueidad lateral en cotas altas, por la presencia de niveles freáticos colgados, pero con suelos impermeables a partir de cierta profundidad, en cuyo caso nos interesa la estanqueidad en esas capas superiores; o bien que exista un nivel freático que alcanza profundidades importantes, que nos obligue a ir a profundidad para aumentar la longitud de la onda de entrada del agua dentro de la excavación por la parte inferior. En definitiva, hay que actuar sobre dos variables: el solape entre los pilotes primarios y los secundarios (juntar más los pilotes primarios, para que al hacer los secundarios queden más recubiertos); y en segundo lugar, cuando el nivel freático actúe en profundidad, aumentar más la longitud de los pilotes primarios.

La ventaja que tiene este método es que se podrían hacer soluciones con los pilotes primarios muy cortos; y los secundarios, que son los que tienen la misión de soportar los esfuerzos tanto horizontales como verticales, hay que llevarlos a las capas portantes, puesto que los de taponamiento (que son los primarios) pueden quedar más altos. En este caso, en que tengamos el agua más abajo, nos obliga a que llevemos los pilotes primarios también más abajo, para que cuando entre el agua hagamos el efecto de una pantalla tradicional.

**D. Leoncio Prieto Tercero (Rodio):** ¿Cómo contempla la normativa europea la evolución futura del tratamiento de los lodos bentoníticos?

**D. Juan L. Ríos (ponente):** En este tema la normativa europea aun está verde: se está trabajando en ello, pero no hay una normativa concreta limitadora. Pero lo que está claro es que las tendencias son cada vez más exigentes hacia la conservación del medio, no sólo del lugar donde depositemos las tierras contaminadas por los lodos, sino también de las posibles filtraciones a las aguas subterráneas, lo que nos va a condicionar de manera muy importante en el futuro.

**D. José Luis Rojo (moderador):** Dentro de la normativa europea, se está considerando que todos aquellos trabajos que afectan al nivel freático, a las aguas subterráneas y a los suelos van a tener en el futuro un tratamiento mucho más importante desde el punto de vista de cómo se va conservar el medio ambiente. En los trabajos que habitualmente hacemos en la construcción dentro de los suelos, hay que ir empezando a pensar que debemos ser capaces de mejorar nuestros controles y las tecnologías, y hacer más profesional nuestro trabajo.

**D. Juan L. Ríos (ponente):** Uno de los retos más importantes de nuestra actividad va a ser ése precisamente: cómo afrontamos el tema del medio ambiente, puesto que la sensibilidad de la sociedad cada vez es mayor, lógicamente.

HÉLICE CONTINUA:

**D. José Manuel Luque Cano (Colegio Oficial de Geólogos):** Cuando los diámetros de perforación son muy superiores a la armadura ¿cómo se consigue la vertical de la armadura?

**D. Jacques Heili (ponente):** Primero hay que hacer el pilote vertical, y además hay separadores previstos en la armadura. También hay que señalar que hemos visto que el hormigón del perímetro del pilote es más agrio, porque el terreno toma agua del hormigón. De esta forma, la corona exterior del pilote es más agria, y así la misma armadura tiende a mantenerse por el centro. Además se le da una forma cónica a la parte inferior de la armadura, que hace que busque el centro del pilote.

**Anónimo:** ¿Cómo se realiza el control de la verticalidad de la canasta de acero?

**Anónimo:** ¿Cuál es el objeto del tubo interior de la barrena?

**D. Jacques Heili (ponente):** La verticalidad de la canasta o la jaula del pilote va en la línea que ya he comentado: hacer el pilote vertical, colocar separadores, y el efecto de cono de la armadura, que hace que busque el centro y el eje del pilote.

El tubo tremie va ligado a la seguridad del pilote, en el sentido de que no dependemos de un tiro brusco de la hélice, que podría producir un estrangulamiento del pilote en ese punto si no entrara suficiente hormigón. Con el tubo tremie tenemos 1,5 m de seguridad ante una mala maniobra del maquinista. Este tubo se utiliza mucho, tanto en pilotes como en pantallas, y está sancionado por la experiencia.

COLOQUIO GENERAL

**D. Francisco J. Valmorisco González (EIS, S.A.):** A la luz de ciertos precios que algunas empresas ofertan a las empresas constructoras ¿cómo se afronta esta competencia, con vistas a mantener una buena calidad de ejecución?

[risas] **D. José Luis Rojo (moderador):** ¿Alguien quiere contestar? Se queda en el aire, que está muy bien.

**D. Fernando da Casa Martín (Universidad de Alcalá, Dpto. de Arquitectura):** Ya que, como hemos visto, el Eurocódigo 7 no es la normativa que se considera ideal para este campo, sería de gran interés desarrollar una especie de libro-manual-recomendaciones de la buena práctica constructiva para cimentaciones especiales, con la consideración de la problemática que puede aparecer, dirigido a evitar futuras patologías por problemas de diseño o ejecución. De mucho interés sería contar con casos prácticos problemáticos. En resumen, sería ir más allá del proceso teórico que ya conocemos con múltiple bibliografía. Se podría crear el compromiso de colaboración para esto por los presentes interesados. Pueden contar ya con nuestra contribución (en la medida de nuestro conocimiento y experiencia docente).

**D. José Luis Rojo (moderador):** Me parece muy interesante tu propuesta, abierta a una dinámica en cómo mejorar la tecnología y la seguridad en la construcción en una cosa tan singular como ésta. Si quieres, puedes tomar la palabra para ampliarla.

**D. Fernando da Casa Martín (Universidad de Alcalá, Dpto. de Arquitectura):** El resumen es ése. También ligado a lo que Jorge Montemayor comentó sobre que no existe normativa actualizada, creo que esperar a que se desarrolle esta normativa puede llevar mucho tiempo, y que uno de los primeros pasos puede ser realizar ese compendio. También se ha señalado que los técnicos que teóricamente están capacitados para firmar esos proyectos generalmente no están tan vinculados al problema geotécnico constructivo. De esta forma, también va dirigido a evitar posibles problemáticas que, como ha comentado Carlos Oteo al final de su ponencia, pueden dar lugar a problemas costosísimos de resolver posteriormente. Invito a los presentes, representantes de empresas especializadas y del campo de la docencia, a realizar este compendio como posible solución a tal problema.

**D. José Luis Rojo (moderador):** La idea de esta jornada es la de resumir las intervenciones y coloquios y sacar un documento, que puede ser quizás un embrión para acabar haciendo lo que tú estás diciendo. Como consecuencia del libro, una cosa que se podría pedir es quién querría colaborar en que eso realmente acabe estructurándose más y siendo una normativa mucho más abierta, más general y más completa. Es un tema muy importante pero muy complejo.

**D. Fernando da Casa Martín (Universidad de Alcalá, Dpto. de Arquitectura):** Más que ir a una nueva normativa, sería quizá el dar el primer paso pero con un carácter más práctico, más orientado a que todos los que vayan a trabajar con pilotes sepan qué es lo que tienen que tener en cuenta cuando vayan a hacer el proyecto; porque hay muchos técnicos compañeros que lo abandonan y lo dejan a la empresa constructora, como decía Juan Luis Ríos anteriormente, y tampoco es eso. La cuestión es que todos los que participamos en el proceso seamos más conscientes de los problemas que se pueden acarrear.

**D. Vicente Cuéllar (SEMSIG):** Como Director del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, soy consciente de que la normativa en la edificación es anticuada; y desde aquí ofrezco el compromiso del Laboratorio de Geotecnia en la colaboración para actualizarla e invito al sector a participar.

**D. Juan L. Ríos (ponente):** Sí es importante la normativa. No sólo hace falta normativa, sino concienciación. No se ha de caer en usar la normativa como un catálogo de diseño, que pueda llegar a caer en manos inexpertas que no lo sepan interpretar. El ingeniero geotécnico ha de participar e interpretar.

**D. Jorge Montemayor (ponente):** Agradezco el ofrecimiento de Vicente Cuéllar. Y considero que la normativa debe existir. Si no hay un manual que ponga al menos las condiciones de mínimos que tienen que cumplir las cosas, no vamos a ser capaces ni de construir, ni de tener las responsabilidades, ni de tener cada uno las atribuciones que tenemos en los proyectos, ni de hacer nada de los que no toca en cada desarrollo inmobiliario y en cada construcción que hagamos. Normativa tiene que haber: eso de ir inventando, y que la normativa ya vendrá, no funciona en nuestro mercado. Hay un seguro decenal, hay ahora una ley de edificación, hay que hacer informes geotécnicos, donde el promotor trata de gastarse el menor dinero posible, y al final el problema, desde mi punto de vista de 14 años de experiencia, el 85% de las veces es de coste puro y duro, no de falta de conocimiento del proyecto ni de comunicación. Y si no hay una normativa que lo contemple, nadie se puede acoger a un documento oficial que pueda modificar las características del mercado.

**(\*) Aclaración por carta de D. Fernando da Casa Martín (Universidad de Alcalá, Dpto. de Arquitectura):** [Con posterioridad a la Jornada, Fernando da Casa envió a la Organización una carta de puntualización de su intervención y del debate que suscitó. En ella comenta que el sentido de su propuesta de “colaboración dirigida a la producción de un manual de recomendaciones, está muy alejado del sentido expresado por D. Juan L. Ríos (Posada), en el sentido de encontrar un ‘catálogo de soluciones’, para tranquilidad de algunos, sino más bien lo contrario, el reflejar cuales son los problemas que se producen por la inadecuada aplicación de determinadas técnicas, y para ello nada mejor que mediante casos problemáticos que sirvan de muestra.”

“Esto, junto a una relación de factores, que todo Técnico que intervenga en el campo de las cimentaciones (Geotécnico, Ingeniero, Arquitecto...), deba tener en cuenta a la hora de plantear este tipo de

intervención, sería el mejor método para iniciar la divulgación sobre la necesidad, y seriedad, que este tipo de Unidades dentro de la obra deben tener, a pesar de ser inversiones que 'al quedar enterradas', el cliente, promotor o Técnico, en ocasiones, tiende a minimizar o generalizar, sin darle su oportuna importancia."

Termina, reiterando su voluntad de colaboración.]

**D<sup>a</sup> Ana María García Gamallo (ETS Arquitectura, UPM):** Me extraña muchísimo que no se comenten aquí unas reuniones de trabajo que están teniendo lugar en la Comunidad de Madrid. Son unos grupos de trabajo sobre la Ley de Ordenación de la Edificación. Concretamente hay un grupo 1 que se dedica a la geotecnia, donde están todos los Colegios: de Caminos, de Arquitectos, de Geólogos, etc. Y según tengo entendido (no pude ir a la primera reunión) lo que se intenta es precisamente hacer esa especie de Manual de la Buena Construcción. Lo que me extraña es esta desconexión, porque parece que nos estamos repitiendo todos en las intenciones, pero al final no van a llegar a nada.

**D. José Luis Rojo (moderador):** Tomamos nota desde AETESS para conectar con ese grupo y ver cómo participar. Es verdad que en general hay mucha descoordinación en los trabajos que hacemos en España, y éste es un caso. Quiero pedir disculpas a los que he decidido que son preguntas para la mesa anterior, porque puede ser que ellos interpreten que no lo son. Si es así, todavía podéis hacer la pregunta aunque ya nos hemos comido el tiempo.

**D. Antonio Santos (Laboratorio de Geotecnia, CEDEX):** Simplemente quería decir que localicé la figura a la que me refería en la anterior mesa (ver Fig. 1), sobre la evolución de tensiones en un pilote auscultado a lo largo de 15 años. El caso es en París. El corte del terreno está formado por una capa de aluviones, arcilla plástica expansiva, arcilla margosa dura también expansiva, arenas grises y luego creta blanda y creta dura. Se construye un pilote que se instrumenta en una serie de secciones, y se hace un primer vaciado de 5 m una vez construido el pilote. Éste empieza a actuar como un bulón: totalmente en tracción. Después se hace un segundo escalón de vaciado, hasta 8-10 m, y las tracciones se incrementan en el pilote. Un vez llegados a este punto (18-3-59) se empieza a construir el edificio, y de la curva (1) se pasa a la (2), que es el pilote sobrecargado (22-12-60). Se ve que la mayor parte de la sobrecarga la toman los aluviones, y el resto del pilote está casi sin carga. Aparentemente en esta fecha se empieza a cerrar la estructura del edificio, con lo que hay una redistribución de cargas, y entonces (3) (22-12-61) y posteriormente (4) (22-3-62), la carga en el pilote llega prácticamente a anularse, en (4) hay incluso una nueva fase de tracción en el pilotaje, y entonces a partir de ahí ya se va produciendo en 1963, 65, 66, 70 y finalmente 1975, una redistribución de cargas, donde el pilote va tomando carga. Y al tomar carga, curiosamente, si comparáis la situación del (14-1-75) en los aluviones con la que había el (6-12-60), los aluviones han pasado de tomar la carga a prácticamente sobrecargar el pilote. Es decir, hay un desarrollo de fricción negativa porque los aluviones asientan con relación al pilote. El pilote prácticamente queda actuando como pilote-columna. Esto era un poco por decir que el terreno está vivo, y al final el pilote es un clavo que está ahí metido.

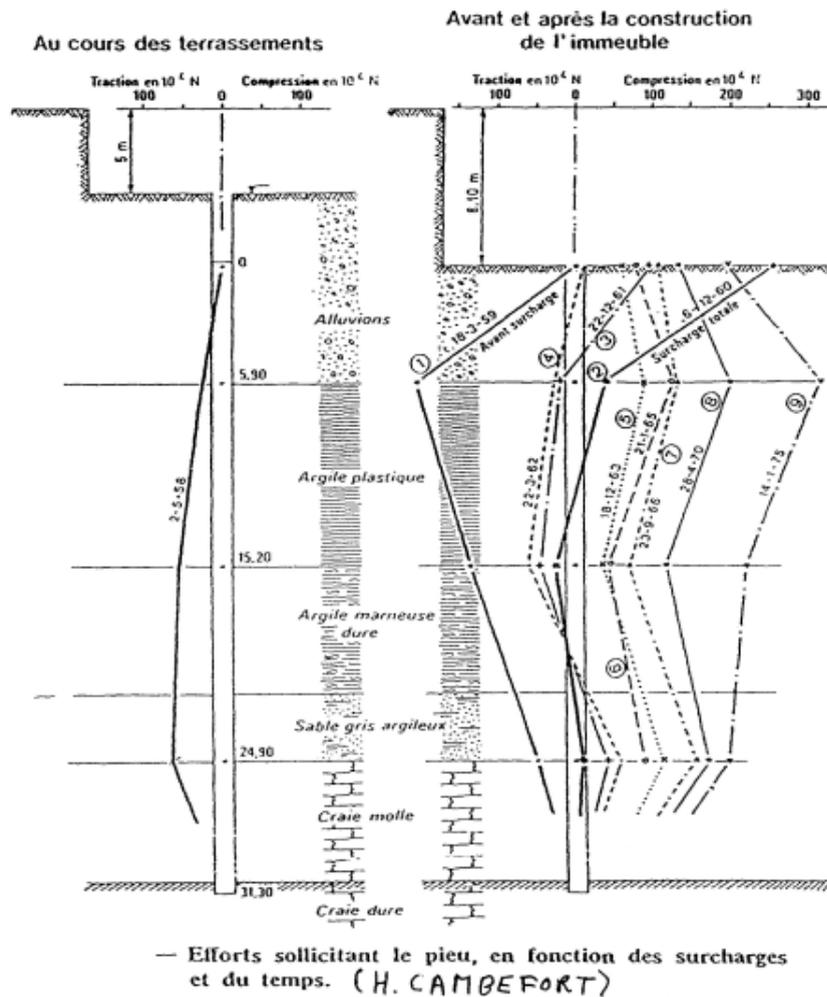


Figura 1.  
Evolución de las tensiones en un pilote, en función de la sobrecarga y del tiempo. [Cambefort, H. (1975). Comportement des pieux dans les argiles gonflantes. Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, 329 (Juin): 21-31].

D. José Luis Rojo (moderador) da paso a Vicente Cuéllar para que cierre el Curso.

D. Vicente Cuéllar (SEMSIG): Me gustaría felicitar a todos por esta Jornada, que ha tenido un alto nivel técnico y que se ha desarrollado de modo que las discusiones han sido útiles y provechosas.