

# **EL CONTROL DE CALIDAD EN LAS OBRAS CON MICROPILOTES INYECTADOS. PARÁMETROS DE CÁLCULO EN SUELOS ALPUJÁRRIDES**

Juan Carlos Hernández del Pozo. ICCP. Profesor Titular de la Universidad de Granada.

Isidro Ocete Ruiz. Licenciado en Ciencias Geológicas. Geotécnica del Sur S.A.

Juan Carlos Hernández Garvayo. ICCP. Geotécnica del Sur S.A.

Francisco Rubio García. ICCP. Doctorando de la Universidad de Granada

## ***RESUMEN***

La extensión de las obras de micropilotes hacia la corrección de deslizamientos en las redes lineales, sobre todo en los terraplenes sobre las medias laderas, ha desarrollado el interés hacia la investigación en el control de calidad de dichos elementos permitiendo la definición de los parámetros a emplear para la transmisión de las cargas exteriores al terreno, debido ello a cambios en la tecnología de construcción de maquinaria.

Los autores presentan las operaciones de control de calidad, así como los problemas surgidos para la interpretación de la normativa existente. Igualmente, se desarrolla una propuesta de metodología para realización de pruebas de carga en micropilotes, fundamentales para definir la adherencia micropilote-terreno, mostrando los resultados obtenidos en terrenos tipo Alpujárride, al igual que las limitaciones y la posible extensión de resultados.

Por último, se cita expresamente el coeficiente de seguridad recomendado, tras un estudio comparativo con los resultados anteriormente presentados por Bustamante.

## ***1.- INTRODUCCIÓN***

El control de calidad en sistemas de micropilotaje, como en cualquier proceso de ingeniería civil, se aplica a los materiales, a la ejecución y a la conservación del producto final, convirtiéndose en una cadena continua que garantice las prestaciones de dicho elemento.

La adherencia es un factor primordial de la máxima importancia en la ejecución de elementos inyectados, como son los micropilotes. La proliferación de estos en las obras de la red viaria andaluza, exige el desarrollo de un procedimiento claro para el control de calidad en las mismas, ya que el método de cálculo actual, desarrollado por Bustamante y Doix a principios de la década de los ochenta, se basa en la interpretación de 130 ensayos reales dirigidos o aprobados por los LPC extendidos por el territorio francés.

Dado que se trata de un método empírico, y siguiendo sus recomendaciones, se deben contrastar los resultados con diferentes tipos de materiales, presentándose en este documento los ensayos y pruebas realizados para terrenos tipo Alpujárride, predominantes en Andalucía Oriental.

## ***2.- MARCO DE REFERENCIA***

Las obras que se han ensayado se encuadran dentro de Andalucía Oriental, más concretamente en las provincias de Granada y Almería.

En el área estudiada afloran materiales preorogénicos de las Zonas Internas de las Cordilleras Béticas, pertenecientes a los Complejos Nevado-Filábride y Alpujárride; y materiales postorogénicos del Neógeno-Cuaternario. La litografía está integrada por rocas metapelíticas entre las que destacan los afloramientos de esquistos, micasquistos, cuarcitas, mármoles, gneises y metabasitas.

## ***3.- CONTROL DE CALIDAD APLICADO A MATERIALES***

Las operaciones de control de calidad se extienden a los materiales, ejecución y producto final dentro del proceso micropilotaje. El control en materiales se refiere a los aceros y la lechada.

### ***3.1.- CONTROL DEL ACERO***

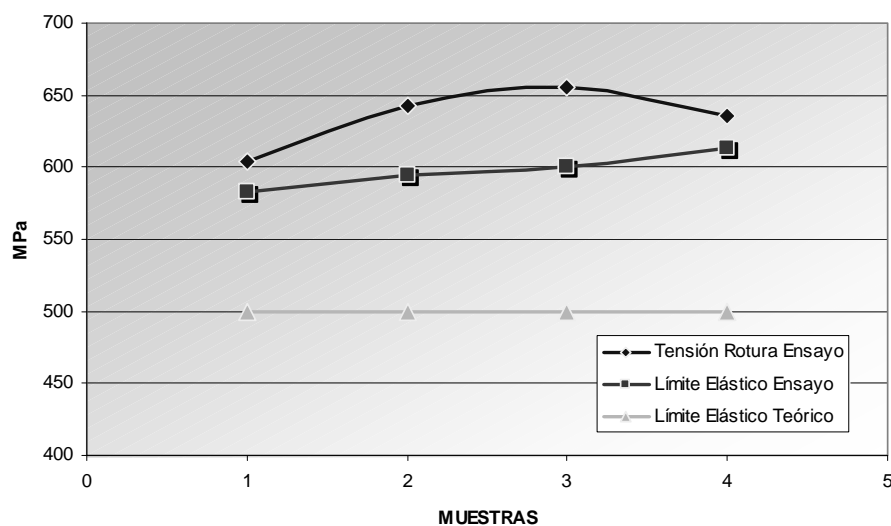
Los aceros comúnmente empleados en las obras analizadas se clasifican como ST-52, indicando que el límite elástico del acero ha de ser al menos de 500 Mpa. Los ensayos a los que se someten los tubos de los micropilotes determinan:

- Diagrama de rotura.
- Tensión de Rotura (MPa).
- Alargamiento (%)
- Límite Elástico (MPa).

A continuación se muestran algunos resultados de ensayos de tracción, según la norma UNE 7474-92, a los que fueron sometidos tubos de micropilotes usados en la corrección de deslizamientos.

ESTADÍSTICAS DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN		
Tensión de Rotura Media Ensayada	634,5	Mpa
Límite Elástico Medio Ensayado	597,5	Mpa
Límite Elástico Teórico de Cálculo	500	Mpa
Desviación Típica de la Tensión de Rotura	26,9	Mpa
Desviación Típica del Límite Elástico	19,5	Mpa
Alargamiento Medio	15.5	%

ENSAYO A TRACCIÓN UNE 7474-92



De toda la serie de muestras, el límite elástico obtenido de media se acerca a 600 Mpa, lo que supone un incremento del 20% respecto al límite elástico teórico. En cuanto a la tensión de rotura, el valor medio de los ensayos realizados es de 635 Mpa, que representa un 27% más del límite elástico de referencia en los cálculos.

### 3.2.- CONTROL DE LA LECHADA

El documento que sirve de base para las especificaciones a controlar en la inyección de la lechada es la EHE, desarrollándolas en su Artículo 36.2, exigiéndose:

- Cementos tipo CEM I, salvo justificación especial.
- Ph del agua inferior a 7.

- Relación agua/cemento lo más baja posible compatible con las condiciones de fluidez (normalmente oscila entre 0.4 y 05).
- Exudación de la lechada inferior al 2%, pudiendo llegar incluso al 4%.
- Contracción inferior al 3%.
- Expansión inferior al 10%
- Resistencia a compresión a 28 días superior a 30 MPa.

Asimismo se deben hacer con frecuencia diaria los siguientes controles, en cumplimiento con el Artículo 98 de la EHE:

- Tiempo de amasado.
- Presión de la inyección, que oscila entre 2 y 8 MPa.
- Cantidad de aditivo.
- Viscosidad con el cono de Marsh, que suele estar comprendida entre 17 y 25 segundos.
- Registro de temperatura ambiente máxima y mínima.

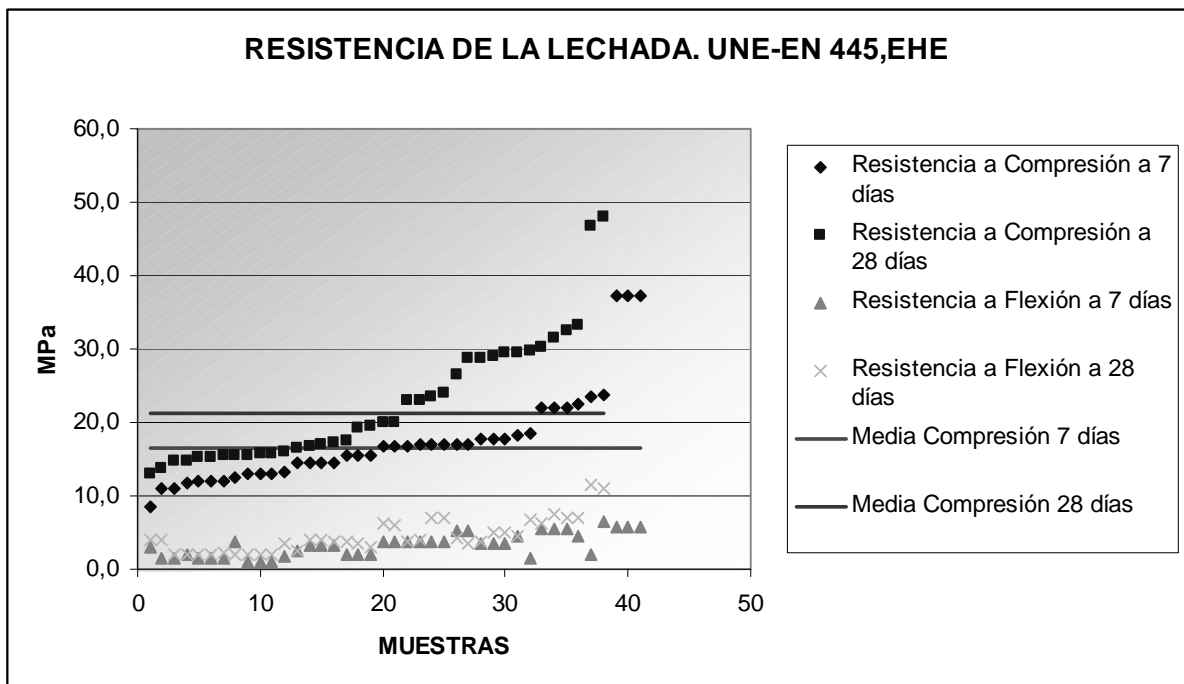
En la actualidad, y a falta de unas recomendaciones específicas para micropilotes inyectados, han surgido problemas en la interpretación de la normativa existente. Los ensayos realizados a las lechadas puestas en obra en materiales alpujárrides arrojan resultados que llevan a la reflexión.

<b>RESISTENCIA A FLEXIÓN Y COMPRESIÓN (UNE-EN 445,EHE)</b>	
Media Resistencia a Compresión a 7 días (Mpa)	16,59
Media Resistencia a Compresión a 28 días (Mpa)	21,36
Media Resistencia a Flexión a 7 días (Mpa)	2,92
Media Resistencia a Flexión a 28 días (Mpa)	3,98
Desviación Típica Resistencia a Compresión a 7 días (Mpa)	6,65
Desviación Típica Resistencia a Compresión a 28 días (Mpa)	8,60

A parte de lo estipulado en la normativa existente, es de buena práctica el control y seguimiento del volumen y el caudal de inyección. El caudal de inyección constituye un factor cuya incidencia sobre la resistencia de sellado nunca se evoca. No obstante la experiencia ha demostrado que los siguientes valores de caudales conducen a una buena calidad de sellado:

- 0.3 a 0.6 m<sup>3</sup>/h para los suelos coherentes.
- 0.8 a 1.2 m<sup>3</sup>/h para los suelos de fricción.

Por el contrario, el volumen de inyección, respecto al volumen teórico de la perforación, aumenta un 50 % para materiales de fricción y sobre un 100% para materiales cohesivos. Los valores anteriores son aplicables a inyecciones tipo IGU. Para inyecciones tipo IRS, dicho volumen puede aumentar un 100% en materiales granulares y entre el 150 y el 200% en los cohesivos.



La gráfica anterior muestra los resultados de más de 80 probetas ensayadas a compresión según norma UNE-EN 445, EHE. Dichas probetas son prismáticas de dimensiones 40x40x160 mm. Como se observa, existe relativa dispersión de los datos cuando se mide la resistencia a compresión a 28 días, pero lo más significativo es que la media es bastante inferior al límite fijado por la EHE para inyecciones, bajando un 28.8% sobre los 30 Mpa.

Existe por tanto dificultad para un cumplimiento estricto con la EHE y con los pliegos de prescripciones técnicas particulares, que suelen basarse en la misma. Por ello, tras los ensayos de contraste que confirmaron una baja resistencia se realizaron pruebas de capacidad de respuesta del terreno ante sollicitaciones exteriores para comprobar la adherencia micropilote-terreno, comprobándose por tanto la resistencia del mismo. Más adelante se detalla este ensayo in situ, pero el resultado fue muy favorable en todos los casos.

El resto de propiedades controladas en la sistemática de calidad de las obras arrojan valores comparativos con los fijados en el Artículo 36.2 de la EHE. Así, la exudación medida oscila entre un 3 y un 4.5%; la contracción de la lechada tiene un rango entre 2.5

y 5%, mientras que la fluidez por el cono de Marsh es un poco inferior al minuto, quedando normalmente entre 10 y 15 grumos de pequeño diámetro retenidos en el tamiz. A través del proceso anterior, se pone de manifiesto una discrepancia entre los valores reales inferiores a los de la normativa existente, con resultados contrastados positivamente a través de ensayos a posteriori. Se abre así una discusión en la idoneidad de fijar valores tan limitativos como los indicados en la EHE, que nunca olvidemos que hacen referencia a inyecciones para armaduras activas, lo cual no se ajusta a la realidad de inyecciones en micropilotes, siendo el concepto y la finalidad distintos para los dos casos. Por ello, el tema invita a continuar la reflexión tras una línea de investigación en la que se tengan en cuenta estos parámetros para el cálculo, aplicándolo, en principio, a suelos alpujárrides.

#### ***4.- PROPUESTA METODOLÓGICA PARA REALIZAR ENSAYOS DE PRUEBA DE CARGA EN MICROPILOTES***

El mecanismo principal para la transferencia de la carga a los micropilotes es la fricción lateral. Los movimientos necesarios para movilizar la resistencia lateral de un micropilote son pequeños en comparación con los necesarios para movilizar la punta del mismo (20 ó 40 veces menos). La fricción lateral depende de la unión inyección-terreno que esta influenciado principalmente por las técnicas y la calidad de la construcción.

La fricción lateral se mejora principalmente por tres factores:

- Aumento de diámetro.
- Aumento de la presión lateral de la inyección.
- Resistencia de terreno.

Debido a la importancia, en cualquier construcción a desarrollar, del funcionamiento de los micropilotes es recomendable realizar pruebas de carga que permitan comprobar su capacidad real.

La carga máxima aplicada durante la prueba debe ser por lo menos dos veces la capacidad requerida para el micropilote (Mascardi 1982).

Los procedimientos seguidos comúnmente para realizar pruebas de la carga son ASTM D 1143-81 para la compresión y ASTM D 3689-87 para la tracción (Bruce 1997).

Los criterios utilizados en España para los test de carga son los que se desarrollan a continuación.

Este procedimiento tiene como objeto la descripción de los pasos a efectuar para inyectar un micropilote por procedimiento IRS (Inyección Repetitiva y Selectiva) y efectuar una prueba para comprobar su resistencia a tracción.

La resistencia a tracción nos permitirá estimar la adherencia existente entre el micropilote inyectado y el terreno. Este valor obtenido nos permitirá dimensionar la longitud de micropilote que precisa inyección IRS en función de la carga de trabajo del mismo.

#### **4.1.- PARÁMETROS DE INYECCIÓN**

En primer lugar debemos fijar las variables que condicionan la prueba y los resultados que se pretenden determinar. Estos valores afectan a:

- Disposición y tipos de válvulas de inyección
- Presión y caudal de inyección.
- Admisión de inyección por válvula
- Longitud tratada con válvula

##### Disposición y tipos de válvulas de inyección

Una disposición sancionada por la experiencia consiste en la colocación de válvulas cada metro, fijándose la primera a medio metro de la base del micropilote, que irá cegado por una brida ciega.

##### Presión y caudal de inyección.

En principio y dada la naturaleza del terreno, el valor a tener en cuenta es el de la presión. Este valor alcanza un límite inicial comprendido entre 2 y 8 MPa, suficiente para abrir las válvulas y para desplazar la lechada de obturación en la zona de influencia de la válvula. Este valor se puede incrementar en caso necesario hasta los 25 MPa.

##### Admisión de inyección por válvula

Se suele fijar en un valor de tres veces el teórico que admitiría la sección estricta del micropilote.

##### Longitud tratada con válvula

El objeto de la prueba es determinar la adherencia entre el terreno y la superficie del micropilote inyectada por procedimiento IRS. Por tanto, se pretende realizar un ensayo destructivo del micropilote.

Pero este ensayo destructivo no debe suponer el colapso del micropilote por su armadura, sino el arrancamiento del mismo, movilizándolo toda la tensión de adherencia que pueda ofrecer el terreno.

Por tanto se pretende inyectar una o a lo sumo dos válvulas del micropilote para crear un bulbo aparente de uno o dos metros y provocar el arrancamiento del mismo. La carga

transmitida al micropilote permitirá determinar la tensión de adherencia del terreno con el bulbo.

## **4.2.- EJECUCIÓN DEL MICROPILOTE**

Los pasos a efectuar son los siguientes:

- Perforación del micropilote
- Colocación de armadura
- Inyección exterior del micropilote
- Inyección controlada de válvula

### Perforación del micropilote

Se efectúa por rotopercusión. Si fuera necesaria se realizaría un revestimiento de la perforación, ejecutándose por los procedimientos usuales. Se registrarán los diversos terrenos atravesados según parte de perforación, para determinar la profundidad del micropilote.

### Introducción de la armadura

La armadura se introducirá en el interior del taladro. Como se ha descrito anteriormente su extremo inferior está cegado.

### Inyección exterior del micropilote

Se introducirá un tubo de inyección hasta la máxima profundidad del micropilote y se procederá a la inyección del mismo hasta que la lechada aflore limpia por la boca del taladro. El volumen inyectado se reflejará en el parte de inyección para el control de calidad.

### Inyección controlada de válvulas

Una vez finalizada la inyección exterior del micropilote se aguardará hasta que comience el fraguado de la misma para asegurar que la columna de lechada exterior actúe como obturador que evite la fuga de la lechada controlada entre la armadura y la superficie de la perforación.

Transcurrido este periodo se procederá a inyectar la primera válvula para lo cual será preciso colocar un obturador mecánico. El sistema de inyección controlada precisa la utilización de un doble obturador que aisle la zona de válvula del resto de del interior de la tubería de micropilote.

El proceso de instalación del obturador consiste en situarlo de tal forma que la válvula a inyectar quede situada entre los dos obturadores que se encuentran rígidamente unidos entre sí. A continuación se expanden los obturadores (son de goma) mediante aire o agua a presión hasta que ocupan toda la sección interior de la tubería del micropilote.



Una vez efectuada esta operación, tenemos aislada la válvula, con lo cual se puede proceder a la inyección controlada de la misma. Se continuará la inyección hasta que se obtengan los valores prefijados anteriormente. Los datos de la inyección se registrarán en el parte de trabajos.

Debido a la longitud del doble obturador, no es posible su colocación en la primera válvula (debido a la disposición particular de un metro entre válvulas). Este problema se puede subsanar utilizando un obturador simple o bien, saltando la primera válvula y obturando la siguiente. El obturador simple es igual al doble eliminando el obturador inferior. La misión de este último la cumple la brida ciega del extremo de la tubería del micropilote.

### **4.3.- PRUEBA DEL MICROPILOTE**

Una vez terminada la ejecución del micropilote de prueba, es preciso proceder a su puesta en carga. La armadura se rodea de una camisa de PVC que elimina el posible

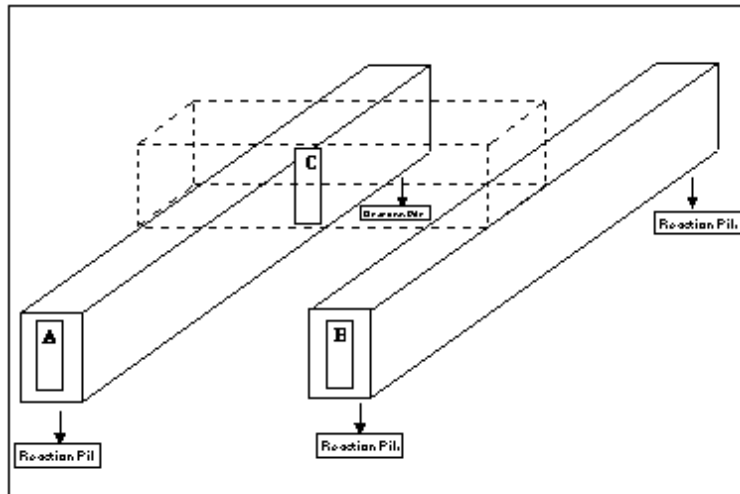


rozamiento del fuste del micropilote con el terreno a la hora de realizar la prueba de tracción.

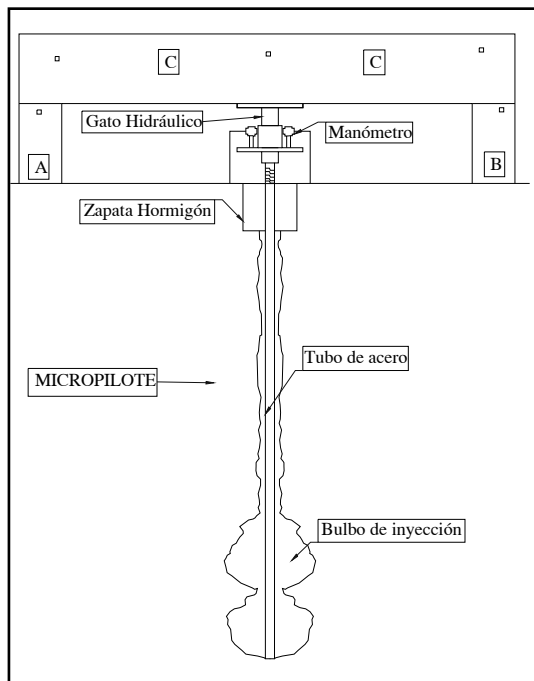
La prueba de carga se efectuará con un gato hidráulico. La reacción sobre el terreno obliga a construir una zapata en la que apoye el gato y distribuya las tensiones. Esta zapata se construirá antes de ejecutar el micropilote, dejando un pasatubos para no interferir con el micropilote. Teniendo en cuenta la capacidad máxima del micropilote se dimensionará la zapata de forma que transmita al terreno la tensión adecuada.

Para asegurar una correcta toma de datos, será preciso efectuar una pequeña puesta en carga de unas 2 tn que permita que se ajusten los diversos elementos mecánicos (barra, tuercas, etc)

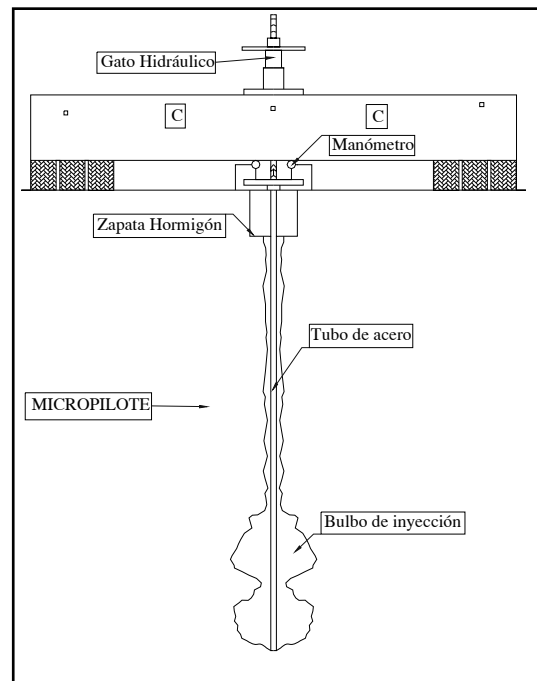
Se tomará la lectura inicial del extremo de la barra con respecto a una referencia fija y a partir de ese valor, se calcularán por diferencia entre la lectura de la posición de la barra, su situación inicial, y las variaciones que pueda sufrir la cota inicial de la cara superior de la zapata, los alargamientos del micropilote. Los escalones de carga que se pretenden aplicar serán de 40 MPa y su duración de 1 minuto. Se anotarán los valores obtenidos hasta que se produzca la descarga del gato por haberse desplazado del micropilote, o los valores de la elongación obtenidos superen el 50% de los valores teóricos.



Distribución de vigas para la realización de pruebas de carga



Ensayo de Compresión



Ensayo de Tracción

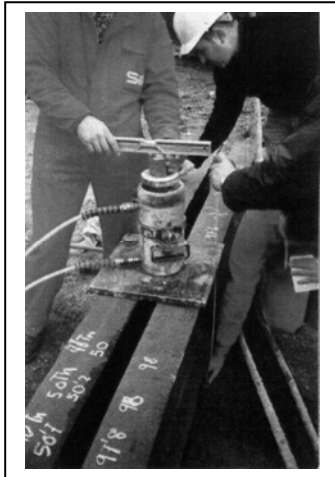
#### 4.4.- LIMITACIONES DE LA PRUEBA

Las pruebas de la carga no proporcionan una información correcta cuando tenga influencia el efecto grupo, ya que no pueden simular el comportamiento de un grupo de micropilotes.

Igualmente para los suelos cohesivos, el desarrollo de la prueba no es lo suficientemente larga en el tiempo (Mascardi 1982), y una sola prueba del micro no puede definir los efectos a largo plazo de un grupo de micropilotes en arcilla.

## 5.- RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS

Sobre la traza de varias carreteras que discurren sobre materiales de transición se han realizado ensayos de tracción a los micropilotes. En las pruebas de carga realizadas hasta la fecha no se ha llegado hasta el arrancamiento del tubo, sino que se ha acotado



el máximo esfuerzo sobre la pieza aplicando el teorema de la cota superior.

La litología que se ha presentado con mayor frecuencia han sido los esquistos y micaesquistos muy fracturados, presentando intercalaciones cuarcíticas en algunos casos. Esta capa de potencia considerable estaba cubierta en todos los casos por derrubios procedentes de rocas similares o de los abundantes afloramientos calizos en la zona de estudio.

Los valores del SPT para la capa competente profunda ha sido de rechazo en la totalidad de los ensayos realizados, mientras que en la capa de derrubios superficial su valor ha sido más disperso, oscilando entre 20 y el rechazo.

En los cálculos de gabinete realizados por el método de Bustamante se obtienen de media los siguientes valores:

- Coeficiente de fricción unitaria entre 0.25 y 0.37 N/mm<sup>2</sup>.
- Coeficiente alfa de mayoración entre 1.1 y 1.4
- Resistencia unitaria por fuste comprendida entre 65 y 125 KN/ml

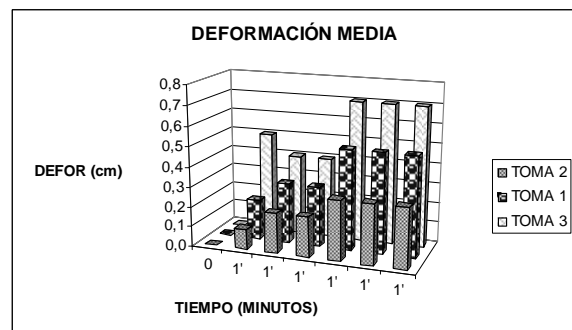
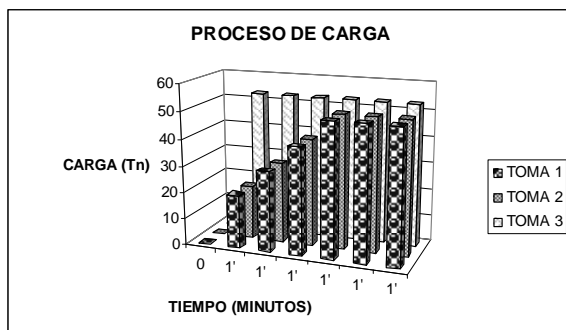
Ha de tenerse en cuenta que para el cálculo geotécnico de la resistencia por fuste, según las recomendaciones de Bustamante, se toma un coeficiente de seguridad igual a 2.

A continuación se muestra una tabla comparando los resultados del cálculo geotécnico con los obtenidos en 4 pruebas realizadas en materiales de transición.

ENSAYO	Nº1	Nº2	Nº3	Nº4
Longitud inyectada (m)	2	2	5	5
Carga Límite a Compresión Según Bustamante (KN)	212	246	302	507
Carga Límite a Tracción Según Bustamante (KN)	202	234	288	482
NSPT	50R	50R	40	50R
Prueba de carga a tracción (KN)	530	580	650	1150
<b>Factor de seguridad mínimo estimado</b>	<b>2,50</b>	<b>2,36</b>	<b>2,15</b>	<b>2,27</b>

En la última fila se intenta representar cuál es el coeficiente de seguridad que como mínimo se ha tenido en el dimensionamiento, destacando que no es el real, puesto que nunca se llegó a agotar la inyección y no se procedió al arrancamiento del tubo. Presumiblemente, dicho factor de seguridad será bastante más elevado, ya que en todos los casos las deformaciones medidas eran bastante asumibles.

A partir de los valores de estas pruebas, se han aceptado micropilotes en los que la resistencia de la lechada era inferior a los 30 MPa indicados en la mayoría de los pliegos. Se muestran a continuación los datos de la prueba realizada en el ensayo denominado nº1, donde se realizaron tres fases de carga.



## 6.- CONCLUSIONES

Se enumeran por último las conclusiones más importantes del estudio:

1. Los aceros empleados en los tubos de micropilotes son de gran calidad, llegando su límite elástico hasta los 600 MPa, un 20% superior a lo exigido.
2. La resistencia característica de la lechada media en las muestras obtenidas es un 28% inferior a los 30 MPa que se marcan los pliegos y la normativa actual.
3. Tras la comprobación estructural y geotécnica de los micropilotes por ensayos in situ de carga, se aceptan valores de lechada superiores a 20 MPa.
4. Las limitaciones respecto a las inyecciones marcadas por la EHE son demasiado restrictivas para las lechadas en micropilotes. Este hecho es claro, puesto que la actual norma entiende las inyecciones con armaduras activas, mucho más exigentes.
5. Existe un sobredimensionamiento, por tanto, en la lechada.
6. Los ensayos de las pruebas de tracción realizados en micropilotes demuestran resistencias por fuste superiores a las calculadas teóricamente por el método de Bustamante en materiales Alpujárrides.

7. Las pruebas de carga realizadas no han sido destructivas, aplicando el teorema de la cota superior para la comparación de resultados, por lo que no se ha obtenido la carga última de adherencia micropilote-terreno.
8. Con los resultados anteriores, se valida el método de Bustamante, estimando, a falta de realizar más ensayos de contraste, que para materiales Alpujárrides el método es conservador, pudiendo llegar a alcanzar coeficientes de seguridad superiores a 3 para este tipo de suelos con el mismo.
9. Se abre una línea de investigación en la que se pretende establecer cuál es realmente dicho factor de seguridad en materiales de transición de Andalucía Oriental, a la vista de los resultados obtenidos en las pruebas hasta ahora realizadas.

## **7.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- A. BENSLIMANE, I. JURAN AND D. A. BRUCE (1997). " Group and Network Effect in Micropile Design Practice". XIV International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. . Hamburg, Volume 2. pp. 767-770.
- ASTM-D1143-81, 1981. "Method of Testing Piles Under Static Axial Compressive Load," Section 04, Vol. 04.08.
- Bustamante, M. and Doix, B., 1985. "Une Méthode pour le Calcul des Tirants et des Micropieux Injectés," Bull. liaison laboratoire Ponts et Chaussées, 140, nov-déc, p. 75-92.
- Coyle, H. M. and Reese, L. C. (1966). Load Transfer For Axially Loaded Piles In Clay. Journal Of The Soil Mechanics And Foundation Division, ASCE, Vol. 92, No. SM2, 1-26.
- HERNÁNDEZ DEL POZO, J.C. ET AL, 2003. "Cimentaciones Profundas. Procedimientos de Ejecución y Cálculo". Área de Ingeniería de la Construcción. Área de Ingeniería del Terreno. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Granada.
- HERNÁNDEZ DEL POZO, J.C. ET AL, 2002. "Micropilotes Inyectados". Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Granada.
- Mascardi, C. A., 1982, "Design Criteria and Performance of Micropiles," Symposium on Soil and Rock Improvement Techniques including Geotextiles, Reinforced Earth and Modern Piling Methods. December, Bangkok, Paper D-3.