

# PRUEBAS DE CARGA HORIZONTAL DE COLUMNAS DE SUELO TRATADO MEDIANTE «JET-GROUTING»<sup>(1)</sup>

A. LLORET (\*)  
E. ALONSO (\*)  
A. GENS (\*)  
J. SURIOL (\*)

**RESUMEN.** La realización de dos pruebas de carga a escala real sobre dos pares de columnas de «jet-grouting», ha proporcionado una interesante oportunidad para constatar la capacidad de los métodos de análisis convencionales para predecir el comportamiento de las columnas. Se ha comprobado que para poder reproducir el comportamiento observado en las columnas mediante las teorías existentes para predecir movimientos horizontales en pilotes, es necesario considerar la disminución exponencial de los módulos de deformación del suelo con el desplazamiento de la cabeza de la columna. Este efecto se mantiene para desplazamientos laterales muy pequeños y es consistente con resultados publicados previamente para grandes desplazamientos. Los ensayos de laboratorio e «in situ» (triaxial, columna resonante y sísmicos de «crossholes»), son difíciles de usar para la predicción del comportamiento y además proporcionan una información limitada. Las teorías existentes para estudiar el comportamiento lateral de pilotes, son razonablemente capaces de predecir la deformada de la columna y sus momentos flectores cuando se incorpora en el análisis una variación correcta del módulo con la deformación.

**ABSTRACT.** *Two full scale lateral load test on two pairs of grouted columns provided an interesting opportunity to examine the ability of current analysis procedures to predict the behaviour of the columns. It has been shown that an exponentially decaying variation of soil modulus with column top displacement is necessary to reproduce the observed column behaviour using existing theories to predict lateral displacements of piles. This effect holds for very small lateral displacements and is consistent with previously reported results for larger displacement. Laboratory and field tests of various types (triaxial and resonant column, crosshole seismic) are difficult to use for prediction and provide limited information. The present theories for lateral behaviour of piles are reasonably capable of predicting the deflected shape of the column and its bending moments provided a correct variation of moduli with deformation is incorporated into the analysis.*

## 1. INTRODUCCION

En el marco de la realización del estudio de factibilidad de un recalse, se incluyó la construcción de varias columnas de «jet-grouting» en el seno de un relleno compactado de limo. Uno de los requerimientos de diseño era el análisis de la estructura recalzada frente a carga sísmica. Para ello se requería un conocimiento preciso del comportamiento de las columnas de «jet-grouting» bajo carga horizontal. Se realizaron dos pruebas de carga sobre dos parejas de columnas cercanas entre sí. Era

previsible que el bajo momento de rotura para las columnas se traduciría en desplazamientos laterales pequeños antes de alcanzar la rotura. Esos desplazamientos laterales están controlados por el módulo elástico del suelo a deformaciones muy pequeñas. Ello permitió el investigar el cambio de valor de los módulos del suelo (elástico y de balasto), con el desplazamiento horizontal; para un rango de desplazamiento en el pilote no estudiado hasta el momento.

Por último, el conocimiento relativamente intenso de las propiedades deformacionales del suelo tanto a través de ensayos de laboratorio triaxiales y de columna resonante como sísmicos de «crosshole» ofreció la posibilidad de comparar el comportamiento observado en las columnas, con el predicho utilizando las propiedades del suelo encontradas de forma independiente.

(\*) Departamento de Ingeniería del Terreno y Cartográfica, E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona.

(1) Artículo presentado en el X Congreso Europea de la SIMS celebrado en Florencia, 1991.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL SUELO Y DEL «JET-GROUTING»

El suelo sobre el que se realizó el tratamiento de «jet-grouting» era un relleno de limo bastante uniforme que en algunas zonas contenía una cierta proporción de gravas. Su profundidad era del orden de 17-20 m y descansaba sobre una marga. El nivel freático se encuentra a 15 m de profundidad. El contenido de material arcilloso está generalmente por debajo del 10 %. El valor medio del límite líquido y del índice plástico son de 20 y 3 respectivamente.

La resistencia al corte del relleno en términos de tensiones efectivas determinada a través de ensayos triaxiales CU se puede definir por una envolvente de cohesión nula y ángulo de rozamiento de 40 grados. En Serrano y otros (1986) se presenta una completa descripción de los parámetros geotécnicos relativos al relleno en cuestión. Para muestras no saturadas simulando las condiciones «in situ», el valor del ángulo de rozamiento era de 33 grados y la cohesión de 55 kPa. En la

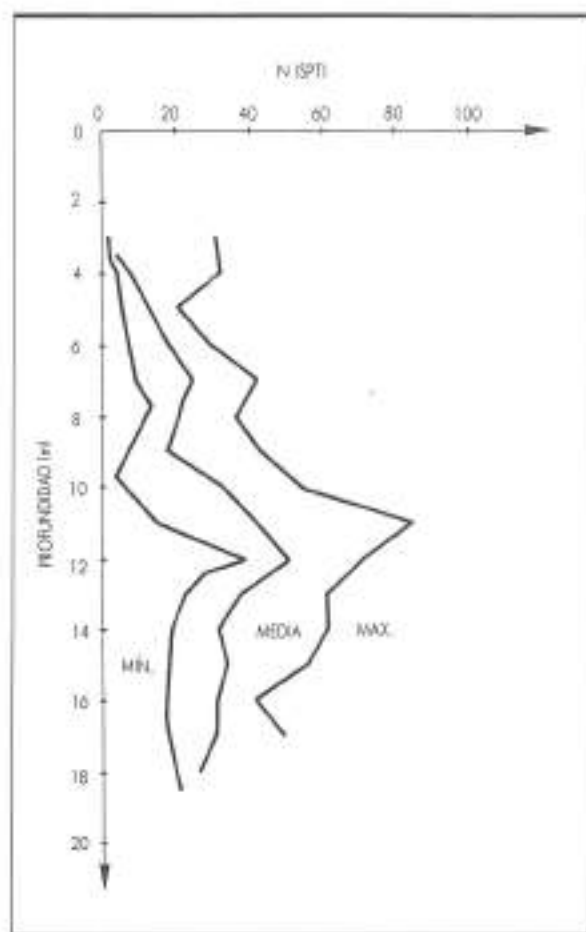


FIGURA 1. Resultados de las ensayos SPT realizadas en el relleno.

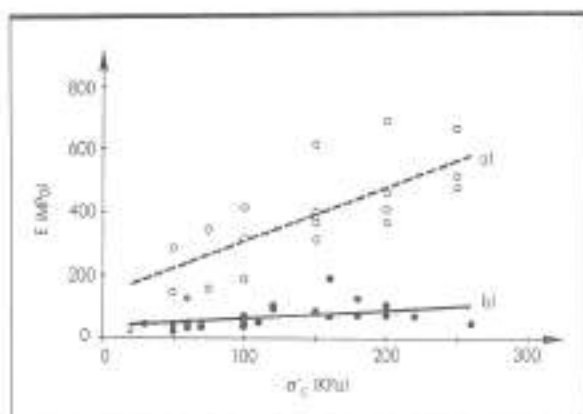


FIGURA 2. Módulos de Young obtenidos en el laboratorio: a) Ensayos de columna resonante, b) Ensayos triaxiales.

figura 1 se indica los resultados de los ensayos de penetración estándar que se realizaron en el relleno.

En el laboratorio se realizaron ensayos triaxiales CD y CU y ensayos de columna resonante al objeto de obtener los parámetros deformacionales. En la figura 2 se presenta la variación del módulo de Young con la presión de confinamiento. En el caso de los ensayos triaxiales, los módulos corresponden al módulo inicial tangente obtenido extrapolando hasta deformación nula la relación lineal existente entre el inverso del módulo secante y la deformación axial siguiendo el procedimiento descrito por Alonso y Gili (1981). En el caso de los ensayos de columna resonante los módulos corresponden a deformaciones del orden de  $10^{-5}$ . Como puede observarse en la figura 2, los módulos basados en el ensayo de columna resonante son de cuatro a seis veces mayores que los determinados en los ensayos triaxiales para un mismo nivel de tensión de confinamiento. Por otra parte, los resultados de los ensayos de «cross-hole» que se realizaron «in situ» se muestran en la figura 3. En estos

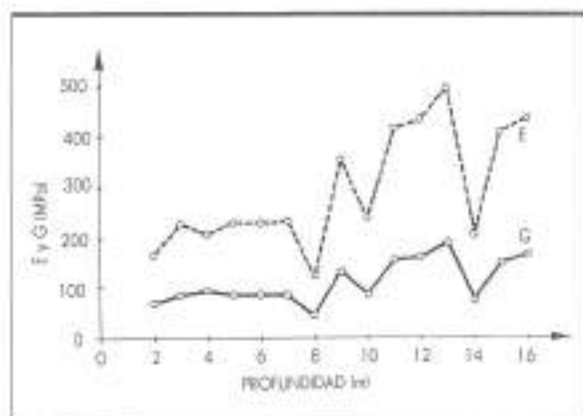


FIGURA 3. Módulos dinámicos obtenidos «in situ» mediante ensayos de «cross-holes».

PRESION DE INYECCION	50 Mpa
DIAMETRO DE LA PERFORACION	0,108 m
VELOCIDAD DE ASCENSO	0,38 m/min
VELOCIDAD DE ROTACION	20 r.p.m.
DIAMETRO DE LA COLUMNA:	
MAXIMO	0,681 m
MINIMO	0,566 m
MEDIO	0,600 m
RELACION AGUA/CEMENTO	1
CONSUMO	0,2 m <sup>3</sup> /m

TABLA 1. Características de las columnas de «jet-grouting».

RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE	10 MPa
RESISTENCIA A TRACCION (ENSAYO BRASILEÑO)	1,35 MPa
MODULO ELASTICO (COMPRESION)	5.400 MPa
MODULO ELASTICO (TRACCION)	8.000 MPa
COEFICIENTE DE POISSON	0,27

TABLA 2. Propiedades mecánicas de las columnas de «jet-grouting».

últimos ensayos la determinación del coeficiente de Poisson condujo a un valor de 0,37.

Para realizar los ensayos de carga horizontal, se construyeron dos pares de columnas de «jet-grouting». Las características principales del procedimiento de inyección y de las columnas resultantes se recogen en la Tabla 1. En la Tabla 2 se presentan las propiedades mecánicas obtenidas a través del ensayo sobre muestras extraídas del centro de la columna de suelo mejorado. Tanto las pruebas de carga «in situ» como los ensayos de laboratorio, se realizaron aproximadamente seis meses después de finalizada la construcción de las columnas.

### 3. PROCEDIMIENTO EMPLEADO Y RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE CARGA

Para el desarrollo de las pruebas de carga se siguió el mismo procedimiento que el utilizado en pruebas sobre pilotes convencionales de acuerdo con las normas ASTM (D3966-1981) y S.I.A. (192-1975). Las cuatro columnas se ensayaron en dos grupos de dos. En cada ensayo

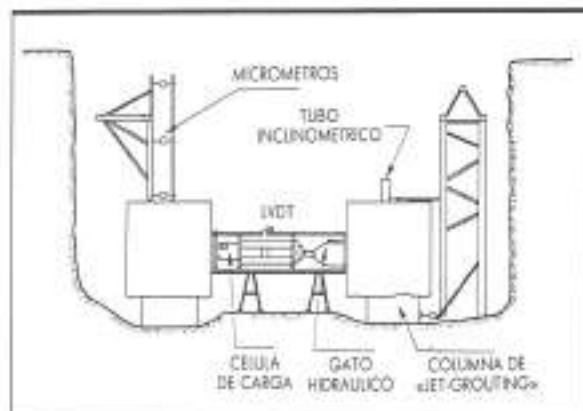


FIGURA 4. Esquema del dispositivo empleado para la realización de las pruebas de carga.

la carga horizontal se aplicó por medio de un gato hidráulico colocado entre las dos columnas. Cuando una de las columnas llegaba a rotura, la carga necesaria para alcanzar la rotura en la otra columna se conseguía utilizando como reacción la pared de la excavación.

La carga en la columna se aplicaba a través de una placa metálica de 2 cm de espesor sobre un cabezal cúbico de hormigón construido encima de cada columna (ver figura 4). En la primera prueba la carga se aplicó 60 cm por encima de la superficie del terreno mientras que en la segunda esta altura se redujo a 15 cm. Para la medida de la carga aplicada se utilizó una célula de carga de 200 KN de capacidad y con una sensibilidad de 100 N. Mediante el gato, la carga podía mantenerse constante dentro de un rango de 250 N.

Los movimientos horizontales de la columna se midieron utilizando 5 micrómetros mecánicos (con una sensibilidad de 0,01 mm) en cada uno de los dos grupos ensayados. Los comparadores estaban fijados a un marco metálico que se apoyaba fuera del área del ensayo. La variación de la separación horizontal entre las dos columnas se registró utilizando un transductor de desplazamiento del tipo LVDT.

A fin de conocer la distribución de movimientos horizontales a lo largo de las columnas se instaló un inclinómetro en el centro de una de las columnas en cada uno de los dos ensayos. La precisión que se podía alcanzar en la medida de los movimientos horizontales era de 0,5 mm aproximadamente en la cabeza de la columna. Durante la realización de cada uno de los dos ensayos se efectuaron 4 y 5 medidas inclinométricas respectivamente (una de las medidas se realizaba siempre después de alcanzada la rotura).

La magnitud de los incrementos de carga no fue constante a lo largo del proceso de carga. Inicialmente se realizaba un ciclo de carga/descarga hasta 20 KN con escalones de carga de 3-4 KN. Posteriormente los escalones se limitaron a 2 KN. El tiempo que se dejaba

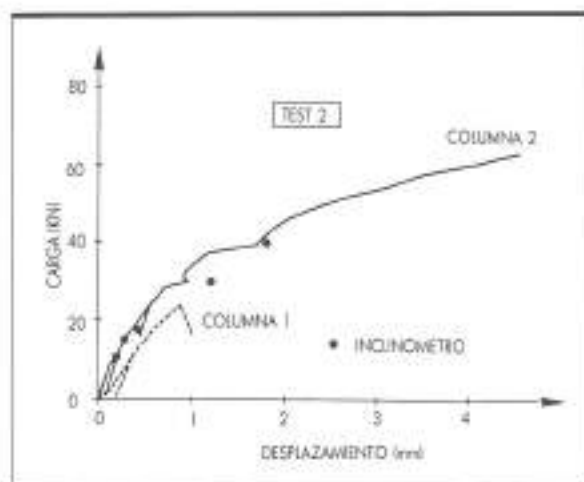


FIGURA 5. Comportamiento carga-desplazamiento medido en la prueba 2.

transcurrir en cada uno de los escalones de carga oscilaba entre los 10 y 40 minutos. En la figura 5 se muestran las curvas carga-desplazamiento a nivel de la superficie del terreno, obtenidas en el segundo ensayo mediante la medida en los micrómetros mecánicos. En la misma figura se muestran los desplazamientos medidos mediante el inclinómetro en una de las columnas. La coincidencia entre los resultados de los dos procedimientos de medida es satisfactorio.

La figura 6 muestra el desplazamiento lateral a lo largo de una de las columnas de «jet-groutings» del primer ensayo para una carga próxima a la de rotura. La lectura de los micrómetros por encima de la superficie del terreno proporciona también alternativamente una

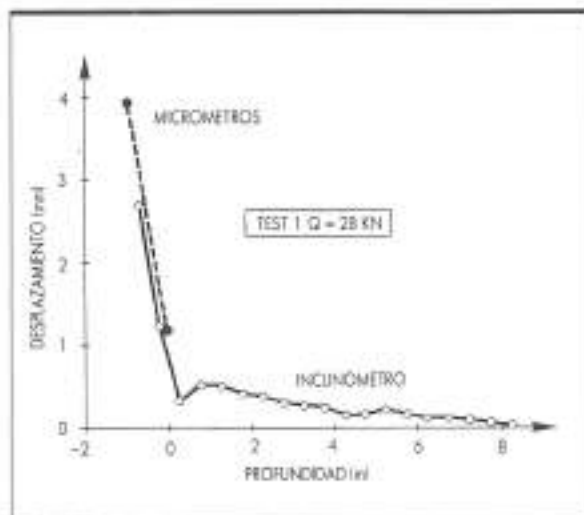


FIGURA 6. Forma de la deformada de la columna instrumentada en las proximidades de la rotura.

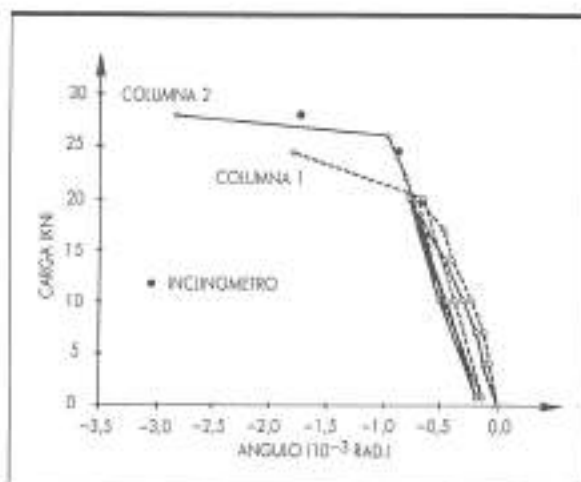


FIGURA 7. Relación carga-inclinación en cabeza para la prueba 1.

medida del giro en la cabeza de cada columna. Estas medidas coinciden relativamente bien con la del inclinómetro. Las cargas de rotura quedan bien reflejadas en un gráfico carga-giro en cabeza de la columna. En la figura 7 se muestra este gráfico para las dos columnas del primer ensayo. El acentuado quiebro en estas curvas es una clara indicación de que se ha alcanzado la carga de rotura.

#### 4. ANALISIS DE LOS ENSAYOS

Para interpretar los resultados de las pruebas de carga se han utilizado soluciones analíticas para los movimientos horizontales en pilotes que se basan en la teoría del coeficiente de balasto.

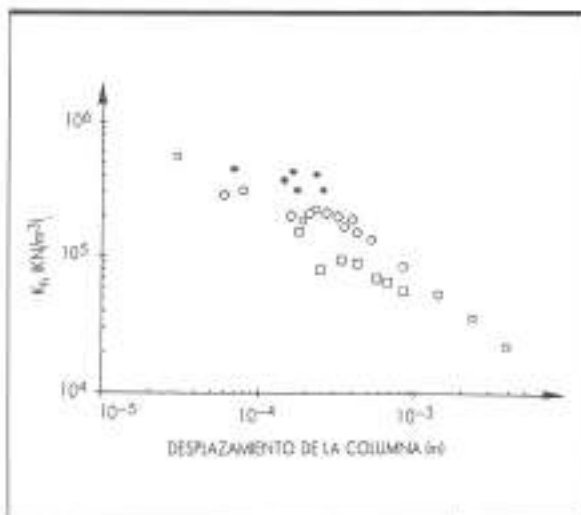


FIGURA 8. Variación del coeficiente de balasto con los desplazamientos en la cabeza de la columna (Prueba 1 y 2).

La no linealidad en las curvas carga-desplazamiento se explica en términos de una variación del coeficiente de balasto horizontal  $K_h$  con el valor del desplazamiento en cabeza de la columna. En la figura 8 se muestra esta variación para las cuatro columnas ensayadas en el caso de considerar  $K_h$  constante con la profundidad. Se detecta una disminución de tipo exponencial del coeficiente de balasto con el desplazamiento, incluso para los más pequeños niveles de movimientos medidos.

Si, por otra parte, se considera una variación del coeficiente de balasto  $K_h$  con la profundidad ( $K_h = n_h z/b$ , donde  $b$  es el diámetro de la columna), la variación de  $n_h$  con el desplazamiento obtenido en los presentes ensayos puede compararse con alguno de los resultados publicados por Alizadeh y Davison (1970) y Awad y Petrasovits (1968) recogidos por Poulos y Davis (1980). Esta comparación se recoge en la figura 9. Los valores de  $n_h$  se han hecho adimensionales con respecto al valor de  $n_{h0}$  para un desplazamiento del 0,5 % del diámetro (ello impide el uso de algunos datos correspondientes a las columnas que han roto antes de llegar a ese nivel de deformación). En la figura 9 la variación exponencial de  $n_h$  con los desplazamientos en cabeza se extiende hasta valores de los desplazamientos muy pequeños. Para un gran rango de variación de los desplazamientos en cabeza, relativos al diámetro de la columna, parece existir una relación única entre  $n_h/n_{h0,0.005}$  y dichos desplazamientos.

La teoría de la elasticidad ofrece una alternativa para el análisis de los desplazamientos laterales en pilotes. Randolph (1981) proporcionó expresiones semianalíticas, basadas en análisis con elementos finitos, para los movimientos en cabeza del pilote cuando el valor del módulo  $G$  aumenta linealmente con la profundidad  $G = \alpha z$ . Los resultados de ensayos en modelo realizados

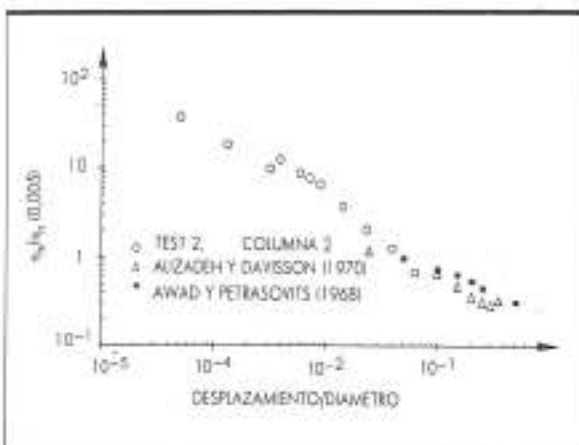


FIGURA 9. Variación del gradiente en profundidad del coeficiente de balasto ( $n_h$ ), con el desplazamiento de la columna en el ensayo 2. También se muestran los resultados publicados por Alizadeh y Davison (1970) y de Awad y Petrasovits (1968), recogidos por Poulos y Davis (1980).

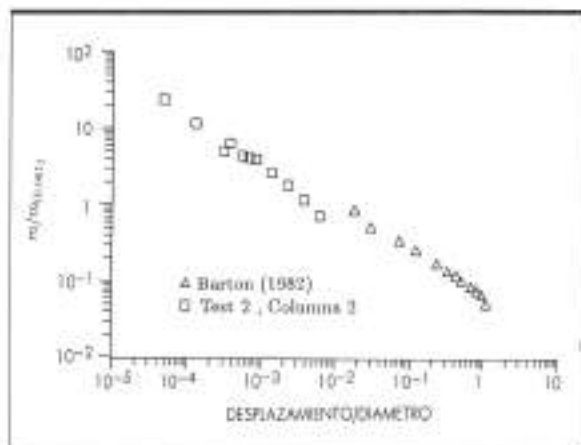


FIGURA 10. Variación del gradiente en profundidad del módulo elástico  $G$  (ml), con el desplazamiento de la columna en el ensayo 2. También se muestran los resultados obtenidos en una centrifuga por Barton (1982) recogidos por Fleming y otros, 1985).

con arena en centrifuga por Barton (1982) recogidos por Fleming y otros (1985) y que se muestran en la figura 10, también reflejan una disminución de tipo exponencial en el grado de aumento de  $G$  con la profundidad ( $m$ ) cuando aumenta el valor de los desplazamientos. Los desplazamientos medidos en el segundo ensayo se han interpretado de acuerdo con dichas expresiones semianalíticas, y la variación de ( $m$ ) con el desplazamiento en cabeza se ha añadido a los resultados de Barton en la figura 10. Se ha tomado un valor de referencia para  $m$  correspondiente a un desplazamiento del 0,5 % del diámetro para dibujar los resultados de ambos tipos de ensayos. Los valores de  $m$  derivados de las columnas de «jet-grouting» extienden de forma coherente, hasta valores muy bajos de los desplazamientos, los resultados de Barton.

Es interesante comparar los valores del módulo de Young  $E$ , derivados de la figura 10, con los valores encontrados en los ensayos de laboratorio. En la figura 11, se han dibujado los resultados de los ensayos de columna resonante junto con el  $E$  aparente para diferentes valores de los desplazamientos en cabeza de la columna. La respuesta de la columna de «jet-grouting» indica que para pequeños movimientos el suelo se comporta más rigidamente que lo previsto en los ensayos de columna resonante. Ello es, quizá, una indicación de un efecto de mejora del terreno alrededor de la columna. Los valores de  $E$  basados en los ensayos triaxiales parecen ser totalmente inapropiados. Para estas comparaciones se ha elegido un valor de  $K_0 = 1$ .

Existen soluciones analíticas no sólo para los movimientos en cabeza sino también para la deformada completa; por tanto pueden realizarse comparaciones entre estas soluciones y los movimientos medidos. En la figura 12 se muestra la comparación entre los movimientos laterales medidos por el inclinómetro en el segundo en-

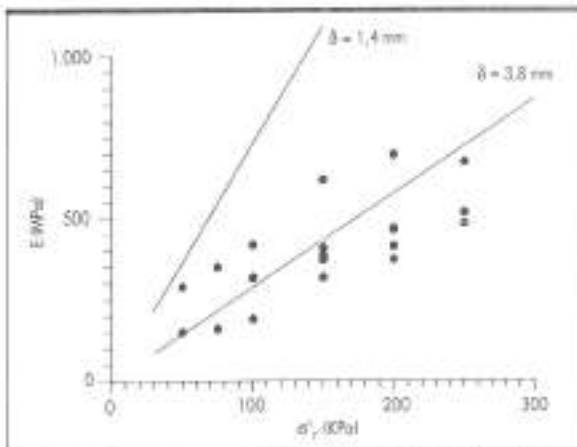


FIGURA 11. Comparación entre los valores de  $E(z)$  obtenidos en el retroanálisis de los ensayos sobre las columnas de jet-grouting y las determinaciones de laboratorio en la columna resonante.

sayo bajo dos cargas horizontales (17,5 kN y 40 kN), y las predicciones de la deformada que se encuentran utilizando el coeficiente de balasto que se desprende de las figuras 8 y 9. En la figura 12, se ha incluido una tercera predicción basada en una variación del coeficiente de balasto con la profundidad del tipo  $K_b = K_0 + \alpha_z z$ . El grado de ajuste con las medidas del inclinómetro es satisfactorio y demuestra la potencia de los métodos analíticos cuando se usan los coeficientes de balasto asociados a las deformaciones existentes.

Por último, se ha examinado la posibilidad de predecir la carga de rotura y la profundidad de la sección por la que se produce la misma. Dada la rigidez de las columnas de «jet-grouting» y su pequeña resistencia a

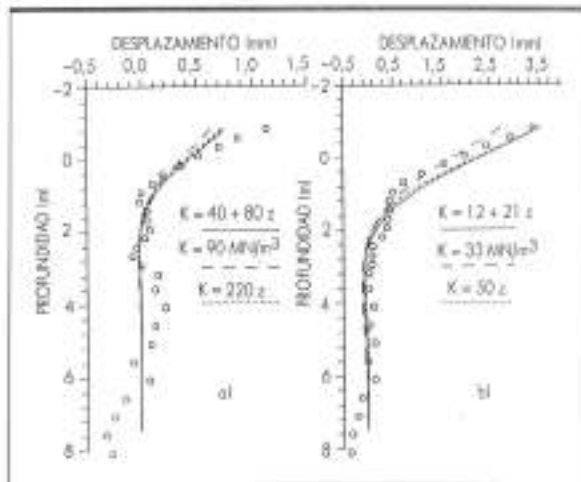


FIGURA 12. Comparación entre las deformaciones obtenidas en predicciones basadas en el método del coeficiente de balasto y los movimientos medidos in situ. a) Carga horizontal,  $Q = 17,5$  kN, b)  $Q = 40$  kN.

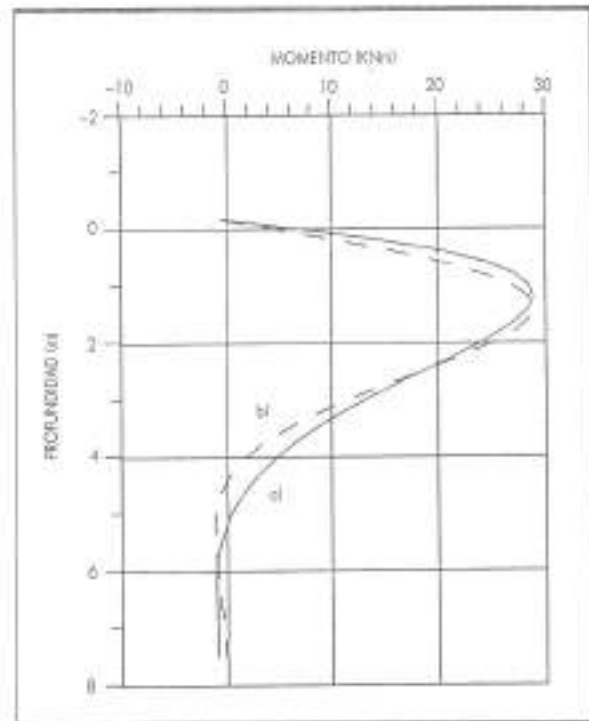


FIGURA 13. Distribución de momentos flectores en la columna instrumentada del segundo ensayo. a)  $K_b = 22,5$  kN/m<sup>2</sup>, b)  $K_b = 27,1 z$  kN/m<sup>2</sup>.

tracción, resulta evidente que las columnas se romperán mucho antes de que se llegase a condiciones últimas en el suelo. Por tanto, un análisis elástico o mediante el coeficiente de balasto es útil, en este caso, para obtener las cargas de rotura. En la figura 13, se muestra para la segunda prueba, la variación de los momentos flectores a lo largo de una columna cuando en la sección más crítica se alcanza el momento de rotura; calculado en base a la resistencia a tracción medida en la columna de suelo tratado. Se han representado dos casos, uno con el coeficiente de balasto  $K_b$  constante y otro con un aumento lineal con la profundidad ( $K_b = \alpha_z z$ ). La situación predicha de la sección crítica ( $x = 1,2 - 1,4$  m) coincide bastante bien con las medidas del inclinómetro.

### 5. CONCLUSIONES

Algunas de las conclusiones que se pueden extraer del análisis presentado son las siguientes:

- La predicción correcta de los desplazamientos laterales de las columnas estudiadas utilizando tanto la teoría de la elasticidad como el coeficiente de balasto, requieren tener en cuenta la variación no lineal de la rigidez del suelo con la deformación. Si se utiliza el desplazamiento en cabeza de la columna como una medida global del nivel de deformaciones, se observa una variación exponencial de los módulos del suelo con los desplazamientos que abarca

casi cuatro órdenes de magnitud para los desplazamientos. El trabajo presente ha extendido, de forma consistente, resultados previos de variación de deformabilidad hasta valores muy bajos de los desplazamientos laterales. Desde las etapas iniciales de aplicación de carga se ha detectado una progresiva disminución de la rigidez del suelo.

- El «mejor» módulo para pequeñas deformaciones determinado mediante ensayos de columna resonante sobre muestras inalteradas, no proporciona una base adecuada para el cálculo de los desplazamientos cuando éstos son pequeños. Ello, quizá, es debido en parte al efecto de mejora producido por el «jet-grouting» en el terreno que rodea externamente a las columnas. Los ensayos sísmicos de «cross-holes» proporcionan valores de  $E$  cercanos, pero inferiores, a los encontrados en ensayos de columna resonante para presiones de confinamiento equivalentes. Los ensayos triaxiales convencionales, a pesar de una cuidadosa interpretación del módulo inicial tangente, proporcionan valores de  $E$  tan bajos que conducen a valores de los desplazamientos fuera del rango de los realmente medidos.
- Las teorías existentes para el análisis de la deformación en pilotes permiten determinaciones correctas de los momentos flectores y de la deformada de las columnas si se consideran valores adecuados a los módulos y, específicamente, de su variación con la magnitud de los desplazamientos de las columnas.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la ayuda y el soporte recibido

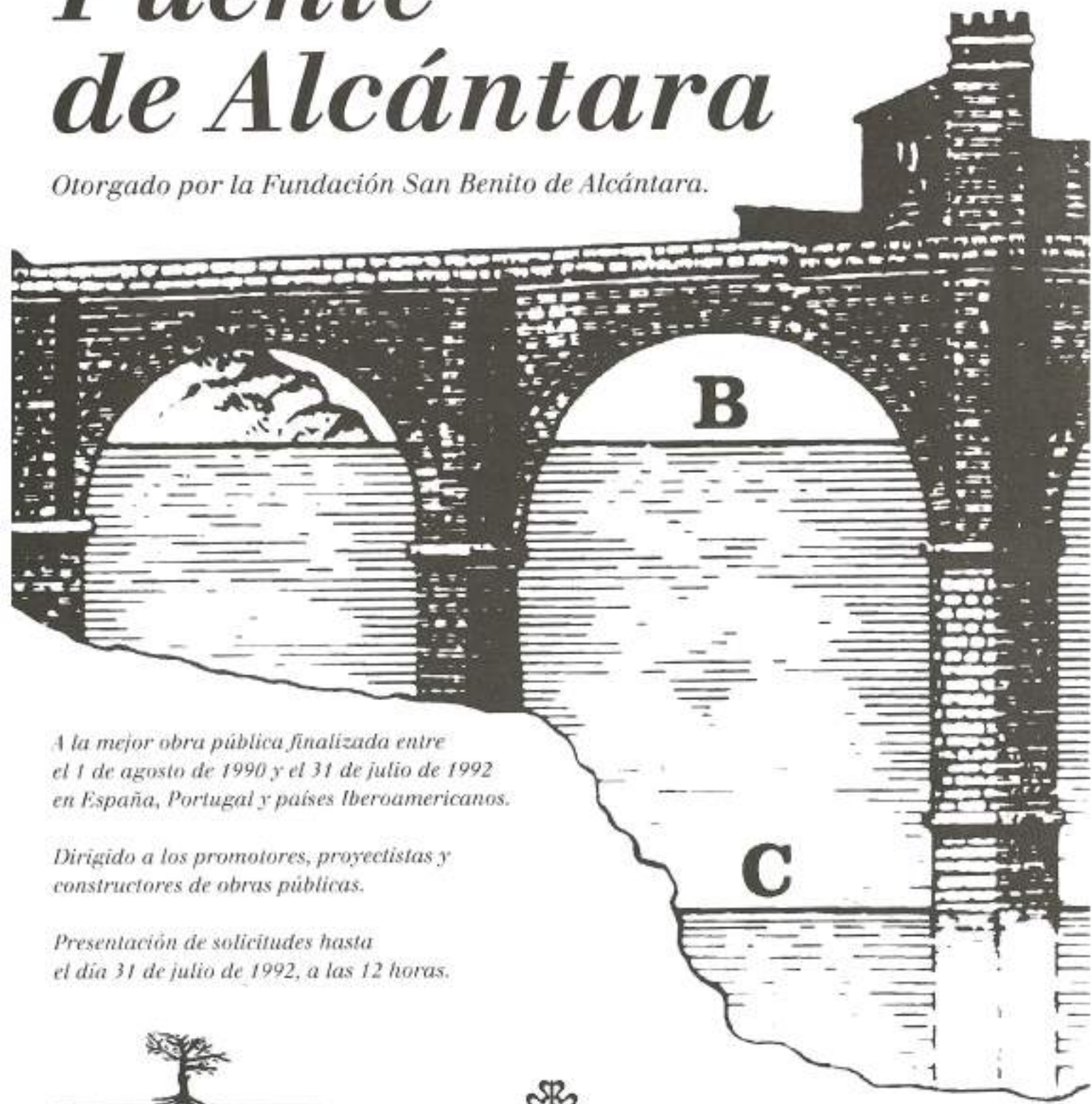
por la Asociación Nuclear de Acero y Cimentaciones Especiales S.A., Rodio.

## REFERENCIAS

- ALIZADEH, M., y DAVISSON, M. T. (1970). «Lateral load test on piles. Arkansas River Project». JSMFD. ASCE. Vol. 96, SM5: pp. 879-894.
- ALONSO, E., y GILL, J. A. (1981). «Small strain deformation moduli from triaxial tests». Proceedings of XICSFME. Vol. 4, pp. 756-757.
- ASTM (1990). «Standard Method of Testing Piles Under Lateral Loads» (D3966-81). Annual Book of ASTM Standards. Vol. 04.08: pp. 503-517.
- AWAD, A., y PETRASOVITS, G. (1968). «Considerations on the bearing capacity of vertical and batter piles subjected to forces acting in different directions». Proc. 3rd. Budapest Conf. SMFE.: pp. 484-497.
- BARTON, Y. O. (1982). «Laterally loaded model piles in sand: Centrifuge test and finite element analyses». Ph. D. Thesis University of Cambridge.
- FLEMING, W. G. D.; WELTMAN, A. J.; RANDOLPH, M. E., y ELSON, W. K. (1985). «Piling engineering». Halsted Press. John Wiley and Sons.
- POULOS, H. G., y DAVIS, E. EH. (1980). «Pile foundation, analysis and design». John Wiley and Sons.
- RANDOLPH, M. F. (1981). «Response of flexible piles to lateral loading». Geotechnique 31, núm. 2: pp. 247-259.
- SERRANO, A.; DAPENA, E., y PAREDES, I. G. (1986). «Limos de las terrazas del Ebro como material de terraplenes». Simposio sobre terraplenes, pedraplenes y otros rellenos. Madrid. pp. 86-89.
- Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA) (1975). «Foundations sur pieux». Norme 102. Zurich.

# *Premio Internacional Puente de Alcántara*

*Otorgado por la Fundación San Benito de Alcántara.*



*A la mejor obra pública finalizada entre  
el 1 de agosto de 1990 y el 31 de julio de 1992  
en España, Portugal y países Iberoamericanos.*

*Dirigido a los promotores, proyectistas y  
constructores de obras públicas.*

*Presentación de solicitudes hasta  
el día 31 de julio de 1992, a las 12 horas.*



FUNDACION SAN BENITO DE ALCANTARA



*Información: Fundación San Benito de Alcántara.*

*Serrano, 26 • 28001 Madrid • Telf: 576 66 00*