Determinación del espesor de suelos blandos a partir de medidas del ruido sísmico ambiental

J. DELGADO (*); A. CUENCA (**); C. LÓPEZ CASADO (***); A. ESTÉVEZ (*); J. GINER (*)

RESUMEN Se presenta un método sencillo y económico para determinar el espesor de una capa de suelo blando, basado en la relación existente entre la frecuencia de resonancia de la columna de suelo y su espesor. Disponiendo de algunos puntos de control, el método permite cartografiar el techo del substrato, lo que puede ser útil en las fases de estudios previos, tanto para evaluar la profundidad de investigación como para estimar la longitud de pilotaje. Como ejemplo, se presenta una aplicación a la Vega Baja del río Segura (Alicante), comparando las estimaciones teóricas con los resultados reales proporcionados por los sondeos y la profundidad de pilotes utilizados en el área.

DETERMINATION OF SOFT SOIL THICKNESS FROM SEISMIC AMBIENT NOISE MEASUREMENTS

ABSTRACT *A simple and economic method to determine the thickness of soft soils is presented. This method is based on the relationships existing between the frequency of resonance of soil column and its thickness. With some checkpoints, this method allows to map the depth of bedrock, which can be useful in preliminar phases of geotechnical studies to evaluate the investigation depth or the length of the piles to be used. As an example, this method is applied to the Vega Baja of Segura river (Alicante province) and the results obtained are compared with those provided by drills and depths of piles used in the area.*

Palabras clave: Suelos blandos; Espesor; Frecuencia de resonancia; Ruido ambiental; Razones espectrales H/V.

1. INTRODUCCIÓN

La planificación de actuaciones en áreas con predominio de suelos blandos, especialmente obras lineales y de desarrollo urbanístico, plantea la necesidad de un conocimiento preciso del espesor de esos suelos, a efectos de prever la posible necesidad de acudir a tratamientos de mejora y para estimar la profundidad de pilotaje, actuaciones ambas de gran incidencia económica. La solución tradicional ha sido la ejecución de campañas geotécnicas con un importante número de sondeos para tener una cierta idea de la cartografía del substrato, pero estos últimos son caros y gravan notablemente los presupuestos, especialmente en las fases de estudios previos o anteproyectos.

La experiencia de los autores en la Vega Baja del Segura, en la que existe una importante extensión de suelos blandos, les llevó a analizar la posibilidad de encontrar alguna solución alternativa a los sondeos mecánicos que, previsiblemente, debería pasar por la Geofísica. En esta línea, también es tradicional la utilización de sondeos eléctricos y de métodos sísmicos, pero los primeros son lentos de ejecución, y tampoco baratos, mientras que la sísmica de refracción no permitía alcanzar la profundidad suficiente para detectar el basamento, salvo que se utilizasen equipos de media potencia que tampoco resuelven el problema del presupuesto. Otras metodologías, como Georádar, también adolecen de los aspectos negativos antes citados.

Para este fin se ha aplicado una técnica típica de ingeniería sísmica (razones espectrales H/V del ruido ambiente) pero utilizada como método de prospección. Dicha utilidad ha sido analizada en trabajos recientes (Delgado et al, 2000; Ibn-von Seht y Wohlenberg, 1999). Una característica de este método es que requiere que el terreno conste de una sucesión de suelo blando sobre un substrato rígido; como principal resultado el método obtiene la frecuencia de resonancia del suelo, la cual permite con una simple relación *frecuencia-espesor (f-H)* determinar el espesor del suelo a partir de dicha frecuencia. Ambos hechos, tanto los requerimientos del método como los resultados ofrecidos, hacen que el mismo resulte muy interesante para evaluar el espesor de la capa de suelos de malas características geotécnicas y, por tanto, estimar la profundidad de apoyo de cimentaciones profundas en áreas problemáticas. En el presente trabajo se presenta los fundamentos del método así como los resultados obtenidos al aplicarlo en la Vega Baja del río Segura.

2. FUNDAMENTOS

El método presentado para calcular el espesor de una capa de suelo blando se basa en la relación existente entre su frecuencia de resonancia y su espesor. Dicha relación viene dada por la siguiente expresión:

(*) Dpto. Ciencias de la Tierra. Universidad de Alicante.

(**) Laboratorio de Carreteras. Consellería de Obras Públicas, Urbanismo y Transportes.

(***) Dpto. Física Teórica y del Cosmos. Universidad de Granada.

$$f = Vs / 4H \quad [1]$$

donde H es el espesor de la capa de suelo y Vs su velocidad de cizalla promedio. Esta velocidad es un parámetro que muestra una importante correlación con diversos parámetros mecánicos del suelo. Entre ellos es de señalar la presión confinante, con la que guarda una relación de tipo potencial (Kramer, 1996; Dobry y Vucetic, 1987). De forma general, la relación entre la frecuencia de resonancia y el espesor del suelo se podría escribir como:

$$f = \alpha H^{\beta} \quad [2]$$

$$H = A f^{B} \quad [3]$$

o *relación f-H* del suelo. Es con esta relación con la que se puede trabajar a fin de realizar la estimación de espesor del suelo. Para ello es necesario determinar los coeficientes A y B de la ecuación, lo cual requiere disponer de numerosos puntos donde se conozca tanto el espesor del suelo como su frecuencia de resonancia.

El primer dato, el espesor del suelo, precisa la existencia de sondeos geotécnicos profundos, que atraviesen la totalidad de la capa de suelos blandos. Para conocer la frecuencia de resonancia es necesario aplicar técnicas de sismología. Hay varios métodos disponibles; uno de ellos es el propuesto por Nakamura (1989), o método de las razones H/V. Con él se mide el ruido ambiente en el sitio a estudiar y se calcula el cociente entre el espectro de las componentes horizontales (H) y verticales (V). Por ruido ambiente (o microtremor) se entiende cualquier perturbación de baja amplitud que excita el suelo, sea de causa natural (viento, oleaje, etc) o artificial (tráfico, máquinas, etc).

El esquema de trabajo y fundamento del método aparece representado en la figura 1. Se parte de las siguientes premisas:

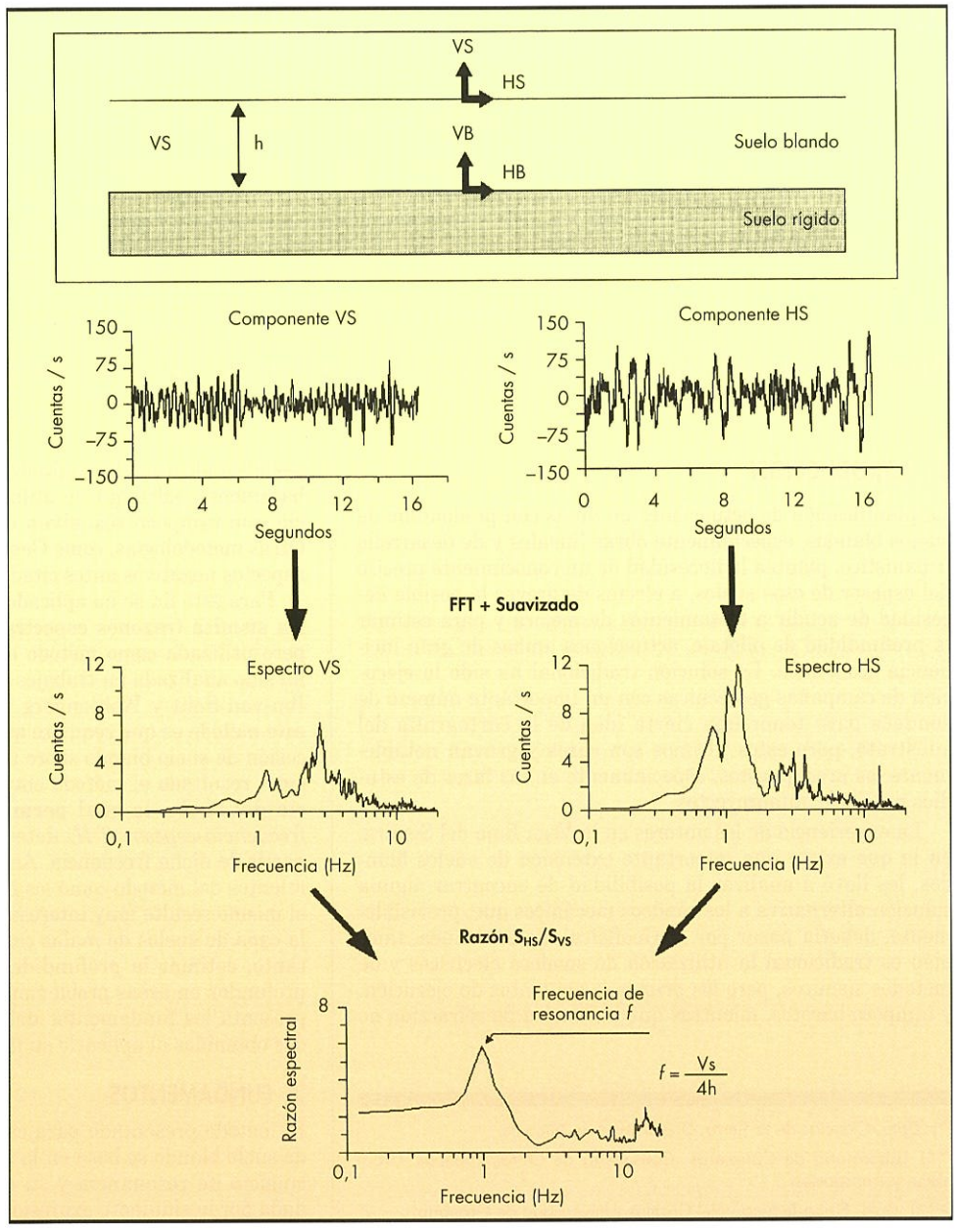

FIGURA 1. Esquema mostrando el fundamento y la metodología de tratamiento del ruido ambiente en el método de las razones H/V.

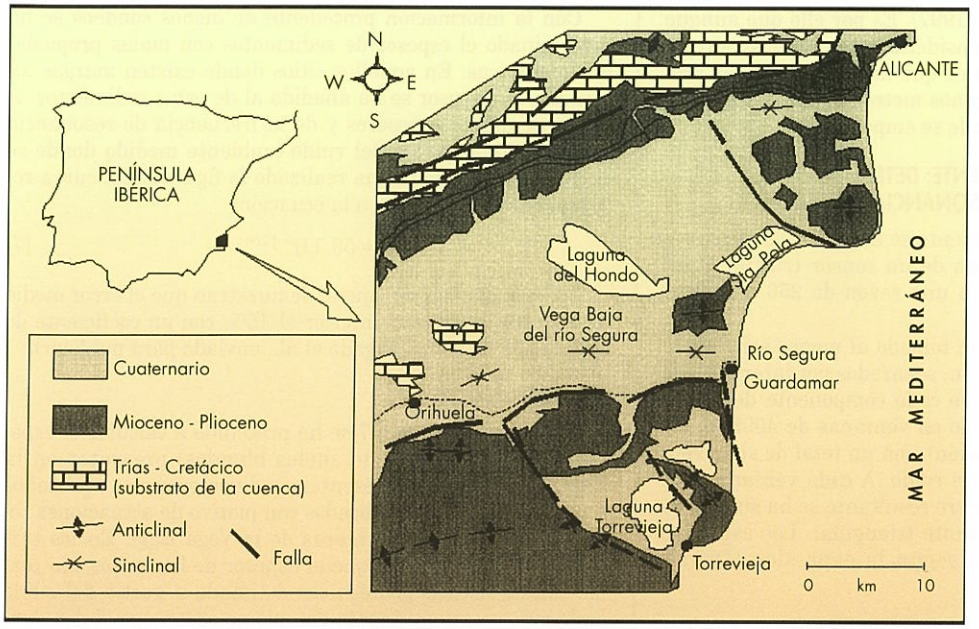

FIGURA 2. Mapa geológico simplificado de la Vega Baja del río Segura.

1. El terreno está constituido por una capa de suelo blando yaciendo sobre un medio más rígido (capa sobre semiespacio).
2. El ruido ambiente está constituido por ondas superficiales (Rayleigh).

La función de transferencia del suelo viene dada por el cociente $FT = S_{HS} / S_{HB}$, siendo S_{HS} el espectro de la componente horizontal del ruido ambiente medido en la superficie de la capa de suelo blando y S_{HB} el espectro de la componente horizontal del ruido registrado en la base de la capa. Sin embargo, este cociente espectral incluye tanto la función de tranferencia del suelo como las caracteríscas de la fuente causante del ruido ambiente. Al objeto de eliminar la contribución de la fuente, Nakamura considera que el efecto de la misma está incluido en el espectro de la componente vertical del ruido medido en la superficie del terreno (S_{VS}), pero no en la base de la capa de suelo blando (S_{VB}). En consecuencia, puede definir la función de la fuente como $FF = S_{VS} / S_{VB}$. La división de ambas razones espectrales da lugar a una nueva función de transferencia:

$$NFT = FT / FF = (S_{HS} / S_{VS}) / (S_{HB} / S_{VB}) \quad [4]$$

Resultados experimentales presentados por este autor indican que el cociente S_{HB}/S_{VB} es próximo a 1 en un amplio rango de frecuencias. Ello simplifica la anterior expresión a:

$$NFT = S_{HS} / S_{VS} \quad [5]$$

Esta función de transferencia presenta un pico de amplificación para la frecuencia de resonancia del suelo (figura 1). La aplicación práctica del método y su comparación con los resultados ofrecidos por otros ha puesto de manifiesto su versatilidad para determinar dicha frecuencia de resonancia (Duval, 1994; Field y Jacob, 1993; Lachet y Bard, 1994; Lermo y Chávez García, 1993).

3. APLICACIÓN PRÁCTICA DEL MÉTODO

3.1. CARACTERISTÍCAS DE LA ZONA DE ESTUDIO: LA VEGA BAJA DEL RÍO SEGURA

El área seleccionada para nuestro estudio corresponde al valle del río Segura en el tramo que discurre por la provincia de Alicante, comprendido entre las localidades de Orihuela y Guardamar, también conocido como la Vega Baja (Fig. 2). El valle está rodeado de relieves constituidos por rocas sedimentarias de edad Trias a Plioceno. Las más antiguas (Trias-Cretácico), de naturaleza carbonatada y margosa, constituyen el basamento de una cuenca, la denominada cuenca del Bajo Segura (Montenat, 1977), donde se acumuló el resto de rocas sedimentarias. Estas últimas están constituidas mayoritariamente por areniscas, margas y conglomerados de edad Mioceno superior-Plioceno. Ambos conjuntos de rocas se encuentran deformados, formando un sinclinal en el cual se ha acumulado sedimentos de edad Pleistoceno terminal-Holoceno y naturaleza fluvial, palustre y litoral (Soria et al., 1999). La geografía actual data de finales del siglo XVIII, cuando se procedió a desecar las zonas pantanosas existentes en las proximidades a la desembocadura del río (Canales y Vera, 1985).

Estos sedimentos recientes son de naturaleza detrítica fina, mayoritariamente arenas finas, limos y arcillas de color gris, con mayor abundancia de la fracción arena hacia la superficie del terreno, siendo las fracciones arcilla y limo las predominantes en profundidad. Estos sedimentos se caracterizan por plantear numerosos problemas de tipo geotécnico. Así, es típica la elevada compresibilidad de los sedimentos más finos, que han causado asientos medios de 40 a 50 cm en terraplenes de pasos elevados, incluso después de tratamientos de mejora del terreno mediante columnas de grava. De otra parte, las arenas de la zona más superficial (entre 0 y 15 m de profundidad) se caracteriza por su baja densidad relativa y elevada susceptibilidad a licuefacción (Delgado, 1997), conociéndose casos de licuefacción en terremotos históricos (Larramendi, 1829; Delgado et al, 1998).

Bajo estos sedimentos recientes se han encontrado margas ocre, con frecuentes intercalaciones de niveles de areniscas y conglomerados, idénticas a las que se observan aflorando en superficie en el borde sur del valle. Cuando se han encontrado en sondeos, por debajo del nivel freático, la parte más superficial de estas margas suele encontrarse alterada, en cuyo caso su comportamiento mecánico es pobre y no difiere mucho del observado en los sedimentos inmedia-

tamente superiores (Delgado, 1997). Es por ello que aunque a estas margas se las suele considerar como el substrato geotécnico de la Vega, lo cierto es que las cimentaciones profundas (pilotes) penetran algunos metros en ellas, hasta alcanzar zonas inalteradas, donde se empotran.

3.2. MEDIDA DEL RUIDO AMBIENTE: DETERMINACIÓN DE LA FRECUENCIA DE RESONANCIA DEL SUELO

Para la medida del ruido ambiente se ha utilizado una estación portátil IDS-3602, dotada de un sensor triaxial Mark L4C, que digitaliza la señal a una razón de 250 muestras por segundo.

En cada localización se han tomado al menos ocho registros de dos minutos de duración, separados por intervalos de otros dos minutos. La señal de cada componente del movimiento del suelo se ha dividido en ventanas de 4096 muestras (16,38 segundos de duración), con un total de siete ventanas por cada dos minutos de ruido. A cada ventana se le ha calculado la FFT y el espectro resultante se ha suavizado mediante una ventana deslizante triangular. Los espectros suavizados se han dividido según la expresión (Duval, 1994):

$$H/V = \sqrt{(FFT_{NS}^2 + FFT_{EW}^2)/(2FFT_Z^2)} \qquad [6]$$

De esta forma resultan hasta siete razones espectrales por cada dos minutos de ruido. A continuación se calcula su valor medio, el cual se utilizará junto con la media resultante de cada medida de 2 minutos de ruido para calcular la función de transferencia promedio en cada sitio.

3.3. DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN F-H

Se ha podido recopilar la información de 27 sondeos realizados para estudios geotécnicos y/o geológicos en diversas actuaciones en la Vega Baja. En dichos sondeos se atraviesa la totalidad de los sedimentos recientes que rellenan el valle, alcanzándose así las rocas sedimentarias subyacentes.

Con la información procedente de dichos sondeos se ha determinado el espesor de sedimentos con malas propiedades mecánicas. En aquellos sitios donde existen margas alteradas, su espesor se ha añadido al de estos sedimentos. A partir de dichos espesores y de la frecuencia de resonancia determinada a partir del ruido ambiente medido donde se perforó cada sondeo se ha realizado la figura 3. La curva representada corresponde a la ecuación:

$$H = 55.11 f^{-1.256} \qquad [7]$$

Los estadísticos del ajuste demuestran que el error medio de las estimaciones es inferior al 15%, con un coeficiente de correlación de 0.98 (Delgado et al., enviado para publicar).

3.4. RESULTADOS

A partir de la ecuación 7 se ha procedido a calcular el espesor de los sedimentos (o suelos blandos) presentes en la Vega. En la figura 4 presentamos diversos cortes realizados a partir de sondeos perforados con motivo de actuaciones recientes en diversas carreteras de la Vega Baja. En los tres ejemplos se comprueba que el espesor de los suelos con malas características geotécnicas estimado a partir del ruido ambiente, es generalmente del mismo orden que el determinado a partir de sondeos geotécnicos. El método se presenta además como capaz de predecir el espesor del suelo allí donde la información de sondeos es incompleta o falta. Así, en el punto C7 de la Figura 4c, el sondeo finalizó antes de alcanzar el basamento geotécnico (40.5 m), estimándose un espesor de sedimentos de 52.9 m en ese punto. Los tres cortes presentados en la figura pone de manifiesto que el método es válido tanto para pequeños espesores (4 a 8 m de suelo) como para grandes espesores (más de 50 m).

Es de especial interés corroborar la anterior información no sólo con los datos procedentes de los sondeos, sino también con los resultados experimentales obtenidos a partir de la hinca de pilotes. El espesor obtenido a partir de la ecuación 7 representa, en teoría, la profundidad mínima en el

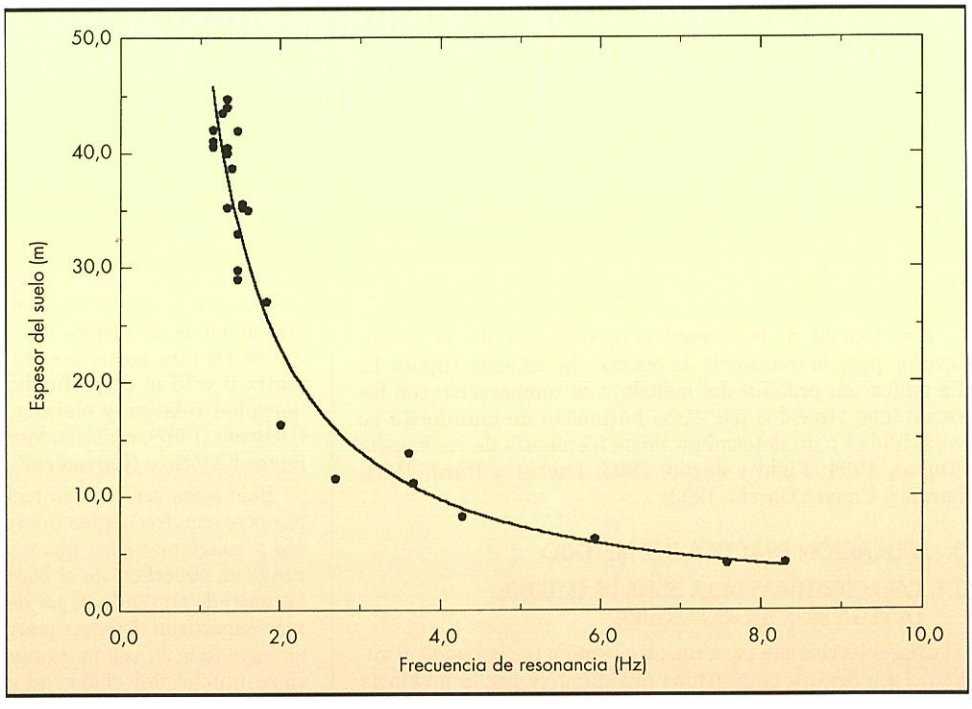

FIGURA 3. Relación entre la frecuencia de resonancia y el espesor de los suelos blandos en la Vega Baja del río Segura.

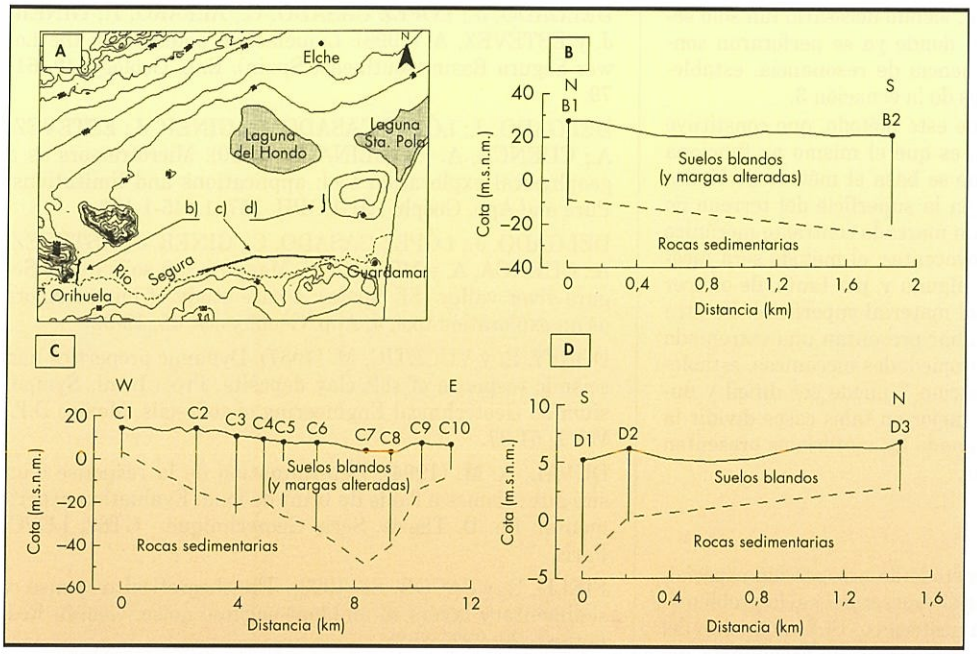

FIGURA 4. Cortes geotécnicos en la Vega Baja mostrando el espesor estimado de los suelos blandos a partir del ruido ambiente y su comparación con el espesor real medido en sondeos geotécnicos. En los cortes la línea discontínua representa la posición del límite suelo blando-substrato geotécnico determinado a partir del ruido ambiente; las líneas verticales gruesas representan el espesor real de los suelos blandos medido en sondeos geotécnicos.
a) Localización geográfica de los cortes.
b) Corte de la ronda de Orihuela.
c) Corte E-W subparalelo al cauce del río Segura.
d) Corte de la carretera de San Fulgencio.

caso de cimentaciones profundas (pilotes). La relación existente entre ambos tipos de profundidades (o espesores) se presenta en la figura 5. Aunque el numero de observaciones es aún pequeño, se observa una clara correlación entre las profundidades de hinca de pilotes y el espesor de suelo estimado a partir del ruido ambiente.

4. DISCUSIÓN

Los resultados prácticos presentados demuestran que el método descrito es útil para la estimación de la profundidad de pilotaje en suelos blandos durante la fase de estudios previos o de anteproyecto.

Las principales cualidades del método son dos: la rapidez de ejecución y la calidad de los resultados obtenidos. En los puntos analizados para este trabajo se emplearon más de 30 minutos/punto, con un rendimiento de unos 12 puntos por jornada de trabajo, aunque la experiencia adquirida demuestra que con 5 a 10 minutos/punto se obtienen resultados similares, por lo que en una jornada normal se pueden superar la treintena de puntos. Ello permite que se pueda estudiar una extensa zona de trabajo en un breve periodo de tiempo. Si se compara dicho rendimiento con otras técnicas de prospección (como la sísmica o la eléctrica), este método resulta claramente más funcional. De otra parte, el método no está limitado por factores externos, a diferencia de la prospección sísmica (por ejemplo el elevado ruido ambiente en áreas urbanas) o eléctrica (presencia de campos eléctricos en las inmediaciones a la zona de estudio, o nivel freático superficial con agua salada).

Hay otras técnicas de prospección, como el georádar, que ofrecen una imagen mucho más detallada del subsuelo a moderadas profundidades; sin embargo, si el objeto del trabajo es determinar únicamente la profundidad de cimentación o el espesor de una capa superficial de suelo con malas características geotécnicas, la técnica basada en la medida del ruido ambiente es más eficaz que el georádar para investigar grandes espesores de sedimentos, habiéndose utilizado satisfactoriamente para medir espesores superiores al millar de metros (Ibn-von Seht y Wohlenberg, 1999).

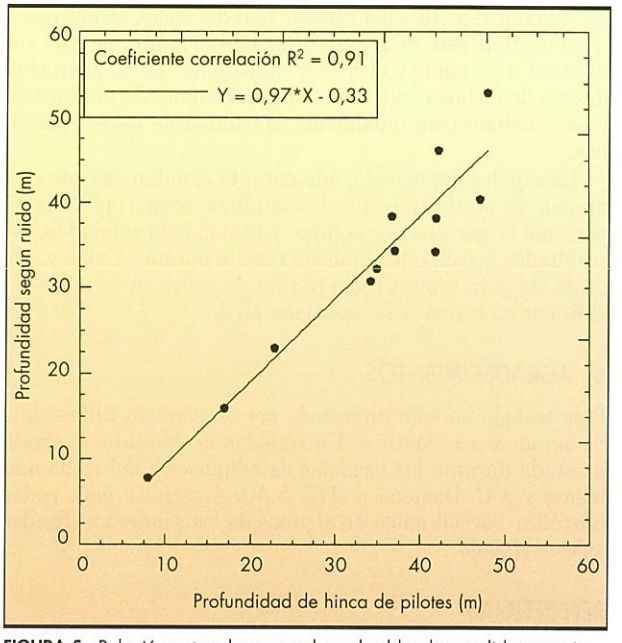

FIGURA 5. Relación entre el espesor de suelos blandos medido a partir del ruido ambiente y la profundidad de hinca de pilotes en la Vega Baja.

Este método tiene el inconveniente de necesitar algunos puntos de apoyo, con espesor conocido de los materiales a estudiar, para determinar los coeficientes de la *relación f-H*. Dicho inconveniente es especialmente preocupante en áreas no urbanas, donde no existe información de sondeos. De hecho la relación presentada en este trabajo sólo ha sido posible gracias a la ejecución reciente de numerosas actuaciones en carreteras de la zona de estudio. En áreas urbanas, donde la información geotécnica es más abundante, estable-

cer la *relación f-H* es muy fácil, siendo necesario tan sólo seleccionar una serie de puntos donde ya se perforaron sondeos y medir en ellos la frecuencia de resonancia, estableciendo entonces los coeficientes de la ecuación 3.

Un último inconveniente de este método, que constituye su mayor limitación práctica, es que el mismo no funciona allí donde las hipótesis en que se basa el método de Nakamura no se cumplen. Así, si en la superficie del terreno no existe una capa de suelo con un marcado contraste mecánico con respecto a materiales subyacentes, el método será incapaz de identificar resonancia alguna y, por tanto, de ofrecer una estimación del espesor del material superficial. De otra parte, si los materiales a estudiar presentan una extremada variabilidad espacial en sus propiedades mecánicas, establecer una relación como la ecuación 7 puede ser difícil y dudosa su aplicabilidad, siendo mejor en tales casos dividir la zona de estudio en subzonas donde los materiales presenten unas propiedades homogéneas.

5. CONCLUSIONES

Se ha presentado un nuevo método de prospección especialmente válido para determinar el espesor del suelo problemáticos desde un punto de vista geotécnico. El fundamento del mismo consiste en medir la frecuencia de resonancia del suelo y estimar su espesor a partir de ella. Los resultados obtenidos muestran una buena calidad, con errores medios no superiores al 15% del espesor real del suelo, siempre que haya un contraste de impedancias elevado entre la capa superficial a estudiar y el medio subyacente. La comparación directa de dichos resultados con los obtenidos de la hinca de pilotes demuestran igualmente la calidad de las estimaciones.

La rapidez del método, que permite estudiar más de una decena de puntos por día, los mínimos requerimientos de personal (1 persona por equipo) y la señalada calidad de los resultados, hacen que el mismo resulte barato y fiable y, por tanto, de gran interés como técnica de apoyo en estudios del subsuelo en trabajos de ingeniería civil.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto PB96-0327. Se agradece a L. Macone (Universidad de Alicante) la ayuda prestada durante las jornadas de adquisición del ruido ambiente y a C. Doménech (ITC S.A.) el permiso para poder consultar las columnas de algunos de los sondeos utilizados en este trabajo.

REFERENCIAS

CANALES, G. y VERA, J. F. (1985). Colonización del Cardenal Belluga en las tierras donadas por Guardamar del Segura: creación de un paisaje agrario y situación actual. Investigaciones Geográficas, 3, 143-160.

DELGADO, J. (1997). Zonificación sísmica de la Vega Baja del río Segura: análisis de la respuesta del suelo. Tesis doctoral. Universidad de Alicante.

DELGADO, J.; LÓPEZ CASADO, C.; ALFARO, P.; GINER, J. y ESTÉVEZ, A. (1998). Liquefaction potential in the Lower Segura Basin (south-east Spain). Eng. Geology, 49, 61-79.

DELGADO, J.; LÓPEZ CASADO, C.; GINER, J.; ESTÉVEZ, A.; CUENCA, A. y MOLINA, S. (2000). Microtremors as a geophysical exploration tool: applications and limitations. Pure and App. Geoph. PAGEOPH, 157, 1.445-1.462.

DELGADO, J.; LÓPEZ CASADO, C.; GINER, J.; ESTÉVEZ, A.; CUENCA, A. y MOLINA, S. Mapping soft soils in the Segura river valley (SE Spain): a case study of microtremors as an exploration tool. J. App. Geophysics, 45, 19-32.

DOBRY, R. y VUCETIC, M. (1987). Dynamic properties and seismic response of soft clay deposits. Proc. Intnl. Symposium on Geotechnical Engineering of soft soils, Mexico D.F., Vol. 2, 51-87.

DUVAL, A. M. (1994). Détermination de la résponse d'un site aux séismes á l'aide du bruit de fond: Évaluation experimental. Ph. D. Thesis. Série Géotechnique - GT62, LCPC, Paris.

FIELD, E. y JACOB, K. (1993). The theoretical response of sedimentary layers to ambient seismic noise. Geoph. Res. Letters, 20, 2925-2928.

IBN-VON SEHT, M. y WOHLENBERG, J. (1999). Microtremors measurements used to map thickness of soft sediments. Bull. Seism. Soc. Am., 89, 250-259.

KRAMER, S. L. (1996). Geotechnical earthquake engineering. Prentice Hall. Upper River Sadle, NJ.

LACHET, C. y BARD, P. Y. (1994). Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique. J. Phys. Earth, 42, 377-397.

LARRAMENDI, J. A. (1829). Memoria y relación circunstanciada de los estragos que la terrible catástrofe de los terremotos de 21 de marzo y siguientes, principalmente, el del Sábado Santo 18 de abril hasta el presente día, han causado en Torrevieja y demás pueblos de la Gobernación de Orihuela y sus inmediaciones, en la ciudad de Murcia y algunos pueblos de la provincia de este nombre. Madrid. Imprenta Real.

LERMO, J. y CHÁVEZ GARCÍA, J. (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. Bull. Seism. Soc. Am., 83, 1574-1594.

MONTENAT, C. (1977). Les bassins néogènes et quaternaires du Levant d'Alicante á Murcia (Cordilleres Bétiques orientales, Espagne). Stratigraphie, paléontologie et évolution dynamique. Doc. Lab. Géol., Univ. Lyon, France.

NAKAMURA, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on ground surface. QR Railway Tech. Res. Inst., 30, 25-33.

SORIA, J. M.; ALFARO, P.; DURAN, J.; DELGADO, J. y ESTÉVEZ, A. (1999). Radiocarbon dating in the Holocene of the Lower Segura Basin (Eastern Betic Cordillera, Spain): sedimentation rates and eustatic implications. Bull. Soc. Géol. France, 170, 349-354.