

Evaluación de la mejora del terreno en ingeniería civil mediante el análisis de ondas superficiales

F. MUÑOZ¹, V. CUÉLLAR² y J. VALERIO²

¹Actualmente en GEOCISA (Geotecnia y Cimientos, S. A.)
Los Llanos de Jerez, 10 y 12. 28820 Madrid

²Laboratorio de Geotecnia. CEDEX
Alfonso XIII, 3 - 28014 Madrid

RESUMEN

El análisis de ondas superficiales es un método de prospección geofísica que se basa en el estudio de la propagación de ondas elásticas, a través de un medio, aplicando vibraciones perpendiculares a su superficie dentro de una amplia gama de frecuencias. Esta técnica, de carácter no destructivo, puede ser utilizada para determinar la velocidad de las ondas tangenciales en sistemas multicapas tales como suelos estratificados horizontalmente. Este trabajo contiene una descripción de esta técnica así como su aplicación a la evaluación de métodos de mejora del terreno. Se han escogido varios emplazamientos, que en principio poseían propiedades geotécnicas deficientes, y que iban a ser utilizados para la cimentación de diferentes estructuras. Como comprobación de las posibilidades del análisis de ondas superficiales para cuantificar la mejora lograda por el tratamiento se realizaron ensayos de ondas superficiales en el terreno antes y después del mismo comparando los resultados obtenidos.

Palabras clave: Ondas superficiales, geotecnia, tratamiento del suelo.

ABSTRACT

The Analysis of Surface Waves method is a non destructive procedure to determine the thickness and the shear wave velocity of multilayered systems, based on the propagation of elastic waves in the soil when a dynamic load is applied on the surface. This paper explains the use of this technique as well as its application to evaluate improvement methods of the soil. Some sites, with poor geotechnical characteristic soils, to be used for foundation of different structures were chosen for this project. Several tests of surface waves were carried out in the ground to check the possibilities of the Analysis of Surface Waves in order to quantify the improvement achieved by the treatment of the soil. For this aim the results of these tests carried out before and after the treatment were compared.

Key words: Surface waves, geotechnics, ground treatment.

1. INTRODUCCIÓN

El análisis de las ondas superficiales generadas mediante impacto o vibración forzada en la superficie de un sólido constituye una técnica de auscultación geofísica con grandes posibilidades en el campo de la Ingeniería Civil. La importancia del método radica, también, en su capacidad para obtener información sobre las propiedades elásticas del terreno bajo capas más rígidas. Frente a otros métodos sísmicos, que tienen esta capacidad tales como el «cross-hole» y «down-hole», tiene la ventaja de no necesitar la perforación de sondeos para llevar a cabo el ensayo.

La primera contribución importante al estudio de ondas superficiales en el terreno fue realizada por Lord Rayleigh (1885). Se sabía que la vibración de un medio elástico, homogéneo, isótropo e infinito se propagaba en forma de ondas esféricas con dos velocidades distintas: una velocidad de corte, tangencial o transversal, v_s o β (onda S) y una velocidad de compresión o longitudinal, v_p o α (onda P), siendo:

$$v_s = \beta = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

$$v_p = \alpha = \sqrt{\frac{2G(1-\nu)}{\rho(1-2\nu)}} \quad (1)$$

$$G = \frac{E}{2(1+2\nu)}$$

donde:

E = módulo de Young del medio elástico

ρ = densidad

ν = coeficiente de Poisson.

La existencia de las ondas superficiales fue demostrada por Lord Rayleigh, al considerar la propagación de ondas en un medio semiinfinito limitado por una superficie plana libre. Este nuevo tipo de onda, ahora conocida como onda Rayleigh, tiene una velocidad de propagación v_R ligeramente inferior a la de las ondas transversales, v_s , y como ésta última, no depende más que de las propiedades elásticas y de la densidad del material:

$$v_R = K v_s \quad (2)$$

donde K en función del coeficiente de Poisson varía desde 0.874 para $\nu = 0$ hasta 0.955 para $\nu = 0.5$.

La propagación de este tipo de ondas produce un desplazamiento horizontal y otro vertical en las partículas del terreno que describen una elipse retrógrada en la superficie y se caracteriza porque la amplitud de estos movi-

mientos decae exponencialmente con la profundidad según se muestra más adelante.

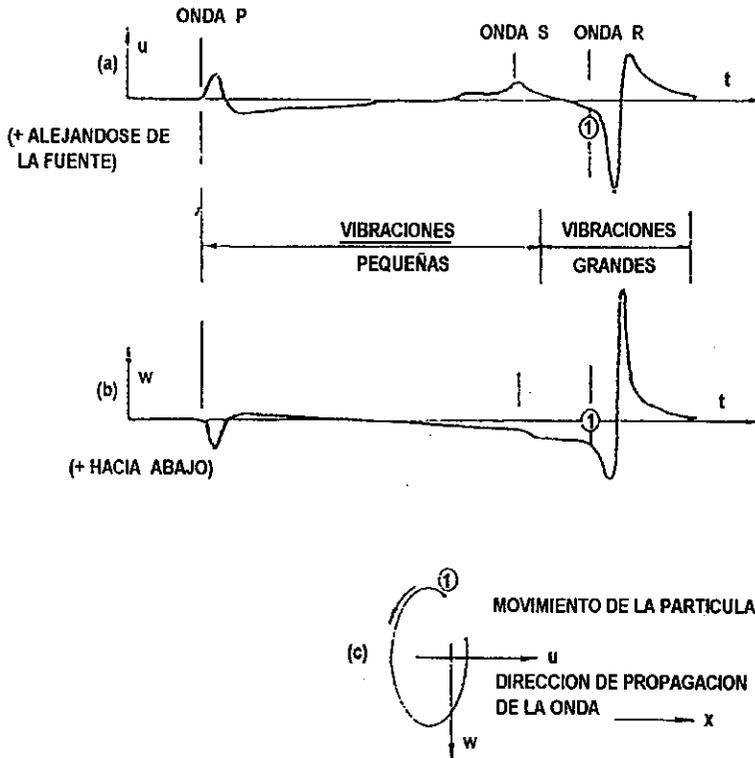
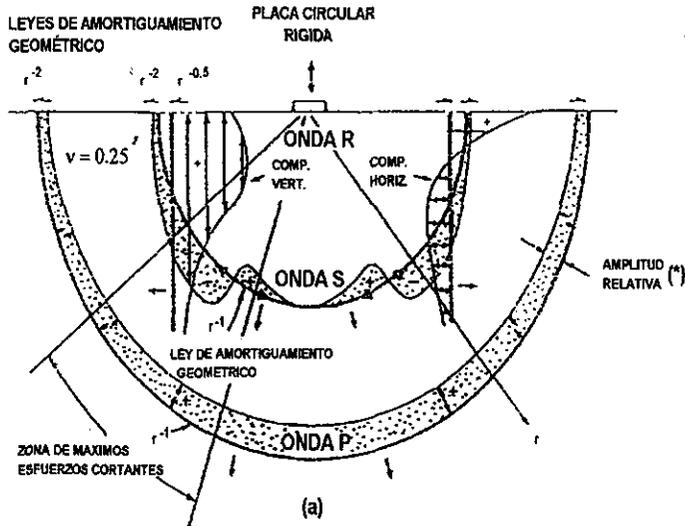


Fig. 1. Movimiento de un punto de la superficie del semiespacio debido a un impulso de corta duración producido en otro punto lejano (Lamb, 1904).

Lamb (1904) demostró que una excitación puntual de corta duración en la superficie de un semiespacio elástico produce ondas Rayleigh además de ondas longitudinales y transversales (figura 1).

Posteriormente, Miller y Pursey (1955) encontraron que la distribución de energía producida en el campo lejano por la vibración vertical de una pequeña placa circular rígida colocada en la superficie de un semiespacio elástico, homogéneo e isótropo (figura 2.a) era la mostrada en la figura 2.b, es decir:

- 67% de la energía se propaga en forma de ondas Rayleigh;
- 26% en forma de ondas S;
- 7% en forma de ondas P.



* ver Miller y Pursey, 1954;
Hirona, 1948

TIPO DE ONDA	% DEL TOTAL DE ENERGIA
R	67
S	26
P	7

(b)

Fig. 2. Distribución de los desplazamientos y de energía producidos en el campo lejano por la vibración vertical de una pequeña placa circular rígida colocada en la superficie de un semiespacio (Woods, 1968).

Así mismo, puede demostrarse que en la superficie del semiespacio, la amplitud de los tres tipos de ondas señalados originados por una carga puntual aplicada en la superficie se atenúa con la distancia a la fuente (r) según las siguientes relaciones:

- ondas internas (P y S): proporcional a r^{-2}
- ondas superficiales (R): proporcional a $r^{-1/2}$.

El hecho de que 2/3 de la energía producida por una vibración vertical de una pequeña placa circular rígida colocada en la superficie de un semiespacio, se propague en el campo lejano en forma de ondas Rayleigh y que estas ondas

superficiales se atenúan con la distancia a la fuente vibratoria mucho más lentamente que las ondas internas, indica que las ondas R son de máximo interés para el tipo de ensayo no destructivo objeto de este estudio. Además hay que señalar un aspecto práctico muy interesante de este tipo de ondas superficiales: se trata de la profundidad del bulbo de energía de las ondas R. Como ya se ha comentado anteriormente, según se muestra en la figura 3 esta profundidad es aproximadamente una longitud de onda.

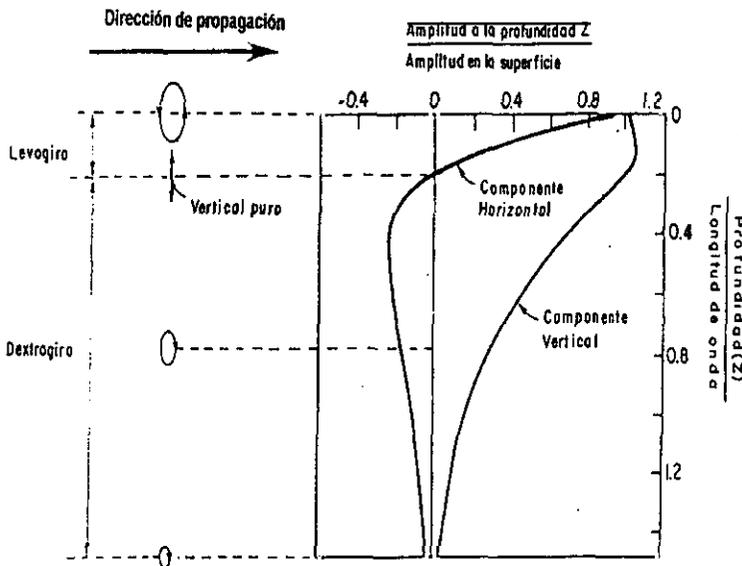


Fig. 3. Distribución de la amplitud y del movimiento de la partícula en función de la profundidad en las ondas Rayleigh para un semiespacio con un coeficiente de Poisson de 0.25 (Richart et al., 1970).

El asimilar el suelo a un semiespacio elástico es, muchas veces, una modelización sólo aproximada. En realidad, el terreno suele estar formado por capas de diversa naturaleza, por lo que una mejora en la aproximación consiste en considerarlo como un medio elástico estratificado.

El primer estudio de la propagación de ondas tipo SV-P en una capa de espesor uniforme sobre un semiespacio elástico fue realizado por Bromwich (1898) suponiendo ondas estacionarias de longitud superior al espesor de la capa. Posteriormente Love (1911) analizó el mismo caso que Bromwich, pero para ondas tipo SH. Demostró la existencia, bajo determinadas condiciones, de las ondas superficiales que llevan su nombre. Además, Love encontró que, para longitudes de onda pequeñas comparadas con el espesor de la capa, podía existir una nueva onda de «tipo Rayleigh» cuya velocidad dependía de las propiedades de ambos medios, pero no del espesor de la capa. La condi-

ción para la existencia de esta onda era que las velocidades de las ondas de corte en ambos medios fueran casi iguales. Stoneley (1924) completó la investigación de este último tipo de onda al estudiar el efecto producido por la superficie de separación entre dos medios elásticos, por lo que actualmente lleva el nombre de este mismo autor. A partir de entonces han sido numerosos los estudios realizados con el fin de demostrar la influencia que tiene la estratificación de la corteza terrestre en la propagación de terremotos, entre los que cabe destacar las contribuciones de Sezawa y Kanai entre 1927 y 1941, las de Sato principalmente entre 1949 y 1954, y las de Ewing y Press a partir de 1950. En todos estos estudios se demuestra que la propagación de las ondas superficiales en un medio estratificado da como resultado una dispersión en éstas. La velocidad de propagación de las ondas tipo Rayleigh y Love depende de la frecuencia, debido a lo cual las ondas de distinto período viajan con distinta velocidad, por lo que la señal se extiende en el tiempo al aumentar la distancia recorrida. Para una distancia dada, las ondas de distinta frecuencia llegan a distinto tiempo.

La velocidad de propagación a la que nos hemos referido es la velocidad de fase, o velocidad con que se propaga la fase de cada componente armónico de las ondas. La representación de esta velocidad (c) en función de la frecuencia (f) o de la longitud de onda (λ) es lo que se conoce como curva de dispersión. Ambas representaciones están relacionadas por la siguiente ecuación:

$$c = f \cdot \lambda \quad (3)$$

El primero en formular la propagación de ondas planas en sistemas multicapas matricialmente como manera más adecuada para su tratamiento con ordenador fue Thomson (1950). Posteriormente Haskell (1953) reformuló el procedimiento de Thomson sugiriendo un método para hallar la curva de dispersión conocido como «Método de la Matriz de Transferencia» de Haskell-Thomson. Sin embargo, tuvieron que pasar varios años para que este método fuera programado y ejecutado por ordenador (Dorman *et al.*, 1960). En esencia, el método de Haskell-Thomson requiere encontrar las raíces de una ecuación trascendente en la forma $\det[L_{21}] = 0$, donde $[L_{21}]$ es una matriz cuadrada, llena y no simétrica; en esta ecuación intervienen la velocidad c , la frecuencia f y las propiedades de los estratos del sistema multicapa. Hallar las raíces de la ecuación anterior no sólo es dificultoso sino que pueden surgir problemas numéricos y de estabilidad cuando se quiere calcular c en el rango de la alta frecuencia. Por ello, diversos autores han sugerido distintos métodos para resolver estos problemas. Sin embargo, han sido Kausel y Roesset (1981) quienes, partiendo del método de Haskell-Thomson pero reagrupando las ecuaciones de otra forma, obtienen unas «Matrices de Rigidez» que tienen las siguientes ventajas sobre las «Matrices de Transferencia»: son simétricas, requieren menos operaciones

para su análisis, con ellas el tratamiento de las cargas múltiples es más fácil, la técnica de subestructuras es rápidamente aplicable y, además, se pueden deducir expresiones asintóticas que eliminan fácilmente el problema de la alta frecuencia.

2. TÉCNICA UTILIZADA

Los primeros ensayos conocidos de auscultación vibratoria por ondas superficiales fueron realizados en carreteras y tuvieron lugar en los Estados Unidos (Bernhard, 1939 y Long *et al.*, 1945). Posteriormente, en el Road Research Laboratory de Inglaterra se efectuó el desarrollo de esta técnica que haría posible la obtención de las curvas de dispersión (Jones, 1955 y 1962). En la década de los sesenta el Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Francia inicia los estudios de esta técnica continuando, así mismo, su desarrollo (Dosso *et al.*, 1968 y Guillemín *et al.*, 1971). Es en la década siguiente cuando el Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo (antigua denominación del actual Laboratorio de Geotecnia del CEDEX) introduce esta técnica en España (Santamaría *et al.*, 1973 y 1975).

En todos estos autores más en otros muchos trabajos (Heukelom *et al.*, 1962 y Ballard *et al.*, 1973), el ensayo consistía en aplicar en la superficie del terreno y en dirección vertical vibraciones senoidales permanentes dentro de una amplia gama de frecuencias y encontrar los puntos de la superficie que están en fase con el vibrador. De esta forma, multiplicando la longitud de onda por la frecuencia se obtenía la velocidad de las ondas Rayleigh.

El ensayo tal como se hacía era fácil de entender y de realizar pero tenía un grave inconveniente: el tiempo de ejecución del ensayo era excesivo; por ello, su difusión y desarrollo fue más bien limitado. Sin embargo, en las dos últimas décadas, con el desarrollo de los equipos electrónicos digitales el ensayo ha sido significativamente mejorado. Las nuevas fuentes de vibración utilizadas han sido de tres tipos:

- impacto (Nielsen y Baird, 1975, 1977; Heisey *et al.*, 1982; Nazarian, 1984; Cúellar, 1988);
- aleatorias (Williams, 1981; Drnevich *et al.*, 1985);
- barrido lineal en frecuencias (Valerio, 1990; Valerio y Muñoz, 1991).

Estas nuevas fuentes vibratorias pueden generar simultáneamente un amplio rango de frecuencias, por lo que esto unido al análisis digital en el dominio de la frecuencia de las vibraciones registradas, ha originado un nuevo y definitivo auge de esta técnica.

La metodología utilizada en la realización de los ensayos se esquematiza en la figura 4.

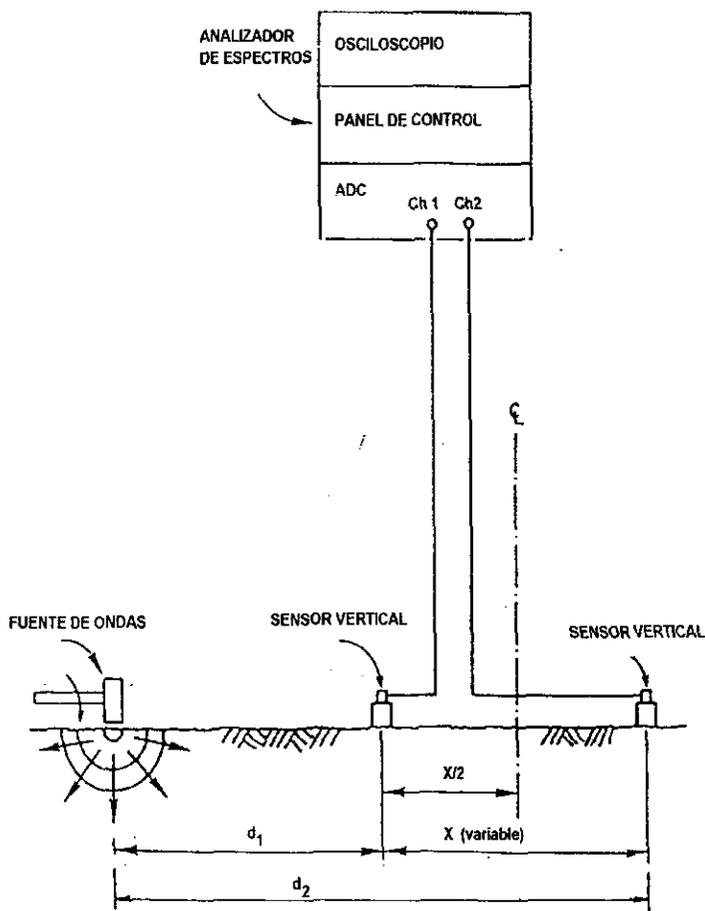


Fig. 4. Distribución de equipos para el análisis espectral de ondas superficiales.

Para conocer la velocidad de las ondas Rayleigh en la vertical de un punto determinado se colocan dos transductores de aceleración o de velocidad, uno a cada lado del punto y equidistantes del mismo. La fuente vibratoria es una carga dinámica vertical colocada en superficie de forma que la perturbación originada se propaga en forma de ondas a través del terreno. Con las señales temporales $X_1(t)$ y $X_2(t)$ captadas por los transductores, el analizador de espectros calcula en tiempo real la función de coherencia $\gamma^2(f)$ y la fase $\Delta\Phi$ de la función densidad espectral cruzada de energía $G_{X_1X_2}$ (ver figura 5), siendo almacenadas, a continuación, ambas funciones en un microordenador para su posterior análisis.

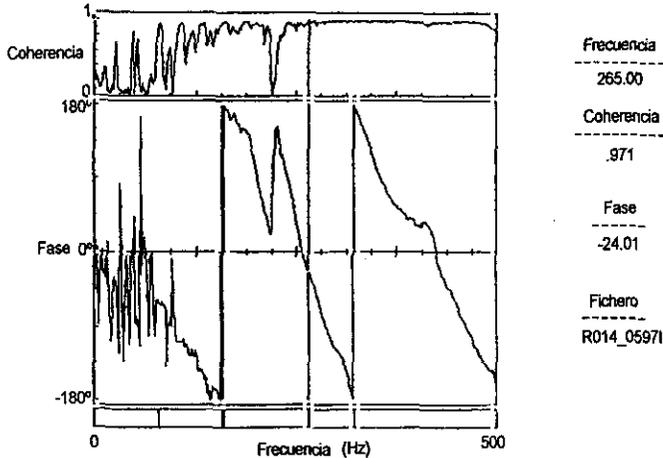


Fig. 5. Funciones de coherencia y de fase para un ensayo determinado.

Las funciones $\gamma^2(f)$ y $\Delta\Phi$ tienen las siguientes expresiones:

$$\gamma^2(f) = \frac{G_{X_1 X_2}^2}{G_{X_1} G_{X_2}}$$

$$G_{X_1 X_2} = X_1(f) \cdot X_2^*(f) \quad (4)$$

$$G_{X_1} = X_1(f) \cdot X_1^*(f)$$

$$G_{X_2} = X_2(f) \cdot X_2^*(f)$$

siendo $X_1(f)$ y $X_2(f)$ las transformadas de Fourier de $X_1(t)$ y $X_2(t)$, respectivamente. El asterisco (*) indica el complejo conjugado y G_{X_1} (o G_{X_2}) se denomina función densidad espectral de energía de $X_1(t)$ (o $X_2(t)$). Al ser $G_{X_1 X_2}$ una función compleja tendrá módulo y argumento, siendo este último el que se ha llamado $\Delta\Phi$.

El significado de la función $\Delta\Phi$ es el siguiente: a cada frecuencia f en Hz, le corresponde un valor $\Delta\Phi$ siendo el tiempo de recorrido entre ambos transductores t de una onda de frecuencia f el dado por:

$$t = \frac{\Delta\Phi}{360 f} \quad (5)$$

en donde $\Delta\Phi$ viene expresado en grados y t en segundos.

Una vez conocido t , es inmediato conocer la velocidad de fase c , ya que:

$$C = \frac{x}{t} \quad (6)$$

siendo x la distancia entre transductores (figura 4). La velocidad c calculada mediante la ecuación (6) corresponde a una longitud de onda λ de:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (7)$$

Repitiendo el proceso (5), (6) y (7) para diferentes frecuencias, se puede obtener la velocidad c en función de la frecuencia f o en función de la longitud de onda λ . Esta variación de la velocidad c con la frecuencia es lo que se conoce como «curva de dispersión».

Finalmente, es importante señalar que la función de coherencia $\gamma^2(f)$ se utiliza para seleccionar el rango de frecuencias en las que se aplica el proceso de cálculo representado por las expresiones (5) a (7). Esto se debe a que $\gamma^2(f)$ es una función, en el dominio de la frecuencia, análoga a la del cuadrado del coeficiente de correlación de forma que:

$$0 \leq \gamma^2(f) \leq 1 \quad (8)$$

En esta expresión la función de coherencia valdrá 0 cuando las señales $X_1(t)$ y $X_2(t)$ no estén relacionadas y será 1 cuando halla una dependencia lineal entre ellas. En general se exige un valor igual o mayor de 0.9, en este caso se ha utilizado 0.95.

3. EVALUACIÓN DE DISTINTOS MÉTODOS DE MEJORA DEL TERRENO

3.1. Inyecciones

En el año 1991 se llevaron a cabo unos ensayos de ondas superficiales en el patio de la Sultana del Generalife. Su objetivo fue valorar cualitativamente la efectividad de las inyecciones de cemento realizadas para consolidar el relleno del trasdós del muro de 5 m de altura existente en dicho patio.

El tratamiento del terreno (ver figura 6) se realizó en dos fases utilizando la técnica de los «tubos manguitos» controlando en todo momento la presión y caudal en cada tramo inyectado para no afectar la estabilidad del muro.

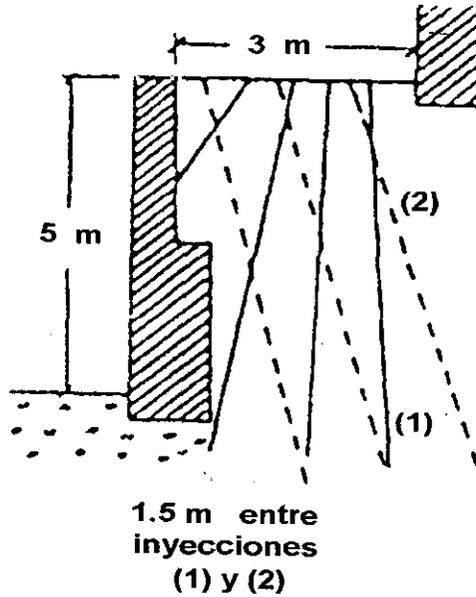


Fig. 6. Disposición de los tubos en las dos fases de la inyección (1) y (2).

En la figura 7 se indica la situación de los 10 ensayos OS-1 a OS-10 realizados antes y después del tratamiento, junto con los puntos donde se perforaron sondeos antes y después del tratamiento para comprobar la eficacia de las inyecciones.

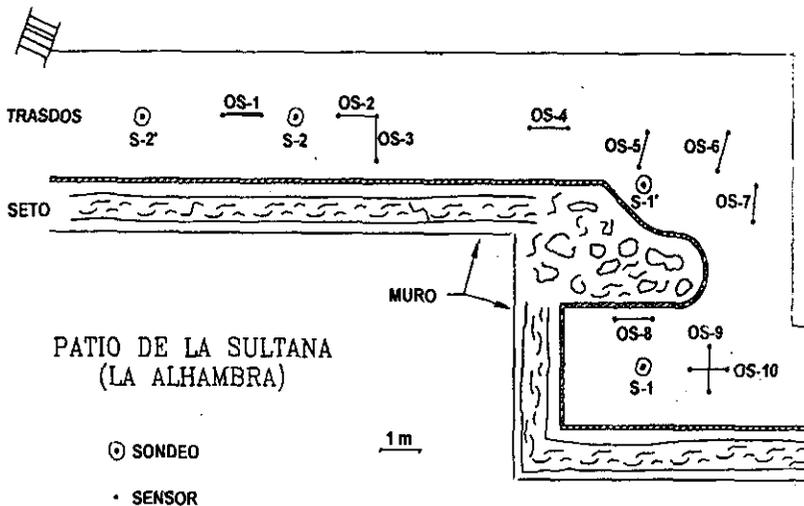


Fig. 7. Situación de los ensayos de ondas superficiales y de los sondeos utilizados en la testificación.

En todos los ensayos la separación de los sensores fue de 1 m, exceptuando el OS-2 que fue de 1.5 m. Como fuente de ondas se utilizó un vibrador electrodinámico 812 E/50LP. Como sensores se utilizaron acelerómetros piezoeléctricos PU-H y PU-L dependiendo del rango de frecuencias que se quería registrar.

Con el objeto de comprobar la validez del tratamiento se compararon las curvas de dispersión experimentales antes y después del tratamiento. En las figuras 8 y 9 se representan las correspondientes a los extendimientos OS-1 y OS-10, respectivamente. En el extendimiento OS-1 puede observarse como la curva de dispersión obtenida tras el tratamiento indica un valor más alto de velocidad de fase, que la obtenida antes, que correspondería a un aumento notable en la velocidad de las ondas tangenciales en el terreno. Sin embargo, en el extendimiento OS-10 situado fuera del alcance del tratamiento (paralelo al muro) se observa que las curvas de dispersión antes y después son bastante parecidas, indicando que no hay mejora apreciable en ese punto del terreno. En los extendimientos OS-2 a OS-8 se pudieron observar comportamientos similares al OS-1 en las curvas de dispersión (Muñoz, 1994), indicando un apreciable aumento en las velocidades de fase después del tratamiento. En el extendimiento OS-9, al igual que en el OS-10, no se apreció variación en las curvas de dispersión antes y después del tratamiento.

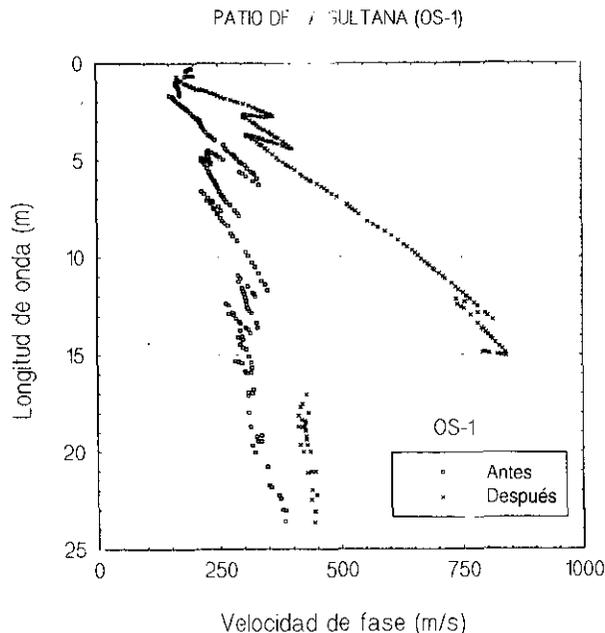


Fig. 8. Curvas de dispersión experimentales antes y después del tratamiento para el extendimiento OS-1 del patio de la Sultana.

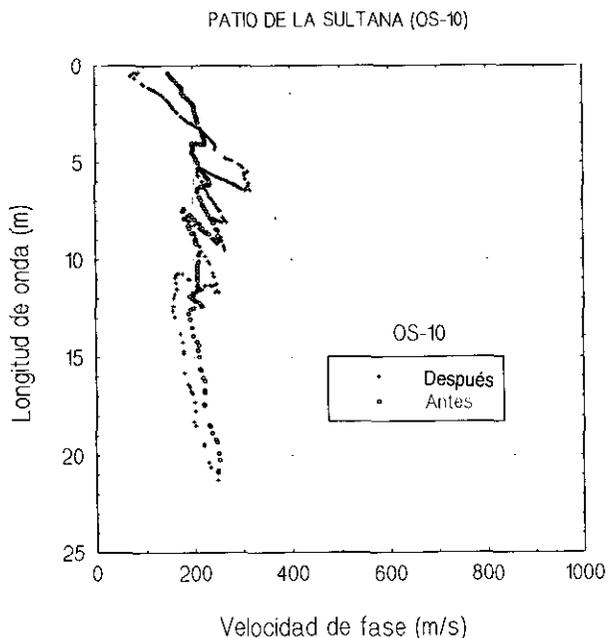


Fig. 9. Curvas de dispersión experimentales antes y después del tratamiento para el extensómetro OS-10 del patio de la Sultana.

El aumento espectacular de los valores de la velocidad de fase detectados después del tratamiento ha sido corroborado por la testificación geofísica de los sondeos, que con el fin de investigar la naturaleza del terreno se perforaron antes y después del tratamiento. En la tabla 1 se presentan los valores medios en c.p.s. obtenidos en los registros realizados.

TABLA 1
VALORES MEDIOS EN c.p.s. OBTENIDOS EN LOS SONDEOS DEL PATIO DE LA SULTANA

SONDEO	PROFUNDIDAD MEDIA DE REGISTROS (m)	GAMMA GAMMA (c.p.s.)	NEUTRÓN NEUTRÓN (c.p.s.)	GAMMA NATURAL (c.p.s.)
S-1 a	5,6	32830	170	16
S-1 d	6,5	30280	960	18
S-1' a	5,4	32170	230	21
S-1' d	6,6	32260	890	21
S-2 a	5,5	34730	150	20
S-2 d	6,5	32450	920	20
S-2' a	5,7	37050	345	18
S-2' d	6,5	36050	1020	24

Los registros gamma-gamma arrojan en general valores medios después del tratamiento inferiores a los existentes antes del mismo indicando un ligero aumento de densidad en al menos tres de los cuatro puntos ensayados (en el sondeo S-1 se mantiene prácticamente constante el valor medio de c.p.s. obtenidas antes y después del tratamiento). Donde claramente se observa la efectividad del tratamiento ha sido en los registros neutrón-neutrón en los que se advierte un aumento importante de las c.p.s. (disminución de porosidad) después de la inyección indicativa de la sustitución de agua por cemento en el espacio intersticial del relleno (ver figura 10 correspondiente al sondeo S-1).

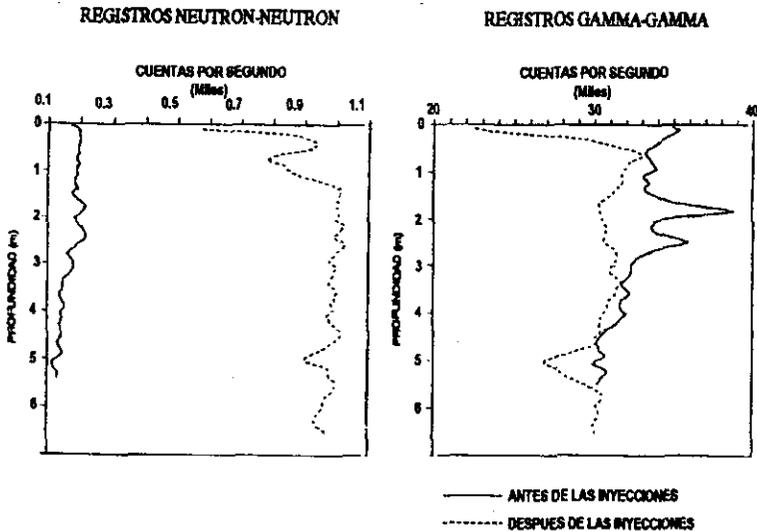


Fig. 10. Resultado de la testificación con sondas radiactivas del sondeo S-1 perforado en el patio de la Sultana del Generalife.

3.2. Compactación dinámica

El objetivo de la compactación dinámica de suelos es mejorar la capacidad portante de terrenos, que en principio poseen propiedades geotécnicas deficientes, mediante la aplicación de esfuerzos dinámicos intensos producidos por la caída de una masa desde cierta altura.

Para poder evaluar el grado de mejora alcanzado por el terreno después de haber sido sometido a un tratamiento de compactación dinámica se eligió el emplazamiento de la estación depuradora de aguas residuales de La Lagosta cerca de Barcelona. Dicho lugar estaba constituido por un suelo arenoso arcilloso blando o muy suelto con presencia abundante de materiales procedentes de vertidos: escombros, ladrillos, maderas, vidrios, etc. En un informe previo a la realización de los ensayos con ondas superficiales, se describe dicho terreno

como un relleno superficial de materiales heterogéneos de consistencia o capacidad muy baja y se le asignan los siguientes parámetros geotécnicos:

- Índice SPT: $N \approx 8-10$.
- Módulo secante de Young: $E \approx 50 \text{ kg/cm}^3$.

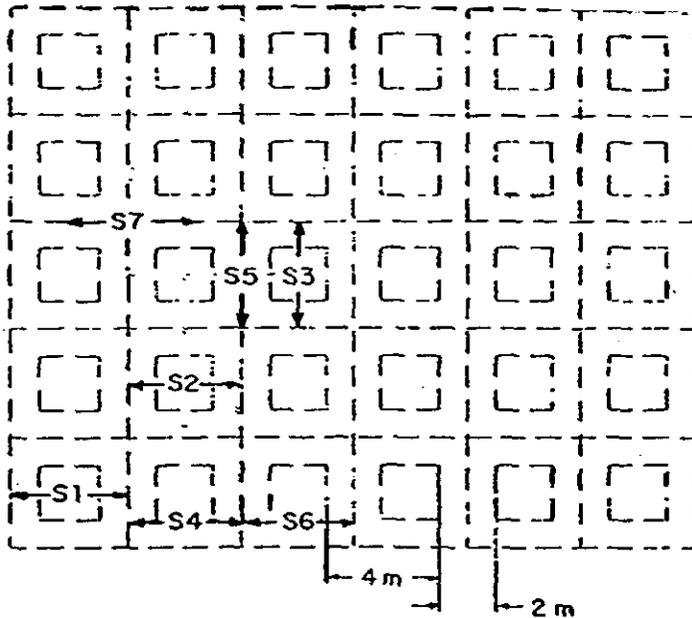


Fig. 11. Situación de los 7 puntos investigados en la malla 14.

Con vistas al tratamiento del terreno se dividió su superficie en una serie de mallas estando constituida cada una de ellas por un cuadrado de 4 m de lado, tal y como se indica en la figura 11 para la malla n.º 14. Aunque se realizaron ensayos en varias mallas (ver tabla 2), sólo se pudieron efectuar ensayos

TABLA 2
RELACIÓN DE ENSAYOS REALIZADOS EN LA LLAGOSTA

PERÍODO	ZONA ENSAYADA	PUNTOS	FECHA
Antes del tratamiento	MALLA 14	S1 S2 S3 S4 S5 S6 S7	10-11-12 Diciembre 1992
Después 1.º tratamiento	MALLA 14	S1 S2 S3 S4 S5 S6 S7	26-27 Enero 1993
Después 2.º tratamiento	MALLA 14 MALLA 3 MALLA 5 MALLA 18 MALLA 21	S1 S2 S3 S4 S5 S6 S7 C-3 C-5 C-18 C-21	4-5-6 Febrero 1993

en la n.º 14 en los tres momentos deseados (figura 11): antes del tratamiento, después de la 1.ª fase y a continuación de la 2.ª fase. En la primera fase se procedió a la aplicación repetida de impactos de gran energía en los vértices de los cuadrados que constituían cada malla dejando caer una masa de 15 T desde una altura de 12 m. En la segunda fase se golpeó en el interior de cada cuadrado sobre los cuatro puntos que definen un cuadrado semejante con los mismos ejes de simetría que el exterior pero con sólo 2 m de lado. Para ello se dejó caer la misma masa utilizada en la primera fase un número menor de veces desde menor altura. En la tabla 3 se especifican los parámetros que definen el tratamiento realizado en la malla 14. Por ello, sólo se comentarán los resultados obtenidos en esta última malla.

TABLA 3
PARÁMETROS DE LA COMPACTACIÓN DINÁMICA UTILIZADOS EN LA
MALLA INVESTIGADA POR ONDAS SUPERFICIALES

	PESO DE CAÍDA (T)	ALTURA DE CAÍDA (m)	N.º de GOLPES
1.ª FASE	15	12	14
2.ª FASE	15	7	10

En los puntos de dicha malla identificados como S-1 a S-7 en la figura 11, se llevaron a cabo ensayos de ondas superficiales con barrido lineal de frecuencias. Los ensayos en cada punto se realizaron separando entre sí los sensores: 0.5, 1, 2, 4 y 6 m. Para las pruebas efectuadas a 0.5 y 1 m de distancia se han utilizado 2 acelerómetros PU-H ($S_V = 1$ V/g) y para las pruebas llevadas a cabo a 2, 4 y 6 m de distancia se han empleado 2 acelerómetros PU-L ($S_V = 10$ V/g). La fuente de ondas fue el vibrador electrodinámico modelo 812 E/50LP.

Las curvas de dispersión obtenidas antes del tratamiento muestran dos zonas de diferente rigidez (figura 12): una más rígida corresponde a S-1, S-2, S-4 y S-6 (próxima a los 200 m/s) y otra menos rígida formada por los puntos S-3, S-5 y S-7 (agrupada entorno a una velocidad de fase de 160 m/s). Después del tratamiento los resultados en la primera zona fueron similares a los obtenidos antes del mismo, mientras que en la zona menos rígida la mejora fue significativa.

Como ejemplo ilustrativo de las posibilidades del análisis de ondas superficiales para cuantificar la mejora lograda en cada una de las fases del tratamiento, en la figura 13 se representan las curvas de dispersión obtenidas en el punto S-7 antes del tratamiento y después de la 1.ª y 2.ª fase de la compactación dinámica.

Para obtener las propiedades del terreno a partir de las curvas de dispersión experimentales se supone un perfil del suelo, que mediante un estudio analítico se utiliza para calcular la curva de dispersión teórica de dicho perfil. Entonces se compara la curva teórica con la experimental, introduciendo las modifi-

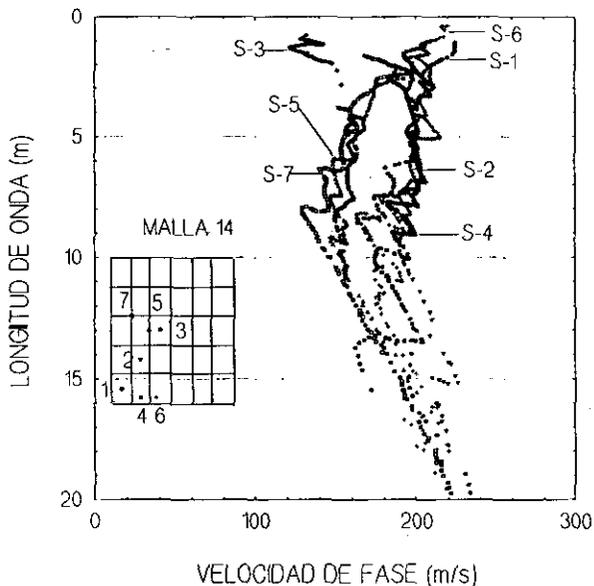


Fig. 12. Curvas de dispersión obtenidas experimentalmente en los siete puntos estudiados en el emplazamiento de La Llagosta y su localización dentro de la malla 14 (dos lados de los cuadrados que forman la malla miden 4 m).

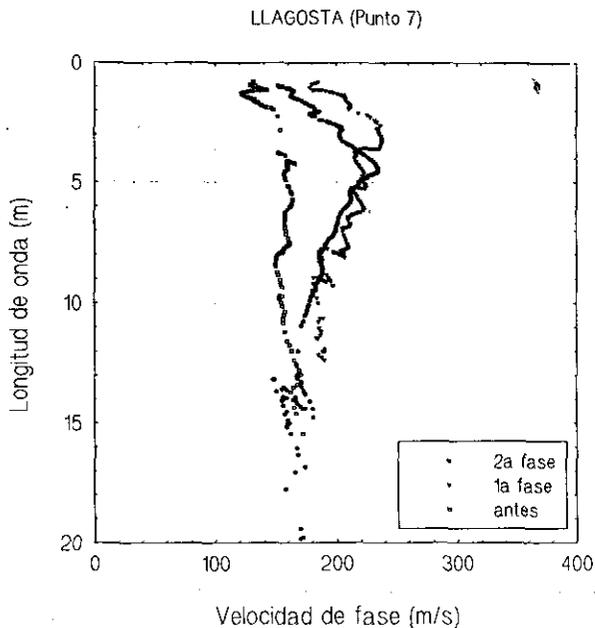


Fig. 13. Curvas de dispersión *in situ* obtenidas en el punto S-7 de la malla 14 en La Llagosta.

caciones necesarias en el perfil cambiando las propiedades y espesores de las capas se repite el proceso iterativamente hasta que ambas curvas alcanzan un parecido deseado.

Como describen Roesset et al (1991) hay dos alternativas para determinar la curva de dispersión teórica para un perfil de un terreno: resolviendo en 2D, a partir de la matriz de rigidez, la ecuación característica para el modo fundamental del sistema multicapa considerando ondas planas de tipo Rayleigh, o bien utilizando en 3D las funciones de Green. En el caso de la solución en 2D resuelve la ecuación característica suponiendo siempre el semiespacio a una profundidad de dos veces la longitud de onda. Por ello, para una longitud de onda determinada si el doble de dicho valor está dentro del espesor de una capa determinada, toma un semiespacio con los valores de los distintos parámetros que definen la capa y no tiene en cuenta el resto de capas que haya por debajo de ella (figura 14). La segunda alternativa se basa en una solución tridimensional con simetría axial y calcula los desplazamientos producidos por una carga dinámica actuando sobre la superficie de un semiespacio estratificado utilizando las funciones de Green deducidas por Kausel (1981). La primera aproximación es más sencilla y rápida mientras que la segunda es más aproximada y reproduce mejor las condiciones del terreno.

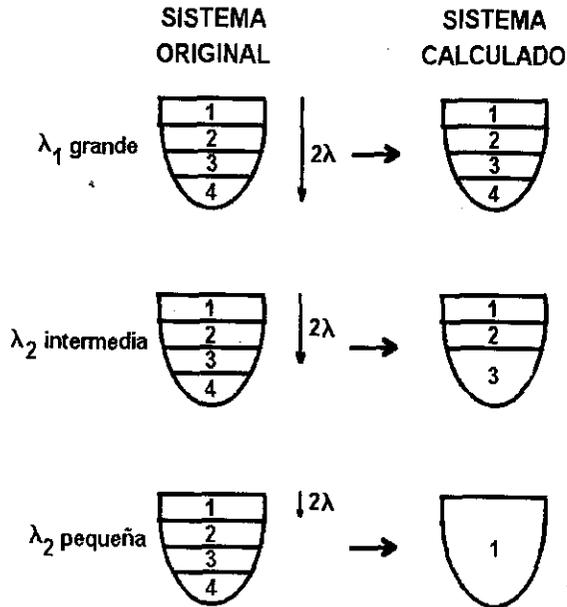


Fig. 14. Método de cálculo de la curva de dispersión mediante el programa SASW 2D.

En este caso se ha utilizado el programa SASW 3D elaborado por Roesset (1993) en la Universidad de Texas utilizando la solución tridimensional. En las figuras 15, 16 y 17 se han representado junto a las curvas experimentales las

curvas teóricas correspondientes a las distribuciones de espesores y capas reflejadas en la tabla 4.

TABLA 4
DISTRIBUCIÓN TEÓRICA DE ESPESORES Y VELOCIDADES TANGENCIALES
EN EL PUNTO S-7 TRATADO MEDIANTE COMPACTACIÓN DINÁMICA

ENSAYO	ANTES		DESPUÉS 1.ª FASE		DESPUÉS 2.ª FASE	
	CAPA (m)	Vs (m/s)	CAPA (m)	Vs (m/s)	CAPA (m)	VS (m/s)
7	0,95	140	0,70	195	0,90	165
	1,55	195	1,70	290	2,30	270
	1,25	205	-	-	-	-
	1,00	100	1,60	170	1,80	180
	1,25	215	-	-	-	-
	1,25	175	2,50	185	3,00	160
	-	220	-	220	-	220

Si se calcula la velocidad tangencial media, $(v_s)_m$, hasta una profundidad de 6 metros, que era la zona que se quería mejorar, se obtienen los siguientes valores: 177 m/s (antes del tratamiento, 212 m/s (después de la 1.ª fase) y 210 m/s (después de la 2.ª fase). Es decir, hay una mejora del 18.6% en la velocidad tangencial media, o lo que es lo mismo, un aumento del orden del 40% en el módulo de elasticidad medio del terreno.

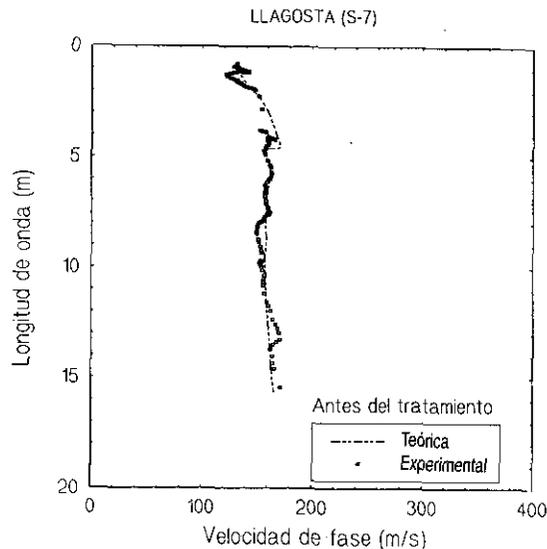


Fig. 15. Curvas de dispersión experimental y teórica en el punto S-7 de la malla 14 en La Llagosta antes del tratamiento.

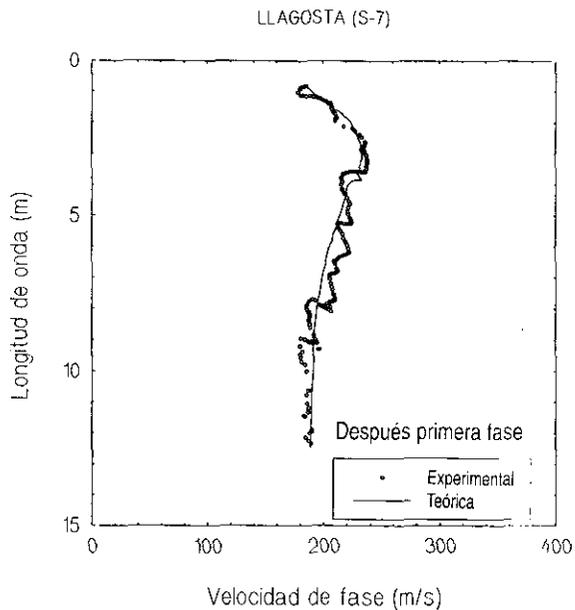


Fig. 16. Curvas de dispersión experimental y teórica en el punto S-7 de la malla 14 en La Llagosta después de la 1.ª fase del tratamiento.

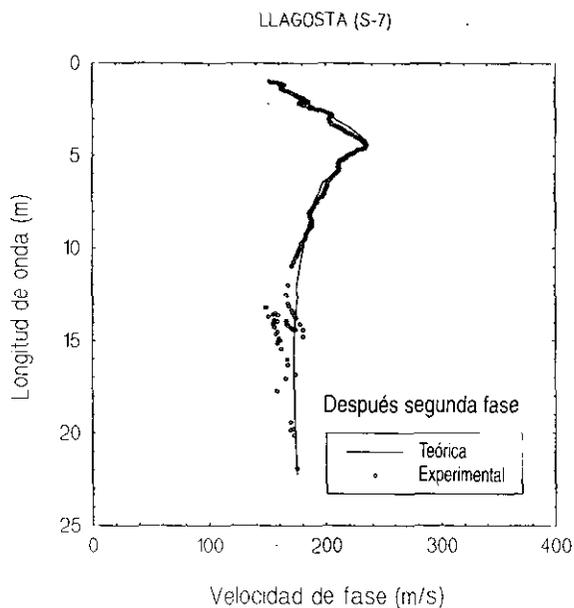


Fig. 17. Curvas de dispersión experimental y teórica en el punto S-7 de la malla 14 en La Llagosta después de la 2.ª fase del tratamiento.

4. CONCLUSIONES

Del estudio de los resultados obtenidos en los dos emplazamientos anteriormente mencionados mediante la técnica del análisis de ondas superficiales se puede deducir que:

- En tratamientos de rellenos con inyección de cemento se producen aumentos en las velocidades de fase considerables, indicando una mejoría en el estado del terreno.
- La técnica del análisis de ondas superficiales se presenta como un método válido para zonificar vertederos de residuos urbanos incontrolados.
- En el estudio de eficacia de los diferentes tratamientos del terreno esta técnica ha permitido comprobar que la compactación dinámica con energías entre 100 y 150 mT mejora los 5-6 primeros metros del terreno.

Finalmente, señalar que estos resultados confirman la utilidad de esta técnica para conseguir el perfil de velocidades tangenciales de un sistema multicapa con simetría axial y su uso para zonificar suelos.

REFERENCIAS

- BALLARD, R. F., y CHANG, F. K. (1973): «Rapid subsurface exploration; review of selected geophysical techniques». *Miscellaneous Paper* n.º 69-30, N.S. Army Engineer W.E.S., Vicksburg, MS.
- BERNHARD, R. K. (1939): «Highway investigation by means of induced vibrations». *Engr. Exp. Station Series*, Penn. State Coll. V. 33, Bull. n.º 49.
- CUÉLLAR, V. (1988): «Análisis espectral de ondas superficiales». Laboratorio de Geotecnia, CEDEX, MOPU.
- DORMAN, J.; EWING, M., y OLIVER, J. (1960): «Study of shear-velocity distribution in the upper mantle Rayleigh waves». *B.S.S.A.*, Vol. 50, 1, pp. 87-115.
- DOSSO, N., y KERYELL, P. (1968): «Utilisation du vibreur Goodman comme complément des autres moyens d'auscultation des chaussées». *Bulletin de Liaison des Laboratoires Routiers*, Special J., pp. 130-144.
- DRNEVICH, V. P.; KIM, S. I.; ALEXANDER, R., y KOKN, S. D. (1985): «Spectral analysis of surface waves in pavement systems with random noise excitation». Artículo presentado en la 55 Reunión Internacional Anual de la SEG en Washington, D.C.
- GUILLEMIN, R., y GRAMSAMMER, J. C. (1971): «Auscultation dynamique des chaussées á l'aide du vibreur léger». Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Note d'information technique.
- HASKELL, N. A. (1953): «The dispersion of surface waves on multilayered media». *B.S.S.A.*, Vol. 43, 1, pp. 17-34.
- HEISEY, J. S.; STOKOE, K. H.; HUDSON, W. R., y MEYER, A. H. (1982): «Determination of in situ shear wave velocities from spectral analysis of surface waves». Research Report 256-2, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin.
- HEUKELOM, W., y KLOMP, A. J. P. (1962): «Dynamic testing as a means of controlling pavements during and after construction.» *Proceedings, International Conference on Structural Design of Asphalt Pavement* Ann Arbor, MI, pp. 495-510.
- JONES, R. (1955): «A vibration method for measuring the thickness of concrete road slabs in situ». *Magazine of Concrete Research*, Vol. 7, n.º 20.

- JONES, R. (1962): «Surface wave technique for measuring the elastic properties and thicknesses of roads: theoretical development». *British Journal of Applied Physics*, Vol. 13, pp. 21-29.
- KAUSEL, E. (1981): «An Explicit Solution for the Green Functions for Dynamic Loads in Layered Media». Research Report S81-13. Department of Civil Engineering, M.I.T.
- KAUSEL, E., y ROESSET, J. M. (1981): «Stiffness matrices for layered soils». *BSSA*, Vol. 54, n.º 1, pp. 1743-1761.
- LAMB, H. (1904): «On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid». *Philos. Trans. Soc. London. Ser. A*, 203, pp. 1-42.
- LONG, B. G.; KURTZ, H. J., y SAN DENAW, T. A. (1945): «An instrument and a technique for field determination of the modulus of elasticity and flexural strength of concrete (pavements)». *J. Amer. Concr. Inst.*, V. 16, (3) pp. 217-231.
- MILLER, G. F., y PURSEY, H. (1955): «On the partition of energy between elastic waves in a semi-infinite solid». *Proc. Roy. Soc.*, 233, pp. 55-69.
- MUÑOZ, F. (1994): «Investigación de sistemas multicapas en obras civiles mediante el análisis de ondas superficiales». Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid.
- NAZARIAN, S. (1984): «In situ determination of elastic moduli of soil deposits and pavements systems by spectral analysis of surface waves method». Ph. D. Thesis, Civil Engineering Department, Univ. of Texas at Austin.
- NIELSEN, J. P., y BAIRD, G. T. (1977): «Evaluation of an Impulse Testing Technique for Non destructive Testing of Pavements». Research Report CEEDO-TR-77-46, Tyndall AFB, Panama City, F.L.
- RAYLEIGH, L. (1885): «On waves propagated along the plane surface of an elastic solid». *Proc. London Mth. Soc.* 17, pp. 4-19.
- ROESSET, J. M.; CHANG, D. W., y STOKOE, K. H. (1991): «Comparison of 2D and 3D Models for Analysis of Surface Waves Tests». *Proc. 5th. International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Karlsruhe.
- ROESSET, J. M. (1993): «Programa SASW para la obtención de curvas de dispersión». Comunicación personal.
- SANTAMARÍA, L., y HERNÁNDEZ-TORRES, M. (1973): «Auscultación vibratoria de firmes de carretera. Método de ondas superficiales». Publicación n.º 28, CEDEX, Madrid.
- SANTAMARÍA, L., y HERNÁNDEZ-TORRES, M. (1975): «Auscultación vibratoria de un tramo de la CN-VI. Evaluación de los resultados mediante ensayos de laboratorio.» *Boletín LT* n.º 109, pp. 39-57.
- THOMSON, W. T. (1950): «Transmission of Elastic Waves Through a Stratified Solid Medium». *Journal of Applied Physics*, vol. 21, pp. 89-93.
- VALERIO, J. (1990): «Estudio de sistemas multicapa mediante la propagación de ondas superficiales (2.ª Fase)». Laboratorio de Geotecnia, CEDEX, MOPU.
- VALERIO, J., y MUÑOZ, F. (1991): «Análisis espectral de ondas superficiales». *Prospección geofísica aplicada a la Ingeniería geológica*. Vol. I. Monografía n.º 7. Serie: *Temas en Ingeniería geológica*, U.C.M.
- WILLIAMS, O. (1981): «Rayleigh wave velocity measurements using broad band frequency sources». U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Missouri.