

Caracterización dinámica de las capas de la pista de ensayos del Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX mediante el análisis espectral de ondas superficiales

Dynamic characterization of the layers of a test track in the CEDEX Road Research Centre using the Spectral Analysis Surface Wave method

VICENTE CUELLAR (*)
JULIAN VALERIO (*)
FERNANDO MUÑOZ (**)

RESUMEN. El Análisis Espectral de las Ondas Superficiales es un método no destructivo que puede ser utilizado para determinar la velocidad de propagación de las ondas tangenciales V_s en sistemas multicapas tales como suelos y pavimentos. Este trabajo contiene una descripción de esta técnica así como su aplicación a un caso concreto: la Pista de Ensayos a escala real que el Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX tiene en sus instalaciones de El Goloso (Madrid)

ABSTRACT. The Spectral Analysis of Surface Waves is a non-destructive method for determining the velocity of propagation V_s of the shear waves in multilayer systems such as soils and pavements. This paper describes this technique and its application in a specific case: the full-scale test track which the CEDEX Road Research Centre has installed in its facilities at El Goloso in Madrid.

1. INTRODUCCION

Los primeros ensayos conocidos de auscultación vibratoria por ondas superficiales fueron realizados en carreteras y tuvieron lugar en los Estados Unidos (R. K. Bernhard, 1939, y B. G. 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 (R. Jones, 1955 y 1962). En la década de los sesenta el Laboratorio Central des Ponts et Chaussées de Francia inicia

los estudios de esta técnica continuando, asimismo, su desarrollo (N. Dosso et al., 1968, y R. Guillemin 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 (L. Santamaría et al., 1973 y 1975).

En todos estos autores más en otros muchos trabajos (W. Heukelom et al., 1962, y R. F. Ballard et al., 1973), el ensayo consistía en aplicar en la

1. INTRODUCTION

The first tests known to have been carried out using surface waves for vibratory auscultation purposes were done on roads in the United States (R. K. Bernhard, 1939, and B. G. Long et al., 1945). Subsequently the Road Research Laboratory in the UK developed this technique which made it possible to obtain the dispersion curves (R. Jones, 1955 and 1962). In the sixties the Laboratoire Central des Ponts et Chaussées in France began to carry out studies with this technique and continued to

work on its development (N. Dosso et al., 1968, and R. Guillemin et al., 1971). In the following decade what was then called the Transport and Soil Mechanics Laboratory (the old name for the Geotechnics Laboratory belonging to CEDEX) introduced this technique into Spain (L. Santamaría et al., 1973 and 1975).

All these authors as well as many others (W. Heukelom et al., 1962, and R. F. Ballard et al., 1973) performed the tests applying permanent sinusoidal vibrations vertically to the

(*) Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Laboratorio de Geotecnia del CEDEX (MOPT).

(**) Licenciado en Ciencias Físicas. Laboratorio de Geotecnia del CEDEX (MOPT).

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 (J. P. Nielsen, 1977; J. S. Heisey et al., 1982; V. Cuéllar, 1988; K. H. Stokoe II et al., 1990, y B. R. Bowen et al., 1992), aleatorias (O. Williams, 1981, y V. P. Drnevich et al., 1985) y barrido lineal en frecuencias (J. Valerio, 1990). Estas nuevas fuentes vibratorias pueden generar simultáneamente un amplio rango de frecuencia, por lo que ésta, unido al análisis digital en el dominio de la frecuencia de las vibraciones registradas, ha originado un nuevo y definitivo auge de esta técnica.

Este trabajo ha utilizado el barrido lineal en frecuencias como fuente de excitación para, aplicando la técnica del Análisis Espectral de las Ondas Superficiales, poder determinar la velocidad de las ondas transversales V_s de las diferentes capas de una de las secciones de la Pista de Ensayos a escala real que el Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX tiene en sus instalaciones de El Goloso (Madrid).

2. DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA DEL ANÁLISIS ESPECTRAL DE ONDAS SUPERFICIALES (AEOS)

2.1. FUNDAMENTO TEÓRICO

La primera contribución importante al estudio de la propagación de ondas en el terreno fue publicado por L. Rayleigh en 1885.

Dentro del marco de la teoría elástica, L. Rayleigh demostró que podía existir, además de las ondas P y S, un tercer tipo de onda en la superficie libre de un sólido. Este nuevo tipo de onda, ahora conocido 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:

$$V_r = K V_s \quad [1]$$

donde K es una función que sólo depende del coeficiente de Poisson ν y varía desde 0,874 para $\nu = 0,0$ a 0,955 para $\nu = 0,5$.

En 1904, H. Lamb demostró que una excitación puntual de corta duración en la superficie de un semiespacio elástico produce ondas Rayleigh además de ondas longitudinales y transversales. Posteriormente, G. F. Miller et al. (1955) encontraron que la distribución de la energía producida por la vibración vertical de una pequeña placa circular rígida colocada en la superficie de un semiespacio elástico, homogéneo e isótropo (Fig. 1a) era la mostrada en la figura 1b, es decir:

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

Asimismo, la figura 1a muestra que, en la superficie del semiespacio, la amplitud

del terreno dentro de un amplio rango de frecuencias y encontrando puntos en la superficie que estaban en fase con el vibrador. En esta manera, la velocidad de las ondas Rayleigh se obtenía multiplicando la longitud de onda por la frecuencia.

El test tal como se realizó entonces era fácil de entender y de llevar a cabo pero sufría de un serio inconveniente: el tiempo requerido para ejecutar el test era demasiado largo lo que limitaba su uso y desarrollo. En los últimos dos decenios, sin embargo, con el desarrollo de equipos electrónicos digitales, el test ha sido significativamente mejorado. Las nuevas fuentes de vibración han sido de tres tipos: impacto (J. P. Nielsen, 1977; J. S. Heisey et al., 1982; V. Cuéllar, 1988; K. H. Stokoe II et al., 1990, and B. R. Bowen et al., 1992); random (O. Williams, 1981, and V. P. Drnevich et al., 1985) and linear sweep in frequencies (J. Valerio, 1990). These new vibration sources can simultaneously generate a broad range of frequencies which, in conjunction with the digital analysis in the frequency domain of the vibrations recorded, has fostered a new and definite boost for this technique.

In this work the linear sweep in frequencies has been used as the source of excitation in order to determine, by applying the Spectral Analysis of Surface Waves technique, the shear wave velocity V_s of the different layers at one of the sections of the full-scale test track belonging to the CEDEX Road Research Centre in its facilities at El Goloso in Madrid.

2. DESCRIPTION OF THE SPECTRAL ANALYSIS SURFACE WAVE TECHNIQUE (SASW)

2.1. THEORETICAL BASIS

The first significant contribution to the study of the propagation

of waves in the ground was published by L. Rayleigh in 1885.

Within the framework of the elastic theory, L. Rayleigh demonstrated that, in addition to P and S waves, a third type of wave could exist in the free surface of a solid mass. This new type of wave, now known as Rayleigh wave, has a propagation velocity V_r which is slightly lower than that of the transverse wave V_s and, like this latter, only depends on the elastic properties and the density of the material involved, hence:

$$V_r = K V_s \quad [1]$$

where K is a function that only depends on the Poisson coefficient ν and varies from 0.874 for $\nu = 0.0$ to 0.955 for $\nu = 0.5$.

In 1904 H. Lamb demonstrated that an impulse applied to a specific point on the surface of an elastic half-space produces Rayleigh waves in addition to longitudinal and transverse waves. Subsequently G. F. Miller et al. (1955) discovered that the distribution of the energy produced by the vertical vibration of a small, rigid, circular plate placed on the surface of an elastic, uniform and isotropic half-space (Fig. 1a) was the one shown in figure 1b, in other words:

- 67 % of the energy is propagated in the form of R waves.
- 26 % in the form of S waves.
- 7 % in the form of P waves.

The figure also shows how the amplitude of the three types of waves on the surface of the semi-space diminished the further away they are from the source (r), as per the following ratios:

- P and S waves: proportional to $r \exp(-2/r)$.
- R wave: proportional to $r \exp(-1/2r)$.

The fact that two thirds of the energy produced by the vertical vibration of a small, rigid circular plate on the surface of a

de los tres tipos de ondas señalados se atenúan con la distancia a la fuente (r) según las siguientes relaciones:

- Ondas P y S: proporcional a $r \exp(-2)$.
- Ondas R: proporcional a $r \exp(-1/2)$.

El hecho de que 2/3 de la energía producida por la vibración vertical de una pequeña placa circular rígida colocada en la superficie de un semiespacio se propague en forma de ondas R y que estas ondas superficiales se atenúan con la distancia a la fuente vibratoria mucho más lentamente que las ondas P y S, indica que las ondas R son las de máximo interés para el tipo de ensayo no destructivo AEOS.

Finalmente, 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. Según se muestra en la figura 2 (F. E. Richart et al., 1970), esta profundidad es aproximadamente de una longitud de onda.

2.2. METODOLOGIA UTILIZADA

La metodología utilizada en la realización de los ensayos se esquematiza en la figura 3.

Para conocer la velocidad de las ondas R en la vertical de un punto determinado P se colocan dos transductores de aceleración o de velocidad -A y B- uno a cada lado de P y equidistantes del mismo. La fuente vibratoria es una carga dinámica vertical colocada en superficie de forma que la perturbación originada en C se propaga en forma de ondas a través del terreno. Con las señales temporales A(t) y B(t) captadas por los transductores situados en A y B, el Analizador de Espectros SD-380 calcula en tiempo real la función de coherencia $\gamma^2(f)$ y la fase $\theta_{AB}(f)$ de la función densidad espectral cruzada de energía $G_{AB}(f)$ (ver

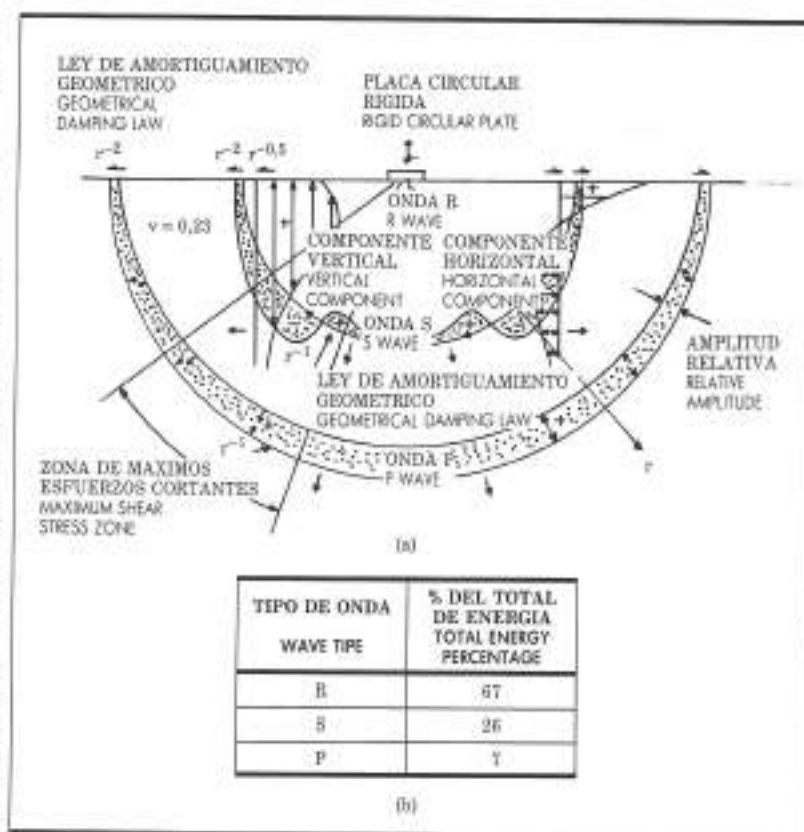


FIGURA 1. Distribución de los desplazamientos y de energía producidos por la vibración vertical de una pequeña placa circular rígida colocada en la superficie del semiespacio (Woods, 1968).

FIGURE 1. Distribution of the displacements and energy produced by the vertical vibration of a small, rigid, circular plate applied to the surface of a half-space (Woods, 1968).

Fig. 4), siendo almacenadas, a continuación, ambas funciones en el microordenador HP216 para su posterior análisis.

Las funciones $\gamma^2(f)$ y $\theta_{AB}(f)$ tienen las siguientes expresiones:

$$\gamma^2(f) = \frac{|G_{AB}(f)|^2}{G_A(f) G_B(f)} \quad [2]$$

$$G_{AB}(f) = A(f) B^*(f) \quad [3]$$

$$G_A(f) = A(f) A^*(f) \quad [4]$$

$$G_B(f) = B(f) B^*(f) \quad [5]$$

siendo $A(f)$ y $B(f)$, las Transformadas de Fourier de $A(t)$ y $B(t)$, respectivamente. El asterisco (*) indica el complejo conjugado y $G_A(f)$ (o $G_B(f)$) se denomina función densidad espectral de energía de $A(t)$ (o $B(t)$). Al ser $G_{AB}(f)$ una función compleja, tendrá módulo y argumento, siendo este último el que se ha llamado $\theta_{AB}(f)$.

El significado de la función $\theta_{AB}(f)$ es el siguiente: a cada frecuencia f en Hz le corres-

pondrá una onda R que se propaga en la forma de R waves and that these surface waves diminish much more slowly than the P and S waves with an increase in the distance from the source of vibration indicates that these R waves are of the utmost interest for the non-destructive test of the Spectral Analysis Surface Wave type.

Finalmente, se debe señalar, como una característica práctica, que la energía de las ondas R alcanza, como se muestra en la figura 2 (F. E. Richart et al., 1970), una profundidad de aproximadamente una longitud de onda.

2.2. METHODOLOGY USED

The methodology utilized for these tests is shown schematically in figure 3.

To determine the velocity of the R waves under a specific point P, two acceleration or velocity transducers, -A and B-, are installed, one on either side of P and at equal distances from it. The vibration source is a

vertical dynamic load applied to the surface so that the perturbation set off in C is propagated in the form of waves across the ground. With the time signals A(t) and B(t) picked up by the transducers installed at A and B, the SD-380 Spectral Analyzer calculates the real time coherence function $\gamma^2(f)$ and the phase $\theta_{AB}(f)$ of the cross spectrum $G_{AB}(f)$ (see Fig. 4) and subsequently stores both functions in an HP216 microcomputer for later analysis.

The functions $\gamma^2(f)$ and $\theta_{AB}(f)$ have the following expressions:

$$\gamma^2(f) = \frac{|G_{AB}(f)|^2}{G_A(f) G_B(f)} \quad [2]$$

$$G_{AB}(f) = A(f) B^*(f) \quad [3]$$

$$G_A(f) = A(f) A^*(f) \quad [4]$$

$$G_B(f) = B(f) B^*(f) \quad [5]$$

where A(f) and B(f) are the Fourier transforms of A(t) and B(t), respectively. The asterisk (*) indicates the conjugated complex

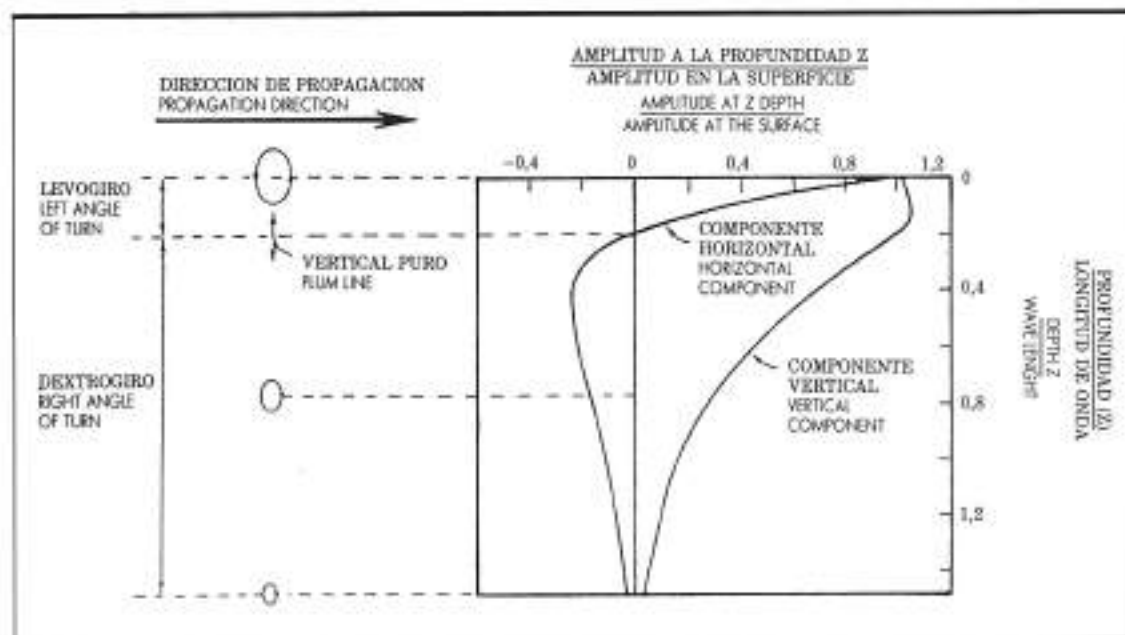


FIGURA 2. Distribución de la amplitud y del movimiento de la partícula en función de la profundidad en las ondas Rayleigh.
FIGURE 2. Distribution of the amplitude and movement of a particle as a function of the depth for Rayleigh waves.

ponde un valor $\theta_{AB}(f)$, siendo el tiempo de recorrido entre ambos transductores t_{AB} de una onda de frecuencia f el dado por:

$$t_{AB} = \frac{\theta_{AB}(f)}{360 f} \quad [6]$$

donde $\theta_{AB}(f)$ viene expresado en grados y t_{AB} en segundos.

Una vez conocida t_{AB} es inmediato conocer la velocidad de fase «C» ya que:

$$C = \frac{X}{t_{AB}} \quad [7]$$

siendo «X» la distancia entre transductores (Fig. 3). La velocidad C calculada mediante la Ec [7] corresponde a una longitud de onda λ de:

$$\lambda = \frac{C}{f} \quad [8]$$

Repetiendo el proceso [6], [7] y [8] 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 [6] a [8]. Esto se debe a que

and $G_A(f)$ for $G_B(f)$ are the linear spectrum of A(f) for B(f). Since $G_{AB}(f)$ is a complex function, it will have a modulus and an argument, which we have

named $\theta_{AB}(f)$.

The significance of the $\theta_{AB}(f)$ function is the following one: at each «f» frequency in Hz there corresponds a $\theta_{AB}(f)$ value,

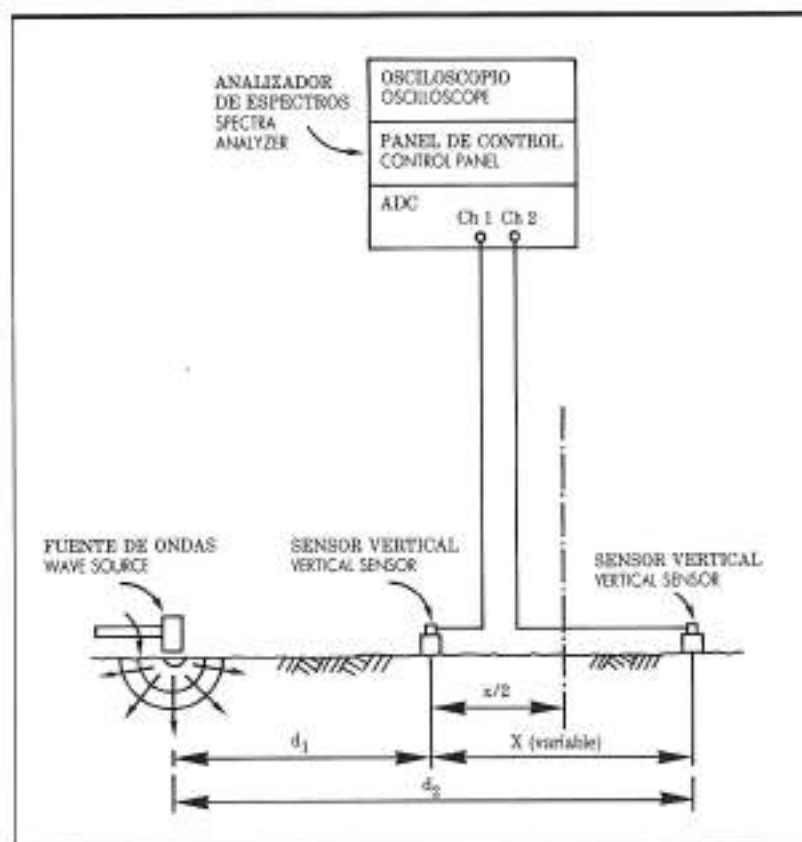


FIGURA 3. Distribución de equipos para el análisis espectral de ondas superficiales.
FIGURE 3. Arrangement of the equipment for surface waves spectral analysis.

$\gamma^2(f)$ es una función, en el dominio de la frecuencia, análoga a la del cuadrado del coeficiente de correlación de forma que:

$$0 \leq \gamma^2(f) \leq 1 \quad [9]$$

En esta expresión la función de coherencia valdrá 0 cuando las señales $A(t)$ y $B(t)$ 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. ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA PISTA DE ENSAYOS DEL CENTRO DE ESTUDIOS DE CARRETERAS DEL CEDEX MEDIANTE LA TECNICA AEOS

3.1. PISTA DE ENSAYOS DEL CEDEX

El Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX ha puesto a punto en sus instalaciones de El Goloso (Madrid) una Pista de Ensayos a escala real para realizar ensayos acelerados de estructuras de firmes de carreteras (A. Ruiz et al., 1987). La pista tiene forma oval (Fig. 5) constituida por dos tramos rectos de 75 metros de longitud cada uno de ellos, unidos entre sí mediante semicírculos de 24,6 metros de radio, medidos hasta la trayectoria media de la rueda de ensayo. La longitud media total recorrida por dicha rueda en cada vuelta es de 304 metros.

La zona de ensayos estructurales está constituida por dos tramos de 67 metros cada uno situados en las zonas rectas. En ella se ha construido una cubeta estanca de hormigón armado de 8 metros de anchura por 2,50 metros de profundidad donde se han colocado las distintas estructuras a ensayar. Las secciones adoptadas para el primer ensayo

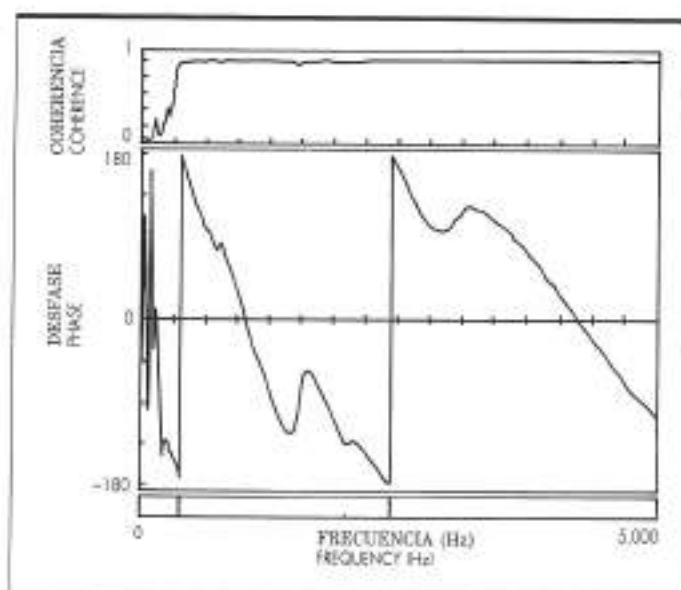


FIGURA 4. Función de coherencia y de desfase calculadas por el Analizador de Espectros SD-380 (Punto n.º 4).
FIGURE 4. Coherence and phase functions calculated by the SD-380 Spectra Analyzer.

han sido seis y están constituidas por capas granulares no tratadas apoyadas en una explanada y sobre la que se ha colocado un pavimento bituminoso.

En enero de 1988 se inauguró oficialmente la Pista de Ensayos y se empezó su explotación. Tras alcanzar a comienzos de 1991 la cifra de 1.000.000 de cargas aplicadas, se dio por finalizada la experimentación.

being the travel time between both transducers of a wave of frequency ω given by:

$$t_{AB} = \frac{\theta_{AB}(\omega)}{360 f} \quad [6]$$

where $\theta_{AB}(\omega)$ is expressed in degrees and t_{AB} in seconds.

Once t_{AB} is known, the phase velocity ωC_p is immediately known since:

$$C = \frac{\lambda}{t_{AB}} \quad [7]$$

where ωC_p is the distance between the transducers (Fig. 3). The velocity C calculated by Equation (7) corresponds to a wavelength λ , given by:

$$\lambda = \frac{C}{f} \quad [8]$$

By repeating Steps [6], [7] and [8] for different frequencies the velocity C can be obtained as a function of the frequency (f) or the wave length (λ). This function is known as «Dispersion Curve».

Finally, it is important to point out that the coherence function $\gamma^2(f)$ is used to select the range of frequencies to which the calculation process, represented by Expressions [6] to [8] is applied. This is due to the fact that $\gamma^2(f)$ is a function, in the frequency domain, analogous to the square of the correlation coefficient, such that:

$$0 \leq \gamma^2(f) \leq 1 \quad [9]$$

In this expression the coherence function will be 0 when the signals $A(t)$ and $B(t)$ are not related and it will be 1 when there is a linear dependence between them. In general a value equal to or greater than 0.9 is required. In this work 0.95 was the value used.

3. ANALYSIS OF THE RESULTS OBTAINED IN THE CEDEX TEST TRACK USING THE SASW TECHNIQUE

3.1. THE CEDEX TEST TRACK

The CEDEX Road Research Centre has built a Full Scale Test Track in its facilities at El Goloso in Madrid for the purpose of carrying out accelerated tests on road pavement structures (A. Ruiz et al., 1987). The track is oval in shape (Fig. 5) with two straight stretches each 75 m long joined by two semicircles with a radius of 24.6 m, measured up to the average wheel path. The total average length of this path in each loop is 304 m.

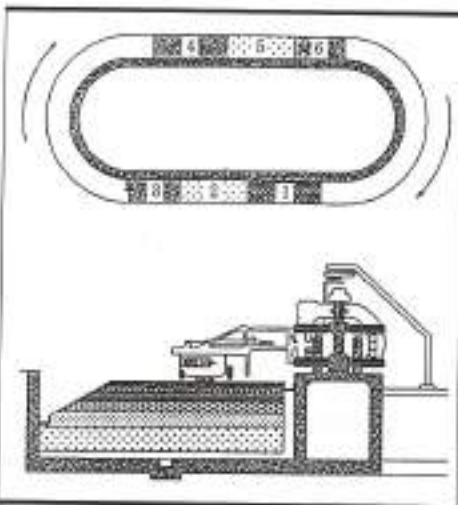


FIGURA 5. Planta y sección transversal de la pista de ensayo.
FIGURE 5. Plan view and cross section of the test track.

3.2. ENSAYOS REALIZADOS

Los ensayos se efectuaron los días 24 y 25 de septiembre de 1991, cuando parte de la pista estaba ya desmantelada en alguna de sus capas; por ello, sólo se pudo ensayar la sección tipo 3 (Fig. 6). Los materiales y los espesores de las capas de esta sección se muestran en la Tabla 1.

Debajo de la explanada había una capa de 0,20 m de espesor de Material Drenante (MD), la solera de hormigón de la cubeta de 0,35 m de espesor y, finalmente, el suelo natural.

Para la realización de los ensayos se utilizó como fuente de ondas un vibrador electrodinámico modelo 812E/50LP de 500 Newtons y como transductores dos acelerómetros piezoeléctricos PU-H cuyo rango de frecuencias era de 5-10.000 Hz y con una sensibilidad de voltaje de 1 V/g. La separación entre sensores $-x-$ y de la fuente vibratoria al sensor más cercano d_1 (ver Fig. 3) se muestran en la Tabla 2.

El ensayo se realizó generando con un oscilador una señal eléctrica de amplitud constante y cuya frecuencia variaba linealmente con el tiempo (barrido lineal de fre-

CAPA LAYER	MATERIAL MATERIAL	ESPEORES (m) THICKNESS (m)
RODADURA WEARING COURSE	MEZCLA BITUMINOSA (MB) COATED MACADAM (MB)	0,105
BASE BASE	ZAHORRA ARTIFICIAL (ZA) CRUSHED AGGREGATE (ZA)	0,250
SUBBASE SUB-BASE	ZAHORRA NATURAL (ZN) NATURAL AGGREGATE (ZN)	0,250
EXPLANADA SUBGRADE	SUELO SELECCIONADO (SS) SELECTED SOIL (SS)	0,550
EXPLANADA SUBGRADE	SUELO TOLERABLE (ST) ACCEPTABLE SOIL (ST)	0,750

TABLA 1.
TABLE 1.

cuencias). Esta señal era amplificada mediante un amplificador de potencia de 400 vatios y cuya salida alimentaba al vibrador electrodinámico. El rango máximo de frecuencias alcanzado en el ensayo fue de 5.000 Hz.

3.3. ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Como se ha comentado anteriormente, el objetivo fundamental de este trabajo ha sido determinar la velocidad de propagación de las ondas tangenciales V_s de las diferentes capas que forman la sección tipo 3 (Tabla 1). Para ello, una vez obtenida la curva de

The structural test zone consists of two stretches, each 67 m long, located in the straight zone, in which a waterproof reinforced concrete trough, 8-m wide by 2.6 m deep, has been built containing the different structures to be tested. The six sections chosen for the first test were made with untreated granular layers over a subgrade on top of which a coated macadam has been laid.

The Test Track was officially opened in January, 1988 and the first test began immediately. After one million loads has been applied the test was considered completed at the beginning of 1991.

3.2. SURFACE WAVE TESTS PERFORMED

The tests were carried out on the 24 and 25 September, 1991 when part of the track had already been dismantled for which reason only Standard Section 3 (Fig. 6) could be tested. The materials and thicknesses of the layers in this section are shown in Table 1.

Beneath the subgrade there were, a 0.20-m thick layer of drainage material (MD), the concrete bottom of the trough and finally the natural ground.

The source of waves used for the tests was a 500 N electrodynamic vibrator, model B12E/50LP. Two PU-H piezoelectric accelerometers were used as transducers with a range of frequencies of 5-10,000 Hz and a sensitivity of 1 V/g. The separation between the sensors $-x-$ and from the vibration source to the nearest sensor d_1 (see Fig. 3) is shown in Table 2.

The test was carried out by generating a constant amplitude electrical signal with an oscillator whose frequency varied linearly with time (linear frequency sweep). This signal was amplified using a 400-W amplifier whose output fed the electrodynamic vibrator. The maximum range of frequencies reached in the test was 5,000 Hz.

3.3. ANALYSIS OF THE RESULTS OBTAINED

As commented earlier, the fundamental aim of this work was to determine the shear wave propagation velocity V_s of the various layers making up Standard Section 3 (Table 1). To this end, having obtained the experimental dispersion curve, the Spectral Analysis of Surface Wave (SASW) Program developed at the University of Texas was used to calculate the V_s of the layers.

Of the two alternatives offered by the program (U. M. Roeset et al., 1991) the one based on the three dimensional solu-

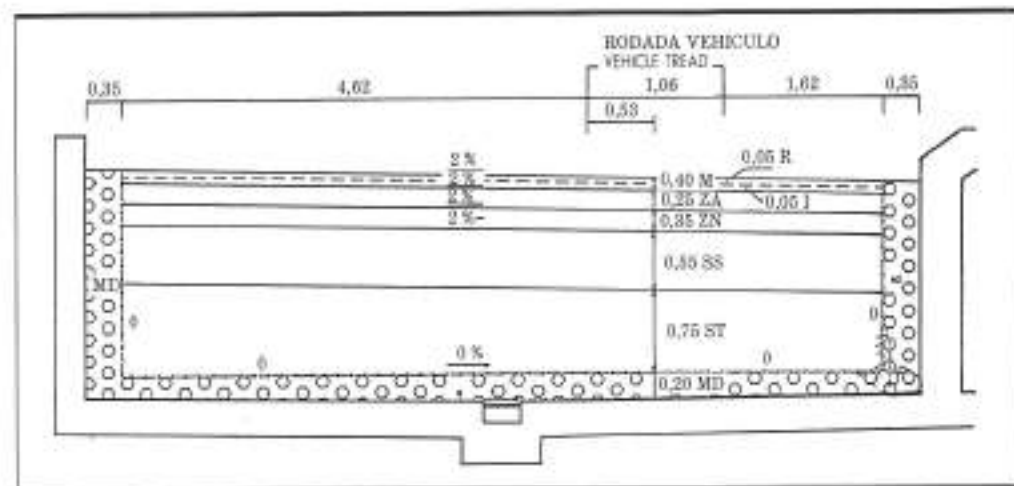


FIGURA 6. Sección tipo 3.
FIGURE 6. Type section 3.

dispersión experimental, se ha utilizado el Programa SASW (Spectral Analysis of Surface Waves) desarrollado en la Universidad de Texas, para calcular las V_p de las capas.

De las dos alternativas que ofrece el programa (J. M. Roeset et al., 1991) se ha tomado, en este caso, la basada en la solución tridimensional, es decir, calculando los desplazamientos originados por una carga dinámica colocada en la superficie de un sistema multicapa mediante las funciones de Green desarrolladas por Kausel (1981). En la figura 7 se muestra la curva de dispersión obtenida «in situ» y la calculada aplicando el Programa SASW. Esta curva de dispersión teórica corresponde a un sistema multicapa cuyas velocidades V_p y espesores son los mostrados en la Tabla 3.

Como se aprecia en esta tabla, el espesor de la capa de rodadura es de 0,15 metros pues de esta manera se mejora el ajuste de la curva teórica a la experimental. Este espesor de la mezcla bituminosa también se podría deducir, aproximadamente, teniendo en cuenta las curvas de desfase obtenidas «in situ» en los puntos 1 y 2. En efecto, como se muestra en las figuras 8 y 9, se produce en ambas una discontinuidad brusca en torno de la frecuencia de 2.400 Hz a la que corresponde una longitud de onda del orden de 0,373 metros; aplicando ahora la regla empírica $1/2$ a $1/3$, se obtiene un valor medio de 0,155 m de espesor para la capa de mezcla bituminosa. El que esta discontinuidad se manifieste más claramente en la figura 9 puede ser debido a que, al ser la distancia del vibrador mayor en el punto 2 que en el 1 para la misma separación de sensores, se produzcan reflexiones más acentuadas en el contacto entre la capa de rodadura y la de la base. Asimismo, se aprecia en ambas figuras

PUNTO POINT	d_1 (m)	x (m)
1	0,50	0,25
2	0,75	0,25
3	1,00	0,50
4	1,00	1,00
5	1,50	1,00

TABLA 2.
TABLE 2.

cómo la curva de desfase tiene una variación suave para frecuencias menores que la de la discontinuidad, mientras que para frecuencias mayores de unos 2.400 Hz esta variación es más bien oscilante, pareciendo reflejar los cambios de rigidez de la capa de rodadura a lo largo de su espesor.

Análogamente, si se analiza la curva de desfase del punto 4 (Fig. 4) puede apreciarse el contacto de la base con la subbase en torno a 1.200 Hz, así como el de la subbase con el suelo seleccionado (SS) que se produce en torno a los 625 Hz. Es interesante resaltar que si se reproduce teóricamente el ensayo de este punto 4, se aprecia el contacto de la base y la subbase incluso más acentuado, como muestra la figura 10. En ella se puede apreciar también el efecto de la capa

tion was chosen. It consisted basically of calculating the displacements caused by a dynamic load applied to the surface of a multilayer system by the Green functions developed by Kausel (1981). Figure 7 shows the dispersion curve obtained in situ and the one calculated by applying the SASW Program. This theoretic dispersion curve corresponds to a multilayer system whose V_p velocities and thicknesses are as shown in Table 3.

As can be seen in this Table, the thickness of the wearing course that better fits the experimental data is 0,15 m. This coated macadam thickness could also be deduced approximately by taking into account the phase curves obtained in situ at Points 1 and 2. Both figures 8 and 9 show a sharp dis-

continuity around a frequency of 2,400 Hz which corresponds to a wavelength of about 0,373 m; if the empirical $1/2$ to $1/3$ rule is now applied an average value of 0,155 m thickness is obtained for the layer of coated macadam. The fact that this discontinuity shows up more clearly in figure 9 could be explained by the more pronounced reflections in the contact between the wearing course and the base that can be expected at Point 2 than at Point 1 due to the greater vibrator distance existing in the former than in the latter. Both figures also illustrate how the phase curves have a mild variation for frequencies lower than the discontinuity frequency whereas for frequencies higher than 2,400 Hz those curves oscillate, tending to reflect the changes in rigidity of the wearing course throughout its thickness.

In an analogous way, if the phase curve at Point 4 (Fig. 4) is analyzed, the contact between the base and the sub-base at around 1,200 Hz can be seen, and that between the sub-base and the selected soil (SS) which occurs around 625 Hz. It is interesting to point out that if the test at Point 4 is reproduced theoretically, the contact between the base and the sub-

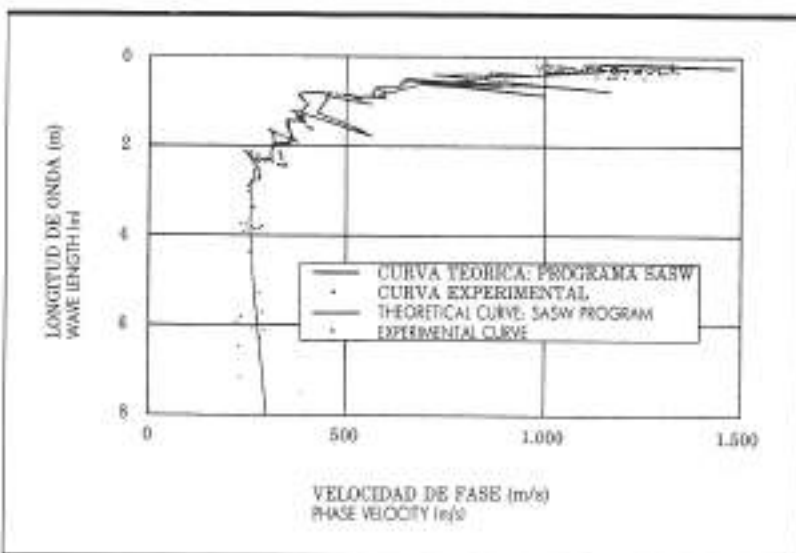


FIGURA 7.
Curvas de dispersión experimental y teórica.
FIGURE 7.
Experimental and theoretic dispersion curves.

de hormigón. Efecto que se manifiesta en oscilaciones de la curva de desfase para frecuencias por debajo de unos 750 Hz.

Finalmente, si se calcula teóricamente la curva de desfase para el caso de $d_1 = x = 2,00$ metros (Fig. 11), se ve que aparecen varias discontinuidades, algunas a modo de ciclos falsos, originados por las reflexiones en la capa de hormigón. Además, se observa que si la V_s de la capa de hormigón se hace igual a la del suelo natural, se aprecia el contacto de la base con el suelo seleccionado en torno de 575 Hz como se vea en la figura 4. Esto hace pensar que en el ensayo de los puntos 4 y 5 no se ha generado suficiente energía para poder obtener experimentalmente, en la curva de desfase, el efecto del hormigón tan claramente.

4. CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados del primer ensayo realizado en la Pista de Ensayos a escala real que el Centro de Estudios de Carreteras del CE-

MATERIAL MATERIAL	ESPESESOR (m) THICKNESS (m)	V_s (m/seg)
MB	0,15	1.400
ZA	0,25	550
ZN	0,25	250
SS	0,55	200
ST	0,75	180
MD	0,20	250
HORMIGÓN CONCRETE	0,35	2.000
SUELO NATURAL NATURAL GROUND	-	350

TABLA 3.
TABLE 3.

DEX tiene en El Goloso (Madrid) aplicando la técnica del Análisis Espectral de las Ondas Superficiales se deduce que:

- La velocidad de las ondas tangenciales en la mezcla bituminosa puede estimarse en 1.400 m/seg, aunque la frecuencia máxima lograda en el ensayo, 5.000 Hz, es baja para haber obtenido con claridad la asíntota de alta frecuencia en la curva de dispersión experimental.

base es even more noticeable, as shown in figure 10. This also illustrates the effect of the concrete layer, an effect that shows up as oscillations in the phase curve for frequencies below some 750 Hz.

Finally, if the phase curve is calculated theoretically when $d_1 = x = 2.00$ m (Fig. 11), several discontinuities become obvious, some of them as false cycles, caused by the reflections in the concrete layer. Furthermore, it can be seen that if

the V_s value of the concrete layer is made the same as that of the natural ground, the contact between the base and the selected soil appears around 575 Hz as shown in figure 4. This would lead us to believe that the energy generated at Points 4 and 5 was not enough for the experimental phase curve to reflect clearly the effect of the concrete layer.

4. CONCLUSIONS

Analysing the results of the first test carried out at the full-scale test track belonging to the CEDEX Road Research Centre in el Goloso, Madrid, in which the technique of the spectral analysis of surface waves was applied, it can be deduced that:

- The velocity of the shear waves in the coated macadam can be estimated at 1,400 m/sec even though the maximum frequency achieved in the test, 5,000 Hz, is low for the high-frequency asymptote of the dispersion curve to have been clearly obtained.
- The analysis of the phase cur-

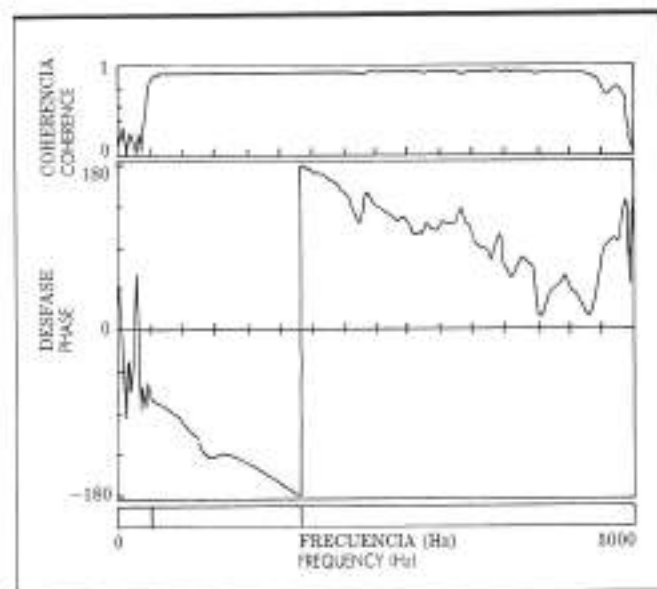


FIGURA 8. Función de coherencia y de desfase calculadas por el Analizador de Espectros SD-380 (Punto n.º 1).
FIGURE 8. Coherence and phase functions calculated by the SD-380 Spectre Analyzer (Point 1).

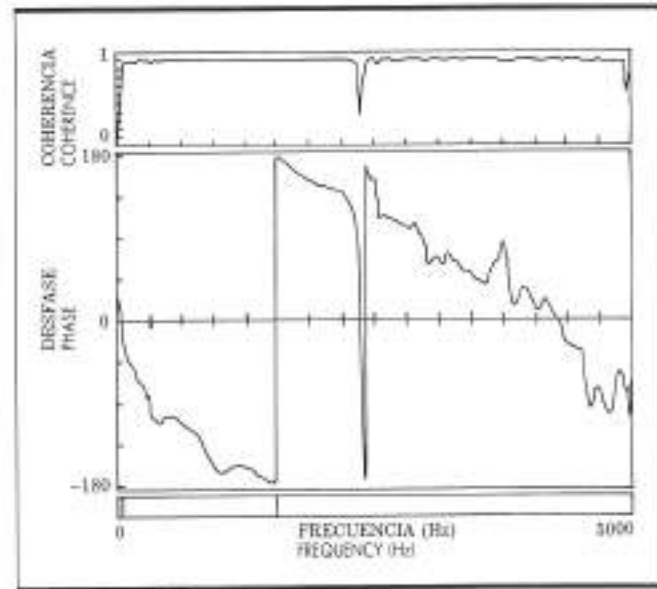


FIGURA 9. Función de coherencia calculada por el analizador de espectros SD-380 (Punto n.º 2).
FIGURE 9. Coherence function calculated by the SD-380 Spectre Analyzer (Point 2).