

Aplicación del Análisis Espectral de las Ondas Superficiales para evaluar la eficacia de diversas técnicas de mejora del terreno

V. CUÉLLAR (*); J. VALERIO (*)

RESUMEN En este trabajo se analizan los resultados de los ensayos realizados por el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX en la Variante del Puerto de Santa María y Puerto Real situada en la provincia de Huelva (España), utilizando la técnica del Análisis Espectral de Ondas Superficiales (AEOS). El objetivo de los mismos ha sido investigar las posibilidades que proporciona esta técnica para valorar la eficacia de las columnas de grava y de los drenes prefabricados en la mejora de las características del subsuelo de la zona. Asimismo, se ha aplicado esta técnica para determinar la rigidez vertical de los terraplenes de las estructuras ensayadas.

USE OF THE SASW METHOD TO EVALUATE SOIL IMPROVEMENT TECHNIQUES

ABSTRACT This work analyzes the results of tests conducted by the Laboratorio de Geotecnia (CEDEX) at the Puerto de Santa María and Puerto Real new highway in the Province of Huelva (España), using the Spectral Analysis of Surface Waves (AEOS) technique. The aim was to deepen into the possibilities that this technique has in evaluating the effectiveness of stone columns and prefabricated drains to improve the subsoil characteristics in the zone. This technique was also applied to determine the vertical stiffness of the abutment earthfills of two bridge structures.

Palabras clave: Ondas superficiales; Análisis espectral; Propagación de ondas.

1. INTRODUCCIÓN

El uso del método del Análisis Espectral de las Ondas Superficiales para determinar, de una forma simple y no destructiva, la velocidad de las ondas tangenciales de suelos y pavimentos ha ganado credibilidad y popularidad en los últimos años y es ampliamente aceptado en la actualidad (Stokoe et al. 1983, Write et al. 1991, Cuéllar et al. 1993, Stokoe et al. 1994, Cuéllar 1994 y Jamiolkowski et al. 1995).

En este trabajo se ha utilizado esta técnica para evaluar la mejora, mediante columnas de grava y drenes prefabricados, de una zona de marismas por donde discurre el trazado de la autovía de acceso al Puerto de Santa María y Puerto Real (Huelva, España). Asimismo, se ha determinado la rigidez vertical de los terraplenes de dos pasos elevados construidos sobre el terreno mejorado.

2. DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA DEL ANÁLISIS ESPECTRAL DE ONDAS SUPERFICIALES

La metodología seguida en la realización de este ensayo se esquematiza en la figura 1. Para conocer la velocidad de las ondas R en la vertical de un punto P se colocan dos sensores —A y B— uno a cada lado de P y equidistantes del mismo.

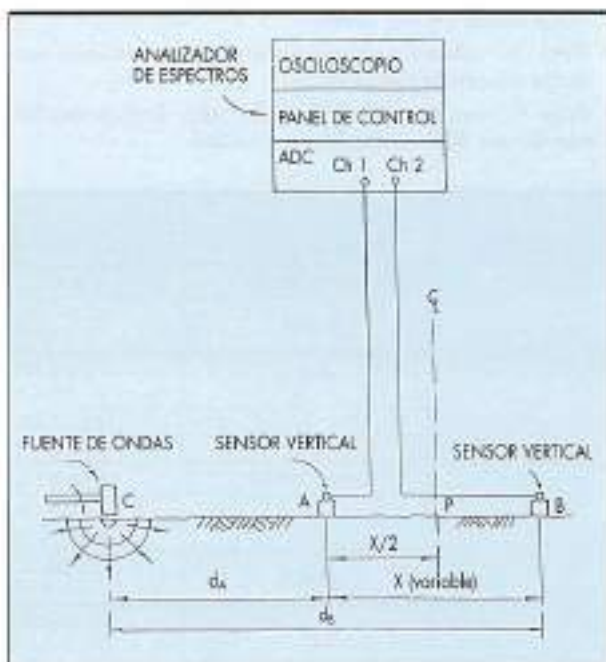


FIGURA 1. Disposición de los equipos en el método del Análisis Espectral de las Ondas Superficiales (AEOS)

(*) Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Ministerio de Fomento.

La fuente vibratoria —C— produce la vibración del terreno y con las señales A(t) y B(t) el analizador de espectros calcula en tiempo real la función de coherencia $\gamma_{AB}(f)$ y la fase $\theta_{AB}(f)$ de la función densidad espectral cruzada de energía $G_{AB}(f)$, siendo almacenadas, a continuación, ambas funciones en un ordenador para su posterior análisis. El significado de la función $\theta_{AB}(f)$ es el siguiente: a cada frecuencia "f" en Hz, $\theta_{AB}(f)$ representa el desfase entre A y B, por lo que el tiempo de recorrido entre ambos sensores " t_{AB} " de una onda de frecuencia f es $\theta_{AB}(f)/(360 f)$ y la velocidad de fase " V_R " igual a X/t_{AB} siendo "X" la distancia entre sensores. Repitiendo el proceso para diferentes frecuencias, se puede obtener la velocidad V_R en función de la longitud de onda λ ($\lambda = V_R/f$). A $V_R = F(\lambda)$ o $V_R = F(f)$ 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 los que se aplica el proceso de cálculo anterior. 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 $0 \leq \gamma^2(f) \leq 1$. En general se exige un valor igual o mayor de 0.9.

3. ENSAYOS REALIZADOS

En las figuras 2 se muestra el estribo 2 de la estructura 7 —E7e2— y el estribo 1 de la 8 —E8e1— donde se han efectuado los ensayos. Una parte del trazado de la autovía antes señalada discurre sobre un área de marismas constituida por depósitos cuaternarios de carácter fluvial en los que existe una alternancia de capas muy predominantemente arcillosas (fangos) con otras más arenosas. Los espesores de estos terrenos blandos que recubren el sustrato Plioceno, son variables pero en general superan los 20-30 metros. Su baja resistencia al corte y su alta deformabilidad ha hecho que se hayan utilizado drenes verticales prefabricados y columnas de grava como técnicas de mejora del terreno. Por esta razón, los estribos se dividieron en tres zonas:

- Zona "A": columnas de grava distribuidas formando una malla triangular con $1e/5m^2$.
- Zona "B": columnas de grava distribuidas formando una malla triangular con $1e/7m^2$.
- Zona "C": drenes verticales prefabricados distribuidos formando una malla triangular con $1d/2m^2$.

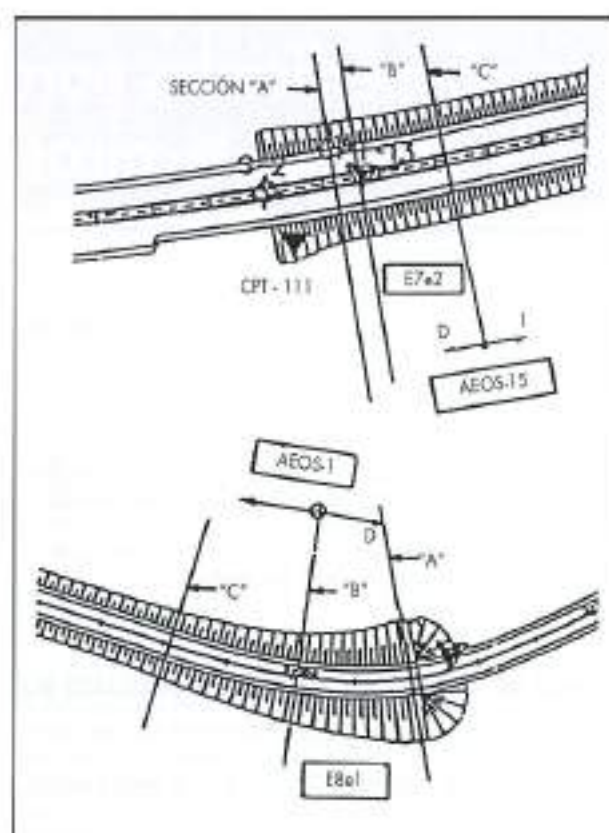


FIGURA 2. Secciones ensayadas.

En cada una de las zonas se eligió una sección (A, B y C) para la ubicación de los puntos analizados. Asimismo, en cada estructura se tomó un punto alejado del terraplén para caracterizar el terreno natural (AEOS-1 y AEOS-15) ya que cuando se realizaron los primeros ensayos (fase 1) estaban los terraplenes construidos en parte. Un resumen de las zonas y puntos ensayados se han esquematizado en la tabla 1. Tanto en las figuras como en las tablas se han identificado

ESTRUCTURA	ZONA DE ENSAYO	PUNTOS (AEOS)		OBSERVACIONES
		FASE 1 (Abril 1995)	FASE 2 (Octubre 1995)	
E8e1	Terreno Natural	1 (+3.57)		A 54.6 m del eje del terraplén
	Zona A	6 L (+6.22) 7 T (+6.22)		Coronación del terraplén
	Zona B	2 L (+6.42) 3 T (+6.42)	6P/2PL (+8.77) 2PL (+7.52)	
	Zona C	4 L (+5.48) 5 T (+5.48)	4PL (+5.85)	Coronación del terraplén
E7e2	Terreno Natural	15 (+3.10)		A 70.2 m del eje del terraplén
	Zona A	9 L (+5.10) 10 T (+5.10)		Coronación del terraplén
	Zona B	11 L (+5.17) 12 T (+5.17)		
	Zona C	13 L (+4.99) 14 T (+4.99)		Coronación del terraplén

[] : cotas de los puntos; L: longitudinal; T: transversal.

TABLA 1. Relación de los puntos analizados.

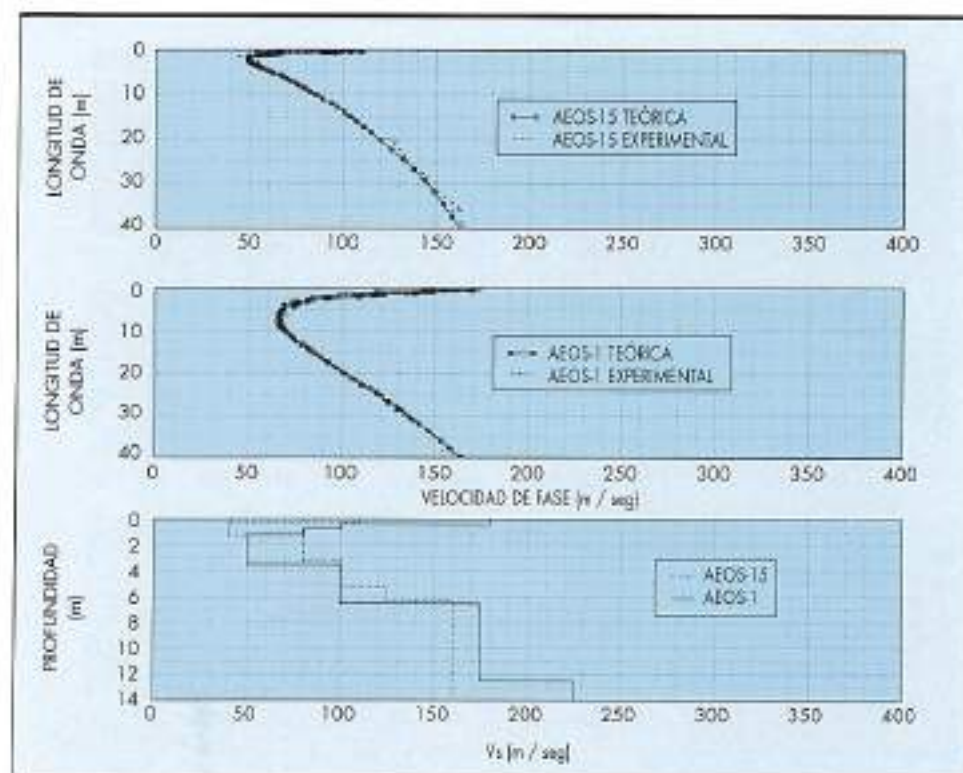


FIGURA 3. Curvas de dispersión y perfiles de velocidad de las ondas S obtenidas en AEOS-1 [E8] y AEOS-15 [E7].

los ensayos con las siglas AEOS seguidas del número del punto correspondiente.

En los ensayos realizados, las vibraciones originadas por un vibrador electrodinámico modelo 812E/50LP o la caída libre de una masa de 500 y 1000 Kg fueron captadas mediante parejas de acelerómetros piezoeléctricos o geófonos.

4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

4.1. TERRENO NATURAL

En la figura 3 se muestran las curvas de dispersión experimentales obtenidas en AEOS-1 y AEOS-15 así como las curvas teóricas ajustadas con el programa SASW desarrollado en la Universidad de Texas (Roesset et al. 1991). Asimismo, se han representado en esta misma figura las "estructuras de capas horizontales equivalentes" correspondientes a las curvas teóricas ajustadas.

Con las longitudes de onda obtenidas en el ensayo más desfavorable (AEOS-6P/2P en la fase 2), se ha valorado la eficacia del tratamiento estimando el valor medio de V_s en la capa de "fangos más superficial". En el terreno natural estos valores han sido:

- AEOS-1: $H=6.10\text{ m} \rightarrow V_s=80\text{ m/s}$
- AEOS-15: $H=6.25\text{ m} \rightarrow V_s=88\text{ m/s}$

4.2. ZONA DE TERRENO TRATADO: COLUMNAS DE GRAVA Y DRENES PREFABRICADOS

Los ensayos AEOS realizados en esta zona se efectuaron en dos fases. En la fase 1 (abril de 1995) se tomaron 3 puntos en cada una de las dos estructuras mientras que en la fase 2 (octubre de 1995) sólo se pudo repetir en las zonas B y C de la E8.

Un primer análisis de los resultados obtenidos muestra que, en cada punto de la fase 1, las curvas de dispersión en

la dirección longitudinal y transversal son muy parecidas. Las curvas de dispersión teóricas y experimentales obtenidas en la fase 1 en la E8 se representan en la figura 4. De los resultados obtenidos en esta fase 1 se deduce que el perfil de velocidades tangenciales en el terreno tratado (drenes o columnas) es prácticamente el mismo que el del terreno natural. El valor medio de V_s en la capa de "fangos más superficial", cuyo espesor se ha estimado en 6.25 m en la E7e2 y en 6.10 m en la E8e1, toma los siguientes valores:

- E7e2: 91 m/seg (zona A), 90 m/s (zona B) y 90 m/s (zona C).
- E8e1: 88 m/s (zona A), 83 m/s (zona B) y 80 m/s (zona C).

Después de 6 meses de realizada la fase 1 se llevó a cabo la fase 2 en la E8. Las curvas de dispersión teórica y experimental obtenidas se han representado en la figura 5 y las estructuras de "capas horizontales equivalentes" deducidas se muestran en la figura 6. En esta última figura también se ha incluido el perfil de V_s obtenido en las zonas B y C de la fase 1. Comparando los resultados de ambas fases se deduce que:

- En la zona C (drenes prefabricados) la pequeña mejora experimentada parece manifestarse únicamente en la capa de "fangos más superficial", de forma que el valor medio de V_s en esta capa pasa de 80 m/s (fase 1) a 89 m/s (fase 2), es decir, se produce un incremento de la velocidad media de un 11%.
- En la zona B (columnas de grava) se aprecia un aumento significativo de la rigidez de la capa de "fangos más superficial". Así por ejemplo, el valor medio de V_s de esta capa pasa de 83 m/s (fase 1) a 120 m/s en el AEOS-2P y a 130 m/s en el AEOS-6P/2P, es decir, se produce un incremento en su velocidad media del 45% y del 57%, respectivamente. Además, parece apreciarse una disminución de

FIGURA 4. Curvas de dispersión obtenidas en la coronación del estribo 1 de la estructura B (fase 1).

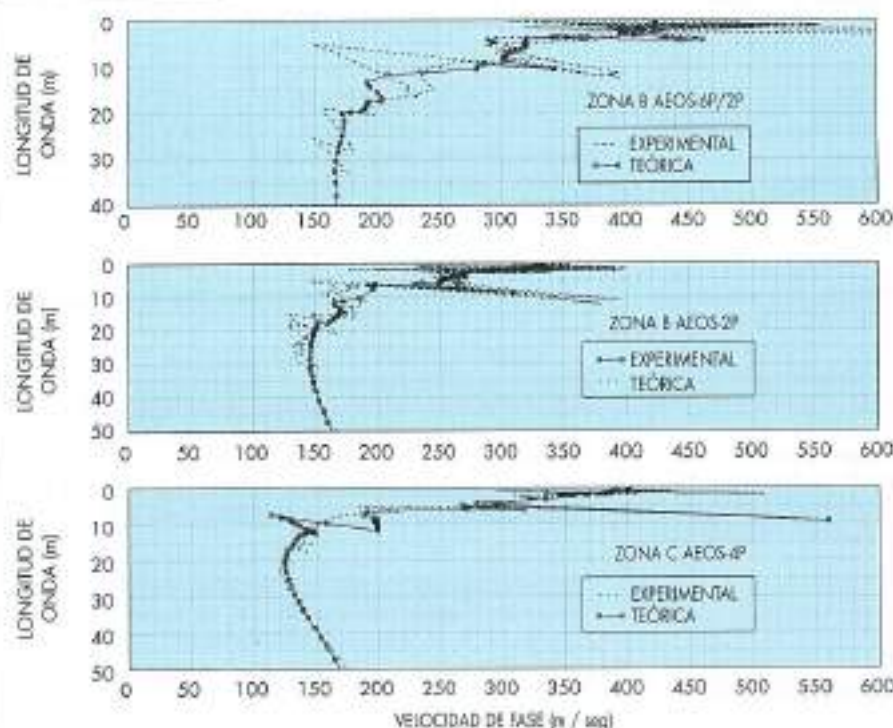
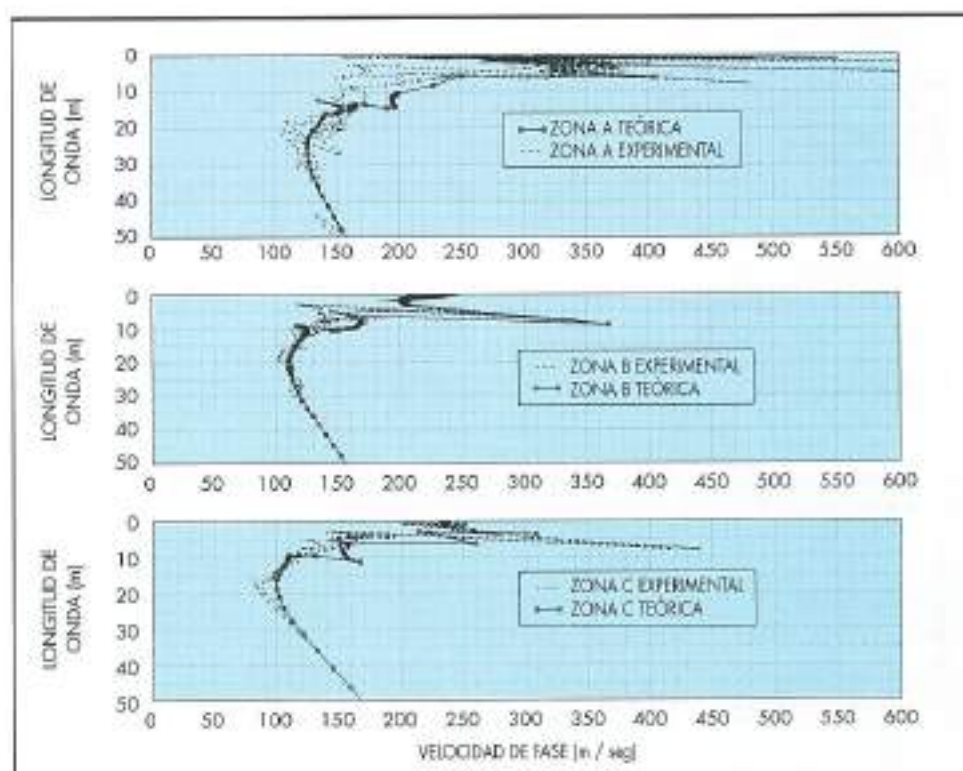


FIGURA 5. Curvas de dispersión obtenidas en la coronación del estribo 1 de la estructura B (fase 2).

la V_s del terreno situado inmediatamente por debajo de esta capa de fangos cuya extensión y magnitud es difícil de precisar con los datos analizados.

4.3. TERRAPLENES

A fin de comparar la rigidez de los dos terraplenes ensayados, se ha calculado la V_s media de las estructuras de "capas

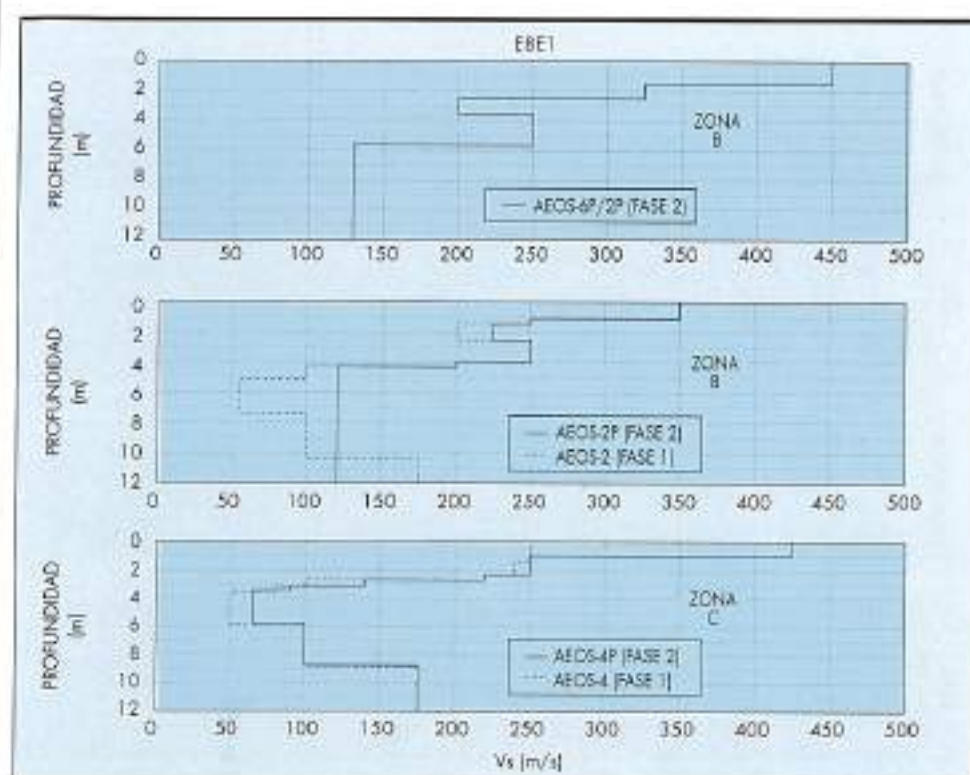


FIGURA 6. Perfiles de la velocidad de las ondas V_s obtenidos en el estribo 1 de la estructura B en las fases 1 y 2.

horizontales equivalentes" deducidas en cada una de sus zonas. Los valores obtenidos en ambas estructuras en la fase 1 se presentan en la tabla 2, mientras que en la tabla 3 se muestran los de la E8e1 en la fase 2.

Si se comparan estos valores medios, se aprecia claramente como la rigidez de los terraplenes de ambas Estructuras, en la fase 1, es análoga, destacando un mayor valor medio de V_s en las zonas A (350-366 m/s) que en las zonas B (231-261 m/s) y C (234-245 m/s). Estas diferencias se hacen menores en la Fase 2 como muestra la tabla 3 para el caso de la E8e1.

Aunque el "método simplificado" de calcular valores medios de V_s directamente de las curvas de dispersión experimentales no es aplicable en muchos casos, sin embargo, si parece práctico en este caso concreto. En efecto, tomando V_s igual a 1.1 la velocidad de propagación de las Ondas Superficiales y suponiendo una longitud de onda de 2.5 a 3 veces la altura del terraplén, se obtienen —respectivamente— los valores medios mostrados en las tablas 2 (fase 1) y 3 (fase 2). Si se comparan con los valores medios calculados a partir de las estructuras de "capas horizontales equivalentes" determinadas con el programa SASW se comprueba una desviación menor de un 10%.

Además de este "método simplificado" existe —en este caso concreto— otro mucho más sencillo para estimar "razonablemente" el valor medio de V_s . En este "nuevo método" basta observar la frecuencia en que se producen ciertas "discontinuidades" en las curvas de fase obtenidas "in situ" correspondientes a determinadas separaciones de los sensores (fig. 7). Un resumen de los puntos de ensayo, separaciones de sensores y frecuencias utilizadas se presentan en la tabla 4. Además de estas frecuencias "características" (f_c), el "nuevo método" sólo necesita conocer la altura del terraplén (H) pues el valor medio de V_s se estima aplicando la cono-

ESTRUCTURA	ZONA DE ENSAYO	ALTURA DEL TERRAPLÉN (m)	V_s MEDIA (m/seg)	
			ESTRUCTURA DE CAPAS	$\lambda/H=2.5$
E7e2	A	2.00	366	375
	B	2.07	261	235
	C	1.89	234	241
E7e1	A	2.65	350	365
	B	2.85	231	216
	C	1.91	245	237

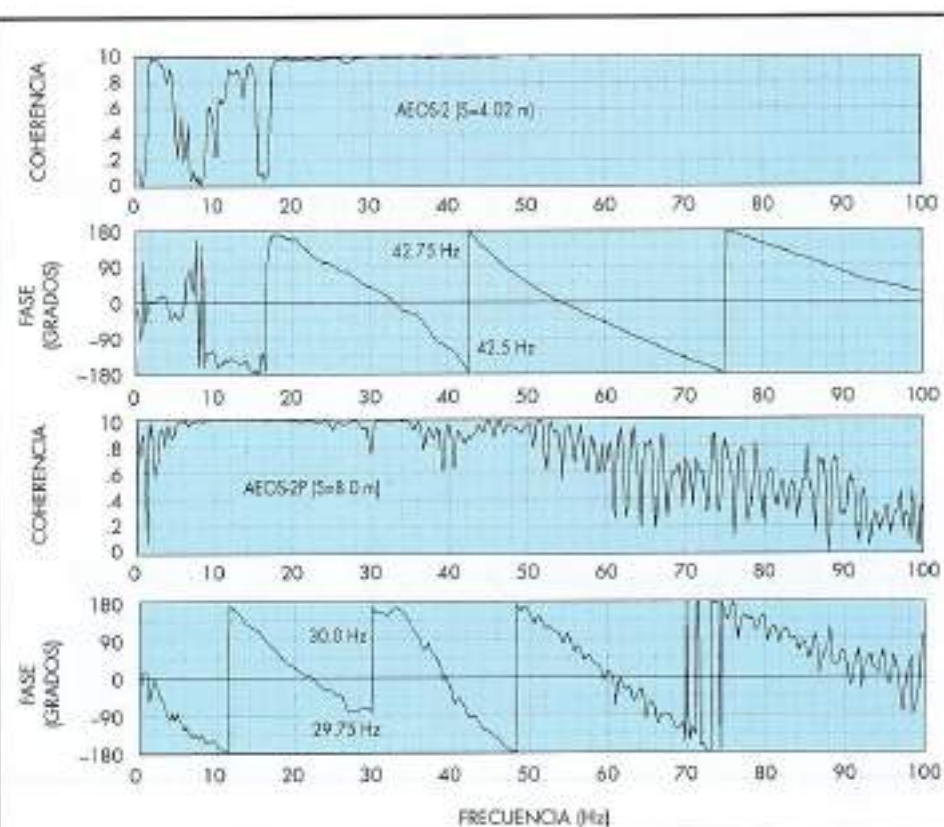
TABLA 2. Valores medios de V_s de los terraplenes de las estructuras analizadas (fase 1).

ZONA DE ENSAYO	ALTURA DEL TERRAPLÉN (m)	V_s MEDIA (m/seg)	
		ESTRUCTURA DE CAPAS	$\lambda/H=2.5$
B	5.20 (AECS-4P/2P)	334	341
	3.95 (AECS-2P)	271	264
C	2.28 (AECS-4P)	327	353

TABLA 3. Valores medios de V_s del terraplén de la E8e1 (fase 2).

cida expresión $V_s = 2 H f_c$. Los valores de V_s así calculados se muestran en la última columna de la tabla 4. Si se com-

FIGURA 7. Funciones de coherencia y curvas de fase obtenidas en la coronación de E8a1 para una separación de sensores de 4.02 m (AEOS-2, fase 1) y 8.0 m (AEOS-2P, fase 2).



ran con los valores medios determinados a partir de las estructuras de "capas horizontales equivalentes" se comprueba una desviación menor de un 15%, salvo dos casos:

- El primero corresponde al punto AEOS-4P en que la desviación es del 20% y es debido a la baja coherencia en el rango de frecuencias de interés.
- El segundo se refiere al punto AEOS-9 (zona A) en donde la desviación es del 37%. En este caso se ve que en el ajuste del punto el espesor de las capas entre el terraplén y el terreno tratado es de 0.75 m en vez de los 0.25 m de las otras dos zonas, es decir, hay "un suplemento" de 0.50 m. Pues bien, si en lugar de tomar $H=2.0$ m se añade el "suplemento" deducido teóricamente, entonces la desviación desciende a un 12%.

En definitiva, la rigidez de los terraplenes analizados se puede estimar con este segundo "método aproximado", suponiendo que la frecuencia $-f_c-$ correspondiente a las "discontinuidades" observadas en las curvas de desfase coincide "numéricamente" con la frecuencia fundamental del terraplén considerado como una "placa".

5. CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados obtenidos en la zona de terreno tratado se deduce que:

- En la fase 1, el perfil de V_s en el terreno tratado (drenes o columnas) es prácticamente el mismo que el del terreno natural.

- En la fase 2, se aprecia en la zona C (drenes) una pequeña mejora únicamente en la capa de "fangos más superficial", de forma que el valor medio de V_s aumenta un 11%.
- Sin embargo, en esta fase 2 se aprecia en la zona B (columnas de grava) un aumento significativo de la rigidez de la capa de "fangos más superficial" ya que el valor medio de V_s de esta capa se incrementa un 45 % en el punto AEOS-2P y un 57% en el AEOS-6P/2P.

En cuanto a la zona de terraplén, se deducen las siguientes conclusiones:

- La rigidez de los terraplenes de ambas estructuras, en la fase 1, es análoga, destacando un valor medio de V_s mayor en las zonas A que en las B y C. Estas diferencias se reducen en la fase 2.
- El "método simplificado" de calcular valores medios de V_s directamente de las curvas de dispersión parece práctico —al menos en este caso— pues difieren de los calculadas a partir de las estructuras de "capas horizontales equivalentes" en ± 10 %.
- Finalmente, existe —en este caso concreto— otro "método aproximado" mucho más sencillo para estimar el valor medio de V_s con una desviación de ± 15 %. Basta observar en algunas curvas de fase la frecuencia (f_c) en que se producen ciertas "discontinuidades", conocer la altura del terraplén (H) y suponer que f_c coincide "numéricamente" con la frecuencia fundamental del terraplén considerado como una placa.

FASE	ESTRUCTURA	REGISTRO	FRECUENCIA (Hz)	ALTURA (m)	V _s media (m/seg)
1	E8e1	AEOS-7 (s = 4.02 m)	60.75 - 61.0	2.65	323
		AEOS-2 (s = 4.02 m)	42.5 - 42.75	2.85	243
		AEOS-4 (s = 4.01 m)	54.75 - 55.0	1.91	210
	E7e2	AEOS-9 (s = 4.03 m)	57.5 - 57.75	2.00 2.50**	231 288**
		AEOS-11 (s = 3.98 m)	58.0 - 58.25	2.07	241
		AEOS-13 (s = 2.05 m)	59.0 - 63.5	1.89	239
2	E8e2	AEOS-6P/2P (s = 8.00 m)	31.0 - 31.25	5.20	324
		AEOS-2P (s = 8.00 m)	29.75 - 30.0	3.95	236
		AEOS-4P (s = 4.03 m)*	56.0 - 56.0*	2.28	260*

NOTA: (*) Ensayo defectuoso y (**) Suplemento teórico por ajuste de la Curva de Dispersión.

TABLA 4. Valores medios de V_s (m/seg) de los terraplenes de las estructuras ensayadas deducidos a partir de las "discontinuidades" de las curvas de fase experimentales (fases 1 y 2).

REFERENCES

CUÉLLAR, V.; J. VALERIO y F. MUÑOZ 1993. Dynamic characterization of the layers of a test track in the CEDEX Road Research Center using SASW method. XIIIth IRF World Meeting, Vol. IV: 1281-1292.

CUÉLLAR, V. 1997. Geotechnical applications of the spectral analysis of surface waves. Modern Geophysics in Engineering Geology, Geological Society Engineering Geology Special Publication No. 12, pp 53-62.

JAMIOLKOWSKI, M.; D. C. F. LO PRESTI Y O. PALLARA 1995. Role of in situ testing in geotechnical earthquake engineering. State of the art #7. Proc. 3rd Int. Conf. on Recent Adv. in GEE and SD, Vol IIIA: 5-24.

ROESSET, J. M.; D. W. CHANG y K. H. STOKOE II 1991. Comparison of 2-D and 3-D models of analysis of surface wave tests. Proc. 5th ICSDEE: 111-126.

STOKOE II, K. H. y S. Nazarian 1983. Effectiveness of ground improvement from spectral analysis of surface waves. Proc. 8th ECSMFD: 91-94.

STOKOE II, K. H.; S. G. WRIGTH; J. A. BAY y J. M. ROESSET 1994. Characterization of geotechnical sites by SASW method. Technical Review: Geophysical Characterization of Sites, ISSMFE Technical Committee #10: 15-25.

WRIGTH, S. G.; J. M. ROESSET y K. H. STOKOE II 1991. Analytical and experimental studies of surface wave measurements to detect gas hydrates offshore. Proc. 23th Annual OTC: 317-324.

UNA VEZ MÁS SOMOS LOS PRIMEROS



Certificado Nº 43.207

Primera empresa de ingeniería certificada en ISO 9001:
**“Diseño, construcción y operación
de todo tipo de plantas de tratamiento de agua”**

