

# Comparación entre las técnicas AEOS, Re-Mi y PS-logging aplicadas en un terreno de estructura profunda conocida

## Comparison among SASW, Re-Mi and PS-logging techniques applied on a site of known deep structure

J. García-Mayordomo<sup>1,2</sup>, I. Pérez Santisteban<sup>1</sup>, V. Pantín<sup>1</sup>, A. Muñoz Martín<sup>3</sup> y A. Carbo<sup>3</sup>

- 1 Laboratorio de Geotecnia (CEDEX) c/Alfonso XII, 3 Madrid 28007 itziar\_psantis@hotmail.com virginia.pantin@cedex.es  
2 Actualmente en Instituto Geológico y Minero de España (IGME) c/La Calera, 1 Tres Cantos (Madrid) 28760 julian.garcia@igme.es  
3 Dpto. de Geodinámica, Fac. de CC. Geológicas (UCM), C.Universitaria, s/n Madrid 28040 amunoz@geo.ucm.es carbo@geo.ucm.es

**Resumen:** En este estudio se contrastan los resultados que ofrecen dos técnicas de uso habitual en el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, el AEOS y el PS-logging, con los de una técnica relativamente novedosa, el Re-Mi (o sísmica pasiva). Para ello se emplean los resultados obtenidos por las tres técnicas en un emplazamiento común de estructura profunda conocida: un tramo de terraplén ferroviario recién construido. La técnica más precisa en la identificación de las diferentes partes de la estructura de tierras (terraplén, cimientado y contacto con el terreno natural) es el PS-logging, seguido por el AEOS y Re-Mi. Los valores de Vs promedio proporcionados por cada técnica presentan importantes diferencias, obteniéndose los más altos con el PS-logging, seguido por AEOS y Re-Mi. La desviación de los valores Vs promedio obtenidos por una técnica en particular, en comparación con las otras, es similar. Respecto a la técnica Re-Mi, cabe destacar que, si bien no se ha mostrado muy precisa en este estudio, presenta un alto grado de operatividad en cuanto a implantación, ejecución y procesado de datos.

**Palabras clave:** Geotecnia, geofísica, ondas de corte, ondas superficiales, sísmica pasiva.

**Abstract:** The results obtained by SASW and PS-logging (In-hole) seismic techniques are compared to the relatively new Re-Mi (refraction-microtremor) method at a common site of known deep structure: a recently constructed railway track embankment. PS-logging is the most accurate technique in identifying the structure of the embankment followed by SASW and Re-Mi. Mean shear wave velocity estimations are also higher for PS-logging, followed by SASW and Re-Mi, while mean deviation is similar in each technique. The Re-Mi technique has not been shown to be particularly accurate in this study, though fast data processing makes it very convenient for extensive geotechnical surveys.

**Key words:** Spain, geotechnics, geophysics, shear waves, surface waves, ambient noise.

## INTRODUCCIÓN

La determinación de la velocidad de propagación de las ondas de corte (Vs) en el terreno tiene una gran importancia en geotecnia por su relación directa con las propiedades tenso-deformacionales de los suelos. Existen diversas técnicas geofísicas que permiten caracterizar la Vs de un terreno, cada una presentando una serie de ventajas y desventajas muy claras. El propósito de este trabajo, sin embargo, no es estudiar esta cuestión, sino analizar comparativamente los resultados que produce una u otra técnica aplicadas a un mismo problema. Concretamente, las técnicas que van a compararse son: el análisis espectral de ondas superficiales (AEOS), la técnica PS-logging (*In-hole* o *Suspension logging*) –ambas de uso habitual en el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX (Cuellar y Valerio, 2000; Valerio, 2004), y, la relativamente novedosa técnica Re-Mi (*Refraction-Microtremor* o sísmica pasiva) (Louie, 2001); aplicadas las tres a un problema común: determinar la variación de la Vs con la profundidad en un terreno de estructura conocida: concretamente, una sección de un terraplén ferroviario.

La sección de terraplén objeto de estudio se localiza en la línea de alta velocidad Madrid-Valladolid, dentro del municipio de Madrid (Fig. 1). El terraplén tiene una altura de 15,5 m aproximadamente, medidos desde el nivel de la capa de forma en el eje de la plataforma, hasta terreno natural saneado, compuesto por arena de miga compacta. La base del terraplén está formada por una capa de grava (material tipo pedraplén y de transición), con un espesor aproximado de 1,5 m, emplazado sobre un geotextil.

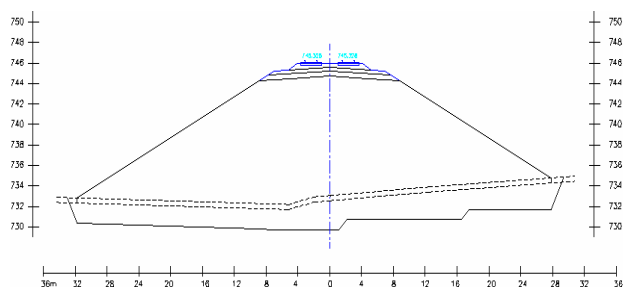


FIGURA 1. Sección transversal del terraplén objeto de estudio.

ANTECEDENTES

Durante los meses de Junio y Julio de 2005 el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX llevó a cabo una campaña de AEOS, y, adicionalmente, en Febrero de 2006 ejecutó un ensayo PS-logging. Posteriormente, en 2007, el Grupo de Geofísica del Departamento de Geodinámica de la Universidad Complutense de Madrid, realizó una campaña de Re-Mi durante una mañana.

La campaña de AEOS se realizó para tres puntos alineados dentro de una misma sección transversal (Fig. 2): uno situado en el eje de la plataforma (punto P1C) y los otros dos en los ejes respectivos de las futuras vías del ferrocarril (puntos P2 y P3). Los ensayos se realizaron en cuatro orientaciones perpendiculares entre sí, según las direcciones longitudinal y transversal de la traza del terraplén, y en sus dos sentidos opuestos, considerándose separaciones desde 0,5 a 32 m (Manzanas, 2006). En la Figura 3 se muestra el modelo de capas en términos de Vs obtenido para los tres puntos analizados a partir de la modelización teórica de las curvas de dispersión mediante el programa SASW del Laboratorio de Geotecnia.

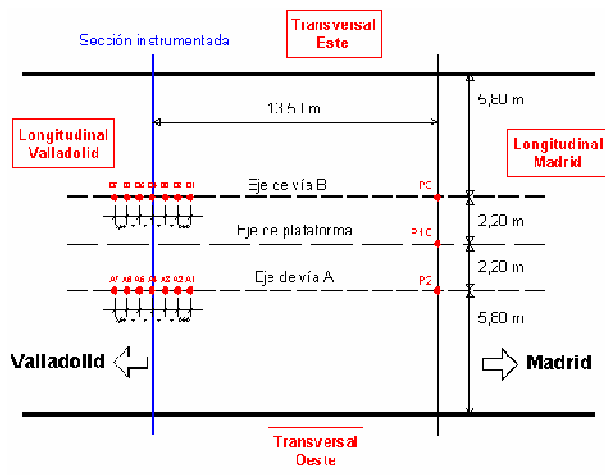


FIGURA 2. Croquis de los puntos y orientaciones ensayados en la campaña de AEOS. Modificado de Manzanas (2006).

En la campaña de Re-Mi se ensayaron los mismos puntos que en el AEOS. Por cada punto se extendió una línea de 24 geófonos de 10 Hz separados 2 m. Dado que la superficie del terraplén presentaba la capa de subbalasto extendida no fue posible hincar los geófonos, disponiéndose estos en el interior de macetas de plástico rellenas de arena ligeramente humedecida. Por cada ensayo se tomaron 10 registros de 30 s de duración con un intervalo de muestreo de 2 ms. Dado que el ruido ambiente natural no producía suficiente señal, se procedió a generar ruido mediante la circulación de un todoterreno a lo largo de la implantación, así como a golpear con maza una placa metálica. En la Figura 4 se presentan los modelos de capas obtenidos en cada uno de los tres puntos estudiados, así como su promedio. El procesamiento de los datos fue realizado por el Grupo de Geofísica de la UCM mediante el software SeisOpt ReMi.

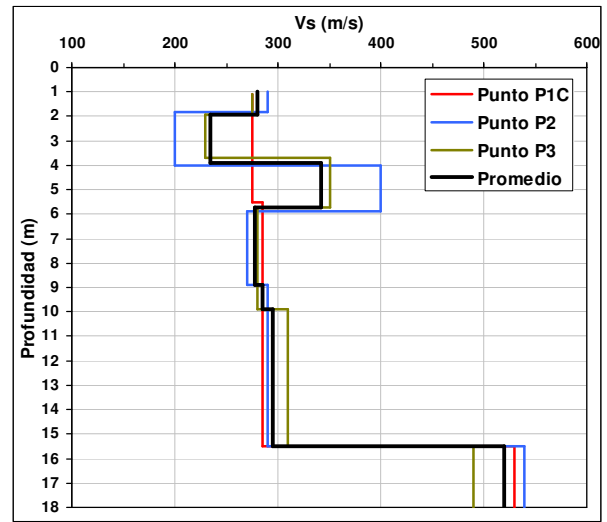


FIGURA 3. Modelos de capas obtenidos con el AEOS en cada punto estudiado (modificado de Manzanas, 2006). Se representa también el modelo de capas promedio.

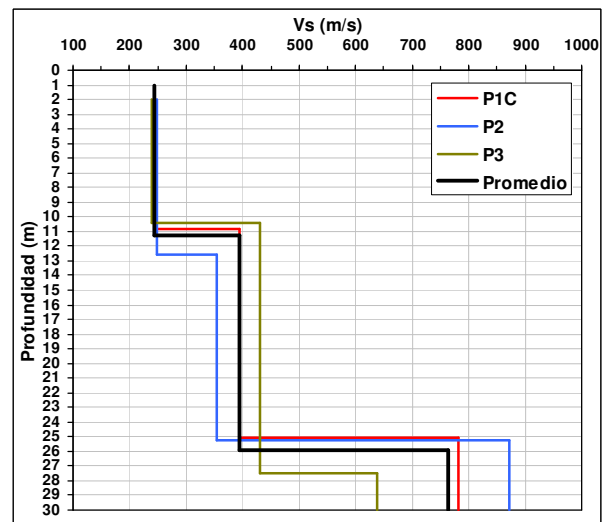


FIGURA 4. Modelos de capas obtenidos con el Re-Mi en cada punto estudiado. Se representa también el modelo de capas promedio.

Los ensayos PS-logging se realizaron con la sonda Suspension PS-Logging 3302A de la casa OYO, en un sondeo perforado al efecto en el eje de la plataforma y desplazado unos 6 m de la sección instrumentada del terraplén en dirección Valladolid (Fig. 2). El sondeo, de diámetro 90 mm, y entubado con PVC, tenía una profundidad de 27,20 m, atravesando completamente el cuerpo del terraplén y penetrando unos 11 m dentro del terreno natural. Tras inundar totalmente el sondeo, y comprobarse que las pérdidas eran mínimas, se procedió a ejecutar el ensayo en avances de 1 m, registrando desde la profundidad 21,8 a 1,8 m. El ensayo se realizó para dos anchos de pulso diferentes: 0,4 ms (ensayo #1) y 1,6 ms (ensayo #2). El ancho de pulso controla la energía liberada por la fuente de excitación. Los perfiles de velocidad de ondas de corte con la profundidad obtenidos en los dos ensayos se comparan en la Figura 5, donde también se representa el promedio de ambos ensayos. El picado de la onda S se realizó mediante el programa PS-Log de la casa OYO.

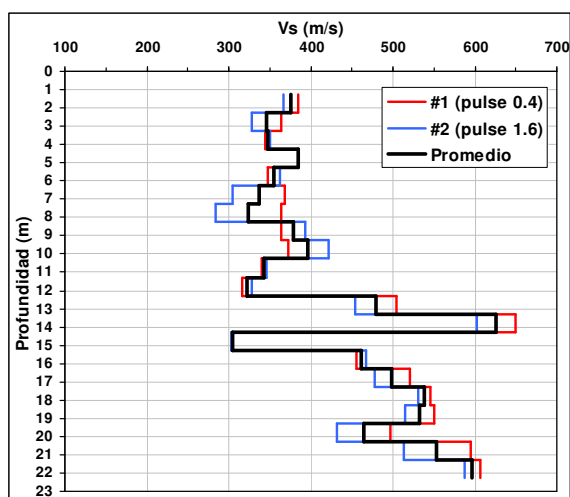


FIGURA 5. Perfiles de Vs con la profundidad obtenidos con el PS-logging (modificado de García-Mayordomo, 2006). Se representa también el perfil promedio.

## OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

Los objetivos de este trabajo son, en primer lugar, analizar los resultados obtenidos por cada técnica en relación con la precisión en la identificación de la estructura del terraplén. En segundo lugar, analizar la desviación de los resultados entre técnicas y, finalmente, analizar la desviación propia de cada técnica.

El análisis de la precisión de los resultados se analiza por comparación con las diferentes partes que se conoce componen la estructura de tierras: espesor del terraplén, profundidad de la capa de cimentación (pedraplén) y espesor de ésta, y profundidad del contacto con el terreno natural. El análisis de la dispersión de los resultados se realiza asumiendo que las medidas en los puntos P1C, P2 y P3, se corresponden, en realidad, con un solo emplazamiento ensayado tres veces. Esta asunción es aceptable, dado que la distancia entre los tres puntos es de tan solo 2,20 m (ver Fig. 2). De este modo, para una misma técnica, se calcula el valor promedio de los tres ensayos y su correspondiente dispersión. Por otra parte, este valor promedio se compara con el valor promedio obtenido por las otras técnicas.

Los resultados del PS-logging se admiten comparables con los obtenidos por el AEOS y el Re-Mi en los puntos P1C, P2 y P3, si bien el sondeo se sitúa a unos 20 m del punto P1C. Esta asunción es admisible, dado que el perfil del terraplén apenas varía en tan pequeña longitud.

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En la Figura 6 se muestran conjuntamente los resultados medios obtenidos por cada una de las tres técnicas estudiadas. El resultado medio mostrado es la velocidad promedio de las ondas de corte, que en el caso del AEOS y Re-Mi es la media de los tres puntos

ensayados (P1C, P2 y P3), y en el caso del PS-logging es la media de los dos ensayos realizados.

La técnica que mejor detalle proporciona, obviamente, es el PS-logging. Destaca la localización de la capa de pedraplén en la base de la estructura de tierras, representada por un fuerte pico de Vs, así como el contacto con el terreno natural, representado por un decremento de Vs, que puede ser atribuido al geotextil emplazado en el contacto. En el cuerpo del terraplén se identifican una serie de irregularidades, básicamente: una bajada de Vs en el tramo 2-4 m de 375 m/s hasta 346 m/s, seguida de una subida en el tramo 4-5 m hasta 355 m/s, y una nueva subida en el tramo 8-10 m de 323 a 397 m/s.

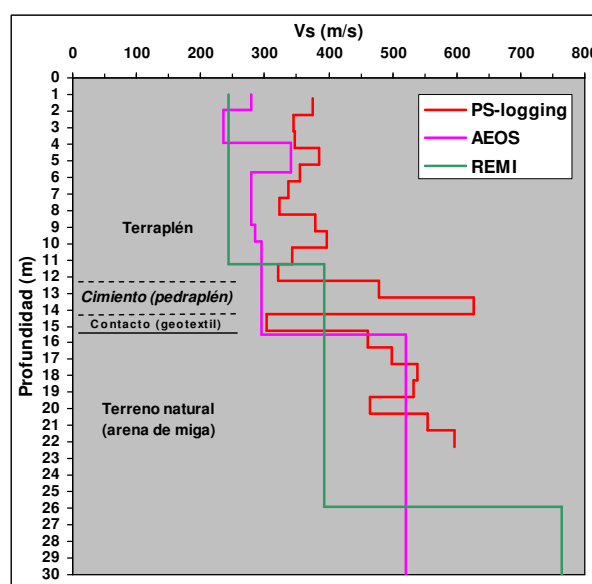


FIGURA 6. Comparación de los perfiles de velocidad promedio obtenidos con cada técnica en relación con la estructura del terraplén.

La técnica AEOS es la segunda más precisa, cuestión puesta de manifiesto por la concordancia que muestra el modelo de capas con las irregularidades detectadas en el terraplén por el PS-logging (Fig. 6). Concretamente, el AEOS detecta también una bajada de Vs en el tramo 2-4 m, una subida en el tramo 4-6 m, y, aunque tímidamente, una nueva subida en el tramo 8-10 m. Sin embargo, la capa de pedraplén no es detectada. Conviene señalar que la profundidad del contacto con el terreno natural fue fijada en el proceso de inversión. No obstante, con objeto de calibrar la precisión en la identificación de este contacto, el proceso de inversión fue repetido, estimándose en este caso la profundidad del contacto a 17 m, es decir, tan solo 1,5 m por debajo de la profundidad real.

La técnica Re-Mi es la que menor precisión de las tres proporciona, distinguiendo tan solo dos grandes capas (Fig. 6). La primera, comprende los primeros 11 m del terraplén, y, la segunda, hasta los 26 m de profundidad. Esta situación supone que en el proceso de inversión, realizado a ciegas y sin fijar la capa de terreno natural, se ha englobado el cimiento del terraplén con el terreno natural.

En la Tabla I figuran las velocidades promedio, y su desviación, obtenidas por cada técnica para diferentes capas de terreno consideradas. De las tres técnicas, el PS-logging es la que proporciona los valores de Vs más altos. Para el cuerpo del terraplén, hasta los 12 m, estima una Vs promedio de 355 m/s, valor que contrasta fuertemente con los 288 m/s del AEOS o los 244 m/s del Re-Mi.

Capas	Prof. (m)	AEOS	PS-logging	Re-Mi
Terraplén	2 – 4	235 ( $\pm 27$ )	356 ( $\pm 16$ )	244 ( $\pm 3$ )
	4 – 6	342 ( $\pm 44$ )	370 ( $\pm 15$ )	
	6 – 11	288 ( $\pm 8$ )	350 ( $\pm 30$ )	394 ( $\pm 26$ )
	11 – 13		553 ( $\pm 73$ )	
Pedraplén	13 – 14		304 ( $\pm 1$ )	
Contacto	14 – 15,5	509 ( $\pm 38$ )		
Terreno natural	15,5 – 22	520 ( $\pm 20$ )	509 ( $\pm 38$ )	764 ( $\pm 84$ )
	22 – 26	–	–	
	26 – 30	–	–	

TABLA I. Valores promedio de Vs en m/s obtenidos para diferentes espesores de terreno. Entre paréntesis se indica la desviación promedio (promedio de las desviaciones absolutas de la media).

Estas diferencias tan importantes podrían explicarse, entre otras razones, como un efecto del diferente volumen de suelo muestreado por cada técnica en relación con la profundidad. Por ejemplo, en el PS-logging se muestrea 1 m de terreno adyacente a las paredes del sondeo, independientemente de la profundidad. En cambio, en el AEOS, aumentar la profundidad de muestreo implica separaciones mayores de los sensores para poder registrar ondas superficiales de longitud mayor, y, por tanto, afectando espesores de terreno mayor. En el caso del Re-Mi, donde se emplean líneas de geófonos del orden de decenas de metros, el volumen muestreado es mucho mayor. Además, esta técnica proporciona la velocidad mínima de ondas Raleygh.

En cuanto a la desviación que presentan los valores promedio de Vs (Tabla I) se observa que ésta es del orden de 10-40 m/s, considerando globalmente todas las técnicas. Una excepción importante es, en el caso del PS-logging, la desviación de la Vs para la capa de pedraplén ( $\pm 73$  m/s).

Resulta muy difícil pronunciarse sobre qué técnica ofrece los resultados con menor desviación. Esta cuestión que, aparentemente podría tratar de dilucidarse en este estudio, dado que consideramos que estamos realizando ensayos repetidos en un mismo emplazamiento de estructura conocida, no es concluyente. La desviación puede estar controlada por factores externos, como la presencia de ruido en el AEOS o PS-logging, o, contrariamente, la escasez de ruido en el Re-Mi; además del juicio experto del analista en la toma y procesamiento de datos, calidad del instrumental, etc.

## CONCLUSIONES

La técnica más precisa en la identificación profunda de la estructura de tierras estudiada es, evidentemente,

el PS-logging. No obstante, los resultados del AEOS también son muy satisfactorios, aunque no alcanzan el mismo detalle, particularmente en la detección de la capa de pedraplén que conforma el cimiento. La resolución vertical en profundidad mejora en el caso de un mayor ruido ambiental (zonas urbanas), o si se utilizan geófonos de 4,5 Hz. El Re-Mi ha proporcionado resultados muy groseros, pero aceptables si se considera el alto grado de operatividad de esta técnica.

Los valores promedio de Vs estimados por cada técnica son muy diferentes. El PS-logging proporciona los valores más altos, seguido del AEOS y del Re-Mi. Este efecto puede ser debido, entre otros, a los diferentes volúmenes de suelo que prospecta cada técnica en relación con la profundidad.

No ha podido extraerse ninguna conclusión sobre qué técnica proporciona medidas más estables, menos dispersas, cuando se repite un ensayo en un mismo emplazamiento. En general, y globalmente para las tres técnicas estudiadas, la desviación de las velocidades promedio obtenida en este trabajo se sitúa en un rango de 10 a 40 m/s.

Finalmente, merecen destacarse las interesantes aplicaciones que puede tener el Re-Mi en geotecnia. Si bien, aparentemente, no es una técnica particularmente precisa para trabajos de detalle, su alta operatividad y la posibilidad de obtener fácilmente secciones 2D profundas, puede ser muy valiosa para estudiar tramos kilométricos de infraestructuras lineales, en estudios de mejora del terreno que abarquen áreas extensas, para reconocimientos no invasivos y no destructivos en entorno urbano, etc. (Muñoz y Carbó, 2006).

## REFERENCIAS

- Cuéllar, V. y Valerio, J. (2000): Aplicaciones geotécnicas del análisis espectral de ondas superficiales. En: *Libro Homenaje a José Antonio Jiménez Salas. Geotecnia en el año 2000*. Ministerio de Fomento, CEDEX, Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica.
- García-Mayordomo, J. (2006): *Informe del ensayo PS-logging en la L.A.V. Madrid-Valladolid*. Laboratorio de Geotecnia (CEDEX), documento interno.
- Louie, J.N. (2001): Faster, Better: Shear-Wave Velocity to 100 meters Depth from Refraction Microtremor Arrays. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(2): 347-364.
- Manzanas, J. (2006): *Informe de la campaña de AEOS en la L.A.V Madrid-Valladolid*. Laboratorio de Geotecnia (CEDEX), documento interno.
- Muñoz Martín, A. y Carbó Gorosabel, A. (2006): Resultados y experiencias de aplicación de Refracción por Microtremor (Sísmica Pasiva) para la investigación geofísica de las nuevas líneas de metro en Madrid (España). *Geogaceta*, 40, 51-54.
- Valerio, J. (2004): *Aplicaciones del PS-logging*. Máster en Mecánica del Suelo e Ingeniería de Cimentaciones. Laboratorio de Geotecnia, CEDEX, Madrid.