

El método de la *Sísmica Pasiva*: una herramienta fiable para la caracterización geotécnica del terreno en zonas urbanas

En este artículo se describe el nuevo método geofísico de la *Sísmica Pasiva*, que consiste en determinar la distribución de los valores de la velocidad de transmisión de las ondas de cizalla (V_s) a través del terreno hasta varias decenas de metros de profundidad. Este proceso se lleva a cabo a partir del análisis espectral de las ondas superficiales del tipo *Rayleigh*, incluidas en el ruido sísmico ambiental producido por el tráfico y por otras actividades características de los medios urbanos. El importante significado geotécnico de los valores de V_s del terreno justifica el interés de este tipo de estudios, especialmente en zonas urbanas en las que se proyecten o ejecuten obras subterráneas de cierta importancia. Dado el elevado nivel del ruido sísmico ambiental y otras interferencias de diversa naturaleza no es factible la aplicación de métodos geofísicos convencionales en este tipo de medios.

La ejecución de diversos tipos de obras subterráneas de cierta importancia requiere conocer con el mayor detalle posible las características geotécnicas del terreno, tanto para su mejor diseño como para minimizar el posible impacto en su entorno. Esta necesidad se hace más evidente si las obras se realizan en medios urbanos, en los cuales han de tomarse precauciones adicionales que eviten afecciones a los edificios o a las estructuras situadas en superficie. Esto exige el reconocimiento detallado del terreno, especialmente en puntos singulares que puedan considerarse más problemáticos tales como zonas de relle-

nos o zonas alteradas del subsuelo en la proximidad de colectores o de otras obras o edificios.

Esta información necesaria para la planificación y ejecución de los trabajos se obtiene habitualmente mediante sondeos y ensayos geotécnicos estándar, cuya principal limitación es su carácter puntual así como la imposibilidad de realizarlos en todos los emplazamientos dónde sería deseable, tanto por razones económicas como por la imposibilidad física de su ejecución en ciertos puntos. En estudios geotécnicos convencionales es habitual tratar de complementar la información obtenida en los

Palabra clave: ANÁLISIS ESPECTRAL, DIAGRAMA P-F, DISPERSIÓN, MEDIOS URBANOS, MODELIZACIÓN, OBRAS SUBTERRÁNEAS, ONDAS RAYLEIGH, RUIDO SÍSMICO, V_s -30.

Ángel GRANDA SANZ^(*), Teresa GRANDA PARÍS^(*), Alejandro MADRID CONTRERAS^(*).

^(*)Ingenieros de Minas, INTERNATIONAL GEOPHYSICAL TECHNOLOGY, S.L.

sondeos mediante los estudios del terreno por métodos geofísicos tales como la tomografía eléctrica, la sísmica de refracción o las medidas sísmicas en sondeos en sus diversas variantes.

Sin embargo, la aplicación de la mayoría de los métodos geofísicos convencionales en medios urbanos resulta cuando menos muy problemática y en muchos casos inviable. En concreto, el considerable nivel del ruido sísmico ambiental existente incluso en momentos de aparente quietud del tráfico puede enmascarar totalmente la señal útil en las medidas sísmicas de refracción o de reflexión haciendo imposible la ejecución de este tipo de estudios.

La situación es tal vez peor en lo que respecta a los métodos como la tomografía eléctrica basados en las medidas de la resistividad aparente del terreno. La existencia de elementos metálicos (tuberías, vallas, puntos de luz, indicadores de tráfico, etc) en contacto eléctrico con el suelo en la proximidad de los puntos de medida provoca importantes distorsiones en éstas y lleva finalmente a resultados poco fiables o incluso completamente erróneos.

El método de la *Sísmica Pasiva* que se presenta en este artículo aparece descrito a veces en la bibliografía anglosajona como *Refraction Microtremor (ReMi)* y presenta algunas similitudes con los conocidos métodos SAWWS (*Spectral Analysis of Surface Waves*) y MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*), basados ambos en el estudio de las ondas superficiales



[Foto 1]
Detalle del equipo de registros.

del tipo *Rayleigh*. Este método de la Sísmica Pasiva consiste básicamente en *determinar la distribución de los valores de la velocidad de transmisión de las ondas de cizalla (V_s) a través del terreno, a partir del análisis espectral del ruido sísmico ambiental* convenientemente registrado.

El importante *significado geotécnico de los valores de V_s del terreno* hace que el método que se presenta sea de indudable interés. El método ha sido suficientemente contrastado y ha demostrado ser una opción fiable para la caracterización geotécnica del terreno en medios urbanos o en la proximidad de autopistas, aeropuertos o vías férreas donde se da la circunstancia de que precisamente por ser muy alto el nivel de ruido ambiental no es factible la ejecución de otros tipos de estudios sísmicos.

Una característica ventajosa del método, es no solamente su viabilidad de empleo en este tipo de ambientes sino también su capacidad para investigar de *forma sencilla hasta varias decenas de metros de profundidad incluso en medios en los cuales se den inversiones de velocidad*, es decir donde V_s no crezca necesariamente con la profundidad, tal como requiere por ejemplo el método sísmico de refracción.

Aunque para los fines de esta publicación nos centremos específicamente en el significado de los valores de V_s como parámetro directamente relacionado con la *consistencia del terreno*, cabe mencionar que el valor medio de los valores de V_s para los 30 metros más superficiales del terreno ($V_s 30$) constituye un parámetro universalmente aceptado para la clasificación de suelos, según las normas de la *IBC (International Building Code)* que se reproduce en la [Tabla I]. Estas normas y recomendaciones se refieren a la *respuesta del terreno frente a movimientos sísmicos* y específicamente los efectos de amplificación de las ondas de cizalla en los niveles superficiales. El método de la Sísmica Pasiva permite determinar de forma rápida y fiable los valores ($V_s 30$) para la caracterización del terreno en los em-

IBC TABLE 1615.1.1: Site Class Definitions				
Site Class	Soil profile name	Average properties in top 30 m, as per section 1615.1.5		
		Soils shear wave velocity, V_s (m/s)	Standard Penetration resistance, N	Soil undrained shear strength, S_u (psf)
A	Hard Rock	$V_s > 1,524$	Not applicable	Not applicable
B	Rock	$762 < V_s \leq 1.524$	Not applicable	Not applicable
C	Very dense soil & soft rock	$365,7 < V_s \leq 762$	$N > 50$	$S_u \geq 2.000$
D	Stiff soil profile	$182,9 < V_s \leq 365,7$	$15 \leq N \leq 50$	$1.000 \leq S_u \leq 2.000$
E	Soft soil profile	$V_s < 182,9$	$N < 15$	$S_u < 1.000$
E	-	Any profile with more than 10 feet of soil having the following characteristic: 1. Plasticity index $PI > 20$ 2. Moisture content $\omega \geq 40\%$, and 3. Undrained shear strength $S_u < 1.000$		
F	-	Any profile containing soils having one or more of the following characteristic: 1. Soils vulnerable to potential failure or collapse under seismic loading such as liquefiable soils, quick and highly sensitive clays, collapsible weakly cemented soils. 2. Peats and/or highly organic clays ($H > 3,048$ m of peat and/or highly organic clay where H = thickness of the soil). 3. Very high plasticity clays ($H > 7,62$ m with plasticity index $PI > 75$). 4. Very thick soft/medium stiff clays ($H > 36,576$ m).		

For S1: 1 foot = 0,3048 m; 1 foot = 304,8 mm; 1 square foot = 0,0929 mm²; 1 pound per square foot = 0,0479 kPa

■ [Tabla I] **Clasificación de suelos según el International Building Code (IBC).**

plazamientos de edificios de nueva construcción. Esta es una aplicación de uso sistemático en países como EE.UU. y Japón.

El método de la Sísmica Pasiva, una solución ingeniosa y eficaz

Conceptos básicos que conviene conocer

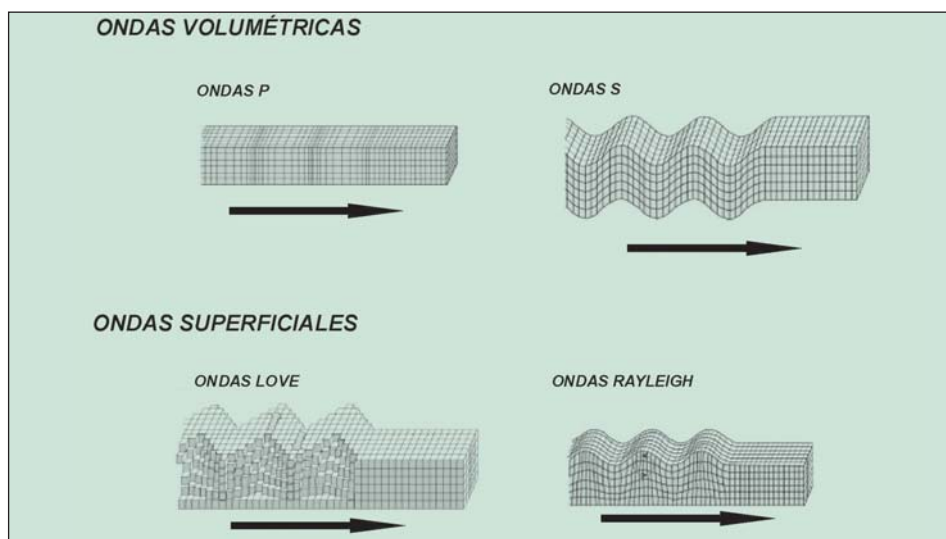
El objetivo del método de la Sísmica Pasiva es evaluar de forma indirecta y no destructiva la consistencia del terreno, determinando para

ello la velocidad V_s de los materiales a partir del análisis de las ondas superficiales del tipo *Rayleigh* incluidas en el ruido sísmico ambiental. Los fundamentos en que se basa este método para determinar los valores de V_s del terreno a partir del análisis de las ondas *Rayleigh* son los siguientes:

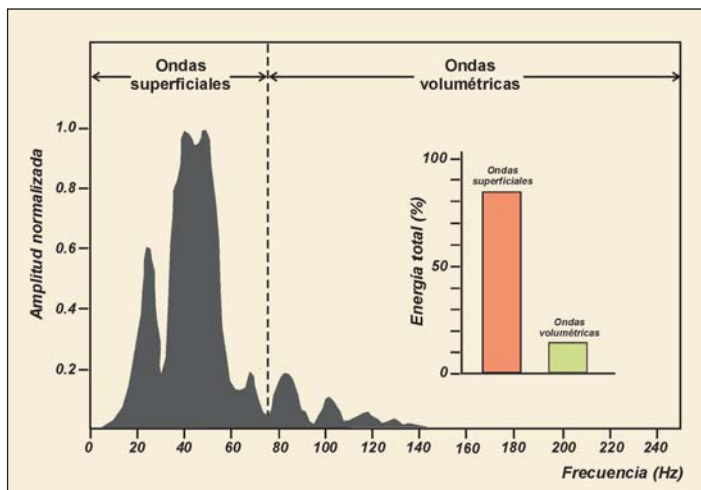
- Mayor facilidad de adquisición y procesado. Cualquier profesional de la Geofísica conoce la dificultad que conlleva generar, registrar e identificar las ondas S en los sismogramas mientras que las ondas superficiales, *Rayleigh* o *Love*, son fácilmente obser-



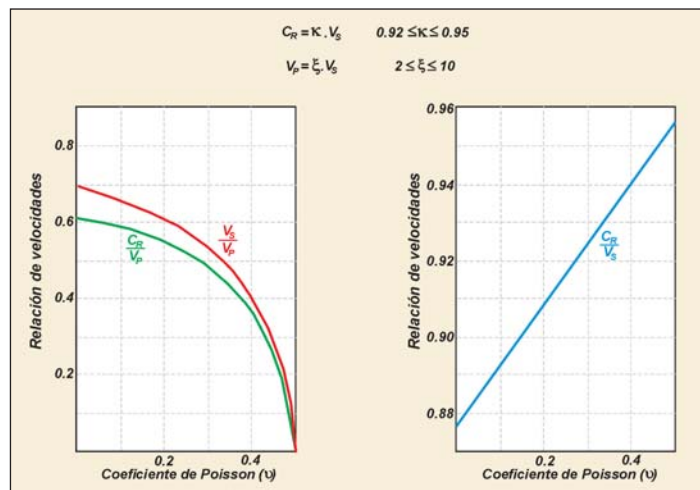
■ [Foto 2] **Ejecución de medidas de Sísmica Pasiva en una calle de Madrid.**



■ [Figura 1] **Diferentes tipos de ondas producidas por la liberación instantánea de un pulso de energía en el terreno.**



[Figura 2] Nivel de energía de las ondas volumétricas y de las ondas superficiales.



[Figura 3] Relaciones entre las velocidades de las ondas compresionales (V_p), de cizalla (V_s) y superficiales Rayleigh (C_R).

- vables y se generan junto con las ondas volumétricas al liberar instantáneamente un pulso de energía en la superficie del terreno.
- Mayor relación señal/ruido de las ondas Rayleigh debido a su mayor nivel de energía respecto a las ondas volumétricas [Figura 2] que incluyen tanto a las ondas P como a las ondas S .
 - La velocidad de transmisión de las ondas Rayleigh (C_R) es prácticamente igual a V_s y la relación entre ambas es constante para cualquier valor del Coeficiente de Poisson, cosa que no sucede con la relación entre V_p y V_s [Figura 3].

- nos remitimos a la [Figura 4], dónde se ilustran de forma esquemática los conceptos de frecuencia (f) y periodo (T), velocidad de fase (C), longitud de onda (λ), series temporales, etc.
- Respecto a las propiedades de las ondas Rayleigh, las más relevantes a efectos prospectivos se describen en la [Figura 5] y las enumeramos a continuación:
- Estas ondas se transmiten por la superficie del terreno aunque afectando a un rango de profundidad que es proporcional a su longitud de onda (λ).
 - Su velocidad de propagación, que se define como velocidad de fase C_R , es determinada principalmente por la velocidad V_s de los materiales. La relación entre ambas se expresa como $C_R = 0,94 V_s$.

- Su amplitud vertical disminuye con la profundidad y el movimiento de partícula asociado a ellas es de tipo elipsoidal, con el eje mayor en disposición vertical y en el sentido de avance del frente de ondas.

El concepto de dispersión de las ondas Rayleigh

Este es un concepto fundamental relativo a la transmisión de las ondas Rayleigh por el terreno y a la forma en que el método de la Sísmica Pasiva, al igual que otros métodos (SASW y MASW) basados en el estudio de las ondas superficiales puede resolver y caracterizar las diferentes capas sísmicas del terreno. C. Park 2005 describe perfectamente este concepto mediante el esquema que se repro-

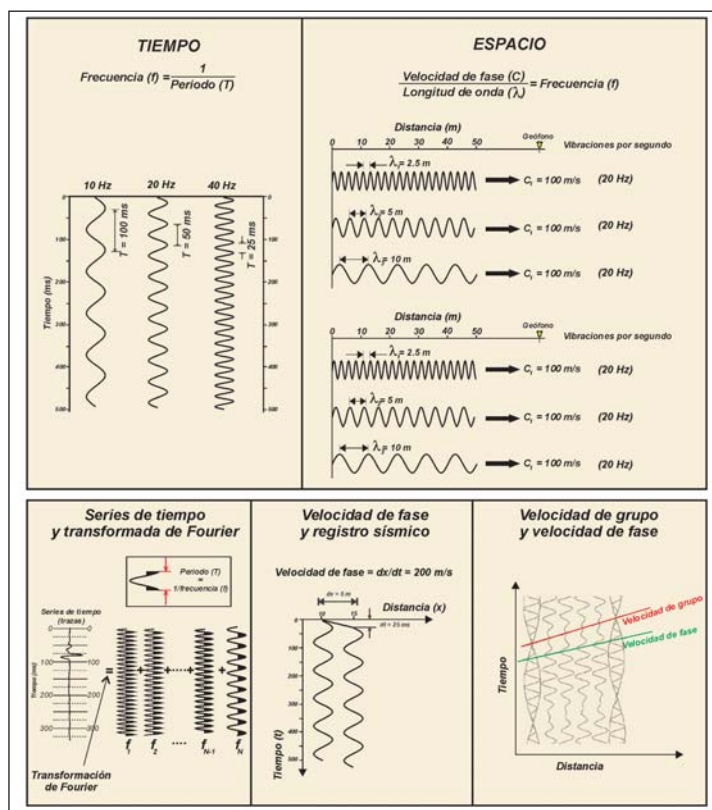
En un registro del ruido sísmico ambiental se incluyen diversos tipos de ondas generadas por el tráfico de cualquier tipo, el movimiento de las personas, el viento, y por cualquier actividad característica de los medios urbanos. Estas ondas pueden ser de compresión o de cizalla, tanto directas como refractadas o reflejadas, ondas superficiales, ondas aéreas, etc. Es decir, que el registro del ruido sísmico ambiental incluye un amplio conjunto de eventos sísmicos con diferentes características. Sin embargo, veremos que es factible extraer información útil de este aparente caos.

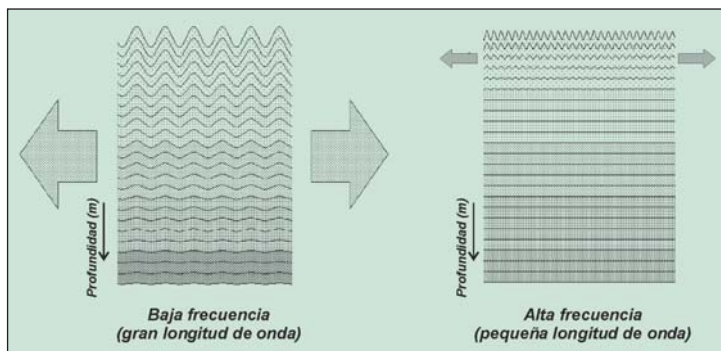
Una de las ideas fundamentales en que se basa el método de la Sísmica Pasiva es que la transformada ($p-f$) bidimensional (inversa de la velocidad-frecuencia) de un registro sísmico de ruido ambiental permite separar las ondas Rayleigh de cualquier otro tipo de ondas, superficiales o volumétricas y determinar su velocidad de fase en función de la frecuencia.

¿Que tienen de especial las ondas Rayleigh?

Con el fin de comprender mejor el significado y la representatividad de los resultados de cualquier estudio del terreno realizado mediante el método de la Sísmica Pasiva, conviene recordar algunos conceptos básicos de la teoría de ondas y algunas características esenciales de las ondas Rayleigh. Para lo primero

[Figura 4] Conceptos básicos de la teoría de ondas.





■ [Figura 5] **Propiedades características de la transmisión de las ondas Rayleigh.**

duce en la [Figura 6] y que explicaremos enumerando las ideas más significativas contenidas en ella:

- Se define como dispersión el cambio de velocidad de propagación de las ondas Rayleigh (C_R) en función de la longitud de onda (λ) o de la frecuencia (f).
- Este fenómeno solamente se manifiesta cuando el medio no es homogéneo en términos de la distribución de los valores de V_s según la vertical.
- En un medio con valores de V_s crecientes con la profundidad las componentes de alta frecuencia (menor longitud de onda) se transmiten a menor velocidad de fase (C_R) que las de baja frecuencia (mayor longitud de onda) que además profundizan más en el terreno.

Ejecución de las medidas y procesamiento de los registros

Una de las ventajas del método de la *Sísmica Pasiva* es que las medidas sobre el terreno pueden hacerse con instrumentación sísmica relativamente convencional, empleando sísmógrafos multicanal, con convertidores A/D de 24 bits y con capacidad de realizar registros de 30 segundos de longitud como mínimo. Dependiendo del rango de profundidad a estudiar se pueden utilizar geófonos con una frecuencia natural variable entre 4,5 y 15 Hz aproximadamente. El intervalo de muestreo habitual en es-

tas medidas, que deben obtenerse sin ningún tipo de filtrado y sin referencia de tiempo cero en los registros, es del orden de 2 ms.

Los sensores sísmicos pueden disponerse sobre el terreno según diversas configuraciones: lineal, en L, triangular, circular, etc. Cada una de ellas tiene *ventajas e inconvenientes dependiendo de los objetivos del estudio, aunque normalmente las diferencias entre los resultados no son relevantes tal como demuestran estudios recientes como los de Koichi Hayashi (2005)*. En la [Figura 7] se reproducen algunos de sus resultados, presentados recientemente en un congreso internacional.

Puesto que uno de los principales ámbitos de aplicación de este método es el de los *estudios en medios urbanos* un problema por resolver en cada caso es conseguir un buen acoplamiento de los sensores con el terreno. En zonas asfaltadas o pavimentadas es efectivo instalar los geófonos sobre placas metálicas que puedan desplazarse fácilmente arrastrándolas sobre el suelo. Es importante señalar que *las medidas pueden hacerse incluso en el interior de edificios*, aunque en todo caso el emplazamiento de los sensores debe cumplir algunas condiciones en cuanto a la linealidad del dispositivo y a la verticalidad de cada uno de ellos.

La profundidad de investigación que puede alcanzar fácilmente los 100 metros, depende de la longitud del dispositivo de medida con-

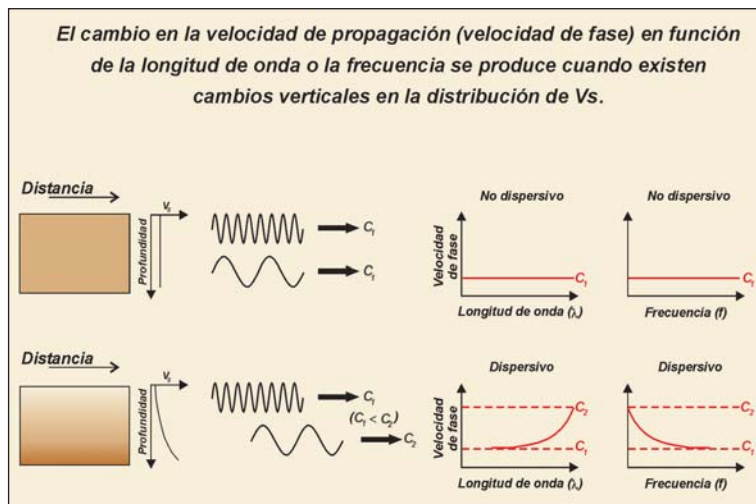
formado por los sensores. Por su parte, la separación entre los geófonos así como su frecuencia natural condicionan la capacidad de resolución para los niveles superficiales en los resultados finales del estudio.

Un procedimiento recomendable durante el proceso de adquisición de los datos es obtener un mínimo de 5 registros independientes en cada emplazamiento; después, en la fase de procesado se selecciona el que se considere mejor. Asimismo, con el fin de incrementar el contenido en altas frecuencias en los registros y con ello mejorar la resolución en los niveles más superficiales, es conveniente provocar algunos impactos con martillo en la proximidad del punto de medida.

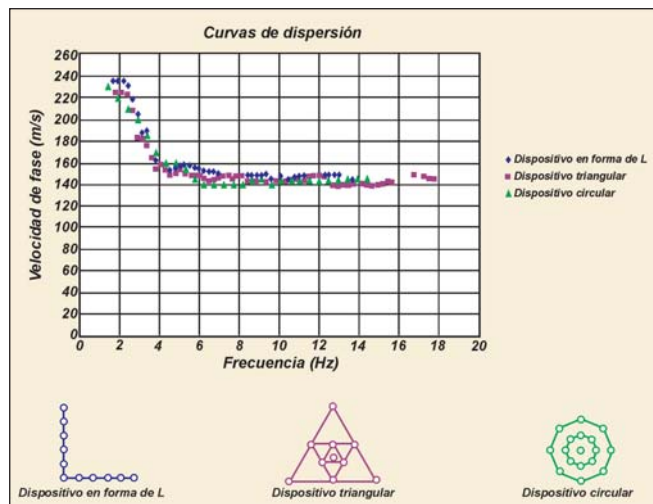
Una vez realizadas las medidas sobre el terreno, el objetivo final del estudio es obtener a partir de los registros sísmicos un modelo con la distribución de los valores de V_s del terreno en la zona de medida. Para ello el proceso de análisis e interpretación de los registros se desarrolla en tres etapas sucesivas que se ilustran de forma esquemática mediante la [Figura 8] y se resume seguidamente:

- Análisis espectral (Louie 2001)** para obtener el diagrama de velocidad aparente de fase en función de la frecuencia. Esta etapa se divide a su vez en tres apartados:
 - Transformación **p-tau** (Thorson and Claerbout, 1985). $A(p, \tau) = SA(x = jdx, t = idt = t + px)$
 - Transformación de **Fourier** (McMechan and Yedlin, 1981). $FA(p, f) = mdf = SA(p, t = ktd) e^{i2\pi m df kdt}$
 - **Análisis espectral de velocidad** (Louie 2001). Espectro de energía $SA(p, f) = FA^*(p, f) FA(p, f)$
 $SA(|p|, f) = [SA(p, f)]_{p > 0} + [SA(-p, f)]_{p < 0}$: Stotal ($|p|, f$) = S SAn (p, f).

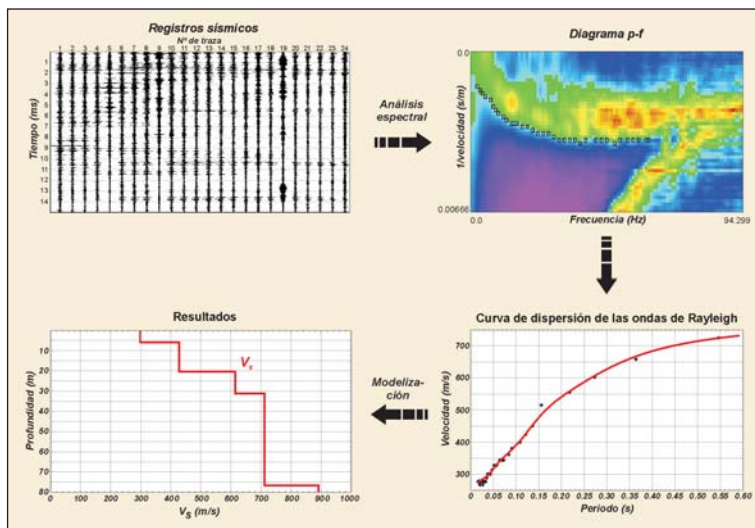
Todas las fases de los registros sísmicos aparecen representadas en el diagrama p - f resultante que pone de manifiesto el espectro de energía mediante paleta de



■ [Figura 6] **Concepto de dispersión en la transmisión de las ondas superficiales.**



■ [Figura 7] **Diversos tipos de dispositivos para la ejecución de las medidas y comparación de los resultados.**



[Figura 8] Esquema explicativo del procesamiento de los registros en el método de la Sísmica Pasiva.

lo relativo a las herramientas de adquisición y procesado está perfectamente desarrollado y en condiciones operativas; su puesta en escena a nivel mundial se ha producido de forma espectacular a partir del año 2002. No es por tanto exagerado catalogarlo como la última frontera entre los métodos no destructivos aplicables al estudio geotécnico del subsuelo, especialmente por su capacidad para proporcionar información de interés geotécnico en ambientes donde no es factible la aplicación de otros métodos geofísicos convencionales.

Este método se ha desarrollado y su utilización sistemática se ha iniciado básicamente en EE.UU. y Japón por su sencillez y por su efectividad para la *caracterización de los terrenos en función de su comportamiento frente a movimientos sísmicos*. Paralelamente ha crecido su utilización para estudios geotécnicos clásicos en los que interesa determinar la distribución de los valores de V_s del terreno por su relación directa con su grado de consolidación y su consistencia. Un estudio detallado de la distribución de los valores de V_s puede permitir no solo la caracterización del terreno sino también la *identificación de zonas puntuales potencialmente problemáticas* tales como rellenos de cualquier naturaleza o zonas alteradas por efecto de las fugas de agua en la proximidad de colectores o tuberías de abastecimiento.

La utilización de este nuevo método geofísico está dando sus *primeros pasos en España*. En concreto se está aplicando de forma sistemática en Madrid para el reconocimiento de los trazados de las diversas actuaciones incluidas en el *Plan de Ampliación de la Red de Metro y Sistemas Ligeros 2003-2007*. Los resultados preliminares obtenidos hasta la fecha de redactar este artículo (abril 2005) pueden clasificarse como positivos en el sentido de que son coherentes con la información geotécnica disponible de las diversas zonas donde se han realizado las medidas, y permiten extrapolar de forma fiable la información puntual obtenida de los sondeos mecánicos.

Los ejemplos que se presentan a continuación corresponden a diversos ensayos que hemos realizado específicamente para esta presentación, seleccionando los puntos o zonas de medida en función de sus diferentes características geotécnicas. Presentamos estos resultados mediante los diagramas p-f (inversa de la velocidad de fase-frecuencia) y el modelo resultante con la distribución de los valores de V_s en función de la profundidad.

El primero de estos ejemplos [Figura 9] corresponde a un punto localizado en la zona alta del Paseo de la Chopera de Alcobendas constituida por materiales terciarios: arena de miga, arena tosquilla, tosco arenosos y tosco. Las medidas geofísicas se han efectuado sobre la acera del referido Paseo, y los resultados obtenidos muestran como cabía esperar un incremento progresivo de V_s con la profundidad sin ninguna anomalía digna de mención.

color para cada combinación de la inversa de la velocidad de fase (*slowness*) y la frecuencia.

b) *Obtención de la curva de dispersión correspondiente a las ondas Rayleigh*, representada por la envolvente de menor velocidad aparente de fase. Este procedimiento se realiza manualmente sobre el diagrama p-f y consiste en seleccionar específicamente las velocidades de fase correspondientes al *modo fundamental* sin tener en cuenta envolventes correspondientes a otras tendencias en el gráfico de dispersión (*higher modes*) que podrían llevar a resultados erróneos en el posterior proceso de inversión. Otras curvas de dispersión del tipo *higher mode* pueden aparecer en el diagrama p-f como tendencias de dispersión si tienen un nivel energético semejante a la correspondiente al modo fundamental. Se diferencian no obstante de esta última por ser la correspondiente a los menores valores de la velocidad aparente de fase.

Finalmente hay que llamar la atención sobre los denominados *artefactos de cálculo* de los que el más relevante es el producido por el efecto *spatial aliasing*. Se pueden identificar fácilmente en el diagrama p-f porque producen tendencias con pendiente de sentido contrario a la correspondiente al modo fundamental de las ondas Rayleigh y no tienen ningún interés para nuestros objetivos.

c) *Obtención de la distribución de los valores de V_s del terreno mediante modelización de la curva de dispersión de las ondas Rayleigh*. El procedimiento seguido es el desarrollado por Yuehua Zeng (1992) que produce resultados idénticos al de Iwata et al (1998) y al de inversión de Xia et al (1999). Consiste en realizar iteraciones sucesivas en la velocidad de fase para cada frecuencia, a partir de un premodelo establecido en base a la información geológica disponible.

Presentación de los resultados de estos estudios.

La representación gráfica de la variación de los valores de V_s del terreno con la profundidad, obtenida mediante el proceso descrito en el epígrafe anterior, puede hacerse en forma de diagramas 1D o bien mediante secciones 2D, distancia-profundidad. El empleo de una u otra forma de presentación de los resultados está condicionado en parte por el tipo de dispositivo de sensores utilizado para las medidas.

Cuando se utilizan dispositivos en L, triangulares o circulares la distribución de los valores de V_s del terreno con la profundidad se representa en forma de diagrama 1D en función de la profundidad. En el caso de que las medidas se realicen con un dispositivo lineal y cuando varias implantaciones de 24 geófonos por ejemplo se disponen contiguas configurando un perfil, los resultados se representan en forma de secciones 2D. Para su elaboración caben dos opciones principales:

- Procesar conjuntamente los 24 registros de cada implantación para obtener un modelo 1D que se asigna al punto central del dispositivo de medida. Posteriormente se construye la sección 2D correlacionando los modelos correspondientes a todas las implantaciones que alineadas forman un determinado perfil.
- Para cada implantación de 24 canales se pueden hacer varios procesados parciales para grupos de varias trazas, como por ejemplo para las trazas de la 1 a la 12, de la 6 a la 18 y de la 12 a la 24 con lo que se obtendrían tres modelos 1D independientes que después permitirían configurar una sección 2D para la implantación en cuestión.

Ejemplos representativos de ensayos realizados en Madrid

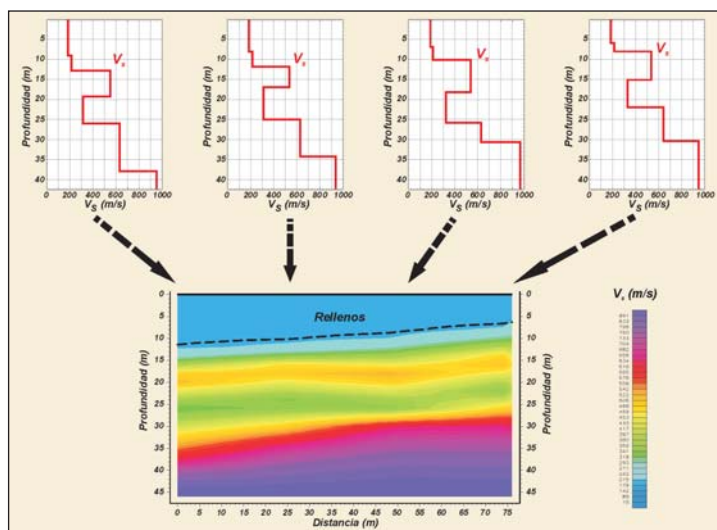
El método de la *Sísmica Pasiva* podría etiquetarse como de última generación en el sentido de que aunque en sus conceptos y en

La diferencia entre este punto y el segundo punto de ensayo, cuyos resultados se presentan en la [Figura 10] consiste en que en este último existe un recubrimiento cuaternario con varios metros de espesor formado por limos y arenas con menor consistencia que los materiales terciarios subyacentes que deben ser muy similares a los de la primera zona de ensayo, dada la proximidad entre ellas. Esta segunda zona se localiza en la Avenida de la Industria del P.I. de Alcobendas. La comparación de ambos ejemplos pone de manifiesto las diferencias entre los resultados y la coherencia de éstos con los modelos geológicos donde se hicieron las medidas.

El tercer ejemplo corresponde a una zona cercana al estadio de La Peineta y se caracteriza por la existencia de vertidos antrópicos con un importante espesor, situados sobre tosquizo y arenas tosquizas. Además de lo anterior este emplazamiento tiene la particularidad de la existencia de inversión en la sección con la distribución de los valores de V_s ; es decir, la presencia de una capa con valores de V_s menores que los de la capa situada a su techo (Ver [Figura 11]). Es conveniente recordar que este tipo de modelo no puede resolverse mediante el método de la sismica de refracción. En consecuencia éste ejemplo demuestra otra importante característica del método de la Sismica Pasiva.

Consideraciones finales a modo de conclusión

La introducción de un nuevo método en cualquier ámbito de la actividad industrial conlleva un cierto esfuerzo para vencer inercias y a veces desconfianzas hasta conseguir su aceptación por los usuarios y por los profesionales en general. Esta situación se hace particularmente complicada en el ámbito de los métodos geofísicos debido fundamentalmente a la falta de un ambiente propicio al empleo de estos métodos en nuestro país. No es éste el medio ni el momento para debatir respecto



[Figura 11] Ejemplo de resultados obtenidos en una zona con importante espesor de rellenos antrópicos en las proximidades del estadio de La Peineta (Madrid).

a este hecho, pero es incuestionable que los métodos geofísicos deberían tener mayor prestigio, tal como les corresponde por su capacidad y como en otros países sucede.

Entendemos que nuestro compromiso como profesionales de la Geofísica aplicada incluye contribuir a su divulgación de la forma más práctica posible, que no es otra que, conociendo los problemas que se plantean en el estudio del subsuelo para cada uno de los posibles campos de interés (Geotecnia, Hidrogeología, Minería, Arqueología, Medio Ambiente, etc), ofrecer a la sociedad las herramientas de nuestra especialidad. Bien empleadas pueden contribuir a resolverlos de una forma eficaz y económica.

Desde la base de la eficacia demostrada y pese a que como cualquier método geofísico tiene sus limitaciones, no es exagerado predecir que el método de la Sismica Pasiva ha de tener un nivel de empleo formidable en los próximos años, tanto por su fiabilidad en términos técnicos como por su capacidad para cubrir un hueco: el de los estudios mediante métodos no destructivos para la caracterización geotécnica del terreno en medios urbanos. Esta capacidad resulta de indudable im-

portancia si se tienen en cuenta las particularidades que conlleva la ejecución de obras subterráneas en ambientes urbanos y la necesidad de disponer por lo tanto del máximo nivel de información geotécnica.

Agradecimientos

Queremos expresar nuestra gratitud a Carlos Oteo, Manuel Herrera y Fernando Díez por la confianza que nos han demostrado y por su apoyo a la propuesta para el empleo de este método de la Sismica Pasiva en el estudio del terreno para el Plan de Ampliación de la Red de Metro y Sistemas Ligeros 2003-2007 de Madrid.

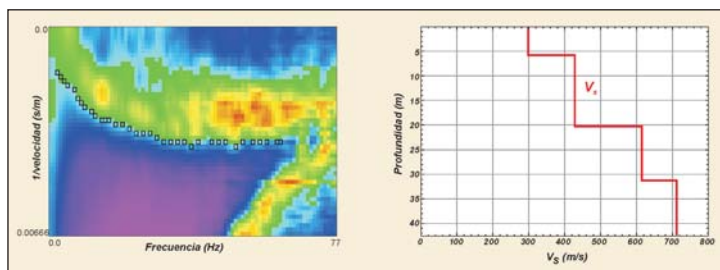
Referencias

- IWATE, T., KAWASE, H., SATOH, T., KAKEHI, Y., IRIKURA, K., LOUIE, J.N., ABBOTT, R.E., AND ANDERSON, J.G., 1998. *Array microtremor measurements at Reno, Nevada, USA (abstract)*. Eos, Trans. Amer. Geophys. Union, v.79, suppl. to no. 45, p. F578.
- KOICHI HAYASHI, 2005. *Buried Channel Delineation using a Passive Surface Wave Method in Urban Area*. 18th Annual Meeting, Environmental and Engineering Geophysical Society. Atlanta 2005.
- LOUIE, J., ET AL. 2001. *Refraction Microtremors and optimization methods as alternatives to boreholes for site strength and earthquake hazard assessments*. 14th Annual Meeting, Environmental and Engineering Geophysical Society. Reno 2001.
- MCMCHAN, G.A., y YEDLIN, M.J., 1981. *Analysis of dispersive waves by wave field transformation: Geophysics*, v. 46, p. 869-874.
- PARK, C.B., 2005. *MASW Workshop*. Atlanta. SAGEEP Meeting.
- THORSON, J.R., AND CLAERBOUT, J.F., 1985. *Velocity-strack and slant-stack stochastic inversion: Geophysics*, v.50, p.2727-2741.
- XIA, J., MILLER, R.D. AND PARK, C.B., 1999. *Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh wave: Geophysics*, v.64, p. 691-700.

Información:

IGT - International Geophysical Technology
 Ángel Muñoz, 15 - 1º.
 28043 Madrid.
 Tel.: 91 519 99 15
 Fax: 91 519 51 50
 Pág. Web: www.igt-geofisica.com

[Figura 9] Ejemplo representativo de los resultados obtenidos en un punto característico de la zona norte de Madrid (Alcobendas).



[Figura 10] Ejemplo característico de una zona del norte de Madrid, con presencia de un recubrimiento Cuaternario de varios metros de espesor.

