



Ensayos Geofísicos de Refracción Sísmica y de Medición de Ondas de Corte (MASW y MAM) para usos de cimentación en obras de edificaciones

Autores: **Miguel A. Rivera Zeta**¹, **Ramiro Piedra Rubio**², **Yris Paripan García**³

¹Universidad Nacional de Ingeniería, ²Gerente Técnico GEORYS Ingenieros S.A.C, ³Gerente de Proyectos GEORYS Ingenieros S.A.C
marz9358@gmail.com, ramiopiedra@yahoo.com, yrisgeophysical@gmail.com

ABSTRACT

El presente artículo da a conocer las ventajas y desventajas de los ensayos geofísicos de refracción sísmica y medición de ondas de corte (MASW y MAM) para usos de cimentación en obras de edificaciones, asimismo, presentar una aplicación y comparación con los rangos de las velocidades de ondas de corte presentadas en la última versión de la Norma E.030 de diseño sísmorresistente para poder clasificar los estratos de suelos.

Palabras claves

MASW, MAM, refracción sísmica, velocidad de ondas de corte, exploración geofísica.

INTRODUCCIÓN

Debido a la necesidad de conocer la naturaleza del subsuelo, durante las últimas décadas se han venido desarrollando diversos métodos de exploración entre ellos los métodos geofísicos. Es conocido por todos nosotros los ingenieros las ventajas que nos proporciona emplear los métodos de Exploración Geofísica básicamente por lo económico y rápido que resulta realizar estos ensayos; por eso su conocimiento masivo es esencial. Durante los últimos años se han venido realizando investigaciones que buscan hacer el proceso de exploración aún más eficiente y confiable, es así que surge los métodos geofísicos de refracción sísmica y de medición de ondas de corte (MASW y MAM) que basa sus procedimientos en matemática avanzada como las Transformadas de Fourier, inversión de matrices, velocidad de fase, ondas Rayleigh, etc.

ALCANCE

Estos métodos geofísicos al igual que otros tienen algunas restricciones por su metodología pero al mismo tiempo tienen muchas aplicaciones en el campo de la Ingeniería Civil. Cabe mencionar que existen otras aplicaciones que se efectúan en el Perú, desde la minería hasta de la microzonificación sísmica pero abordaremos su aplicación con fines de cimentación en obras de edificaciones.

OBJETIVO

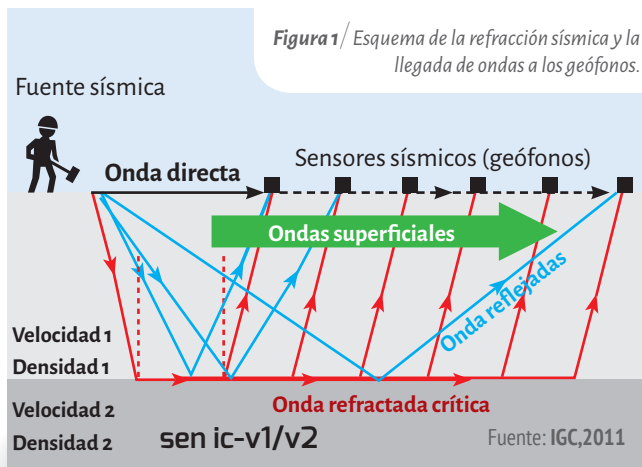
Clasificar los suelos de acuerdo al código IBC 2012 y a la norma E.030 de Diseño Sísmorresistente 2016 en base a sus velocidades de ondas de corte, mediante el capítulo 2.3.1 perfiles de suelo, tabla Nro 2 (Clasificación de los perfiles de suelo), donde identifican el tipo de perfil del suelo de acuerdo a la velocidad promedio de ondas de corte de los 30 primeros metros, lo que nos permitirá diferenciar los tipos de suelos blandos (S3) de los suelos intermedios (S2) de las rocas o suelos muy rígidos (S1) y de la roca dura (S0).

EVALUACIÓN GEOFÍSICA PARA CIMENTACIONES

El programa de exploración geofísica consiste en la ejecución de ensayos de medición de la velocidad de propagación de las ondas "P" (V_p) y "S" (V_s) del terreno denominados Refracción Sísmica, MASW y MAM. Los ensayos Refracción Sísmica y MASW permitirán determinar de manera indirecta los espesores y compacidad de los estratos del suelo de cimentación en el área de estudio hasta una profundidad máxima de 20 m a partir de los ensayos de Refracción Sísmica y de 20 m a 30 m a partir de los sondajes MASW, dependiendo del área de estudio y de las líneas ejecutadas en la superficie.

Fundamentos del Ensayo de Refracción Sísmica

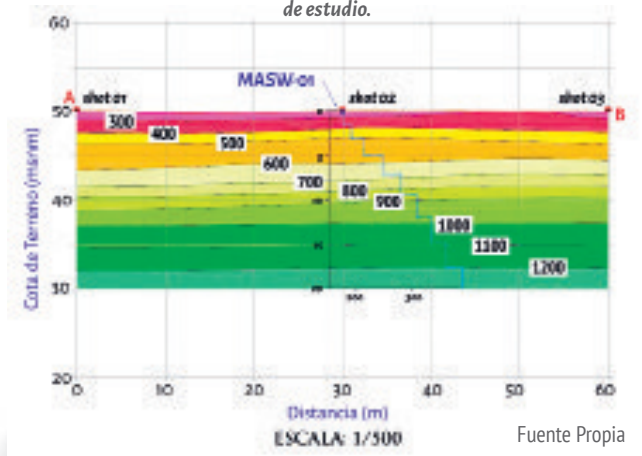
El ensayo de refracción sísmica es un método de exploración geofísica que permite determinar la estratigrafía del subsuelo en forma indirecta, basándose en el cambio de las propiedades dinámicas de los materiales que lo conforman. Este método consiste en la medición de los tiempos de viaje de las ondas de compresión (Ondas P) generadas por una fuente de energía impulsiva a unos puntos localizados a distancias predeterminadas a lo largo de un eje sobre la superficie del terreno.



La energía, que se propaga en forma de ondas, es detectada, amplificada y registrada de tal manera que puede determinarse su tiempo de arribo en cada punto. El tiempo cero o inicio de la grabación es generado por un dispositivo de arranque o "trigger" que activa el sistema de adquisición de datos al momento de producirse el impacto o explosión. La diferencia entre el tiempo de arribo y el tiempo cero permite evaluar el tiempo de propagación de las ondas desde la fuente de energía hasta el lugar en que éstas son registradas.

Los datos de tiempo y distancia obtenidos para diferentes ubicaciones del punto de aplicación de la energía (shot), nos permite determinar las velocidades de propagación de ondas P a través de los diferentes estratos de suelos y rocas cuya estructura, geometría y continuidad son investigadas.

Figura 2/ Perfil de Refracción Sísmica de zona de estudio.



Fundamentos de los Ensayos MASW

El ensayo MASW o Análisis de Ondas Superficiales en Arreglo Multicanal es un método que consiste en la interpretación de las ondas superficiales (Ondas Rayleigh) de un registro en arreglo multicanal, generadas por una fuente de energía impulsiva en puntos localizados a distancias predeterminadas a lo largo de un eje sobre la superficie del terreno, obteniéndose el perfil de velocidades de ondas de corte (Vs) para el punto central de dicha línea. El método MASW, permite obtener perfiles de ondas S hasta profundidades promedio de 25 m a 30 m.

En este método, la interpretación de los registros consisten en obtener de ellos una curva de dispersión (velocidad de fase (c) vs la frecuencia (f)), ver Figura 03(a)). Luego, el perfil de velocidad de onda de corte (Vs) se calcula utilizando un proceso iterativo que requiere la inversión no lineal de los datos de la curva de dispersión. El método MASW estima que a partir de la curva de dispersión, el perfil de velocidad de onda de corte (Vs) del terreno es construido mediante una simple transformación. Esta transformación estima que la longitud de onda (λ) se calcula a partir de la frecuencia (f) y la velocidad de fase (c) (Ecuación 1, Figura 03(b)). A continuación, la profundidad (D) se define como 1/3 de la longitud de onda, y la velocidad de onda de corte (Vs) a dicha profundidad es b veces la velocidad de fase medida c, donde b es un coeficiente que cambia ligeramente con la frecuencia y se basa en un semi-espacio homogéneo. Se grafica el esquema Velocidad de Onda de Corte (m/s) vs Profundidad (m), (Figura 03(b)) (Hayashi K., 2008).

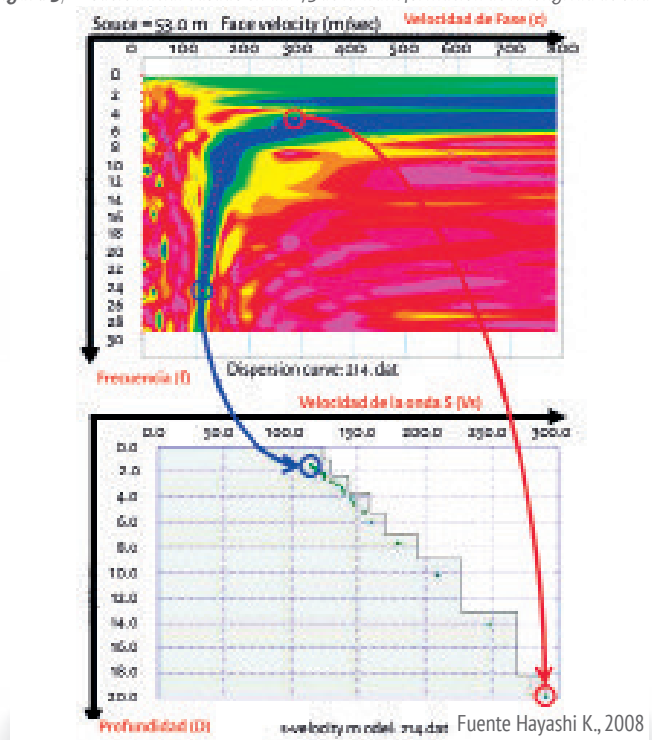
$\lambda = c/f$ (Ecuación 1)
 $D = \lambda/3$ (Ecuación 2)
 $V_s = b \cdot c$ (b es 1.05 a 1.11) (Ecuación 3)

Dónde:

- λ = Longitud de onda
- c = Velocidad de fase
- f = Frecuencia
- D = Profundidad
- Vs = Velocidad de la onda S

Es importante remarcar que la forma de la curva de dispersión está fuertemente relacionada a la variación de la rigidez con la profundidad. Por lo tanto el método MASW tiene la capacidad de identificar estratos más blandos entre estratos rígidos.

Figura 3/ Modelo inicial basado en un 1/3 de la transformación de la longitud de onda.



Esta técnica se ha venido utilizando con bastante frecuencia en la exploración geotécnica para la cimentación de edificaciones, de puentes y cimentación de máquinas, cimentación de presas de tierra, presas de relaves y pads de lixiviación, obteniéndose buenas correlaciones con los perfiles estratigráficos del suelo en los casos donde se han realizado perforaciones diamantinas, así como con los resultados de los ensayos SPT, por lo que tiene una buena confiabilidad y constituye una alternativa muy económica para la evaluación de los parámetros elásticos del suelo de fundación.

Fundamentos de los Ensayos MAM

El método MAM o Medición de Microtrepidaciones en Arreglos Multicanal es un método pasivo de exploración geofísica basado en el análisis de las vibraciones ambientales, es decir utiliza como fuente el ruido ambiental, en arreglos predeterminados y mediante el análisis de dispersión de éstas, determinar el perfil de velocidades de ondas S. No se requiere la utilización de una fuente externa de energía, como en los ensayos de Refracción Sísmica y MASW; se utiliza un arreglo instrumental bidimensional sobre la superficie, como se ve en la Figura No 4.

Este método consiste en monitorear vibraciones ambientales en arreglos predeterminados y utilizando el análisis de dispersión determinar el perfil de velocidades de ondas S (Vs).

La combinación de los métodos MASW y MAM, permiten obtener perfiles de velocidades de ondas S (Vs) hasta profundidades promedio de evaluación entre 50 m a 80 m., permitiendo determinar la estratigrafía del subsuelo bajo un punto en forma indirecta, basándose en el cambio de las propiedades dinámicas de los materiales que la conforman, obteniéndose el perfil de velocidad de onda de corte (Vs) para el punto central de dicha línea.

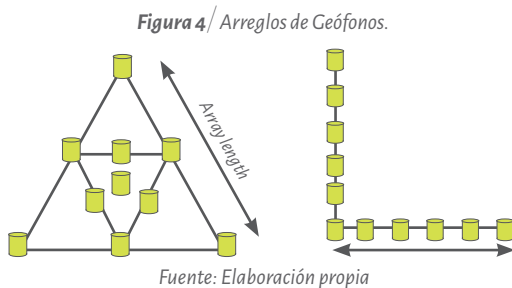


Figura 4/ Arreglos de Geófonos.

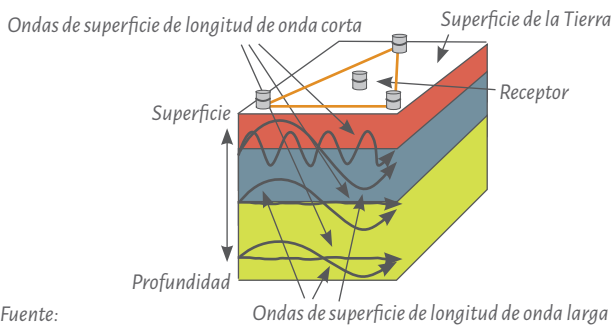


Figura 5/ Longitud de la onda S a diferentes profundidades.

La Figura No 5 muestra que las ondas superficiales de longitud de onda más corta reflejan la velocidad de la onda de corte (Vs) superficial y las más largas reflejan la velocidad de la onda de corte (Vs) más profunda. El perfil de la onda de corte (Vs) puede calcularse midiendo la velocidad de fase para diferente longitud de onda (frecuencia).

El procesamiento de las líneas de ensayos MAM, pasa por las siguientes etapas, adquisición de datos adecuados, obtención de curva de dispersión, que es una imagen de la velocidad de fase vs la frecuencia (Figura 06), la generación de la curva de dispersión (Figura 07) y la inversión del perfil de la velocidad la onda de corte 1D (Vs) de la curva de dispersión (Figura 08) (Park et al., 2006). La combinación de las curvas de dispersión activa y pasiva (Figura 07) permite aumentar la curva de dispersión y el rango de profundidad de la investigación, identificando mejor la naturaleza modal de las tendencias de la dispersión (Park et al., 2005)

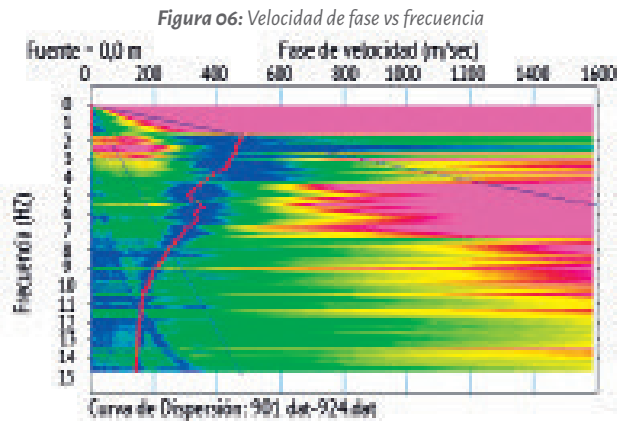


Figura 06: Velocidad de fase vs frecuencia

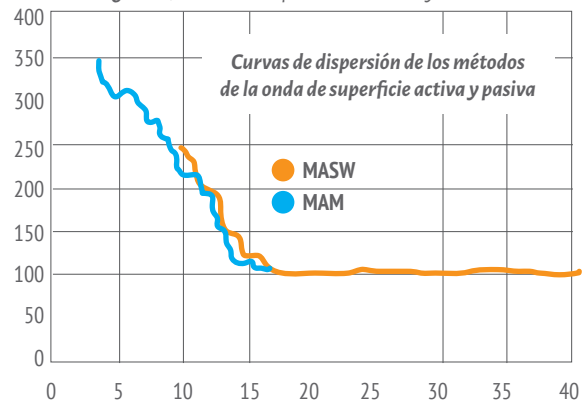


Figura 07: Curva de dispersión de MASW y MAM

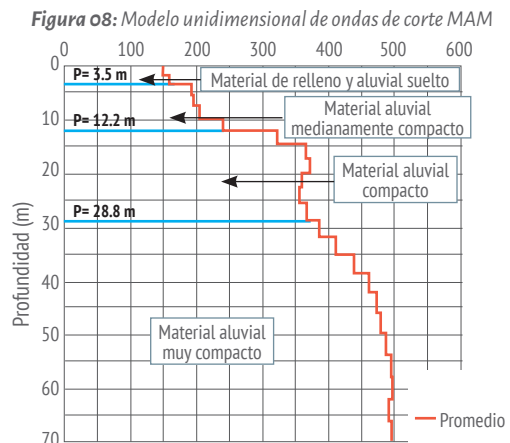


Figura 08: Modelo unidimensional de ondas de corte MAM

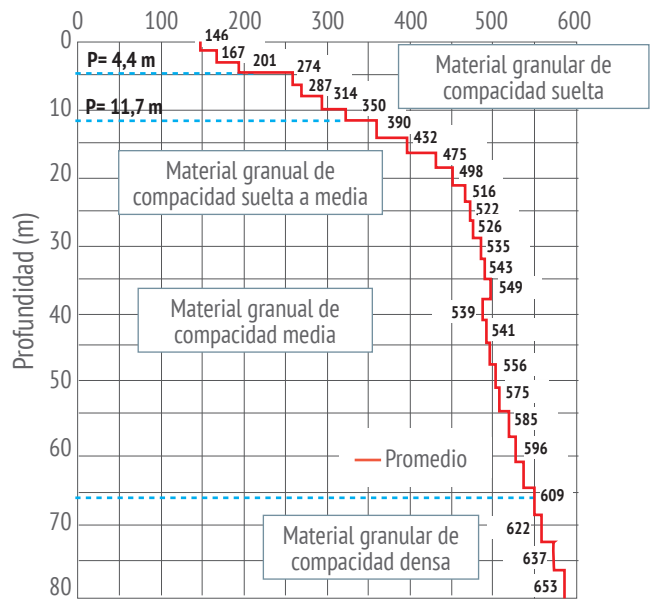
Caso de Aplicación – Ensayos geofísicos en la Universidad Cesar Vallejo - Callao

Como parte del estudio en donde estarán ubicadas nuevas estructuras de la Universidad Cesar Vallejo, sede del Callao, se han realizado ensayos geofísicos para determinar los perfiles sísmicos del material existente. Los ensayos consistieron en la medición de la velocidad de propagación de las ondas P por medio de ensayos de refracción sísmica para determinar el perfil sísmico estratigráfico del terreno, ensayos MASW y en arreglos de microtrepidaciones MAM para determinar las velocidades de propagación de las ondas S

El resultado del análisis efectuados para las líneas sísmicas conformada por los perfiles de refracción sísmica LS-01 y MASW-01; LS-02 y MASW 02; LS-03 y MASW 03; LS-04 y MASW 04, muestran un estrato superficial conformado por un material granular de compacidad suelta con velocidades de ondas P (Vp) que van desde los 200 m/s hasta 500 m/s, con velocidades de ondas de corte Vs en el rango de 172 m/s a 247 m/s. Este estrato superficial posee un espesor que varía entre 2.7 m a 6.4 m. El segundo estrato podría corresponder a un material granular de compacidad medianamente densa con velocidades de ondas P (Vp) de 500 m/s a 1100 m/s. con velocidades de ondas de corte Vs en el rango de 247 m/s a 366 m/s. y posee un espesor que varía entre 5.9 m a 11.4 m. El tercer estrato podría corresponder a un material de compacidad densa con velocidades de ondas P (Vp) que van desde los 1100 m/s hasta 1400 m/s, con velocidades de ondas de corte Vs en el rango de 361 m/s a 450 m/s. Este estrato posee un espesor que varía entre 2.0 m a 15.4 m.



Figura 11: Modelo unidimensional de ondas de corte MAM - Sondaje MAM-01



Fuente: Elaboración propia

Figura 09: Perfil sísmico línea LS-02

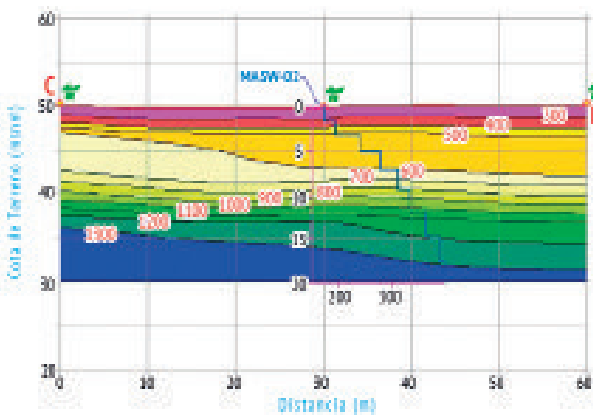
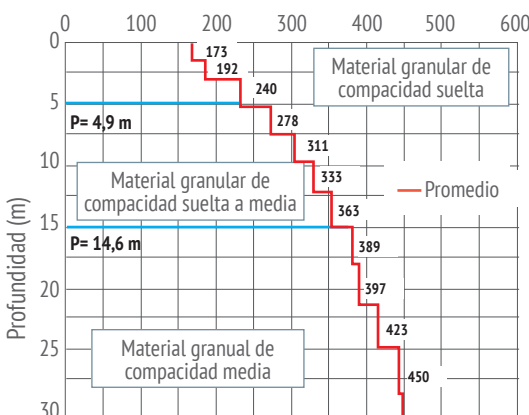


Figura 10: Modelo unidimensional de ondas de corte MAM



Fuente: Elaboración propia

Se ha calculado la velocidad promedio de ondas de corte Vs30 de acuerdo al International Building Code (IBC, 2012) y a la Norma E-030, con el propósito de caracterizar sísmicamente el tipo de suelo en función de los perfiles unidimensionales de ondas de corte y sus correspondientes velocidades promedio hasta los 30 m de profundidad (Vs30). De acuerdo al código IBC 2012, se clasifica los suelos en 6 clases, tal como se presenta en Cuadro 1, esta clasificación ha sido definida en función a la velocidad de ondas de corte promedio de un estrato de 30 m de profundidad que se calcula de acuerdo a la siguiente relación:

$$V_{s30} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}}$$

d_i : Espesor de cada capa entre 0.0 m y 30.0 m
 V_{si} : Velocidad de ondas de corte de cada capa (m/s)

(Ecuación 4)

Cuadro 1: Clasificación del Sitio (Fuente IBC, 2012)

TIPO DE SUELO	NOMBRE DE SUELO	PROPIEDADES PROMEDIO EN LOS 30 PRIMEROS METROS, VER SECCIÓN 1613.5.5		
		Velocidad de onda de corte, \bar{V}_s (m/s)	Resistencia a la penetración standar, \bar{N}	Resistencia al corte no drenada, \bar{S}_u (psf)
A	Roca muy dura	$\bar{V}_s > 1,500$	N/A	N/A
B	Roca	$760 < \bar{V}_s < 1,500$	N/A	N/A
C	Suelo muy denso o roca blanda	$360 < \bar{V}_s < 760$	$\bar{N} > 50$	$\bar{S}_u \geq 2,000$
D	suelo rígido	$180 < \bar{V}_s < 360$	$15 \leq \bar{N} \leq 50$	$1,000 \leq \bar{S}_u \leq 2,000$
E	Suelo blanco	$\bar{V}_s < 180$	$\bar{N} < 15$	$\bar{S}_u \leq 1,000$
F	-	Cualquier perfil de suelo de 3m de espesor que tenga las siguientes características: 1. Índice de plasticidad (IP) > 2. Contenido de humedad (w) $\geq 40\%$ 3. Resistencia al corte no drenada $\bar{S}_u < 500$ psf		
G	-	Cualquier perfil de suelo que contenga una o más de las siguientes características 1. Suelos vulnerables a una posible fractura o colpaso bajo efecto sísmico, por ejemplo: suelos licuables, arcillas altamente sensibles y suelos débilmente cementados. 2. Turbas y/o arcillas altamente orgánicas (H>3 mde turba y/o arcillas altamente orgánicas, donde H= espesor del suelo). 3. Arcillas de muy alta plasticidad (H>7.6 m con índice de plasticidad IP>75) 4. Arcillas gruesas suaves a medias (H>36m)		

Según la Norma E-030, Norma Técnica E-030 "DISEÑO SISMORRESISTENTE", clasifica los suelos según 5 tipos, como puede verse en la tabla 2 de la Norma, en el presente caso considera la zona de estudio como Perfil Tipo S2, a este tipo corresponden los suelos medianamente rígidos, con velocidades de propagación de onda de corte V_s , entre 180 m/s y 500 m/s, incluyéndose los casos en los que se cimienta sobre:

- Arena densa, gruesa a media, o grava arenosa medianamente densa, con valores del SPT N_{60} , entre 15 y 50.
- Suelo cohesivo compacto, con una resistencia al corte en condiciones no drenada S_u , entre 50 kPa (0,5 kg/cm²) y 100 kPa (1 kg/cm²) y con un incremento gradual de las propiedades mecánicas con la profundidad.

Cuadro 2: CLASIFICACIÓN DE LOS PERFILES DE SUELO

Perfil	\bar{V}_s	\bar{N}_{60}	\bar{S}_u
S_0	> 1500 m/s	-	-
S_1	500 m/s a 1500 m/s	> 50	> 100 kPa
S_2	180 m/s a 500 m/s	15 a 50	50 kPa a 100kPa
S_3	< 180 m/s	< 15	25 kPa a 50kPa
S_4	Clasificación basada en el EMS		

Los resultados muestran que el comportamiento dinámico del suelo en el área de estudio de los sondajes MASW-01, 02, 03 y 04, corresponden a un suelo Tipo D (suelo rígido según IBC 2012) y a un suelo tipo S2 (suelo intermedio según Norma E-030), cuyas velocidades promedio de ondas de corte V_{s30} se encuentran en el rango de 310 m/s y 332 m/s. Los valores exactos de este cálculo se aprecian en el Cuadro 2.

Cuadro 3:

Velocidades promedio de ondas de corte a 30 m de profundidad (V_{s30})

Sondaje	\bar{V}_{s30}	Tipo de suelo según IBC	Nombre del Tipo de suelo (IBC, 2012)	Tipo de suelo según Norma E-030	Nombre del tipo de suelo (E-030)
MASW-01	310	D	Suelo rígido	S2	Suelos Intermedios
MASW-02	328	D	Suelo rígido	S2	Suelos Intermedios
MASW-03	332	D	Suelo rígido	S2	Suelos Intermedios
MASW-04	312	D	Suelo rígido	S2	Suelos Intermedios

Los métodos geofísicos tienen una amplia aplicación en la exploración geotécnica, la confiabilidad de los resultados dependen grandemente de los criterios de su utilización y de la experiencia del profesional.

La selección de los ensayos geofísicos debe de estar ligada a los alcances de la exploración, los métodos geofísicos tienen grandes ventajas en su aplicación, pues permiten cubrir grandes áreas en corto tiempo y a un precio razonable

Los ensayos de refracción sísmica y la medición de Ondas Superficiales en Arreglo Multicanal (MASW) y MAM son análisis indirectos que tiene un grado de aproximación aceptable, sin embargo requieren de algunas verificaciones mediante perforaciones u otros ensayos directos para determinar su grado de precisión.

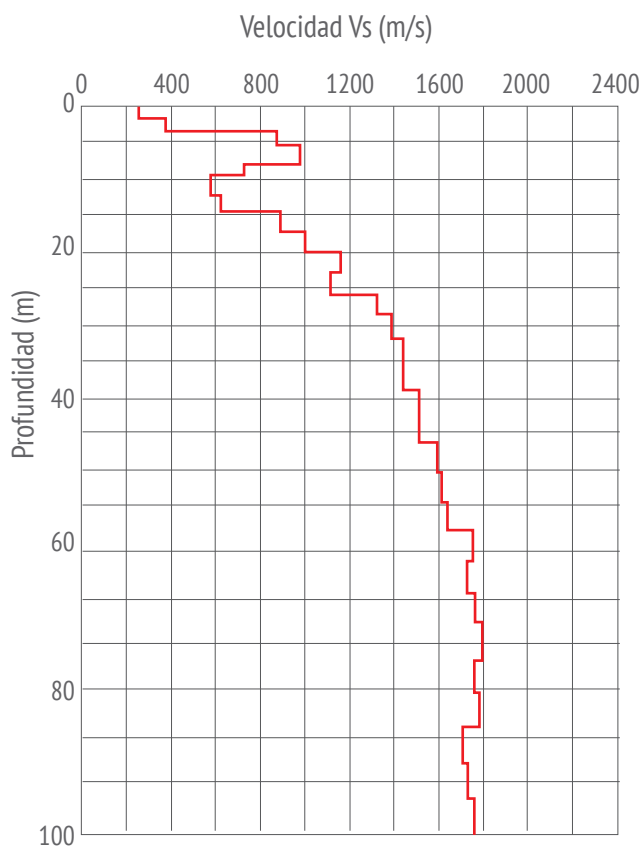
Estas técnicas se ha venido utilizando con bastante frecuencia en la exploración geotécnica para la cimentación de edificaciones, puentes, presas de tierra, presas de relaves



y pads de lixiviación, obteniéndose buenas correlaciones con los perfiles estratigráficos del suelo en los casos donde se han realizados perforaciones diamantinas, así como con los resultados de los ensayos SPT, por lo que tiene una buena confiabilidad y constituye una alternativa muy económica para la evaluación de los parámetros elásticos del suelo de fundación.

Otra de las ventajas de los ensayos de medición de ondas de corte es que puede hallar estratos de velocidad bajas entre dos estratos de velocidad mayor, como puede observarse en el MAM 02. Figura 12, a esto se denomina inversión de velocidad, esto no podrá ser detectado realizando refracción sísmica, por ello recomendamos siempre realizar medición de ondas de corte para poder detectar estos suelos blandos.

Figura 12: Modelo unidimensional de ondas de corte MAM 1



Fuente: Elaboración propia

REFERENCIAS

- » ASTM Designation D5777 (1995): "Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation", American Society for Testing and Materials, Philadelphia, U.S.A.
- » Ayashi, K (2003), "Data Acquisition and Analysis of Active and Passive Surface Wave Methods". Short Course - SAGEEP 2003.
- » Benjamín, F., Howell (1962), "Introducción a la Geofísica", OMEGA, Barcelona, España.
- » Beresnev, I.A., Hruby, C., Davis, C. (2002) "Exploration Geophysics". Journal of Applied Geophysics, 49. 245-254.
- » CISMID (1991), "Memorias del Seminario Taller de Dinámica de Suelos". Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- » D., H., Friffiths & R., F., King, (1972), "Pagina 19-83", "Introducción a la Geofísica".
- » Dobrín, M., B. (1975), "Introducción a la Prospección Geofísica", OMEGA, Barcelona, España.
- » Figuerola, J., C. (1974), "Tratado de Geofísica Aplicada", LITOPRINT, Madrid, España.
- » García Hermoso, Fernando (2006): "Estudios Geotécnicos" Escuela Politécnica Superior, Huesca, España.
- » Lankston, R. W., "High Resolution Refraction Data Acquisition and Interpretation", Geo-Compu-Graph, Inc., U.S.A.
- » Park, C., Miller, R. y Xía, J. 1999, "Multichannel analysis of surface waves". Geophysics. Vol. 64. N° 3. p: 800-808.
- » Park, C.B., R. D. Miller, and J. Xia, Julian M. (1999), Multichannel Analysis of Surface Waves to Map Bedrock, Kansas Geological Survey, Lawrence, Kansas, U.S.
- » Park, C., Miller, R., Xia, J., & Ivanov, J. (2001). "Seismic characterization of geotechnical sites by Multichannel Analysis of Surfaces Waves (MASW) method". Tenth International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering (SDEE), Philadelphia.
- » Orellana, Ernesto (1970), "Principios de Geofísica Aplicada", Paraninfo, Madrid
- » Redpath, Bruce, (1973), "Seismic Refraction Exploration for Engineering Site Investigations", Explosive Excavation Research Laboratory Livermore, California, U.S.A.
- » Rodríguez Manuel Arlande (2001): "Geofísica Aplicada a la Obra Civil. Método Geoléctrico y Sísmica de Refracción. Casos Prácticos". Geoconsult Ingenieros Consultores, Valencia, España.
- » U. S. Army Corps of Engineers, (1995), "Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Investigations", Engineer Manual, Washington, U.S.A.
- » Underwood, D.; Hayashi, K. (2006), Surface Wave Data Acquisition and Field Methods, Geometrics Inc, U.S.