

EL USO DE LOS MICROTREMORES PARA LA DETERMINACIÓN DEL PERFIL DE VELOCIDAD DE ONDA S

Selene Quispe¹, Zenón Aguilar², Fernando Lazares³

¹CISMID, Investigadora, Perú, Av. Túpac Amaru N° 1150 – Lima, challengernative@gmail.com, 992263170

²CISMID, Sub Director Académico, Perú, Av. Túpac Amaru N° 1150 – Lima, zaguiarb@yahoo.com, 995805569

³CISMID, Jefe del Área de Planeamiento, Perú, Av. Túpac Amaru N° 1150 – Lima, f_lazares@hotmail.com, 997403676

RESUMEN

Los métodos geofísicos convencionales usados para la estimación de velocidades de ondas de corte superficiales para la caracterización dinámica de suelo son complicados a nivel técnico, costosos y de difícil ejecución en áreas urbanas. Por el contrario, los métodos geofísicos no invasivos basados en las características dispersivas de las ondas de superficie y que se vienen utilizando recientemente, permiten estimar en forma rápida y confiable el perfil de la velocidad de la onda de corte hasta una profundidad de investigación razonable.

La presente investigación se ha enfocado principalmente en la aplicación del método de análisis espectral F-k de alta resolución. Este método está basado en la naturaleza dispersiva de las ondas Rayleigh en un medio verticalmente heterogéneo. La variación de la velocidad de fase de la onda Rayleigh con la frecuencia resulta de la variación de la velocidad de la onda de corte con la profundidad. La curva de dispersión experimentalmente se determina a partir de los registros de onda relacionados con la propagación de una perturbación generada por una fuente de origen dinámica (método activo) o por las vibraciones ambientales (método pasivo), y registrada por sensores sobre la superficie del terreno. Un subsiguiente proceso de inversión, basado en la simulación numérica de la propagación de la onda en un medio estratificado, conduce a estimar el perfil de la velocidad de la onda S.

La aplicación de este método se llevó a cabo en el distrito de Puente Piedra, donde se realizó este ensayo como parte del estudio de “Microzonificación Sísmica y Vulnerabilidad en la ciudad de Lima”, realizado por el Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) durante el 2010 y 2011, con el fin de determinar el perfil de Vs.

Palabras Claves: Método F-k, arreglo de microtremores, Puente Piedra.

1. INTRODUCCIÓN

La velocidad de onda de corte (Vs) es una importante propiedad dinámica del suelo y es muy utilizada para evaluar la respuesta sísmica de un depósito de suelos. Diversos son los ensayos que se utilizan para su determinación y en los últimos tiempos los métodos geofísicos han logrado una gran aceptación, especialmente aquellos basados en los registros de vibraciones ambientales o microtremores. En el presente artículo se describe el método de análisis espectral F-k (frecuencia – número de onda), que es utilizado para analizar los registros de microtremores medidos en arreglos lineales y circulares con el fin de determinar el perfil de velocidad de onda de corte (Vs).

2. ENSAYOS DE MEDICIÓN DE ONDAS DE CORTE – MÉTODO F-K

El principio de este método radica en el hecho de que los Microtremores consisten predominantemente de ondas Rayleigh, y que el análisis espectral de estos puede reproducir las características dispersivas de las ondas Rayleigh, las cuales reflejan el perfil de velocidad de onda de corte del sitio en estudio (Tokimatsu et al., 1992a, Tokimatsu et al., 1992b).

Este método consiste en la medición de microtremores utilizando un arreglo de sensores, con el fin de determinar una curva de dispersión desde un análisis espectral de los movimientos observados (Tokimatsu et al., 1992a). Posteriormente se obtiene el perfil de velocidad de onda de corte (Vs) el cual se calcula utilizando un proceso iterativo que requiere la inversión no lineal de los datos de la curva de dispersión.

Para la medición de las ondas Rayleigh con el fin de obtener la curva de dispersión, hay esencialmente dos métodos, los métodos activos y pasivos (Tokimatsu et al., 1992b). El método activo mide la componente vertical de las ondas Rayleigh producida ya sea por una fuente impulsiva (representado por el golpe de un martillo o un peso pesado que se deja caer de una cierta altura) o una fuente armónica con un movimiento vertical armónico. Estos tipos de fuente tienen la ventaja de generar ondas de alta frecuencia o longitud de onda corta las cuales tienen la capacidad de explorar el suelo a profundidades relativamente superficiales. Para emplear este método, los sensores deben ser ubicados sobre la superficie del terreno en línea con la fuente, y la velocidad de fase se calcula basada en el análisis espectral. El método es capaz de explorar la superficie del terreno a profundidades menores de 20 metros (Tokimatsu et al., 1992b).

El método pasivo mide la componente vertical de los microtremores usando un arreglo circular de sensores distribuidos sobre la superficie del terreno, no requiere de ninguna fuente impulsiva, sino por el contrario registra las vibraciones generadas por el ruido del tráfico, maquinarias, el viento, ondas del océano a la orilla del mar, etc., las cuales consisten principalmente de ondas Rayleigh de baja frecuencia o longitud de onda grande, permitiendo caracterizar el suelo a profundidades mayores. La máxima profundidad de investigación depende de la apertura del arreglo bidimensional, que permiten registrar ondas de longitud de onda más grande (frecuencias más bajas), así como también del medio de propagación.

2.1 PROCEDIMIENTO DE LOS TRABAJOS DE CAMPO

Para utilizar el método F-k, se requiere registrar los microtremores en arreglos circulares y lineales. En consecuencia, en el campo primeramente se define la geometría de los arreglos circulares utilizando seis sensores, que son instalados sobre la superficie del terreno con un sensor en el centro y cinco sensores que forman un pentágono regular con un radio constante para cada medición. Posteriormente se definen los arreglos lineales colocando los sensores en línea con el sensor del centro del arreglo circular.

El radio de los arreglos circulares así como también el espaciamiento entre sensores de los arreglos lineales está en función de la profundidad de exploración requerida, por lo que se recomienda que éstos sean expandidos o contraídos manteniendo una relación de dos, con el fin de cumplir con este propósito.

2.2 FUNDAMENTOS DEL MÉTODO DE ANÁLISIS ESPECTRAL F-K

Una vez registrado las vibraciones ambientales, éstas son procesadas en gabinete con los programas respectivos, los cuales se basan en el análisis espectral F-k.

El análisis espectral se basa en la estimación Frecuencia-Número de Onda de Alta Resolución desarrollado por Capon (1969). Tal estimación se basa en el cálculo de la densidad espectral de potencia cruzada o llamado también espectro de potencia cruzada entre cada par de sensores (sensor i y sensor j) a una cierta frecuencia f , $G_{ij}(f)$. Por simplicidad, el método de segmento directo (Capon et al., 1967) es utilizado para calcular el espectro de potencia cruzada, ya que desde el punto de vista computacional, es eficiente (Capon, 1969). El espectro Frecuencia-Número de Onda de Alta Resolución $P(f, \mathbf{k})$ es definido por,

$$P(f, \mathbf{k}) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M A_i^*(f, \mathbf{k}) A_j(f, \mathbf{k}) G_{ij}(f) \exp[i\mathbf{k} \cdot (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)] \quad (1)$$

En donde \mathbf{k} es el vector número de onda en radianes por metro, M el número de sensores para un arreglo dado, y

$$A_i(f, \mathbf{k}) = \frac{\sum_{j=1}^M q_{ij}(f, \mathbf{k})}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M q_{ij}(f, \mathbf{k})} \quad (2)$$

En donde $[q_{ij}(f, \mathbf{k})]$ es la inversa de la matriz $[\exp[i\mathbf{k} \cdot (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)] G_{ij}(f)]$.

El espectro F-k de Alta Resolución es dibujado en un espacio bidimensional de número de onda $(k_x - k_y)$ para cada frecuencia. El pico de este espectro F-k proporciona la información concerniente a la

velocidad de fase c de las ondas propagadas, pico correspondiente a un vector número de onda \mathbf{k} desde el origen a una frecuencia f (Tokimatsu et al., 1992a, Tokimatsu et al., 1992b).

Repetiendo este cálculo numérico y computacional sobre un rango de frecuencias con una buena relación señal-ruido para un conjunto de arreglos de microtremores, una curva de dispersión se genera a partir del método F-k.

3. APLICACIÓN DEL MÉTODO F-K EN LA CIUDAD DE LIMA, DISTRITO DE PUENTE PIEDRA

Para evaluar el uso de los microtremores para determinar el perfil de velocidad de la onda S, se han llevado a cabo una serie de mediciones de arreglos de Microtremores en el distrito de Puente Piedra, como parte del estudio de “Microzonificación Sísmica y Vulnerabilidad en la ciudad de Lima”, realizado por el Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres durante el 2010 y 2011.

En aras de la simplicidad, dos mediciones de arreglos de microtremores ubicados en puntos definidos como estratégicos en el distrito de Puente Piedra son descritas a continuación.

Arreglo N°1

Comprende arreglos de Microtremores lineales de 0.5m, 2m de separación y circulares en forma de un pentágono regular con radios de 12m y 20m.

La Figura 1 muestra a diferentes frecuencias y/o periodos los espectros F-k de Alta Resolución en un espacio bidimensional de número de onda correspondiente a los arreglos circulares de radio diferente. Los espectros son dibujados como contornos de $-10\log[P(f, \mathbf{k})/P_{max}(f)]$, donde $P_{max}(f)$ es el valor máximo de $P(f, \mathbf{k})$. El máximo del espectro de potencia es indicado por un asterisco (*), el cual indica que los microtremores sobre el rango de frecuencia de 6 a 11 Hz se propaga principalmente en la dirección NE. Esto es probablemente debido a que las vibraciones ambientales son generadas por el tráfico pesado provienen en aquella dirección.

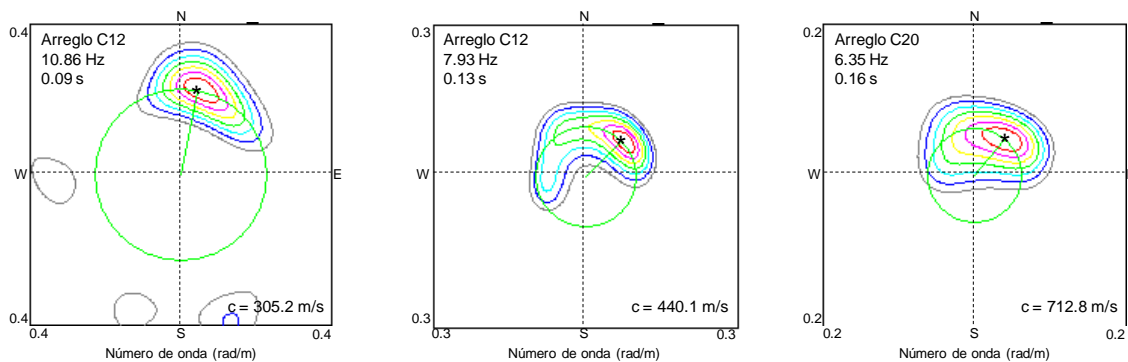


Figura 1.- Espectros F-k de Alta Resolución en un rango de frecuencia entre 6 a 11 Hz.

La Figura 2(a) muestra la curva de dispersión, procesada a partir del método F-k, para todos los arreglos de Microtremores obtenidos en este punto de exploración. La velocidad de fase es graficada versus la frecuencia. Esta curva muestra una tendencia normalmente dispersiva, en la cual la velocidad de fase aumenta con la disminución de la frecuencia. La Figura 2(b) muestra el perfil Vs determinado a partir de la inversión. Este perfil sísmico de velocidad de ondas S muestra resultados confiables hasta una profundidad de exploración de 36 m, indicando la presencia de 5 estratos sísmicos.

Los cuatro primeros estratos superficiales corresponderían a una arcilla cuya consistencia varía de blanda a muy dura, con una velocidad de onda de corte de 170 a 550 m/s. A este depósito le subyace una grava muy densa con matriz arcillosa, con una velocidad de la onda de corte promedio de 700 m/s, hasta una profundidad de 36 m.

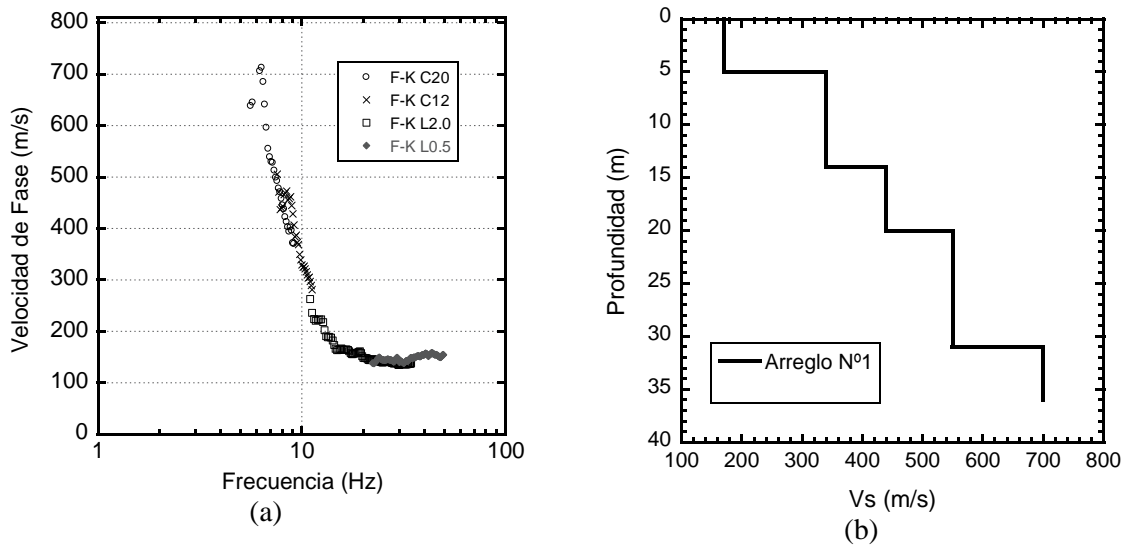


Figura 2.- (a) Curva de dispersión obtenida por el método F-k. (b) Perfil de velocidad de la onda S en el Arreglo N°1.

Arreglo N°2

Comprende arreglos de Microtremores lineales de 0.5 m y 2 m de separación, y arreglos circulares en forma de un pentágono regular con radios de 12 m, 22 m y 45 m.

La Figura 3 muestra a diferentes frecuencias y/o periodos los espectros F-k correspondiente a los arreglos circulares de radio diferente. En cada figura, un pico, representado por un asterisco, varía con la frecuencia, indicando que los microtremores sobre el rango de frecuencia de 3 a 9 Hz se propagan en distintas direcciones. Esto se debe a que las fuentes de los microtremores están distribuidas alrededor del sitio en estudio.

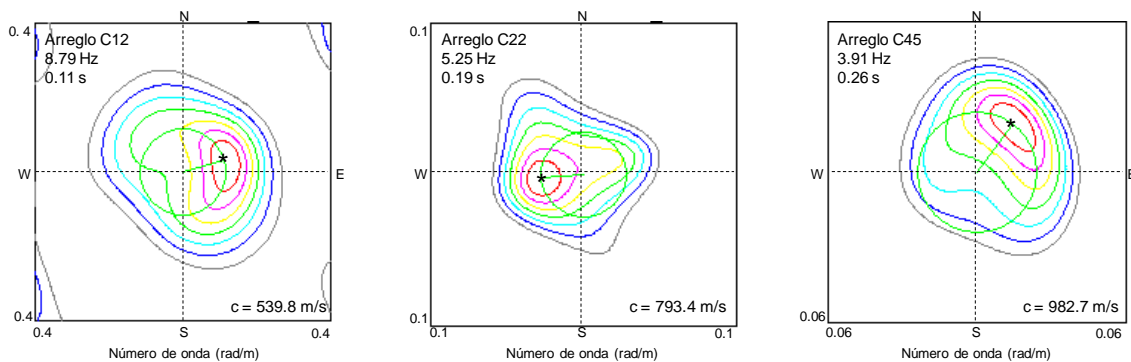


Figura 3.- Espectros F-k de Alta Resolución en un rango de frecuencia entre 3 a 9 Hz.

La Figura 4(a) muestra la curva de dispersión, procesada a partir del método F-k. Esta curva muestra una tendencia inversamente dispersiva, en la cual la velocidad de fase decrece con la disminución de la frecuencia en el rango de frecuencias de 6 a 10 Hz. La Figura 4(b) muestra el perfil V_s determinado a partir de la inversión. Este perfil sísmico de velocidad de ondas S muestra resultados confiables hasta una profundidad de exploración de 80 m, observándose la presencia de 6 estratos sísmicos.

La velocidad de onda de corte del estrato superficial presenta un valor promedio de 270 m/s hasta una profundidad de 12 m, el cual correspondería a un material compuesto por una arena arcillosa medio densa, a este material subyacería una arcilla de consistencia semidura a dura con una V_s de 530 m/s hasta una profundidad de 25 m. Posteriormente subyacería a este material una arena de compacidad densa a muy densa con una V_s que varía de 420 a 680 m/s hasta una profundidad de 48 m. Estos depósitos yacen sobre

una grava de compacidad muy densa, con un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S (V_s) de 860 m/s hasta una profundidad de 80 m.

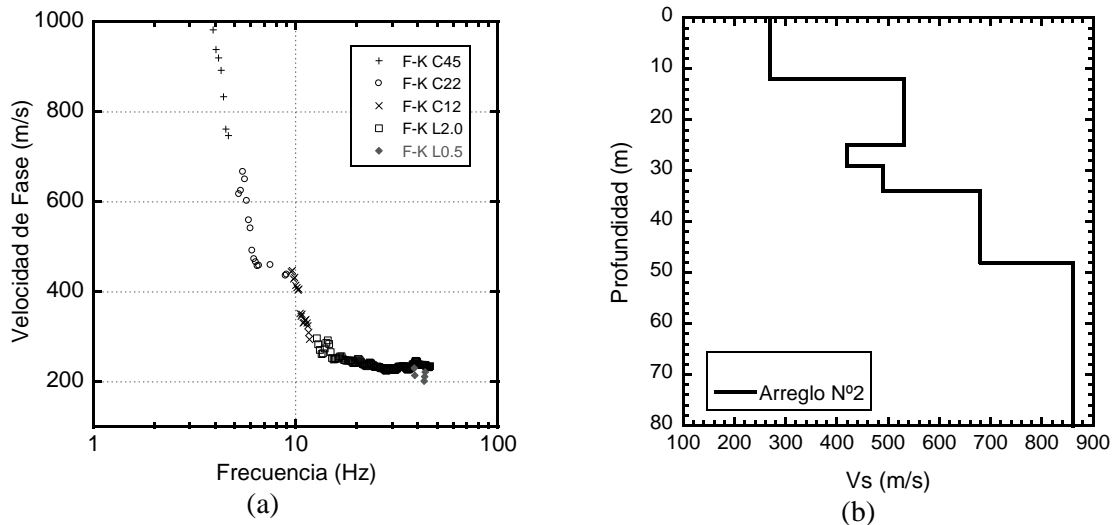


Figura 4.- (a) Curva de dispersión obtenida por el método F-k. (b) Perfil de velocidad de la onda S en el Arreglo N°2.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los registros de Microtremores han sido utilizados para la determinación del perfil de velocidad de onda de corte. Los ensayos de campo son llevados a cabo sin mucha dificultad con el objeto de medir la componente vertical de los microtremores ya sea generada por ruido ambiental o por vibraciones forzadas utilizando arreglos de sensores distribuidos circular o linealmente sobre la superficie del terreno. Basado en el análisis espectral Frecuencia-Número de Onda de Alta Resolución, las características dispersivas de la onda Rayleigh son determinadas. Las investigaciones de campo fueron llevadas a cabo en dos sitios con diferentes características de suelo en el distrito de Puente Piedra, para evaluar la aplicabilidad del método. Los perfiles sísmicos de velocidad de ondas S calculados a partir de la inversión de la curva de dispersión han sido interpretados adecuadamente con base a la información geotécnica recopilada (calicatas, pozos de exploración subterránea) cercanos a los puntos de exploración.

El Arreglo N°1 ha alcanzado una profundidad de exploración menor a los 40 metros, a diferencia del Arreglo N°2, en el cual se llega a profundidades del orden de los 80 m. Esta diferencia de la capacidad para investigar el suelo depende, como se mencionó previamente, de la apertura de los arreglos circulares. A mayor diámetro, éstos permiten registrar ondas de frecuencia baja con lo cual se pueden obtener perfiles de la velocidad de onda de corte (V_s) a grandes profundidades. Además, el método tiene el potencial para detectar estratos relativamente blandos que subyacen a los estratos más rígidos, lo cual no es posible con métodos convencionales de exploración geofísica.

BIBLIOGRAFÍA

- Capon, J., Greenfield, R. J. and Kolker, R. J.**, 1967, Multidimensional maximum-likelihood processing of a large aperture seismic array, Proc. IEEE, v. 55, p. 192-211.
- Capon, J.**, 1969, High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis: Proc. IEEE, v. 57, p. 1408-1418.
- Tokimatsu K., Miyadera Y. and Kuwayama S.**, 1992a, Determination of Shear Wave Velocity Structures from Spectrum Analyses of Short-Period Microtremors, Proc., 10th World Conf. on Earthquake Engrg., 1, , 253-258.
- Tokimatsu K., Shinzawa K., Kuwayama S.**, 1992b, Use of short-period microtremors for V_s profiling, J. Geotechnical Eng., vol. 118 (10), ASCE, pp. 1544-1558.