



METODOLOGÍA DE EXPLORACIÓN INDIRECTA DEL SUELO

Líneas de Refracción Sísmica y Análisis Multicanal de Ondas de Superficie

1. Introducción

Con el propósito de obtener información del perfil estratigráfico del suelo y estimar indirectamente parámetros geomecánicos del mismo, las exploraciones geofísicas (líneas de refracción sísmica LRS y Análisis multicanal de ondas de superficie MASW 1D) son una buena alternativa para racionalizar las exploraciones directas con perforaciones.

El propósito general de este tipo de exploración es determinar espesores y contactos de los estratos, continuidad de los mismos basándose en la velocidad de propagación de ondas compresionales V_p y de ondas de corte V_s . Además determinar, a través de algunas correlaciones, módulos dinámicos del suelo como el módulo de Poisson, módulo de Young, módulo de corte máximo, módulo de deformación volumétrica del suelo y valores estimados de N de la prueba de SPT.

Con la información de propagación de ondas p se realiza la interpretación a través de dos métodos: uno de ellos, el denominado "Time Term Inversion" permite obtener modelos simplificados de dos o tres capas diferenciables en función de la velocidad de propagación de onda; el otro método permite obtener, utilizando elementos finitos, una estructura del suelo en un modelo con un mayor número de capas llamado Tomografía.

Con la información de propagación de ondas superficiales se realiza otro tipo de análisis denominado MASW (Siglas en inglés de Análisis Multicanal de Ondas de Superficie).

Se presenta a continuación la metodología seguida para la planeación, recopilación, interpretación y análisis de los resultados de las líneas de refracción sísmica.



2. Objetivos

El objetivo de las líneas de refracción sísmica es determinar velocidades de propagación de onda compresional (v_p) en el suelo, estimar contactos entre los estratos subsuperficiales y módulos elásticos y dinámicos del subsuelo.

En el caso del análisis multicanal de las ondas superficiales en una dimensión (MASW 1D) el objetivo es determinar la variación de la velocidad de la onda de corte S con la profundidad para un punto. A partir de esa información se pretende identificar los cambios de materiales y sus rigideces a bajas deformaciones. Posteriormente con esta información se puede identificar el tipo de sitio, desde el punto de vista de su respuesta ante un evento sísmico.

La prueba realmente analiza las ondas superficiales tipo Rayleigh, que representan el 67% de la energía que se propaga en el suelo, además la velocidad de onda Rayleigh es aproximadamente el 95% de la velocidad de la onda S. Las ondas Rayleigh tienen la propiedad de variar la velocidad de fase con la frecuencia, esta gráfica se denomina curva de dispersión y su inversión produce el perfil de ondas S (V_s contra la profundidad)

Para que el análisis de las ondas de superficie muestre un perfil representativo del sitio, es necesario combinar las ondas de alta frecuencia producidas por un impacto en el suelo, en este caso el golpe de un martillo de 20 Lb; con las ondas de baja frecuencia producidas por el ruido ambiental o el paso de vehículos cerca de la zona de estudio. Las primeras ondas se encargarán de caracterizar la parte más somera del depósito mientras que las segundas se encargarán de caracterizar la parte más profunda. La profundidad de exploración máxima está relacionado con la longitud característica del arreglo pasivo (disposición de los sensores), que en el caso de un arreglo lineal corresponde a su longitud, es decir que la máxima profundidad de exploración en este caso será igual a la longitud de la línea pasiva.

3. Adquisición de datos

Equipo

Para la adquisición de los datos se utilizó un sismógrafo GEOMETRICS ES-3000 de 12 canales, 12 geófonos de 10Hz, cables para transmisión de datos, martillo de 20 lb con sensor de movimiento y placa para generación de ondas, computador

portátil con software especializado para la recepción y evaluación de los datos recopilados. Para el análisis MASW los geófonos tienen una frecuencia de 4.5Hz.

Procedimiento

- **Ondas P**

Una vez en el sitio de la exploración, es necesario realizar una inspección de la zona y replantear la ubicación de las líneas buscando la mejor disposición de las mismas. La primera parte de la recopilación de datos consiste en el tendido de cables y colocación de los geófonos a la distancia que sea conveniente según el sitio, teniendo en cuenta las necesidades de cada uno de los sitios a estudiar; para este caso las distancias entre geófonos fueron variables debido a la topografía de la zona, obteniendo una línea de 83.5 m de longitud.

Una vez verificado el buen funcionamiento de todo el montaje (sismógrafo, geófonos, sensor de movimiento del martillo, computador, cables, etc.) se procede a generar las ondas que serán registradas por los geófonos golpeando el martillo contra una placa destinada para tal fin; para las ondas *p* el golpe se realiza con la placa en posición horizontal.

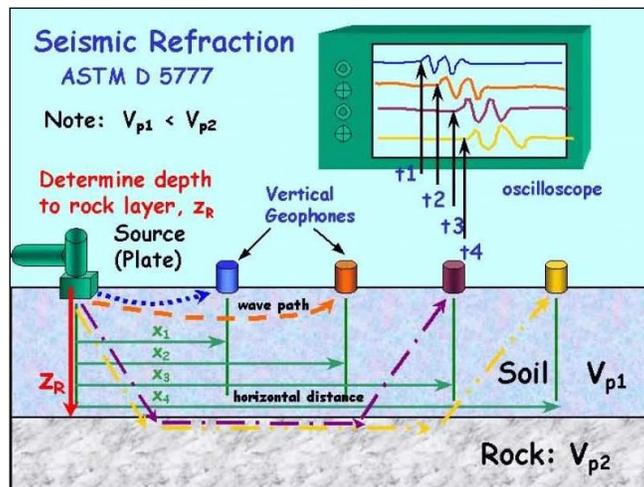


Figura 1. Esquema de funcionamiento de la línea de refracción sísmica, Lectura de Ondas *p*, (tomado de ASTM D5777)

Las ondas se generaron golpeando con el martillo de 20 lb una placa de polímero de alta resistencia en cada uno de los lugares de disparo y en la posición requerida según se muestra en los siguientes esquemas.

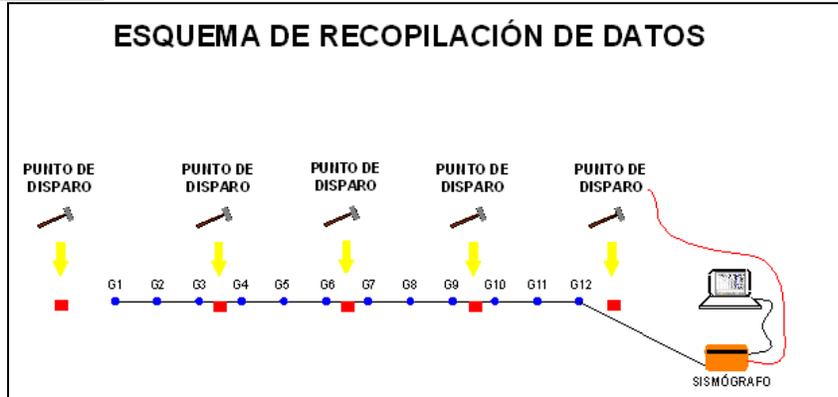


Figura 2. Esquema del montaje y recopilación de datos de la línea de refracción sísmica

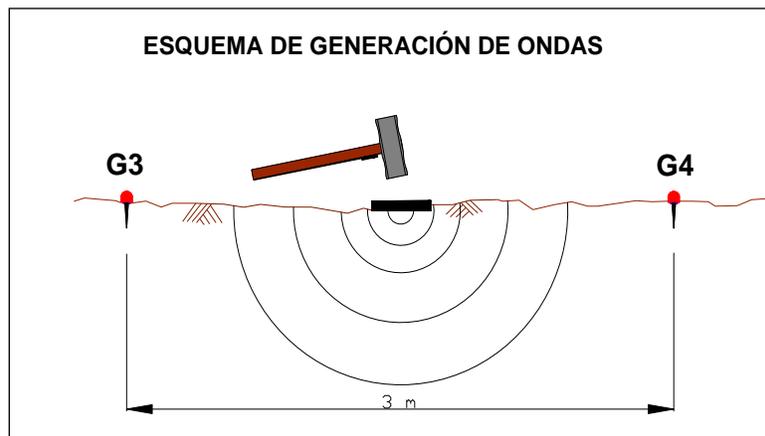


Figura 3. Generación de ondas "p"

En algunos casos, específicamente en aquellos en los que la calidad de las señales recibidas fuera débil, para cada uno de los puntos de disparo, se hace necesario apilar golpes con el fin de tener una mejor señal de la onda y su propagación por el medio. Para este caso, donde las señales recibidas tuvieron la calidad requerida para el análisis correspondiente, se realizaron disparos con un golpe único. En todos los casos el número de golpes apilados por disparo depende de la calidad de las señales recibidas. Una vez fueron adquiridos los datos en cada línea y antes de levantar el equipo se procedió a realizar una verificación preliminar en campo para evaluar la validez de los datos tomados.

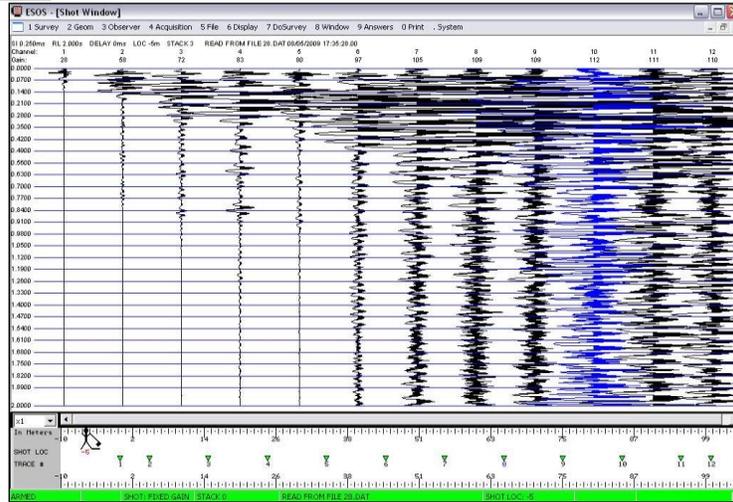


Figura 4. Registro de lectura de ondas tras la generación de ondas en el programa ESOS

- Ondas de Superficie

Fuente Activa

Para la fuente activa se ubicaron los geófonos de 4.5Hz en un arreglo lineal con una separación de 3m entre geófonos y se dispusieron cinco sitios para la generación de ondas, uno en cada extremo a tres metros fuera de la línea en la misma dirección de ésta y otros dos intermedios como en la figura que a continuación se muestra.

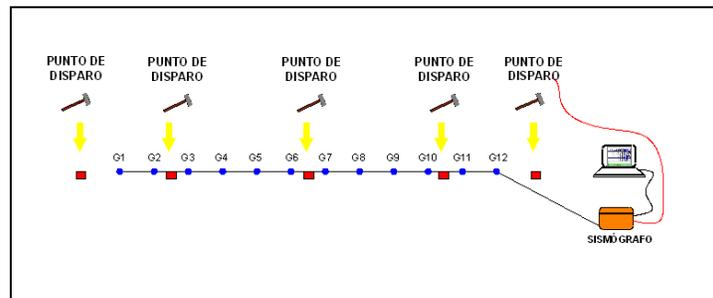


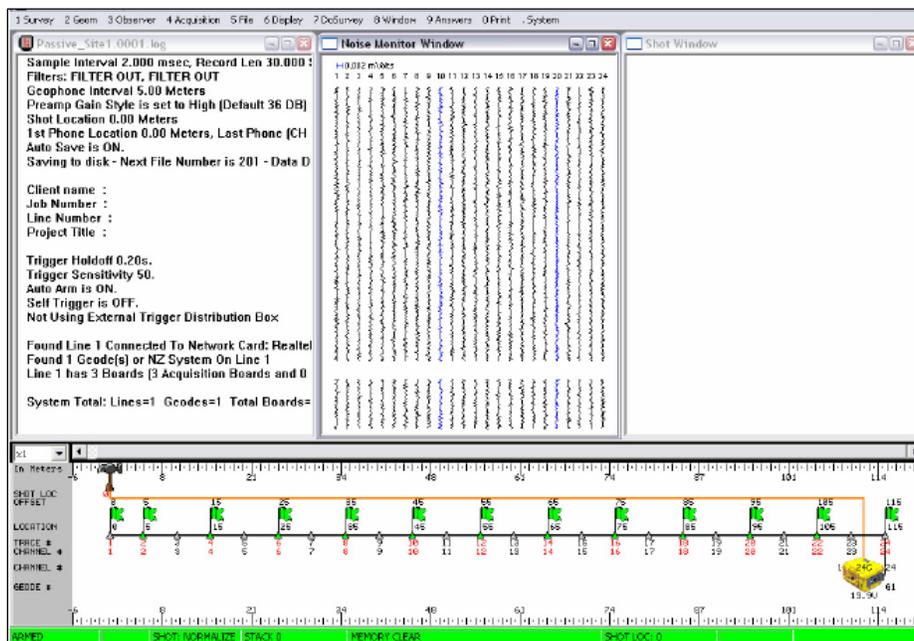
Figura 5. Esquema del montaje y recopilación de datos de ondas se superficie. Fuente Activa

Una vez configurado el arreglo se procedió a generar las ondas golpeando el martillo contra la placa destinada para tal fin; para las generación de ondas el golpe se realizó con la placa en posición horizontal sobre el suelo.

Fuente Pasiva

Para la medición de la fuente pasiva se utilizó una configuración lineal con separación de 5 m entre geófonos de 4.5Hz, lo que se traduce en una línea de 55 m de largo y se tomaron 20 registros de 32 segundos cada uno. La apertura de cada registro se hace manualmente desde el software de recolección de datos previamente configurado para esta modalidad.

Para la recolección de datos en esta modalidad se requiere que exista una fuente de ondas que sea constante durante el tiempo de cada registro, estas ondas provienen del ambiente como vehículos, sonido de un curso de agua, entre otras. Para este caso el sonido de la Quebrada fue la fuente para estas mediciones. La siguiente figura ilustra este tipo de registros.





A través del software PickWin, contenido en el paquete SEISIMAGER suministrado por la casa fabricante del equipo, se establecen en primera instancia unos tiempos de llegada asignados automáticamente y que deberán ser ajustados manualmente en caso de ser necesario.

Agrupamiento de archivos

Al determinar los tiempos de llegada para cada disparo, es necesario agruparlos ahora por cada línea, es decir, agrupar los disparos por tipo de onda y por línea para generar así un nuevo archivo correspondiente a la información de la línea de refracción sísmica. Este archivo compuesto tiene la información corregida de la llegada de las ondas generadas en cuatro puntos a cada uno de los geófonos.

Time term inversion/Tomografía

Con ayuda del software se preparan los gráficos *Tiempo vs. Distancia* y posteriormente se generan modelos de dos o tres capas (para el caso de los tiempos de retraso o "*Time Term Inversion*"), y de más de diez capas en el caso de las tomografías. Con la información ingresada y a través del método que se emplee el software calcula las velocidades y contactos entre estratos o capas.

Verificación

Una vez generado el modelo multicapa con velocidades y profundidades de contacto, se revisa el valor de RMS (Root Mean Square), para verificar que el error inducido por el cálculo interno del software sea admisible. El valor de RMS debe ser menor a 2.0 y en lo posible debe encontrarse entre 0.5 y 1.5 y debe replantearse el modelo tantas veces como sea necesario para que este valor de RMS esté dentro del rango de aceptación. Este valor de RMS dentro del rango garantiza la homogeneidad de velocidades por capa en el modelo generado.

Una vez realizados y verificados los modelos generados es necesario realizar una última revisión y esta corresponde a la comparación de los resultados con información existente de la zona y el medio objeto de estudio, tal como mapas geológicos, información de perforaciones, velocidad de propagación de materiales, etc., con el fin de establecer correlaciones y mejorar la interpretación final de los resultados del estudio. Para este se cuenta con las perforaciones 32A y 32B hechas en sitios cercanos a dos de los apoyos del puente, pero no se cuenta con ensayos de laboratorio para su análisis completo.



- **Ondas de Superficie**

Determinación de tiempos de llegada

A través del software PickWin, contenido en el paquete SEISIMAGER suministrado por la casa fabricante del equipo, se establecen aspectos en la geometría del arreglo y de los sitios en donde se generan las ondas, en este punto es posible verificar la calidad de las señales tomadas. Este procedimiento es válido tanto para la fuente activa como para la pasiva, solo que en el primer caso se trabaja con un archivo para cada análisis mientras que en el caso pasivo se trabaja con los 20 o más archivos al tiempo que posteriormente se agruparan en un único archivo.

Generación de Curvas de dispersión

Luego de fijar la geometría del arreglo de los geófonos, de los disparos y verificar la calidad de la información, se procede a generar las respectivas curvas de dispersión considerando que en los dos casos se está trabajando con contenidos frecuenciales diferentes.

Generación del modelo Vs

Teniendo una idea preliminar de la profundidad de exploración y con ayuda del software para realizar inversión de las curvas de dispersión, se generan modelos unidimensionales de la velocidad de propagación de ondas en profundidad para cada caso. Con base en la información ingresada y a través del método que se emplee, el software calcula las velocidades y contactos entre estratos o capas. Para la generación del modelo del sitio es necesario superponer el modelo activo y el modelo pasivo, este proceso es ejecutado por el software WaveEq que es el encargado en todos los casos de hacer las inversiones.

Verificación

Una vez generado el modelo, se deben comparar las curvas de dispersión calculada con la medida y debe replantearse el modelo tantas veces como sea necesario para que el error se encuentre dentro del rango de aceptación (menor al 5%). Este valor garantiza la homogeneidad de velocidades por capa en el modelo generado.

Una vez realizados y verificados los modelos generados es necesario realizar una última revisión y esta corresponde a la comparación de los resultados con información existente de la zona y el medio objeto de estudio, tal como mapas geológicos, información de perforaciones, velocidad de propagación de materiales, etc., con el fin de establecer correlaciones y mejorar la interpretación final de los resultados del estudio. Como se dijo anteriormente, para este caso no se posee, hasta la fecha, información completa de topografía en detalle, ni resultados de perforaciones del subsuelo, por lo que la información de análisis de resultados incluida en este informe es de carácter preliminar y está sujeta a ajustes posteriores al complementar la información al nivel de detalle requerido.

5. Análisis de Resultados

Del análisis de Ondas p en el subsuelo se puede obtener una tomografía multicapa de velocidad de propagación de ondas tal como se muestra a continuación.

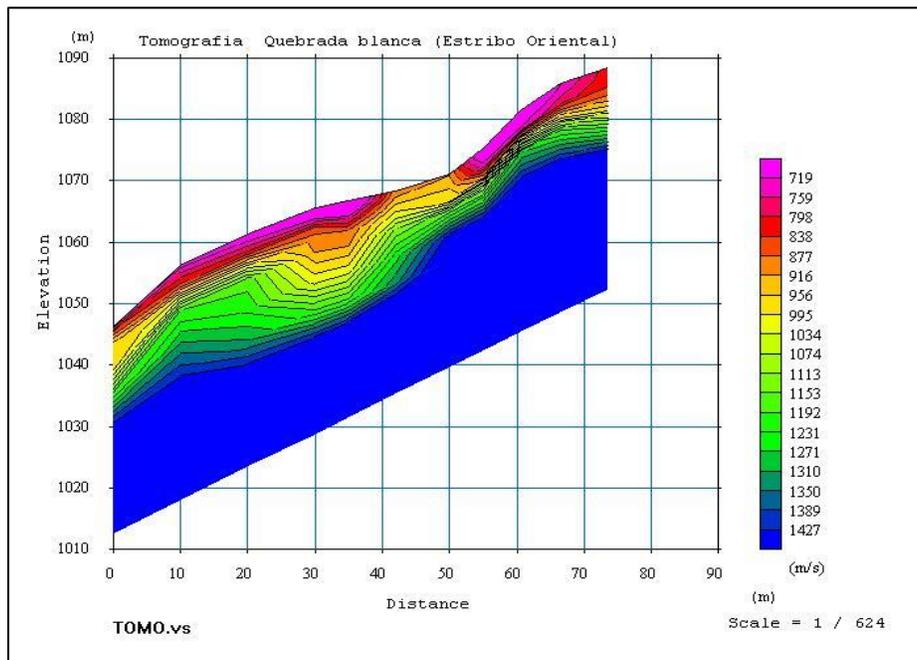


Figura 7. Tomografía de velocidades de propagación de onda P

El análisis de las ondas de superficie para determinar la velocidad de propagación de ondas s en el suelo arrojó el siguiente perfil unidimensional.

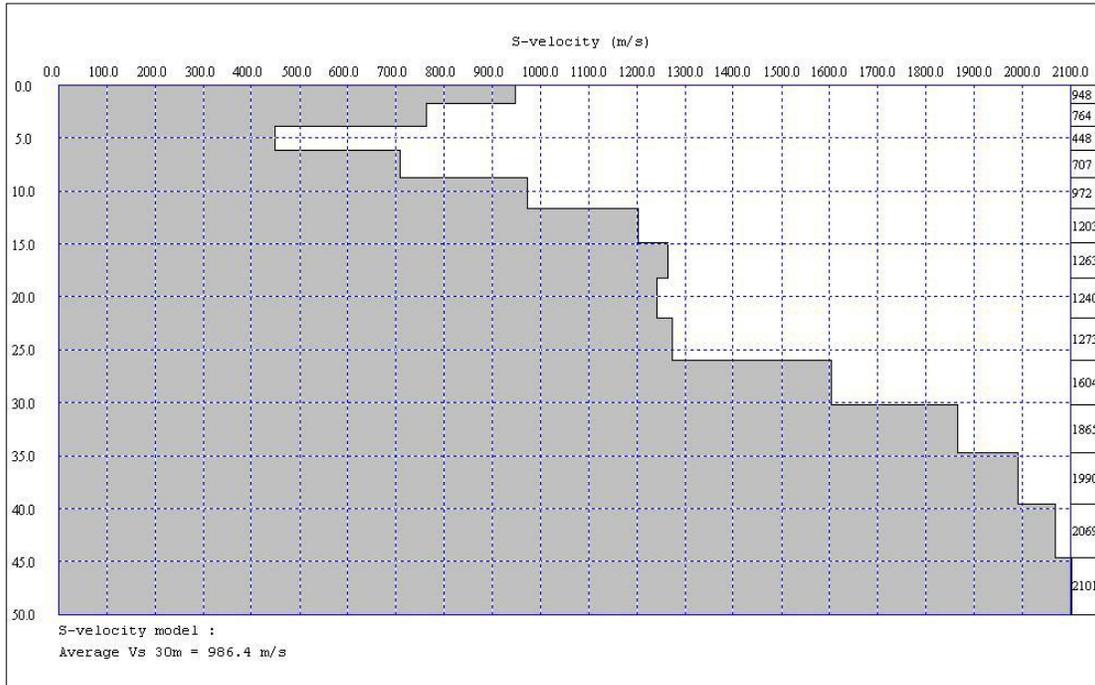


Figura 8. Perfil unidimensional de velocidad de propagación de ondas S.

6. Propiedades inferidas de la exploración Geofísica

En las tablas que se muestran a continuación se resumen las propiedades que se determinaron a partir de la exploración geofísica, entre ellas se encuentran:

- El módulo de Elasticidad para pequeñas deformaciones (E)
- El módulo de rigidez para pequeñas deformaciones (G)
- La relación de Poisson (ν)
- El valor esperado de N (ensayo de penetración estándar)
- A partir de los anteriores parámetros se determinó el módulo de reacción horizontal (Kh)

Las tres primeras propiedades fueron determinadas a partir de la teoría de la elasticidad.

El valor de N puede ser estimado por ejemplo, a partir de la correlación propuesta por Seed & Idriss (1981). Adicionalmente se puede definir el perfil de sitio.