



## **5.e Determinación en campo de las propiedades dinámicas del subsuelo con sonda suspendida**

### **5.e.1 Resumen**

Se presenta un informe parcial de los trabajos correspondientes a la determinación de las propiedades dinámicas en campo con sonda suspendida, SS. Aunque aún no comienza esta campaña de exploración, por causas ajenas al Instituto de Ingeniería, hasta el momento se han definido los alcances, estableciendo el marco metodológico, y la selección de los sitios más apropiados para ejecutar las pruebas SS, en función de la ubicación de pistas y terminales del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, NAICM. Asimismo, se ha puesto de manifiesto la necesidad de realizar sondeos de cono, CPT, y mixtos, SM, cerca de cada punto donde se ubicarán las SS para fines de validación de modelos empíricos para estimar velocidades de onda de corte a ser usados en el rubro j.

### **5.e.2 Objetivos y alcances**

Los objetivos del rubro “e” son:

- 1) Definir un programa complementario de exploración para la determinación de las propiedades dinámicas del subsuelo en el área de estudio, estableciendo la ubicación de sitios para la realización de pruebas de Sonda Suspendida, SS, en perforaciones realizadas por terceros.
- 2) Ejecución de las pruebas de sonda suspendida, con el fin de definir los perfiles de velocidades de transmisión de ondas de cortante y de compresión. Con las velocidades anteriores, se determinarán el módulo cortante dinámico, y el módulo de Poisson.

### **5.e.3 Ubicación de los sondeos**

En total se llevarán a cabo dieciséis ensayos, diez distribuidos en la zona de pistas, y el resto en los tramos de prueba. En las figuras 5.e.1 y 5.e.2 se muestra la ubicación de los pozos, para ambos regiones. En la Tabla 5.e.1 se presentan las coordenadas de UTM correspondientes. Cerca, o en el mismo punto donde se efectúe cada prueba de sonda suspendida se deberá realizar un sondeo mixto, con el objetivo de obtener muestras inalteradas a diferentes profundidades, la cuales se ensayarán en el laboratorio para determinar la variación del módulo de rigidez al cortante dinámico del suelo, y el amortiguamiento para diferentes deformaciones angulares, utilizando diferentes técnicas experimentales. Asimismo, cerca de cada sitio donde se realice un ensayo de sonda suspendida se deberá ejecutar un sondeo de cono, CPT, para validar modelos empíricos de predicción de velocidad de onda de corte, a ser utilizados en el rubro j.



El personal del Instituto de Ingeniería está en espera de que inicien los trabajos de campo para llevar a cabo los ensayos.

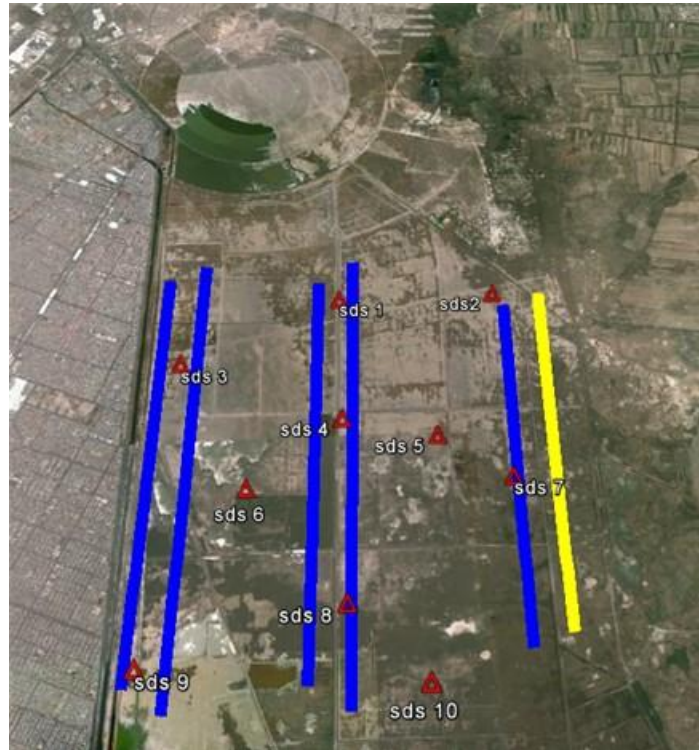


Tabla 5.e.1. Ubicación de los puntos donde se ejecutarán los ensayos de sonda suspendida en la zona de las pistas.

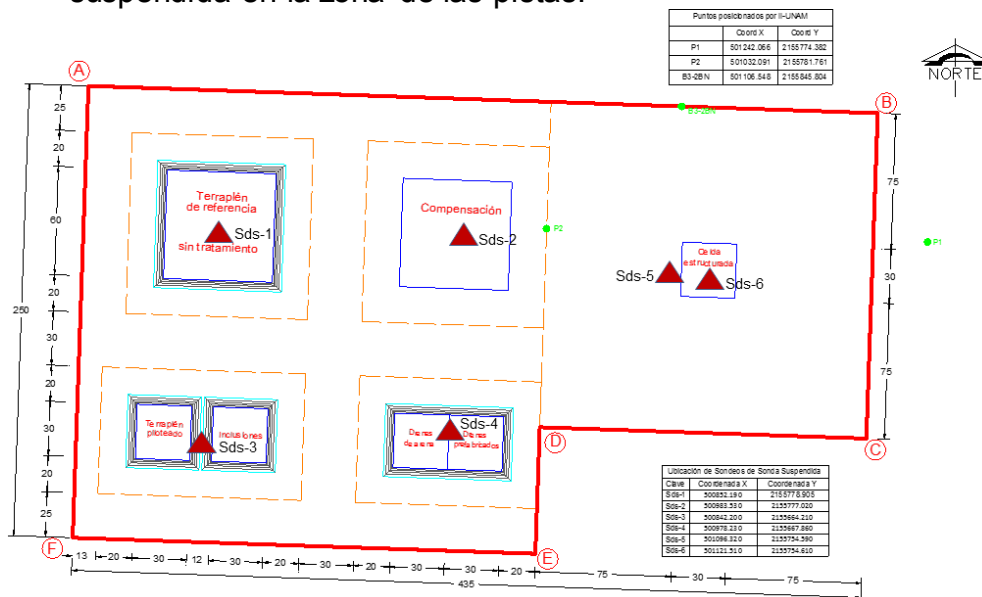


Figura 5.e.2. Ubicación de los puntos donde se ejecutarán los ensayos de sonda suspendida en la zona de los tramos de prueba.



Tabla 5.e.1. Coordenadas UTM correspondientes a la ubicación de los ensayos de sonda suspendida.

Ubicación	Sondeo	coordenadas UTM	
		X (Este) <i>m</i>	Y (Norte) <i>m</i>
Pistas	Sds-1	500722.284	2160825.668
	Sds-2	502507.194	2160641.111
	Sds-3	498973.215	2159821.671
	Sds-4	500662.117	2159119.129
	Sds-5	501705.235	2158713.896
	Sds-6	499779.660	2158303.797
	Sds-7	502544.146	2158240.070
	Sds-8	500594.317	2157085.950
	Sds-9	498859.102	2156439.572
	Sds-10	501623.240	2156378.221
Tramos de prueba	Sds-1	500852.190	2155778.905
	Sds-2	500983.530	2155777.020
	Sds-3	500842.200	2155664.210
	Sds-4	500978.230	2155667.860
	Sds-5	501096.320	2155754.590
	Sds-6	501121.510	2155754.610

#### 5.e.4 Descripción del equipo y procedimiento de ensaye

La sonda suspendida es uno de los ensayos de campo disponibles para determinar las velocidades de onda de cortante y compresión ( $V_s$  y  $V_p$ , respectivamente) en perfiles de suelo y roca. La medición se puede hacer en sondeos sin ademe llenos de mezcla de bentonita con agua o con un ademe de PVC con un relleno de bentonita-cemento entre el suelo y el ademe. Este equipo permite determinar las velocidades en un segmento de 1 m de columna de suelo que rodea a una perforación en la que se miden las velocidades de onda de arriba.

Para la ejecución del ensaye se requiere la perforación (que realizará la empresa responsable de los sondeos), la sonda (con la instrumentación), el cable, el winch o malacate y el sistema de control y adquisición de datos. La prueba consiste en un golpe (transmisor) y dos geófonos biaxiales (superior e inferior) separados por unos filtros físicos (elemento flexible). La figura 5.e.3 muestra los elementos básicos que conforman la sonda. El personal del Instituto de Ingeniería está en espera de que inicien los trabajos de campo para llevar a cabo los ensayos de sonda suspendida.

En la prueba, el sistema genera ondas que viajan a través del suelo y son registradas por los geófonos. La sonda se mueve por la perforación en sentido ascendente o descendente, produciendo una señal con amplitud aproximadamente constante en toda la perforación. El sistema excitador consiste dos solenoides con polarización reversible para generar ondas horizontales de cortante (SH) y de compresión (SP). En otro punto se encuentran los receptores (R1 y R2) separados 1 m, los que registran las



vibraciones emitidas con el martillo. Estas señales se registran y amplifican para luego mandarlas al sistema de adquisición de datos. Los cables conductores están envueltos por un cable metálico, el que soporta el peso de la sonda y que se enreda en el malacate o winch.

La sonda completa es soportada por el cable, de tal forma que el cuerpo del equipo no hace contacto directo con la perforación. Las ondas de compresión que viajan por el líquido (agua o la mezcla de bentonita-agua) se convierten en ondas S y P en el suelo o roca periféricos. La separación de estas ondas se hace de la siguiente forma:

- La orientación de los receptores horizontales se mantienen paralelos al eje de la excitación, maximizando la amplitud de la señal receptora.
- Para cada profundidad, las ondas S son obtenidas con la excitación generada en la dirección opuesta, produciendo ondas S con polaridad opuesta, proveyendo una característica de las ondas S, distinta que el signo de la onda P.
- Por la distancia que separa el punto de la excitación y el receptor 1 (R1 ó cercano) permite que la onda P se amortigüe significativamente, después de que la onda S arribe al receptor. En suelos o rocas con velocidades altas, el cilindro donde se genera la excitación se extiende, permitiendo una mayor separación entre las ondas P y S.
- En suelos saturados los valores de las ondas P son suficientemente altos que permiten una razonable separación con el arribo en las ondas S.
- El arribo directo de las ondas del fluido por el cual se transmiten las ondas no se detectan en los sensores porque la longitud de onda del pulso en el fluido es significativamente alta respecto a las dimensiones del anillo alrededor de la sonda (escala de metros versus centímetros), evitando la transmisión importante de energía a través del fluido.

Los datos para cada receptor son almacenados en diferentes canales del sistema de adquisición de datos. La sonda cuenta con 6 canales, con adquisición simultanea de dos canales, con 1024 muestras en cada uno. Aunque los filtros digitales se pudieran utilizar durante la adquisición, éstos se aplican, si el usuario lo desea, en el análisis posterior a la ejecución del ensaye.

La interpretación de los datos en general es relativamente sencilla, pero una pobre adquisición lleva a una interpretación ambigua. La calidad de los datos generalmente está ligada con la calidad de la perforación. El mejor método de perforación corresponde a un pozo obtenido por rotación y lavado. Además, la calidad de la perforación se deteriora con el tiempo, luego de haber sido concluida. Cuando existe la posibilidad de que el material que conforma el perfil de suelo tenga caídos o se cierre, se puede ademar con PVC, pero no con acero. Los resultados a profundidades someras ( $\leq 5$  m) no siempre son de buena calidad, debido a que está poco confinado el suelo.

Chen, et al. (2008) comentan y ejemplifican que al tomar dos señales de arribo se puede definir el punto de llegada de las ondas S en más de un punto, pero con

diferentes resultados. La figura 5.e.4 muestra señales en las que se define el tiempo considerando el momento en el que se aprecia el arribo de las ondas S (TA), el segundo intervalo de tiempo para el primer valle (TB) y el tercero para la primera cresta (TC). En apariencia, pudiera parecer un procedimiento apropiado, pero al realizar el cálculo de la velocidad se observa que ésta disminuye al pasar de la condición A a C. Lo que recomiendan estos autores es tomar como tiempo de arribo de las ondas S el punto donde se aprecia que éstas aparecen, es decir TA.

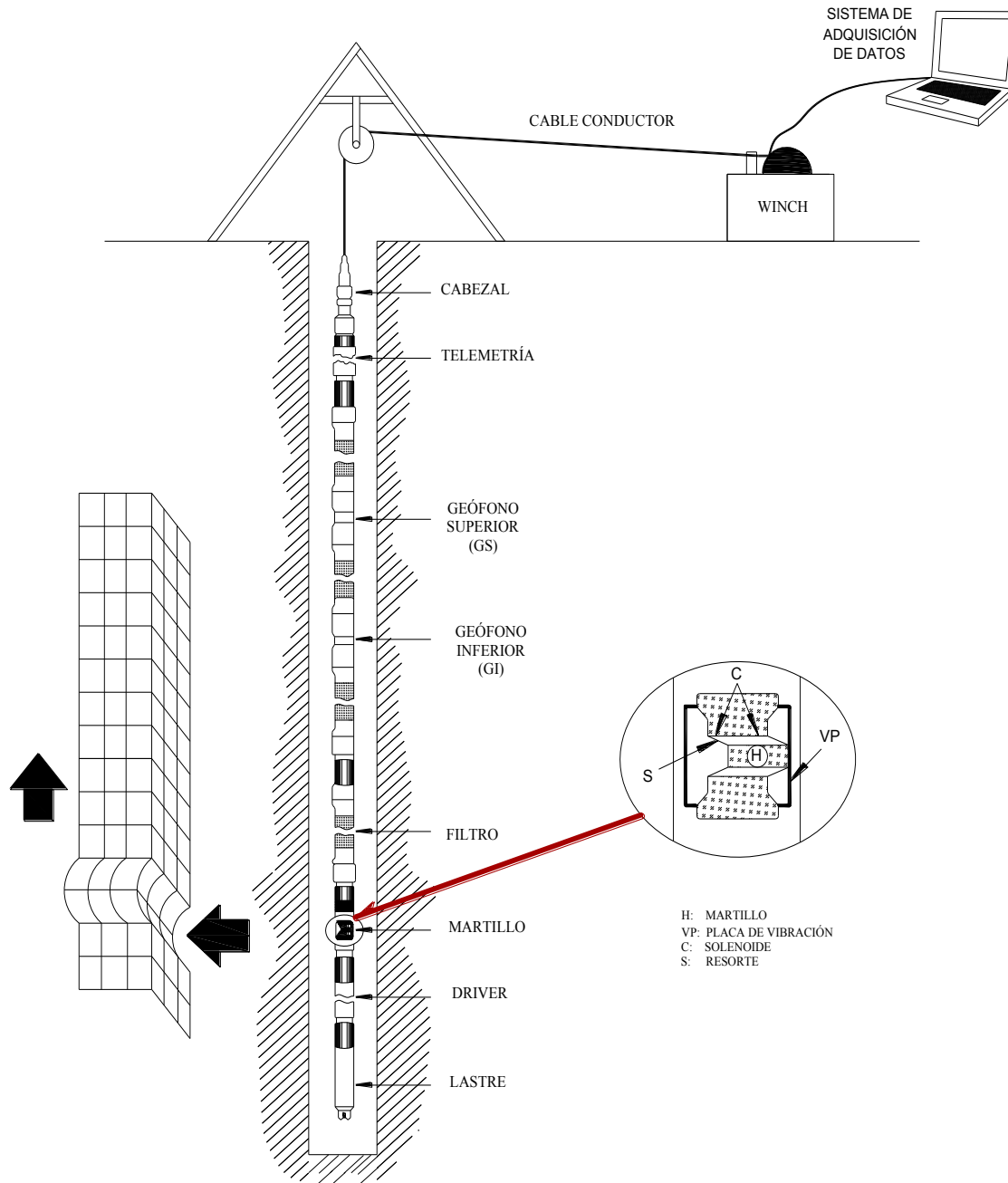


Figura 5.e.3. Esquema general del sistema perforación-sonda suspendida (Modificado de Bringen y Davie, 2010).

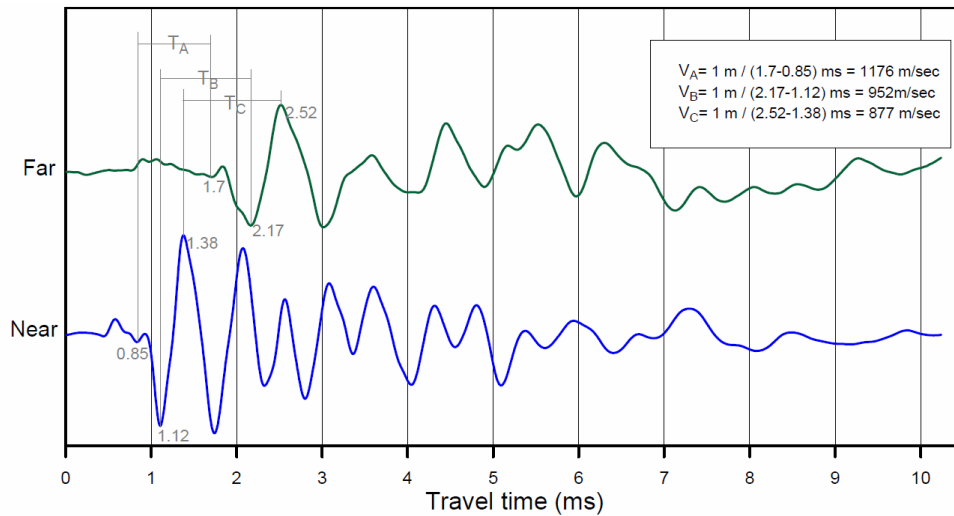


Figura 5.e.4. Criterios para definir los tiempos de arribo de las ondas S (Chen et al., 2008).

Estos mismos autores hacen la observación de que en algunos casos las señales emitidas para determinar las ondas S pueden apoyar para obtener los tiempos de arribo de las ondas P y viceversa, lo cual se ejemplifica en la figura 5.e.5. Se aprecia que en las señales H1 y H2, de los geófonos lejanos y cercanos para determinar las ondas S, respectivamente, se puede definir el arribo de las ondas P (punto I de las señales H2), mientras que en las señales V1 y V2 para determinar las ondas P (puntos III y II de las señales V1 y V2, respectivamente), se pueden definir los arribos de las S. Este ejercicio puede ayudar a definir cualquiera de los arribos de las dos ondas cuando la señal que le corresponde no es muy clara o bien para corroborar que el punto de arribo asignado es el correcto.

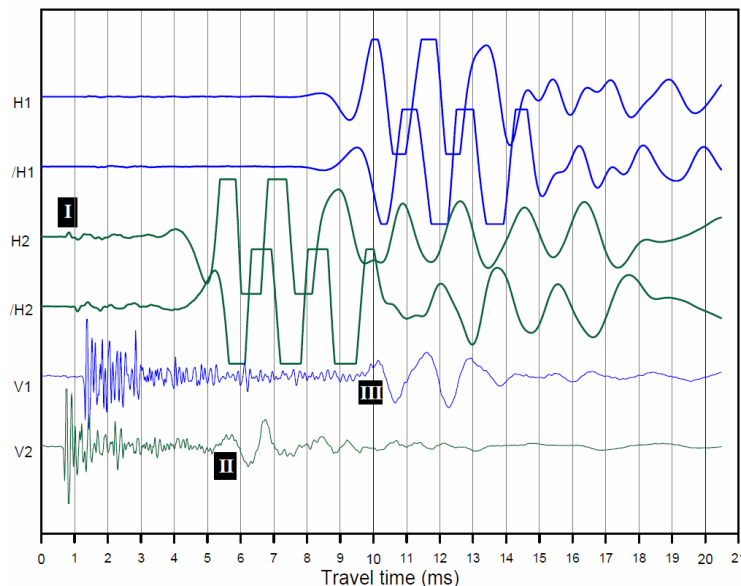


Figura 5.e.5. Identificación del arribo de las ondas P y S (Chen et al., 2008).





### **5.e.4.1 Procedimiento del ensaye**

Es importante que se cubran los siguientes requerimientos para ayudar a que los resultados de los ensayes sean exitosos:

- Permisos para ingresar al sito donde se realizará el estudio.
- Condiciones físicas adecuadas del camino para ingresar en vehículo hasta donde se hará el estudio.
- El grupo de perforación dará aviso al personal del Instituto de Ingeniería responsable de la ejecución de los ensayes con al menos de 24 hrs de anticipación sobre el término de la perforación de cada pozo, de tal forma que al momento de que se saquen las barras de perforación, se tenga el equipo de sonda suspendida armado para iniciar el ensaye.
- Los sondeos deben estar perforados en un diámetro de 4” y se deben mantener rellenos durante la prueba con una mezcla de bentonita con agua (fluido de perforación), para retardar el cierre de la perforación.
- En casos específicos donde las condiciones del subsuelo lo requieran y el personal del instituto lo defina, se deberá ademar la perforación con tubo de PVC reforzado de 4” de diámetro, para lo cual será necesario ampliar la perforación a 6” y rellenar el espacio entre el tubo y el suelo con una mezcla de bentonita con cemento y agua.
- Durante la ejecución de los ensayes no puede estar en operación equipo que genere vibraciones en el terreno, para evitar que las mediciones experimentales se pueden ver afectadas.

**Nota:** La ubicación y profundidad de los sitios donde se realizará el ensaye de sonda suspendida se indica en la Adenda a la Nota Técnica No. 6 de este Primer Informe Parcial (que se localiza en la parte de Anexos).

#### **5.e.4.1.1 Descripción de la sonda suspendida**

La medición de las velocidades de onda en el suelo se realizó con la sonda suspendida (fabricado por OYO Corporation en Japón y distribuida por su subsidiaria, Robertson Geologging). Esta técnica determina directamente la velocidad promedio a cada metro a lo largo de la perforación de interés, mediante la medición del tiempo transcurrido entre la fuente y los geófonos receptores.

La sonda suspendida se introduce en un pozo lleno de una mezcla de bentonita y agua para estabilizar la perforación, o en su caso, ademado con tubería de PVC, lleno de agua, y una mezcla de bentonita con cemento y agua entre el tubo y el suelo. La sonda queda suspendida de un cable a través de una polea. El cable lleva en el centro la conexión que transmite la señal eléctrica de la fuente a la unidad de control y medición colocada en la superficie (Micrologger). Con esta técnica se miden las velocidades de onda de compresión y de cortante en el suelo.

El equipo de sonda suspendida consiste en un sistema de adquisición de datos, un malacate mecánico, un tripié y la propia sonda. Esta última cuenta en su parte inferior



con una fuente de excitación, un filtro y dos unidades de medición con dos geófonos colocados en dos direcciones (uno horizontal y otro vertical), dichos geófonos están separados un metro por filtros de neopreno para atenuar la vibración entre ellos. Las mediciones de ondas de compresión y cortante son obtenidas mediante la generación de una excitación dinámica en dirección transversal al eje de la perforación, que se propagan al suelo circundante. Tanto la excitación como la respuesta se transmiten a través del agua o lodo bentonítico y son registradas por los geófonos horizontales alineados con la fuente de cada estación, y guardadas para su posterior análisis. Se produce otra onda en dirección opuesta a la primera, con objeto de verificar que la onda generada sea de cortante S. Luego se produce otra onda que se detecta con los geófonos verticales, para estimar las ondas de compresión. Las señales de respuesta son analizadas posteriormente para calcular las Vs y Vp.

El procedimiento general de operación es como sigue:

- La sonda se suspende a la profundidad a la que se desea hacer la medición. La profundidad registrada corresponde a la distancia entre la superficie y el valor medio entre los dos geófonos receptores.
- Se activa el martillo en una dirección horizontal y se registra la señal en ambas direcciones horizontales en los geófonos (SH).
- Se aplica una excitación en la dirección horizontal opuesta, produciendo una polaridad opuesta a la primera (SH).
- Finalmente, se aplica la señal en la primera dirección y se activa el geófono vertical, el cual representa la señal de las ondas P (SP).
- La fuente de excitación es un martillo solenoide electromagnético, que al ser activado produce en el agua una onda perpendicular al eje largo del sondeo, la que a su vez se transmite a la pared del pozo, así, el pozo es excitado indirectamente a través del agua.

A continuación se presenta los componentes de la sonda suspendida.

#### *5.e.4.1.2 Micrologger*

Es una unidad donde se conecta a la PC, con sistema operativo XP o Windows vista, a 32 ó 64 bits. Los conectores con que cuenta son para la entrada de la señal del sensor de profundidad instalado en el tripié, para la PC donde se visualizan las señales experimentales y para el suministro de corriente a los acondicionadores (Figura 5.e.6).

La función del micrologger es el acondicionamiento de la señal de los sensores (geófonos y sensor de desplazamiento) y la adquisición de los datos de éstos y como interfaz con la PC para la visualización gráfica de las señales. Para el análisis de las señales, se cargan los archivos generados experimentalmente y se interpretan mediante el software instalado en la PC.



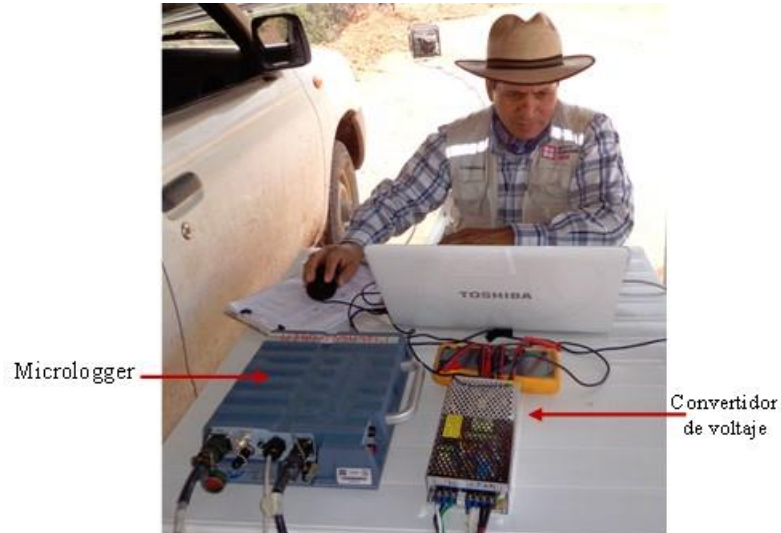


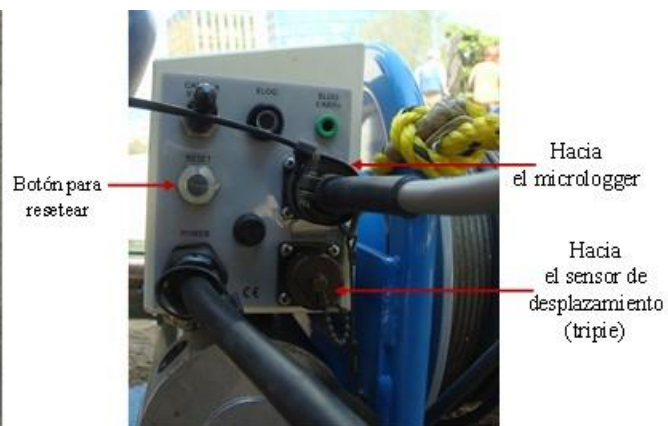
Figura 5.e.6. Sistema de adquisición de datos (Micrologger)

#### 5.e.4.1.3 Winch o malacate

El carrete del winch tiene un cable de 3/16” con 175 m de longitud. El cable de acero que soporta la sonda aloja en su alma los cables por los que viaja la información de la PC al martillo, para generar la excitación dinámica y de los geófonos a los acondicionadores de señal, razón por la cual se debe tener el debido cuidado para operarlo correctamente. El malacate, donde se aloja el cable, cuenta con un botón de control de velocidad (mínimo y máximo), para subir o bajar la sonda (botones up y down, respectivamente), además del de paro de emergencia (stop), tal como se muestra en la figura 5.e.7.



a) Vista general,



b) conexiones

Figura 5.e.7. Winch o malacate de la sonda suspendida.

#### 5.e.4.1.4 Tripié

El tripié soporta la polea de 500 mm de perímetro (dos vueltas equivalen a un metro de desplazamiento) por la que corre el cable que soporta la sonda. A esta polea se encuentra adosado un sensor que registra el desplazamiento axial de la sonda durante el ensaye. El tripié debe quedar bien fijo y alineado con la perforación (figura 5.e.8), en sentido vertical, y al malacate, en sentido horizontal.

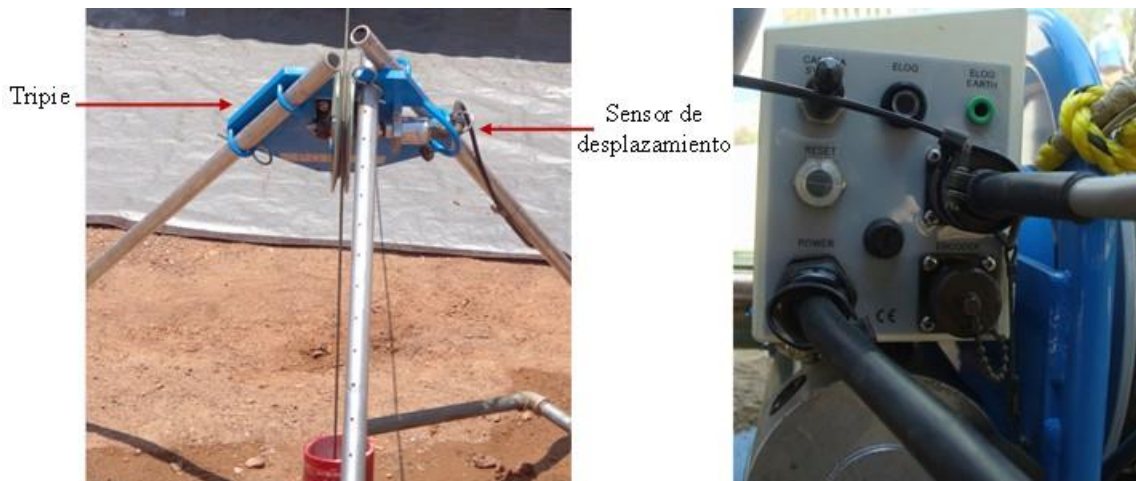


Figura 5.e.8. Conexión del tripié hacia el malacate.

#### 5.e.4.1.5 Orden de ensamblaje de la sonda suspendida

Las partes que componen la sonda suspendida, en el orden que se ensambla en el campo, es la siguiente:

- Telemetría. Ésta va conectada a un cable de acero que viene del malacate, por el cual viajan las señales de excitación al martillo y respuesta de los geófonos (figura 5.e.9).
- Geófonos. Como se ha comentado, éstos tienen una distancia de separación entre ellos de 1 m y se encuentran separados por filtros físicos de plástico flexible, como se observa en dicha figura 5.e.10.
- Filtros en sus tramos largo y corto. Éstos tienen la función específica de amortiguar al máximo la señal que genera el martillo y evitar que viaje por la propia sonda y llegue a los geófonos antes que la que viaja por el suelo (figura 5.e.11).
- Martillo. Este dispositivo genera las ondas de propagación que viajan a través del suelo (figura 5.e.12).
- Driver y el lastre de la sonda suspendida. Esta última tiene la función de mantener alineada la sonda a lo largo de la perforación (figura 5.e.13).



Figura 5.e.9. Telemetría



Figura 5.e.10. Geófonos



Filtro en su tramo largo      b) filtro en su tramo corto  
Figura 5.e.11. Filtro de diferentes longitudes.



Figura 5.e.12. Martillo



a) Driver



b) Lastre

Figura 5.e.13. Componentes de la sonda suspendida.

#### **5.e.4.2 Procedimiento para armar la sonda suspendida y su operación**

- Se arma el tripié, se debe tener cuidado que el transductor quede por la parte baja de la placa metálica, sobre la que está montada la polea.
- Se alinea el winch o malacate, con respecto a la polea y la perforación para hacer la prueba, a una distancia mínima entre el tripié y el malacate de 5 m. La alimentación del winch debe ser de 12 volts. Se conecta a la batería (rojo a “+” y negro a “-”).
- Se conecta el inversor de corriente a la batería. Ésta alimenta de corriente a la computadora y a la fuente de poder que suministra de energía al micrologger.
- Se conectar el micrologger a la fuente de poder. Se verifica que la fuente de poder tenga 12 Volts, para evitar que se quemen las tarjetas de adquisición del micrologger.
- Se conecta el cable que va del micrologger hacia la laptop (USB).
- Se realiza la conexión de la sonda en el siguiente orden: telemetría, geófonos, filtro en su tramo largo (2 m), filtro en su tramo corto (1 m), martillo, driver y lastre.
- Durante el armado de la sonda suspendida se requerirá engrasar los arosellos con grasa silicón, para evitar que el agua llegue a la parte eléctrica.



- Checar la configuración del software. Verificar que corresponda el malacate con el que se tiene físicamente (polea de 500 mm de diámetro), ya que comercialmente existen de otros diámetros. Se verificar el funcionamiento del martillo que va a generar las ondas que viajan a través de las paredes de la perforación.
- Se ubica la posición inicial de la sonda suspendida dentro de la perforación del sondeo a realizar.
- El ensaye se inicia moviendo la sonda en sentido ascendente o descendente en el sondeo, según se escoja, y midiendo las velocidades de onda a cada 50 cm (distancia mínima más común en la práctica). En la Figura 5.e.14 se observan las partes que componen la sonda suspendida y la colocación de éstas en la perforación a donde se realizará las mediciones de las velocidades de onda.

En la figura 5.e.15 se muestra la sonda ya ensamblada, en proceso de colocación en la perforación y en la figura 5.e.16, operando.



Figura 5.e.14. Colocación de la sonda suspendida en el pozo

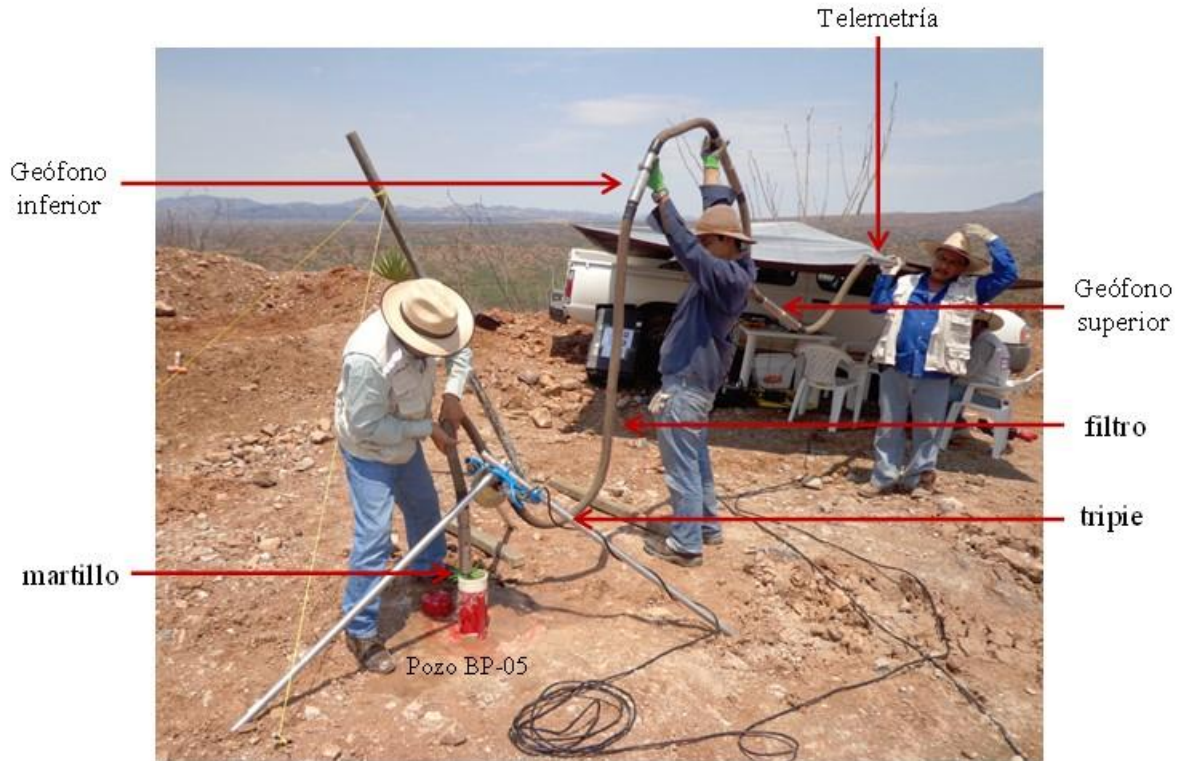


Figura 5.e.15. Sonda suspendida operando



Figura 5.e.16. Sonda suspendida operando





### **5.e.4.3 Análisis de las señales obtenidas con la sonda suspendida (suspension p-s logging system)**

Se utiliza el programa PS Logger application versión 1.2, para analizar las señales que se obtuvieron en campo y determinar los tiempos de arribo de las ondas P y S. El criterio utilizado es definir la primera deflexión de cada una de las señales sobre el eje vertical, lo que nos indica el arribo del frente de las ondas P y S.

Los geófonos utilizados para detectar ondas de corte son del tipo libremente suspendido y se mueven en fase con el agua. La fuente y los detectores están conectados por un tubo flexible y elástico para evitar la incidencia del ruido o de algunas otras interferencias, aunque para ello la sonda cuenta con un sistema de filtros. El impulso generado en la fuente se detecta en los sensores superiores que están a una separación constante de un metro.

El martillo de la sonda suspendida funciona como fuente y aplica tres golpes, el primero genera los frentes de onda P (señales en color azul), el segundo golpe genera los frentes de ondas para determinar las señales S (señales en color rojo), y el tercer golpe tiene la finalidad de verificar el arribo de las ondas S (señales en color verde).

La Figura 5.e.17 muestra un ejemplo de las mediciones realizadas con la sonda suspendida. Con los registros de los geófonos inferior y superior se determinó los tiempos de arribo de cada una de las señales.

Las velocidades de onda se calculan mediante la siguiente expresión:

$$V_{p,s} = \frac{1}{t_{p,s2} - t_{p,s1}} \quad (5.e.1)$$

donde

$t_{p,s1}$ : Tiempos de arribo de las ondas P y S en el geófono 1, en s.

$t_{p,s2}$ : Tiempos de arribo de las ondas P y S en el geófono 2, en s.

$V_{p,s}$ : Velocidades de la onda P o S, en m/s.

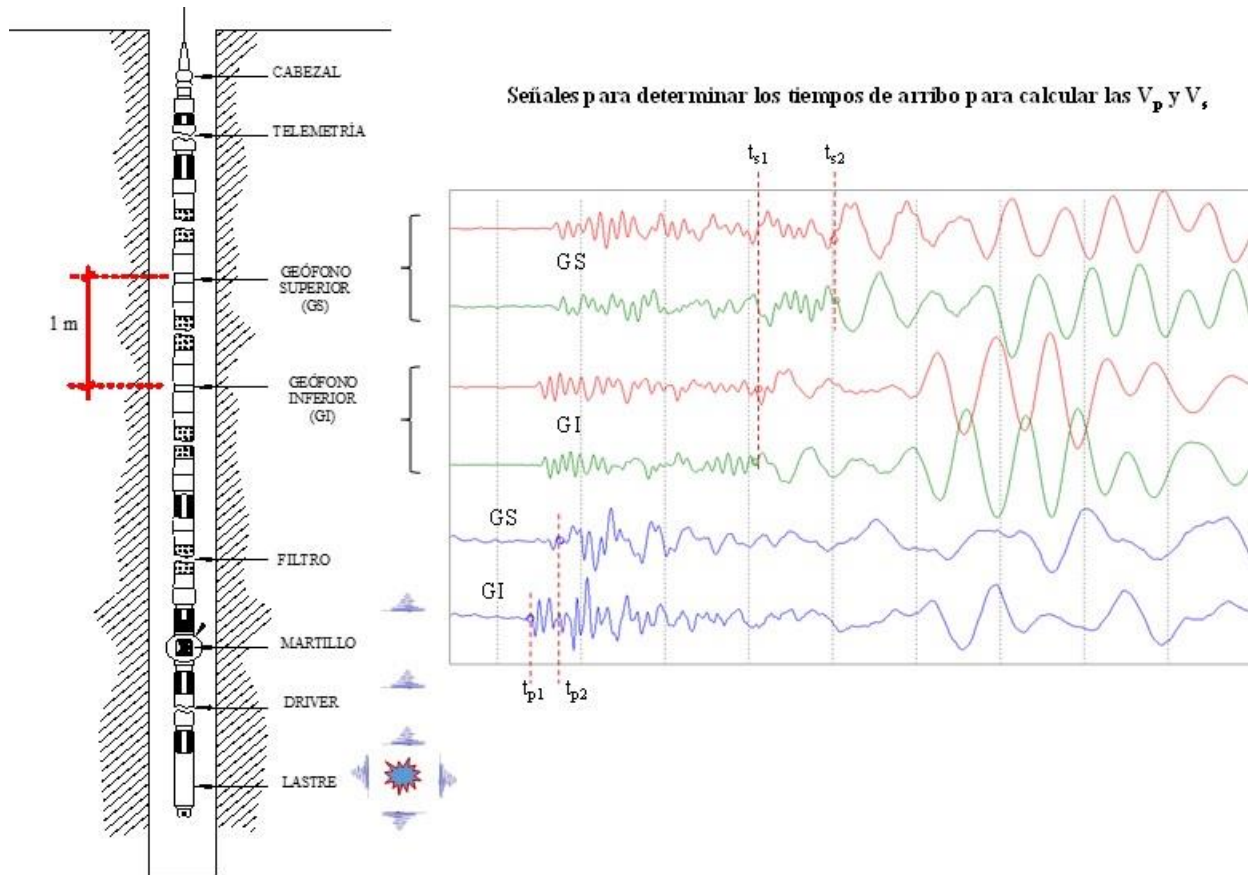


Figura 5.e.17. Determinación de los tiempos de arribo

### 5.e.5 Presentación y análisis de resultados

Esta actividad queda pendiente a que Aeropuertos y Servicios Auxiliares, ASA, asigne a la empresa que realizará las perforaciones, y **el Instituto de Ingeniería** pueda ejecutar los ensayos de sonda suspendida.

Las características de las perforaciones así como su ubicación pueden consultarse en los incisos 5.e.3 y 5.e.4. **De igual forma, en la Adenda a la Nota Técnica No. 6 de este Primer Informe Parcial (que se localiza en la parte de Anexos) puede consultarse con mayor detalle la ubicación y profundidad de los sitios donde el Instituto de Ingeniería realizará el ensayo de sonda suspendida.**

Los resultados se incluirán en el Segundo Informe Parcial.