



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

PROCEDIMIENTO PARA OBTENER VELOCIDADES DE
ONDA (V_p Y V_s) EN CAMPO CON SONDA SUSPENDIDA

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN GEOTECNIA

PRESENTA:

ING. OMAR I. JUÁREZ BARAJAS

DIRECTOR DE TESINA: DR. OSVALDO FLORES CASTRELLÓN

MÉXICO, D.F.

NOVIEMBRE 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

“Todos somos genios, pero si juzgas a un pez por su capacidad de escalar árboles,
vivirá toda su vida creyendo que es inútil”
Albert Einstein

La dedicación de hacer las cosas cada vez mejor es la que me ha mantenido en donde estoy, la que me lleva a lugares donde nunca creí estar, incluso, me abstiene de estar en sitios que aún no son para mí.

Agradeciendo siempre a mis padres Ma. Elena Barajas Estrada e Ismael E. Juárez Cruz, el apoyo incondicional que me han brindado siempre. Gracias. No tienen idea de cuánto los amo.

A la que ha hecho posible mi historia de amor y el gran deseo de querer realizar una familia, Ale te amo preciosa, gracias por tu apoyo, sabemos que nos ha costado lágrimas y enojos llegar a donde estamos, pero aquí seguimos en pie. Gracias nena.

Mis hermanas Brenda y Viri que son un fuerte apoyo para poder perder la rutina y divertirnos siempre, aun cuando no se vea una razón.

A mis amigos de la especialidad y sobre todo a Juan Carlos, que me apoyó en varios proyectos y nos seguimos echando la mano para todo. Tienes mi apoyo incondicional. Para los Wakaritas que seguimos siendo los mismos, aunque nuestros caminos nos lleven a lugares distintos. Es un gusto seguir compartiendo con ustedes los días de comidas y titulaciones.

Un agradecimiento especial al Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, a su gente trabajadora como los laboratoristas German y Javier. A los Académicos Dr. Mario Flores y Dr. Ovando Shelley y en especial a mi tutor Dr. Osvaldo Flores Castrellón, por todo el apoyo recibido, la estancia y las salidas a campo que más que trabajo, son enseñanzas para mi vida profesional y personal.

Y sobre todo a mi gran casa, la casa de todos, donde todos cabemos y nos apoyamos, donde todos aprendemos y sobre todo, donde nos esforzamos por ser mejores personas día con día. Gracias UNAM.

A las personas que se encuentran en mi diario andar, les agradezco.

Índice

	Página
Parte 1 Introducción	1
1.1 Objetivos particulares	1
1.2 Alcances	1
1.3 Métodos de exploración.....	2
1.3.1 Métodos directos	2
1.3.2 Métodos indirectos	4
1.4 Tipos de ondas	5
1.5 El uso del ensaye de sonda suspendida para determinar perfiles de velocidades 5	
Parte 2 Descripción del equipo.....	11
2.1 Componentes de la sonda suspendida	11
2.1.1 <i>Micrologger</i>	11
2.1.2 Malacate.....	12
2.1.3 Tripié	13
2.2 Sonda Suspendida	14
2.2.1 Telemetría	15
2.2.2 Geófonos.....	15
2.2.3 Filtros.....	16
2.2.4 Martillo.....	16
2.2.5 Driver y Lastre	17
Parte 3 Procedimiento de ensaye	18
3.1 Armado del equipo.....	18
3.2 Ejecución del ensaye.....	22
3.2.1 Condiciones que debe cumplir la perforación	22
3.2.2 Configuración de la prueba y toma de datos.....	22
3.3 Cálculo de parámetros.....	26
Parte 4 Interpretación de resultados	29
Parte 5 Conclusiones y recomendaciones	31
Conclusiones.....	31
Recomendaciones.....	32

Anexo A Informe fotográfico 33

Referencias y Bibliografía..... 39

Parte 1 Introducción

Este trabajo de tesina aborda los aspectos más importantes que se deben tomar en cuenta para la ejecución de un ensaye de sonda suspendida, desde el conocimiento del equipo con el que se va a contar hasta los resultados que llegan a mostrarse, pasando por el análisis en computadora y la interpretación de estos datos.

Esta tesina, se realizó con la ayuda de varios sondeos que se realizaron en campo en la zona lacustre del valle de México.

1.1 Objetivos particulares

- Describir el principio de operación del equipo de sonda suspendida, de los elementos físicos que lo conforman, los procedimientos de ensamble del sistema, el diseño de la prueba y operación del *software* y ejecución del ensaye.
- Describir el procedimiento de cálculo de velocidades de onda de cortante y compresión.
- Realizar un ensaye experimental en campo y obtener los perfiles de velocidades y de parámetros dinámicos.

1.2 Alcances

Generar un documento que sirva como guía y donde se presente la descripción del equipo, del procedimiento de prueba y de un ensaye experimental, en el que se obtengan los perfiles de parámetros dinámicos del suelo.

1.3 Métodos de exploración

En los métodos de exploración de suelos existen dos clasificaciones: métodos directos e indirectos. De cada uno de ellos se desprenden varios tipos de exploración, los cuales pueden ser de utilidad en varios proyectos, otros, están orientados a casos específicos. Figura 1

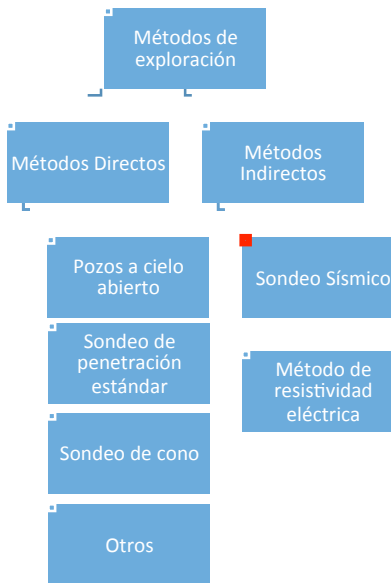


Figura 1. Métodos de exploración en suelos.

1.3.1 Métodos directos

1.3.1.1 Pozo a cielo abierto (PCA)

Este tipo de exploración consiste en una excavación de dimensiones suficientes para que una persona pueda descender a la excavación y determinar los diferentes estratos en el suelo, o bien, el tipo de cimentación de una construcción vecina. Este tipo de excavaciones no se pueden realizar a grandes profundidades y mucho menos cuando hay presencia de nivel freático muy superficial. Se debe llevar un registro de los estratos que se encuentran en cada sondeo anotando características principales, tales como: humedad, color, consistencia, tipo de suelo al tacto o vista.

De este tipo de sondeos se extraen muestras cubicas alteradas y se protegen con parafina para evitar la pérdida de humedad en la muestra. La muestra que se va a tomar debe ser representativa del estrato en cuestión.

1.3.1.2 Sondeo de penetración estándar (SPT)

Es el método de exploración preliminar más usado debido a que se obtienen buenos resultados y da una información más útil respecto al suelo. De los datos que arroja esta muestra, nos podemos dar una idea de la resistencia al corte que tiene el estrato estudiado, este tipo de sondeo permite rescatar muestras alteradas representativas del estrato.

En este tipo de sondeo se realiza una perforación en base a una serie de tuberías conectadas a un tubo partido con el cual se van a recuperar las muestras de los estratos y, ayudándonos con el golpe de un martinete con un peso de 63.5 Kg que cae de una altura de 76 cm y se encontrará en la parte superior de la tubería, va a ir perforando el suelo en avances de 60 cm y anotando el número de golpes que le toma a este tubo avanzar dicha longitud. Cuando se encuentran estratos resistentes, se utiliza una broca tricónica para dar avances

1.3.1.3 Sondeo de cono eléctrico (CPT)

Estos métodos consisten en hacer penetrar una punta cónica en el suelo y medir la resistencia que el mismo ofrece.

Se subdividen a grandes rasgos en:

- a) Cono dinámico: Este muestreo se realiza de forma parecida al SPT, dando golpes con el martinete y avanzando siempre y cuando el suelo lo permita, en base al número de golpes necesarios para perforar cierta longitud se da un resultado que va a ser graficado número de golpes contra profundidad para realizar un perfil de los estratos.
- b) Cono estático: Este ensaye a diferencia del dinámico, no es a percusión, sino que a presión ayudado por un gato hidráulico para su hincado. El cono se hinca en el suelo mediante la presión vertical de una columna de barras de acero, por cuyo interior pasa el cable que lleva la señal a la superficie. La velocidad de hincado en México es de 1 o 2 cm/s

1.3.2 Métodos indirectos

1.3.2.1 Método de resistividad eléctrica

Este método se basa en el hecho de que los suelos, dependiendo de su naturaleza, presentan una mayor o menor resistividad eléctrica cuando una corriente pasa por ellos. La información que nos presenta este método es la presencia de estratos de roca y de aguas subterráneas, aunque estos límites sean pobremente definidos.

El procedimiento es: Se colocan cuatro electrodos en línea recta a iguales distancias, y se hace pasar una corriente de 50 a 100 miliamperios entre los electrodos extremos, la cual es medida con exactitud. La caída de voltaje en una parte de la masa se mide entre los dos electrodos interiores por un circuito de punto muerto que requiere que no haya pase de corriente en el instante de hacer la medición.

El método sirve en primer lugar, para medir la resistividad a diferentes profundidades aumentando la distancia entre cada electrodo de la línea, con lo que se logra que la corriente penetre a mayor profundidad, y también mide a la misma profundidad un área mayor, esto se logra conservando la distancia entre electrodos, pero desplazando la línea de medición en un área a explorar.

1.3.2.2 Método sísmico

Este procedimiento se funda en la diferente velocidad de propagación de las ondas vibratorias de tipo sísmico a través de diferentes medios materiales. Las mediciones realizadas permiten establecer que esa velocidad de propagación de las ondas Vs varía entre 30 y 100 m/s en suelos arcillosos, de 100 a 500 m/s en capa dura y para suelos más resistentes los valores pueden llegar hasta los 2000 m/s. Esencialmente, el método consiste en provocar una excitación en un punto determinado del área a explorar usando una pequeña carga de explosivo. Por la zona a explorar se sitúan registradores de ondas (geófonos). La función de los geófonos es captar la vibración, que se transmite amplificada a un oscilógrafo central que marca varias líneas, una para cada geófono.

1.4 Tipos de ondas

Pequeñas perturbaciones mecánicas en depósitos de suelos, tales como el impacto de un marro, causan la propagación de ondas elásticas que no alteran prácticamente las condiciones del suelo. Las ondas elásticas se dividen en dos grandes grupos, las de cuerpo, que viajan en el interior del medio elástico, y las de superficie, que se propagan a lo largo de la frontera de un medio semi-infinito, como es la superficie de un depósito de suelos. Las ondas de cuerpo se subdividen a su vez en ondas de compresión o primarias V_p y de corte o secundarias V_s (Figura 2.).

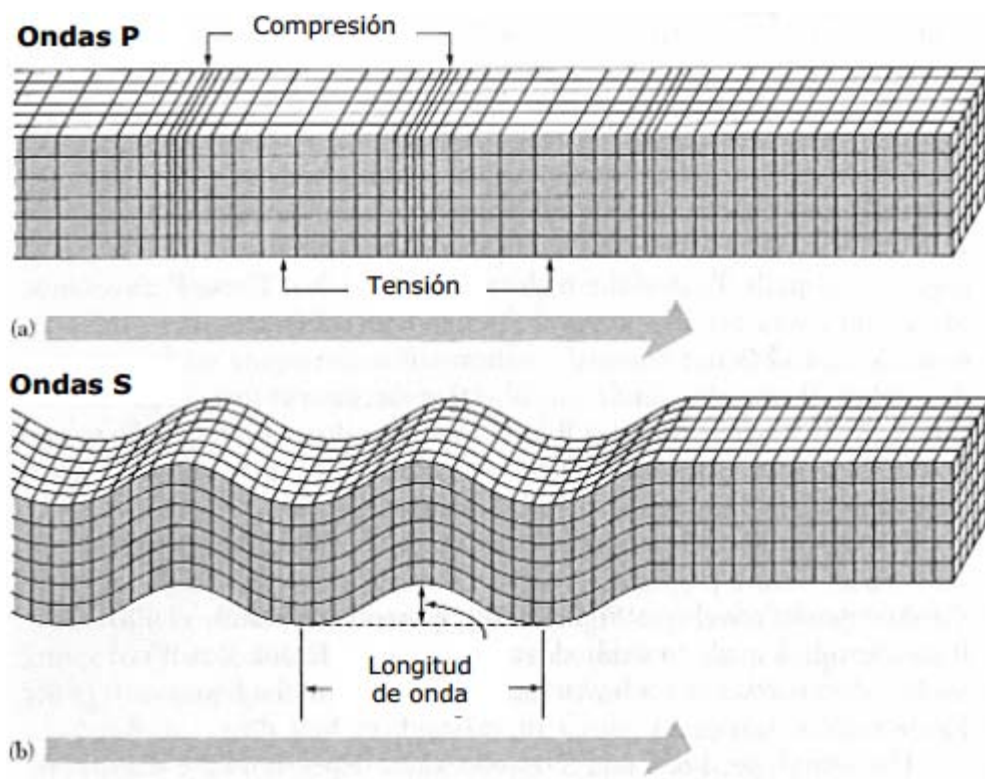


Figura 2. Ondas de Cuerpo: Primarias (V_p) y Secundarias (V_s).
(Salvador Lazcano, 2007)

1.5 El uso del ensayo de sonda suspendida para determinar perfiles de velocidades

La sonda suspendida es una sonda acústica de baja frecuencia diseñada para medir velocidades de ondas de cortante y de compresión (V_s y V_p , respectivamente) que son transmitidas en suelos y formaciones de rocas blandas. Funciona utilizando excitación indirecta en lugar de la conversión sonora

convencional. Es capaz de adquirir datos de alta resolución de ondas V_p y V_s en profundidades de pozos de hasta 1000 m.

Un ensaye de sonda suspendida típico consiste en tener una perforación, la sonda (con la instrumentación), el cable, el *Winch* o malacate y el sistema de control y adquisición de datos. La Figura 3 muestra los elementos básicos que conforman la sonda.

La sonda suspendida contiene un diseño único que combina una fuente de martillo y dos receptores llamados geófonos, separados por tubos de amortiguación acústica (filtros físicos de tubo flexible). Para adquirir los datos la sonda se posiciona en la profundidad requerida y la fuente se dispara bajo el mando de superficie. El disparo es de tipo solenoide, que se acciona a través del eje de la perforación para golpear placas en lados opuestos a su vez de los receptores, con la ayuda de un fluido circundante que provoca una doble presión. El movimiento del fluido produce una onda de tubo en la pared del pozo con una velocidad cercana a la velocidad de cortante y de compresión del estrato adyacente a la perforación. Como las ondas se propagan en paralelo al eje de la perforación, se configuran los correspondientes movimientos del golpe, que viaja a través del material circundante a la perforación y son detectados por los dos geófonos, permitiendo así medir directamente las velocidades de onda. El *software* tiene la facilidad para realizar tres disparos y filtrar los datos como en cualquier adquisición de datos sísmicos normales.

La medición de las velocidades de onda en el suelo para este trabajo 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 de 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 que funge como cementante. 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.

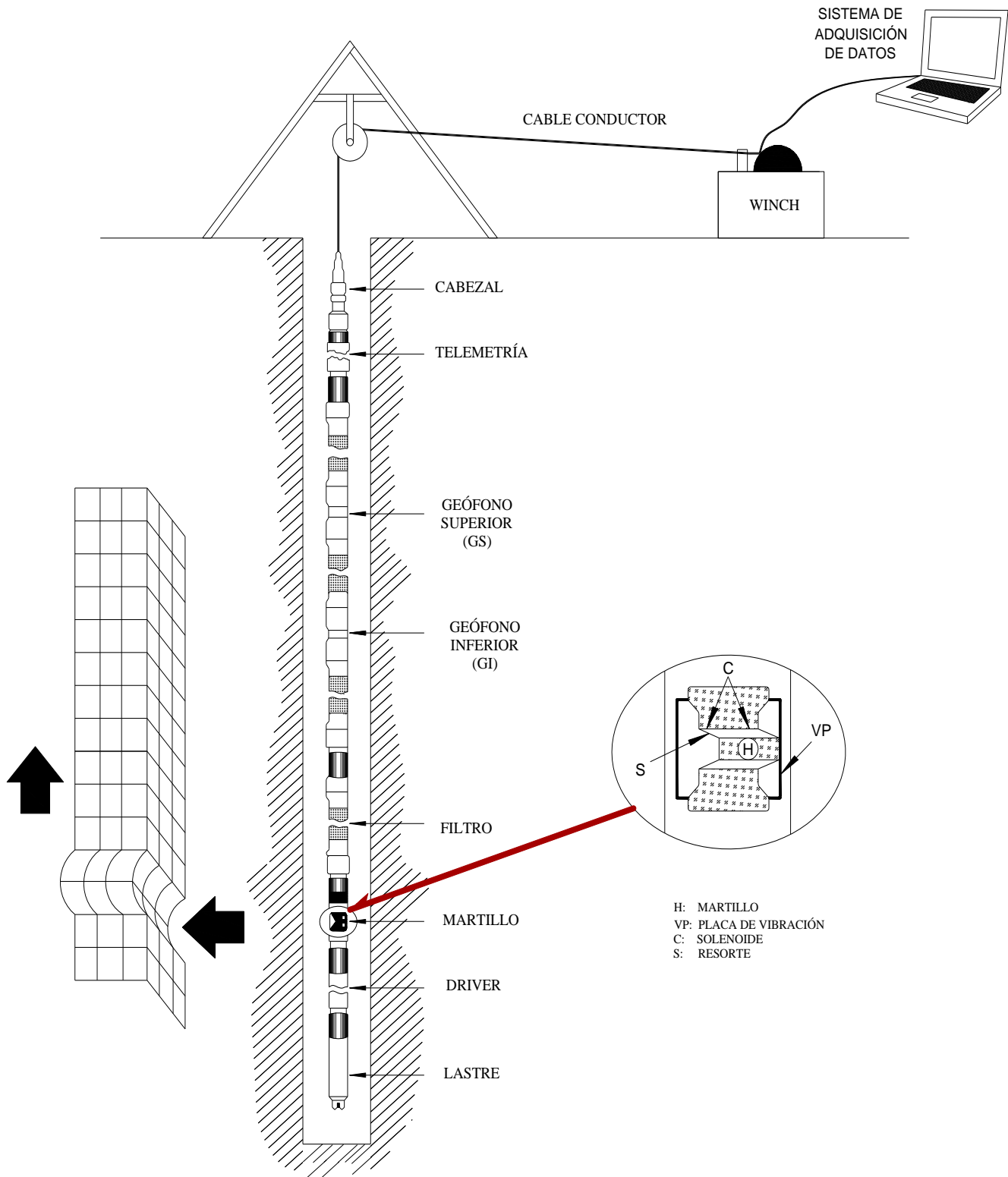


Figura 3. Esquema de Sonda Suspendida (Modificado de Bringen y Davie, 2010)

La separación de estas ondas se hace de la siguiente forma:

1. La orientación de los receptores horizontales se mantienen paralelos al eje de la excitación, maximizando la amplitud de la señal receptora.
2. Para cada profundidad, las ondas Vs son obtenidas con la excitación generada en la dirección opuesta, produciendo ondas Vs con polaridad opuesta, proveyendo una característica de las ondas Vs, distinta que el signo de la onda Vp.
3. Por la distancia que separa el punto de la excitación y el receptor 1 (cercano) permite que la onda Vp se amortigüe, después de que Vs arribe al receptor 2 (Lejano).
4. En suelos saturados los valores de las ondas Vp son suficientemente altos que permiten una razonable separación con el arribo en las ondas Vs, (cercano a 1500 m/s)
5. 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 éste es significativamente alta respecto a las dimensiones del anillo alrededor de la sonda (escala de metros versus centímetros).

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. 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 (≤ 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 Vs en más de un punto, pero con diferentes resultados. La Figura 4 muestra señales en las que se define el tiempo considerando el momento en el que se aprecia el arribo de las ondas Vs (TA), el segundo intervalo de tiempo para la primera cresta (TB) y el tercero para el primer valle (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 la C. Lo que recomiendan estos autores es tomar como tiempo de arribo de las ondas Vs el punto donde se aprecia que éstas aparecen, es decir TA.

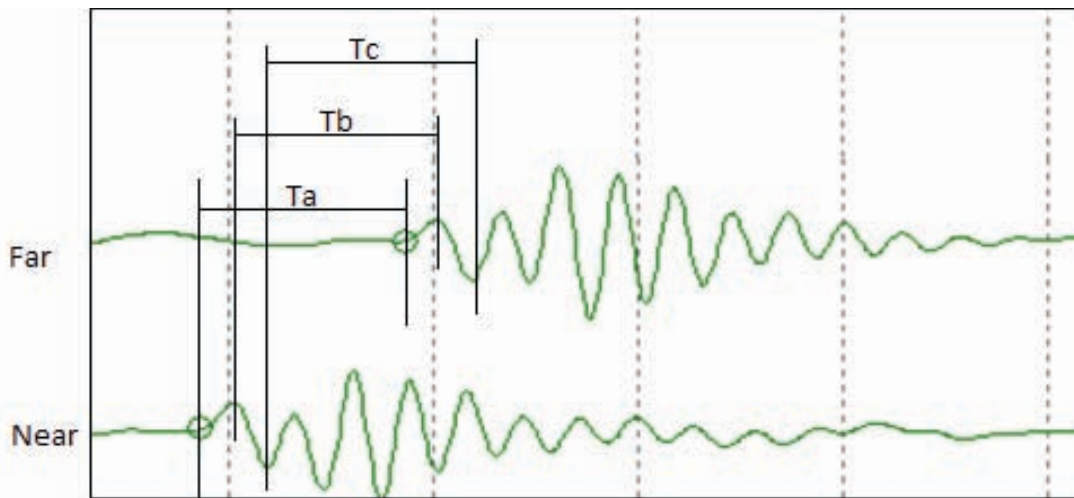


Figura 4. Criterios para definir los tiempos de arribo de las ondas S (Chen et al., 2008).

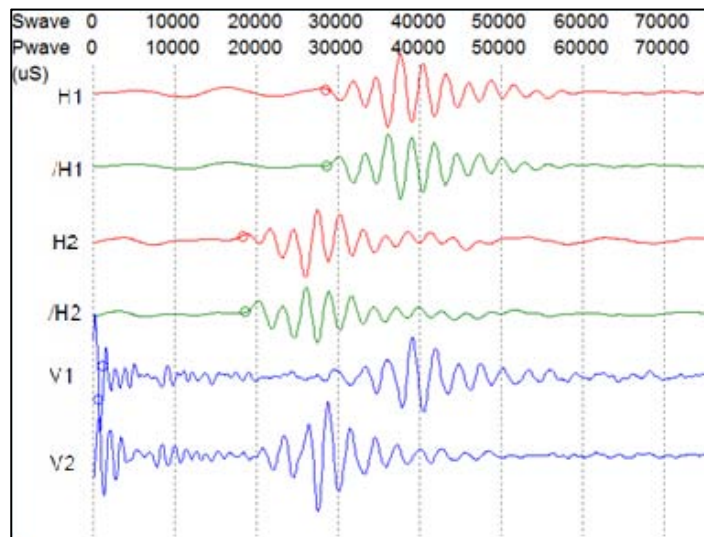


Figura 5. Identificación del arribo de las ondas Vp y Vs (Chen et al., 2008).

Estos mismos autores hacen la observación de que en algunos casos las señales emitidas para determinar las ondas Vs pueden apoyar para obtener los tiempos de arribo de las ondas Vp y viceversa, lo cual se ejemplifica en la Figura 5. Se aprecia que en las señales H1 y H2, de los geófonos lejanos y cercanos para determinar las ondas Vs, respectivamente, se puede definir el arribo de las ondas Vp (punto I de las señales H2), mientras que en las señales V1 y V2 para determinar las ondas Vp (puntos III y II de las señales V1 y V2, respectivamente), se pueden definir los arribos de las Vs.

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.

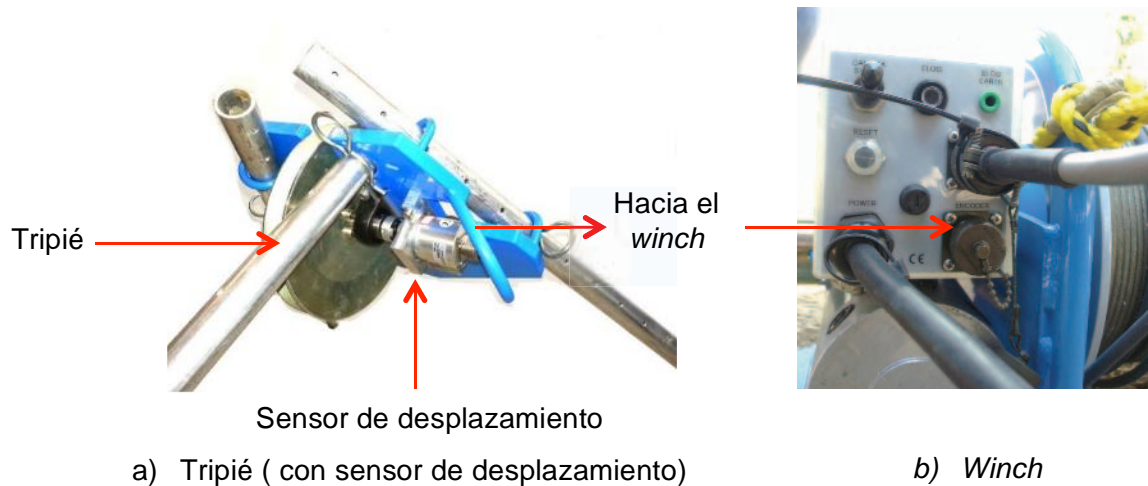


Figura 10. Conexión del tripié hacia el malacate.

Al momento de armar el tripié, el sensor de desplazamiento debe colocarse hacia abajo, como se observa en la Figura 10.

Es importante que el cable head se mantenga en buen estado, tiene una conexión de cuatro pines hembra que no se debe dejar caer, puesto que si se llegan a maltratar los pines pueden juntarse y hacer un corto circuito, por lo cual se recomienda usar su propia protección. Otro detalle importante son los arosellos, tenerlos siempre lubricados para evitar que se resequen.



Figura 11. Apoyos de tripié y ganchos sujetadores.

2.2 Sonda Suspendeda

Se presentan las partes que componen la sonda suspendida en el orden que se ensambla en campo.

2.2.3 Filtros



Figura 14. Filtros.

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.

2.2.4 Martillo



Figura 15. Martillo.

Este dispositivo genera las ondas de propagación que viajan a través del suelo.

Los plásticos verdes que muestra la figura son utilizados para garantizar el centrado del martillo, ya que como el aparato se encuentra suspendido, se debe cuidar que los golpes se realicen en el centro del pozo y no cercano a las paredes.

Parte 3 Procedimiento de ensaye

3.1 Armado del equipo

- Se arma el tripié, se debe tener cuidado que el sensor de desplazamiento 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 debe 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 17 se observan las partes que componen la sonda suspendida y la colocación de éstas en la perforación, donde se realizarán las mediciones de las velocidades de onda.

En la figura 18 se observa la ejecución de un ensaye habitual, la forma en que se realiza y como es que se ve el equipo montado.

3.2 Ejecución del ensaye

Antes de poder ejecutar el ensaye, se realizan las pruebas para verificar el correcto funcionamiento del martillo, además de verificar la comunicación entre el programa de PC y la Sonda.

Antes de armar el equipo en el sitio donde se va a realizar el ensaye de Sonda Suspendida se deben cumplir las condiciones que se mencionan a continuación para poder llevar a cabo el sondeo en campo.

3.2.1 Condiciones que debe cumplir la perforación

Para el caso de una perforación sin ademe se necesitarán:

- Una perforación vertical de 4" de diámetro.
- Estabilizar la perforación con ayuda de un lodo bentonítico con una relación bentonita-agua de 15 kg-100 L. Probablemente exista un cambio en esta relación el cual va a depender del tipo de suelo que se ensaye, ya que si es muy espeso se asienta el lodo y no permite el avance del equipo.
- Realizar el ensaye de sonda suspendida inmediatamente después del último avance del equipo de perforación.

3.2.2 Configuración de la prueba y toma de datos

Para definir la configuración adecuada en cada sondeo se realizó una prueba de forma descendente variando los parámetros de ganancia, filtrado, tiempo de retardo, tiempo del golpe, tiempo de muestreo, midiendo a cada 2.5 m. Luego de forma ascendente se realiza el ensaye con la longitud entre toma de lecturas de 0.5 m.

En las siguientes figuras se ejemplifica un tipo de configuración utilizada y como definirla en el *software*. (Figuras 19 a 24)

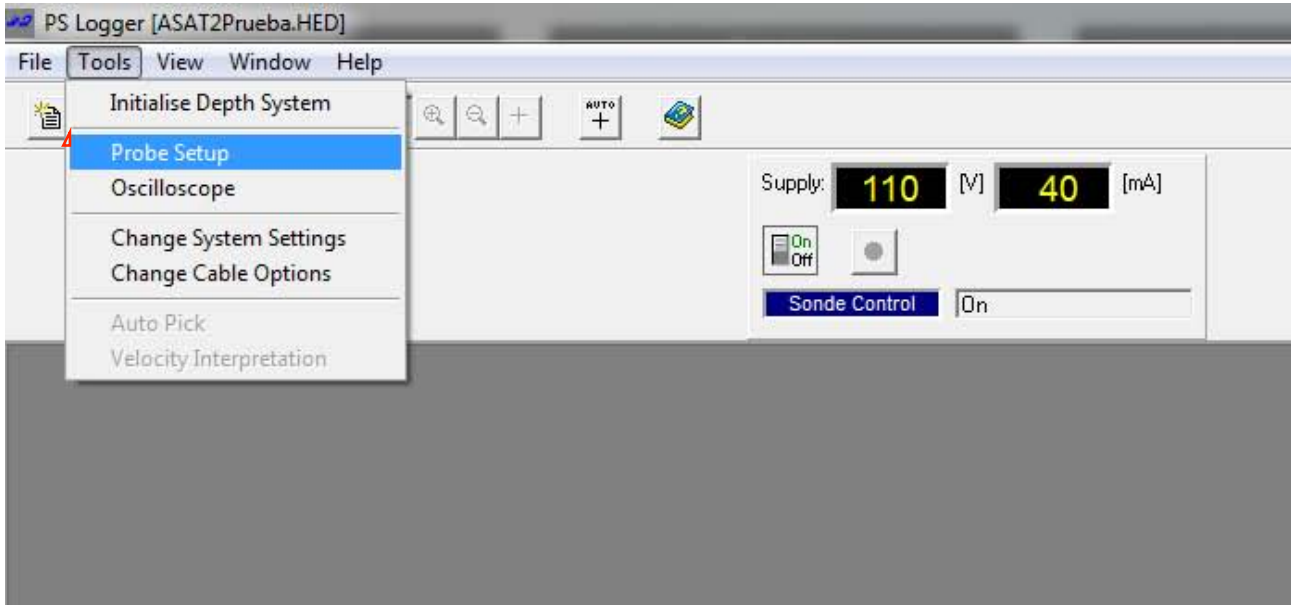


Figura 19. Menú para configurar la prueba en *software*.

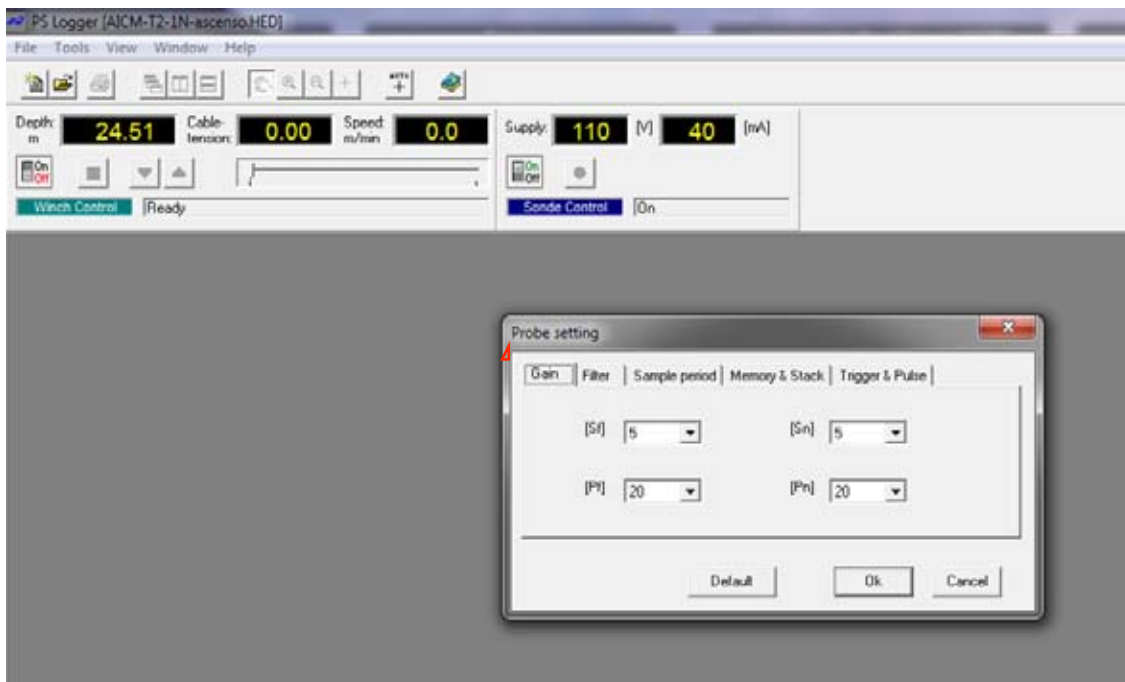


Figura 20. Configuración de la ganancia.

PROCEDIMIENTO PARA OBTENER VELOCIDADES DE ONDA (V_p Y V_s) EN CAMPO CON SONDA SUSPENDIDA
PARTE 3 PROCEDIMIENTO DE ENSAYE

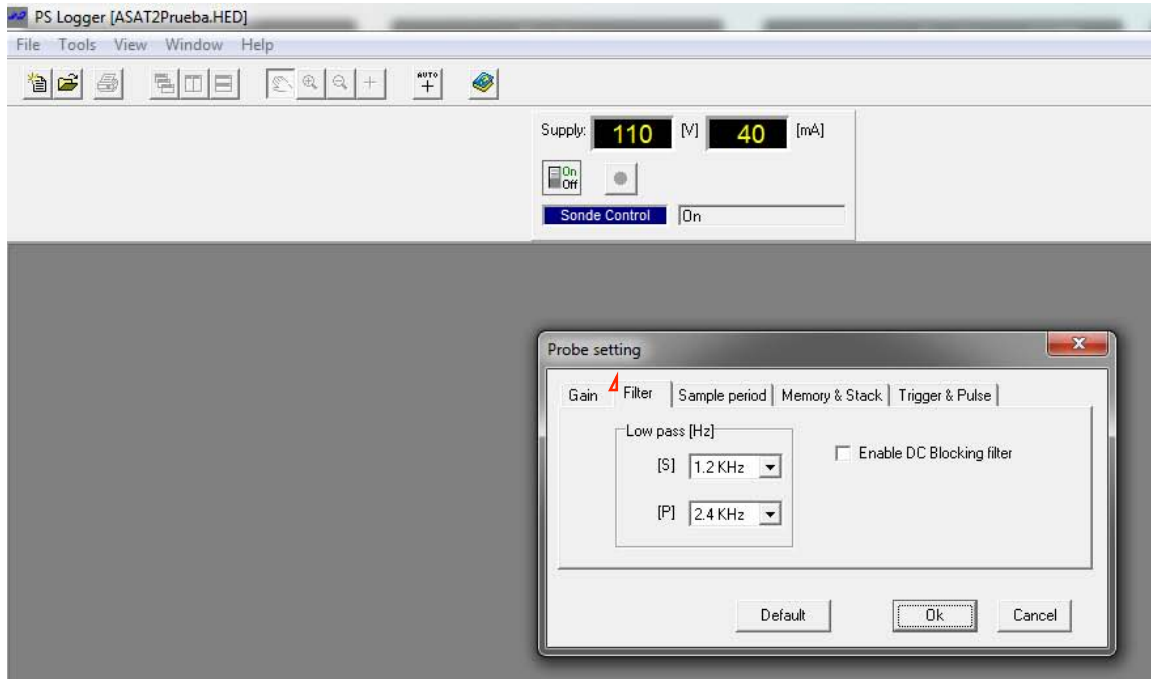


Figura 21. Configuración del filtro para las lecturas.



Figura 22. Elección del tiempo de muestreo.

PROCEDIMIENTO PARA OBTENER VELOCIDADES DE ONDA (VP Y VS) EN CAMPO CON SONDA SUSPENDIDA
PARTE 3 PROCEDIMIENTO DE ENSAYE

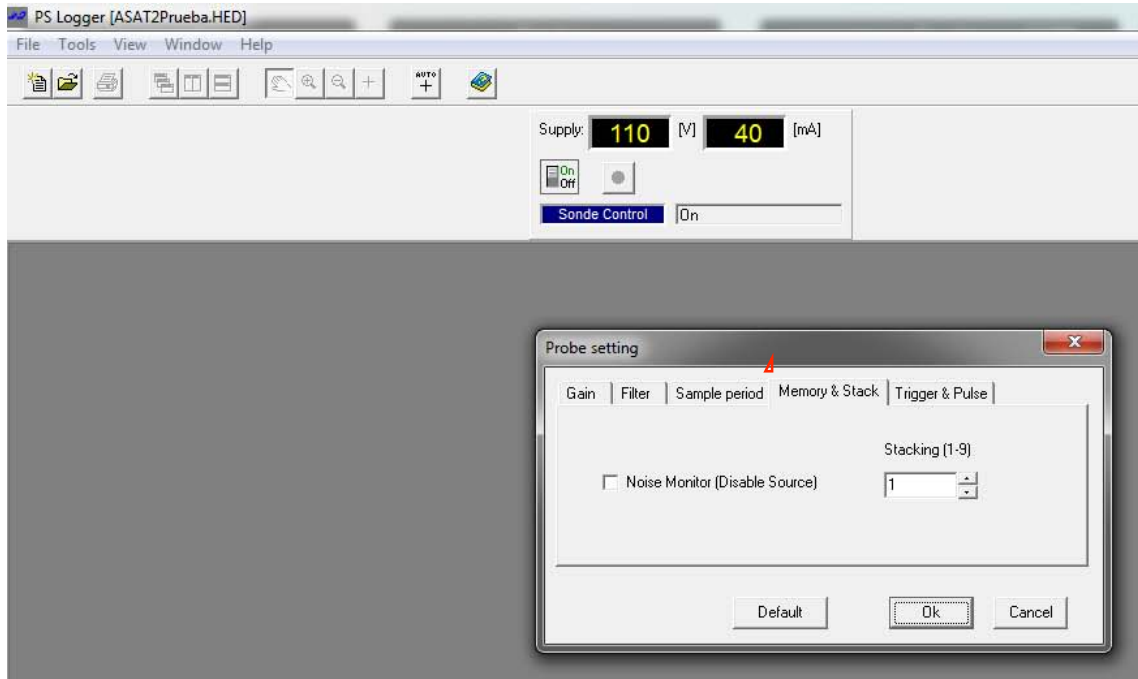


Figura 23. Valores de separación de ondas.



Figura 24. Retraso entre golpes y tiempo de golpeo

3.3 Cálculo de parámetros

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 Vp y Vs. 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 Vp y Vs.

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 Vp (señales en color azul) Figura 25, el segundo golpe genera los frentes de ondas para determinar las señales Vs (señales en color rojo), y el tercer golpe tiene la finalidad de verificar el arribo de las ondas Vs (señales en color verde).

Las Figuras 25 y 26 muestran 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:

$$V_{p,s} = \frac{1}{t_{p,s2} - t_{p,s1}}$$

donde

t_{p,s1} Tiempos de arribo de las ondas Vp y Vs en el geófono 1, en s.

t_{p,s2} Tiempos de arribo de las ondas Vp y Vs en el geófono 2, en s.

V_{p,s} Velocidades de la onda Vp o Vs, en m/s.

Para el cálculo de parámetros se debe hacer minuciosamente, ya que dependiendo las lecturas que se tienen, se debe definir el tiempo de arribo de cada una de las ondas.

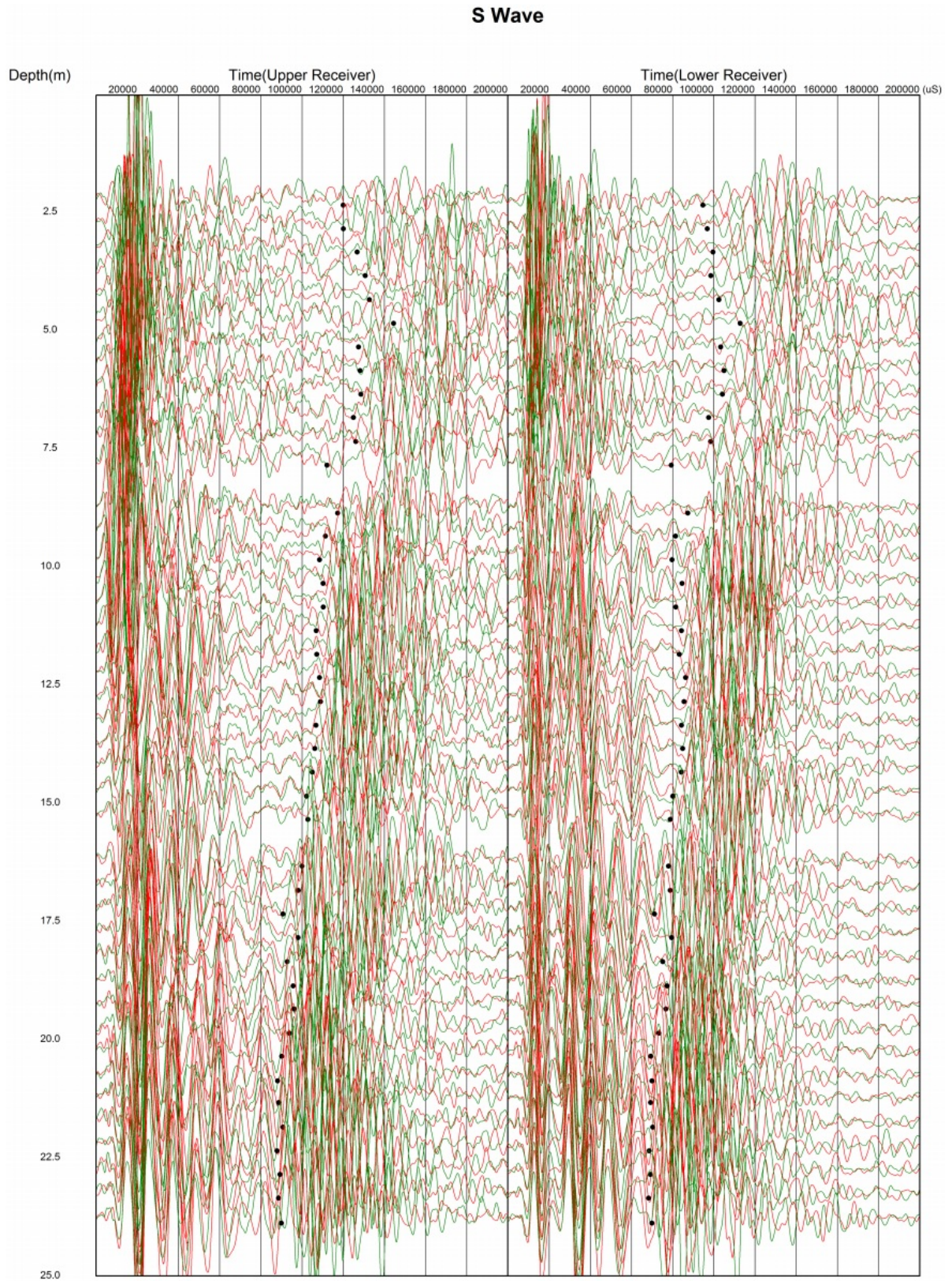


Figura 27. Perfil de tiempos de arribo registrados en el ensaye

Parte 4 Interpretación de resultados

La determinación de la velocidad de propagación de las ondas de corte (V_s) es de gran utilidad en la geotecnia, ya que con este valor se puede determinar el módulo de rigidez al esfuerzo cortante (G), obtener el periodo fundamental del suelo (T), estimar el estado de esfuerzos (Stokoe *et al.*, 1989).

La relación entre V_s y el módulo de cortante (G) está dada por la siguiente ecuación:

$$G = \rho V_s^2$$

donde:

ρ densidad;

V_s velocidad de onda de corte.

Como las deformaciones causadas por las pruebas geofísicas son muy pequeñas, el módulo de cortante que se obtiene con la V_s (determinada con la sonda) viene siendo el valor máximo (G_0), y sufre una degradación mayor o menor, dependiendo del suelo y de la deformación inducida. También es importante mencionar el remodelo que sufre el suelo durante la perforación. Este tipo de comportamiento de materiales se le conoce como elástico no-lineal, está asociado con suelos y se le ha dado mayor importancia para la comprensión de este fenómeno en los últimos años (Matthews *et al.*, 1996), por lo que los valores de V_s y G_0 tienen aplicaciones tanto para análisis geotécnicos semiestáticos como dinámicos.

Para esta parte del ensaye se midieron valores de V_s que inician con 39 m/s para la profundidad más somera que se puede medir (2.5 m) y varía de forma casi lineal con la profundidad, valores de 50 m/s para 24 m de profundidad y cercanas a 150 m/s en profundidades de 52 m (mayor profundidad explorada).

Debido a que el nivel freático está, en promedio, a 1.5 m de profundidad, las velocidades de compresión, V_p , resultaron cercanas a 1500 m/s (velocidad de compresión del agua) a lo largo de la profundidad ensayada, debido a que estas ondas viajan principalmente por el agua.

Parte 5 Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

Con la Figura 28 se pueden definir tres capas de arcilla en este tipo de suelo, las cuales son:

Tabla 1. Estratos definidos con sonda suspendida

Estrato	Espesor	Vs	T _s
1 ^{er}	30 m (0.00 m – 30.00 m)	48 m/s	2.5 s
2 ^{do}	12 m (30.00 m – 42.00 m)	60 m/s	0.8 s
3 ^{er}	10 m (42.00 m – 52.00 m)*	235 m/s	---- s

**Profundidad explorada para los trabajos en campo, no se determinan velocidades a profundidades inferiores, por lo cual, no se define un T_s*

De esto se puede concluir que para cada estrato se puede definir una velocidad de onda promedio, las cuales están marcadas en la Tabla 1, con ayuda de las velocidades y dependiendo del espesor de cada estrato arcilloso se puede definir un periodo de cada estrato.

La importancia que han adquirido últimamente los ensayos dinámicos ha sido de gran utilidad para el avance en su estudio, la determinación de estos parámetros sigue siendo dudosa en muestras de campo, pero cada vez son más verídicos los resultados adquiridos puesto que se refina aún más la búsqueda de estos valores por diferentes métodos.

La velocidad de onda de corte (Vs) es un parámetro de gran utilidad para caracterizar suelos, ya que con este valor se puede determinar directamente el módulo de rigidez al cortante para pequeñas deformaciones (G₀).

Se debe tener especial cuidado en la adquisición de datos de las ondas P, ya que al menos en el *software* que se utilizó en esta ocasión para su obtención, la variación es

muy sensible y con cada pequeño cambio en la definición de éstas, podían modificarse de forma importante.

De acuerdo con las velocidades que se obtienen con la sonda, se definirá el suelo como de tipo arcilloso, a reserva de definirlo con la ayuda de un sondeo SPT para caracterizar debidamente el suelo.

Varias ventajas que puedo mencionar con respecto a ejemplos de otros métodos son: que con *cross hole* se necesitan hacer dos perforaciones y con sonda suspendida no, con *down hole* entre más profundizas el sondeo, la fuente de excitación de la onda se aleja más, lo que conlleva a resultados con más ruido y refracción, con sonda suspendida la fuente y los geófonos se mueven a la par. Con refracción sísmica no puedes profundizar mucho como con sonda, ya que entre más profundizas más ruido se genera en los resultados.

Recomendaciones

Para el armado de la sonda se debe tener cuidado en el cableado eléctrico, siempre estar conectado a un suministro constante y a 12 volts, asegurarse de eso antes de proceder a las conexiones.

Otro aspecto importante es el debido engrasado de las conexiones de la sonda, debido a que el trabajo que realiza es sumergida en agua se debe cuidar que no haya paso de agua hacia el interior de la parte eléctrica.

La alineación de la sonda con el *Winch* también es importante, ya que el tripié muchas veces queda fijo y no es tan fácil moverlo, por eso, antes de montar la sonda, posicionar el tripié con dirección recta hacia el *Winch*.

En cada avance de la sonda se debe checar la tensión del cable que la sujeta, ya que si se pierde la tensión, puede ser debido a que se ha alcanzado el fondo del sondeo o ha habido caídos o cierre de la perforación que presionan a la sonda e impiden su avance.

Anexo A Informe fotográfico



Figura A1. Equipo de trabajo



Figura A2. Armado de sonda suspendida



Figura A3. Armado de equipo de medición



Figura A4. Conexión de sonda suspendida



Figura A5. Conexión de equipo de medición



Figura A6. Verificación de corriente a 12 Volts



Figura A7. Conexión del cable que sujeta la sonda suspendida



Figura A8. Armado de tripié



Figura A9. Instalación de *software*



Figura A10. Engrasado de arosellos



Figura A11. Posicionamiento del hombro de sonda a nivel de piso (prof. de adquisición de 2.5 m)



Figura A12. Equipo en operación.

Referencias y Bibliografía

Biringen Emre and Davie John (2010). Suspension P-S Logging for Geophysical Investigation of Deep Soil and Bedrock. Advances in Analysis, Modeling & Design.

Flores *et al*, Agosto 2014 Técnica experimental de campo para determinar las velocidades de compresión y de corte, Instituto de Ingeniería UNAM para Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica, Puerto Vallarta, Jalisco, México.

II-UNAM Estudio de ingeniería geotécnica para el Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México en el ex Lago de Texcoco y Zapotlán de Juárez, Anexos BI al BVIII, Segunda edición, Informe del Instituto de Ingeniería, UNAM a Aeropuertos y Servicios Auxiliares, México, D.F.

Lazcano, Salvador., 2007, Caracterización de suelos arenosos mediante análisis de ondas de superficie, Academia de Ingeniería A.C.

Ming-Hung *Chen*, Kuo-Liang Wen, Chin-Hsiung Loh and Robert L. Nigbor (2008). *Experience of Suspension P-S Logging Method and Empirical Formula of Shear Wave Velocities in Taiwan. Journal of the Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering.*