

**CARACTERIZACION SISMICA DEL SUBSUELO POR MEDIO DEL METODO
DOWNHOLE**

EDISON JOSE CAMACHO OSMA

EDWING YESID GONZALEZ PARRA



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FISICOMECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA**

2012

**CARACTERIZACION SISMICA DEL SUBSUELO POR MEDIO DEL METODO
DOWNHOLE**

EDISON JOSE CAMACHO OSMA. CODIGO: 2032579

EDWING YESID GONZALEZ PARRA. CODIGO: 2032528

TESIS DE GRADO PARA OPTAR POR EL TITULO DE INGENIERO CIVIL

DIRECTOR

Ingeniera Civil. Ms.c, HEBENLY CELIS LEGUIZAMO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE CIENCIAS FISICOMECANICAS

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

BUCARAMANGA

2012

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.	16
1. TEORIA DE PROPAGACION DE ONDAS SISMICAS	17
1.1. INTRODUCCION	17
1.2. ONDAS ELASTICAS EN DEPOSITOS DE SUELOS.	18
1.2.1. Ondas P y Ondas S.....	18
2. METODOS SISMICOS BAJO LA SUPERFICIE Y ASPECTOS DEL TRABAJO DE CAMPO.	24
2.1. PRINCIPIOS FUNDAMENTALES	24
2.2. TIPOS DE METODOS BAJO LA SUPERFICIE.	24
2.3. METODO UPHOLE Y DOWNHOLE.	25
2.3.1. Medidas.	25
2.3.2. Aplicaciones.	27
2.3.3. Equipo.	27
2.3.4. Procedimiento de obtención de datos.	29
2.3.5. Método Uphole.	30
2.4. METODO CROSSHOLE.	32
2.4.1. Generalidades.	32
2.4.2. Medidas sísmicas Crosshole.	34
2.5. METODO DOWNHOLE.	35
2.5.1. Trabajo de Campo.	38

2.5.2. Procedimiento para la toma de datos.	42
3. INTERPRETACION Y PROCESAMIENTO DE DATOS.	45
3.1. PROCEDIMIENTO EN EL SOFTWARE WINGEO.	45
3.1.1. Inicio del Ensayo.	46
3.2. PROCESAMIENTO DE DATOS.	49
3.2.1. Superposición de funciones.	49
3.2.2. Definiendo el cero.	50
3.2.3. Seleccionando tiempos de llegada.	51
3.2.4. Exportación de datos.	52
3.2.5. Cálculos para determinar el perfil del suelo.	52
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES.	57
4.1. CONCLUSIONES.	57
4.2. RECOMENDACIONES GENERALES.	58
BIBLIOGRAFIA.	59
ANEXOS.	60

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Datos de onda S con tiempo corregido.	53
Tabla 2. Datos de tiempo y velocidad.	55
Tabla 3. Tipos de Perfil de Suelo.	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Desplazamiento de una onda P esférica.	19
Figura 2. Movimiento durante el paso de una onda Plana.	21
Figura 3. Rotación del medio durante el paso de una onda S.....	22
Figura 4. Velocidad de onda vertical P y S para estudios Downhole y Uphole.	26
Figura 5. Técnica del método Uphole.	31
Figura 6. Método Crosshole.	33
Figura 7. Esquema del método Crosshole.	34
Figura 8. Técnica del Metodo Downhole.	36
Figura 9. Oscilograma del estudio Downhole, muestra la llegada de las ondas S de 180 grados de interface.	37
Figura 10. Equipo a utilizar.	40
Figura 11. Ventana donde seleccionamos el tipo de ensayo a realizar.	45
Figura 12. Configuración de canales para el Ensayo Downhole.	46
Figura 13. Nombre y Configuración del Ensayo.	47
Figura 14. Pantalla en la que se confirma la dirección y la profundidad.	48
Figura 15. Barra de Herramientas en ella se muestra el botón “D” para cambiar de dirección.	48
Figura 16. Barra de Herramientas en ella se muestra el botono “N” para cambiar de profundidad.	48
Figura 17. Menú de Entrada.	49
Figura 18. Botón de Superposición de funciones en la barra de herramientas.	49
Figura 19. Botón para definir el cero en la barra de herramientas.	50
Figura 20. Ondas de Compresión, después de superposición y de definir el cero.	50

Figura 21. Llegada de la onda de corte.	51
Figura 22. Llegada de la onda de compresión.	51
Figura 23. Fuente de energía con desplazamiento ajustado a cero.	52
Figura 24. Distancia "r".	53
Figura 25. Grafica de Tiempo Vs Profundidad.	54
Figura 26. Grafica de Velocidad Vs Profundidad.	55

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Foto 1. Excavación previa a la colocación de la platina de acero.	39
Foto 2. Herramientas a utilizar.	40
Foto 3. Geófono, el tubo guía, la bomba de aire entre otros.	41
Foto 4. Cables que van conectados al geófono.	41
Foto 5. Sensor.	42
Foto 6. Conectando el geófono al tubo guía.	42
Foto 7. Geófono descendiendo junto con los respectivos cables y cinta métrica. ..	43
Foto 8. Sensor conectado al equipo.	43
Foto 9. Generando ondas P mediante golpes en la platina de acero.	44
Foto 10. Cambia la posición de la platina para generar ondas S.....	44

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Datos exportados del software Wingeo a un bloc de notas.	61
ANEXO B. tabla A.2. 4-1 de la NSR – 10 título A. página a22.	63

RESUMEN

TITULO: CARACTERIZACION SISMICA DEL SUBSUELO POR MEDIO DEL METODO DOWNHOLE. *

AUTORES: EDISON JOSE CAMACHO OSMA **

EDWING YESID GONZALEZ PARRA **

PALABRAS CLAVES: Método Downhole, Ondas S, Ondas P, Perfil de Suelo, Software Wingeo, Geófono.

CONTENIDO:

En toda obra a construir es indispensable contar con un buen estudio de suelos para poder determinar el tipo de suelo sobre el cual se construirá la edificación y en base a esto determinar a qué profundidad deben ir los cimientos.

En este trabajo de grado se hará una breve descripción del método Uphole y Crosshole y sus similitudes con el Método Downhole, se describirá las ventajas que tienen cada uno de estos métodos así como también sus respectivas limitaciones.

Se procederá a determinar un perfil de suelo mediante el Método Downhole, por lo cual se mostrara los principios físicos que este requiere dado que este método consiste en generar ondas las cuales viajan desde la superficie a través del suelo hasta llegar a un geófono ubicado a cierta profundidad; con ayuda del software Wingeo podemos medir el tiempo que tarda la onda desde que es generada hasta que llega al geófono, una vez tenemos este dato de tiempo procedemos a calcular la velocidad con la que viaja la onda a través del suelo, este dato de velocidad es el que nos ayudara a determinar el perfil de suelo.

En este trabajo de grado se enseñara todo lo necesario para poder llevar a cabo satisfactoriamente el Ensayo Downhole, desde el equipo a utilizar, el Software implementado, así como también los respectivos cálculos que se hacen a la información y la importancia que tienen estos en el campo de la geotecnia.

* Proyecto de Grado Modalidad: Trabajo de Investigación.

** Facultad de Ciencias Físico Mecánicas. Escuela ingeniería Civil.
Director: I.C., M.Sc., Hebenly Celis Leguizamo.

ABSTRACT

TITLE: SEISMIC CHARACTERIZATION OF SUBSOIL USING THE DOWNHOLE METHOD. *

AUTHORS: EDINSON JOSÉ CAMACHO OSMA **
ÉDWING YESID GONZÁLEZ PARRA **

KEYWORDS: Downhole Method, S Waves, P Waves, Soil Profile, WinGeo Software, Geophone

DESCRIPTION:

In every work to building, it is essential to count with a good soil study to be able to determine the soil-type where the edification is going to be built and based on this, determine how deep the foundations must be set.

In this thesis a brief description of the Uphole and Crosshole methods and their similitudes with Downhole method, are presented. The advantages of each method and their limitations are presented too.

The soil profile will be determined by the Downhole Method. This method consists in the generation of waves that ride from the surface through the soil, to a geophone located at some depth, so the required physical principium of the method is shown. With WinGeo Software, the time taken by the wave from the surface to the geophone can be measured; this time data is used to calculate the wave-velocity through the soil, so the soil profile can be determined with the velocity data.

This thesis will show the procedure and everything else needed to achieve a satisfactory Downhole Test, like the required equipment, implemented software, information processing and its importance in the geotechnical field.

* Draft Grade Method: Research Work

** Faculty of Physical – Mechanical. School of Civil Engineering.
Advisor (I.C., M.Sc.) Hebenly Celis Leguizamo.

INTRODUCCION

En toda obra arquitectónica o de ingeniería moderna, ya sean edificios o viviendas, es de vital importancia la realización de un estudio de suelos, ya que a través de este nos permite conocer las propiedades físicas y mecánicas del suelo y su composición estratigráfica, es decir las capas o estratos de diferentes características que la componen en profundidad y nos da la ubicación de niveles freáticos si las hubiere. Dando por resultado la resistencia del terreno sobre el que se construirá la edificación y nos da una base para determinar el tipo de condiciones de cimentación a usar.

Está comprobado que toda la corteza terrestre es capaz de transmitir ondas elásticas si se presenta un mecanismo que las genere, el conocimiento de esta propiedad propicio que se experimentara y estudiara la posibilidad de generar sismos artificiales y la detección de los movimientos ondulatorios, para determinar las características del subsuelo. Ya que en determinadas ocasiones la utilización de los métodos convencionales se puede presentar el problema de que no hay una buena descripción del tipo de suelo y sus características; lo cual nos genera un mayor costo y riesgo en la construcción de proyectos de gran magnitud.

En este trabajo de grado se mostrara como determinar un perfil de suelo mediante el ensayo Downhole, en el cual se mostrara sus principios básicos de física mediante los cuales entenderemos mejor el comportamiento de las ondas y su respectivo uso en la geotecnia, también se enseñara el equipo a utilizar junto con su respectivo procedimiento para poder llevar a cabo el ensayo.

Una vez realizado el trabajo de campo se mostrara el respectivo procedimiento a seguir en el software Wingeo para obtener los datos de tiempo los cuales serán sometidos a cálculos para obtener la velocidad con que viajan las ondas a través del suelo: este dato de velocidad es el que determinara el perfil del suelo el cual le será de ayuda al ingeniero para poder determinar a que profundidad debe construir los cimientos de una edificación.

1. TEORIA DE PROPAGACION DE ONDAS SISMICAS

1.1 Introducción

Los principios que rigen las ondas elásticas se conocen a partir del siglo XVI, sin embargo su relación con los sismos y la afinidad de la corteza terrestre para transmitirlos, fueron establecidas a finales del siglo XIX y principalmente a principios del siglo XX.

Es bien conocido que la actividad sísmica en su forma natural esta restringida a ciertas zonas de la tierra, relacionadas con movimientos tectónicos aun no totalmente explicados.

Esta comprobado que la corteza terrestre tiene la capacidad de transmitir ondas elásticas si se presenta un mecanismo que las genere. Teniendo en cuenta esta propiedad se experimentara y estudiara la posibilidad de generar sismos artificiales y la detección de los movimientos ondulatorios para determinar las características del subsuelo.

El tamaño y la forma de un cuerpo solido se pueden cambiar aplicando fuerzas a la superficie externa de este cuerpo. A estas fuerzas externas se oponen fuerzas internas que se oponen a los cambios de tamaño y forma. Debido a estas fuerzas internas el cuerpo tiende a regresar a su condición original cuando las fuerzas externas desaparecen.

Esta propiedad de resistir cambios de tamaño o forma y de regresar a su condición original cuando se eliminan las fuerzas externas se le conoce como elasticidad. Un cuerpo perfectamente elástico es aquel que se recupera completamente después de ser deformado. Muchas sustancias, incluyendo rocas, se pueden considerar perfectamente como elásticas sin error apreciable, ya que generalmente las deformaciones son muy pequeñas.

1.2 ONDAS ELASTICAS EN DEPOSITOS DE SUELOS

1.2.1 Ondas P y Ondas S

En un medio isotrópico Homogéneo se pueden identificar dos tipos de ondas, uno correspondiente a cambios en la dilatación (Δ), el otro correspondiente a cambios en uno o más componentes de la rotación (θ)

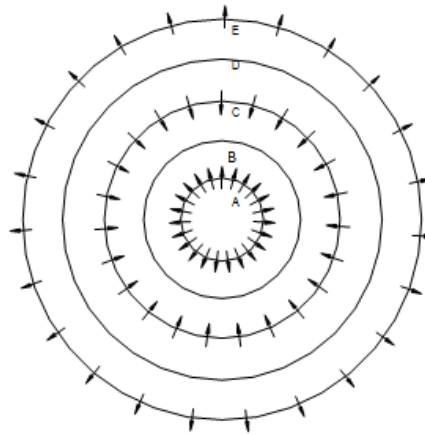
“El primer tipo se conoce de modos diversos, tales como onda dilatacional, longitudinal, irrotacional, compresional u Onda P, este último nombre se debe al hecho de que usualmente este tipo es el primero evento (primario) que ocurre en un terremoto. El segundo tipo se denomina onda cortante, transversal, rotacional u Onda S este nombre se debe a que es el segundo evento observado en los registros de terremoto. Las ondas P viajan a una velocidad entre 70 y 140% mayor que las ondas S, para valores de la relación de Poisson (μ) de entre 0.25 y 0.4, rango frecuente en suelos y rocas.

La velocidad sísmica en rocas en realidad depende de muchos factores, incluyendo la porosidad, la litología, la cementación, la profundidad, el régimen de presión, la edad, los fluidos intersticiales, etc. La velocidad de rocas sedimentarias saturadas de agua se encuentra entre 1.5 a 6.5 km/s aumentando con la pérdida de porosidad, profundidad, cementación y edad. La velocidad de las ondas P en el agua es de aproximadamente 1.5 Km/s. La velocidad de la onda P decrece, a veces considerablemente, cuando un gas reemplaza al agua como fluido intersticial. Esto es de gran importancia cerca de la superficie, por lo general arriba del nivel de agua subterránea donde una capa de baja velocidad (CBV, también llamada capa de intemperismo) tiene una velocidad entre 0.4 a 0.8 km/s y ocasionalmente tan baja como 150m/s, y a veces tan alta como 1.2 km/s.

Se investigara la naturaleza del movimiento del medio correspondiente a los dos tipos de movimiento ondulatorio. Considérese una onda P esférica. En la figura 1

se muestran frentes de onda trazados en intervalos de un cuarto de longitud de onda. Las flechas representan la dirección del movimiento del medio en el frente de onda. El medio está sometido a máxima compresión en B (es decir, la dilatación Δ es mínima) y a mínima compresión (Δ máxima) en el frente de onda D; la velocidad de la partícula es cero en cada uno de estos puntos.

Figura 1. Desplazamiento de una onda P esférica



Métodos de prospección sísmica en la investigación del subsuelo [1].

Es posible formarse una imagen mental en el caso de la onda plana imaginando que el radio de la figura 1 se ha hecho tan largo que los frentes de onda son prácticamente superficies planas. En todas partes los desplazamientos serán perpendiculares a estos planos, así que ya no habrá convergencia o divergencia de las partículas del medio cuando se muevan hacia atrás y hacia adelante en forma paralela a la dirección de la propagación de la onda. Este desplazamiento es longitudinal, lo cual explica porque en algunas situaciones a las ondas P se les llama longitudinales, Las ondas P son las ondas dominantes utilizadas en la exploración sísmica. En la figura 2(a) se ilustra una onda P plana.” [1].

Para determinar el movimiento de un medio durante el paso de una onda S, se tiene la siguiente ecuación vectorial de onda.

$$\frac{1}{\beta^2} \frac{\partial^2 \theta_i}{\partial t^2} = \nabla^2 \theta_i, \quad i = x, y, z \quad (1.1)$$

Donde β es una constante elástica representada por

$$\beta = (\mu/\rho)^{1/2} \quad (1.2)$$

Para fluidos μ es cero y por lo tanto β también es cero; por eso las ondas S no se propagan dentro de los fluidos.

Ahora considérese el caso en que una rotación θ_z que es una función de x y t solamente se propaga a lo largo del eje x . Se tiene.

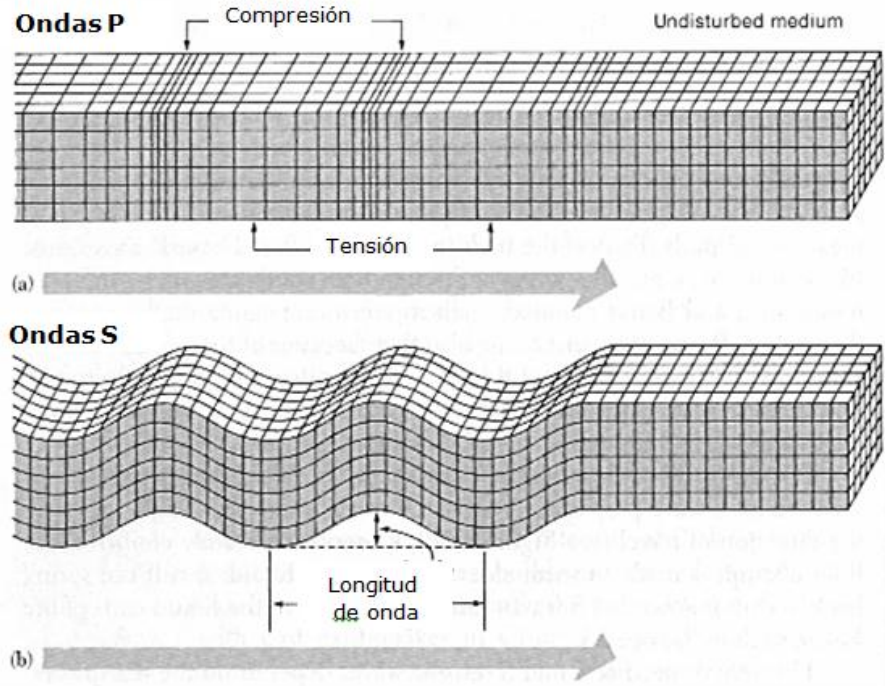
$$\frac{1}{\beta^2} \frac{\partial^2 \theta_z}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \theta_z}{\partial x^2} \quad (1.3)$$

Puesto que

$$\theta_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial x} \quad (1.4)$$

Podemos observar que el movimiento ondulatorio consiste solamente en un desplazamiento v del medio en la dirección y , siendo v una función tanto de x como de t . Como v es independiente de y y z , en todas partes el movimiento es el mismo en un plano perpendicular al eje x ; así que el caso que se está tratando es el de una onda S plana viajando a lo largo del eje x como podemos apreciar en la figura 2 (b) [3].

Figura 2 Movimiento durante el paso de una onda Plana. a) Onda P; b) Onda S



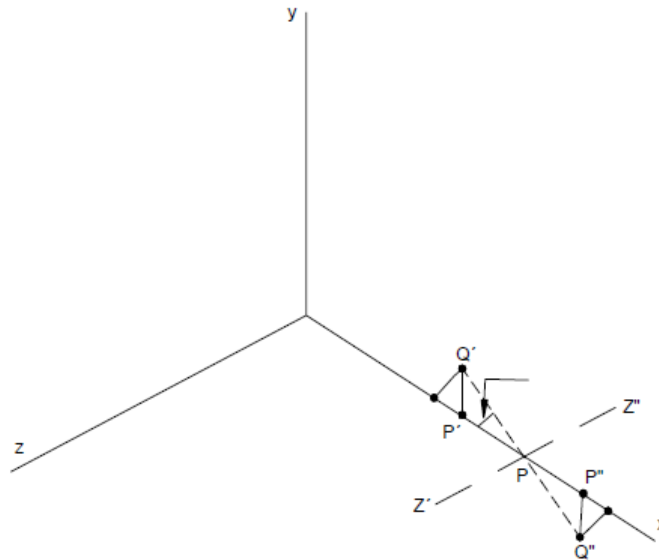
Caracterización de Suelos Arenosos Mediante Análisis de Ondas de Superficie [3].

En la figura 3 se ilustran las relaciones anteriores. Cuando la onda llega al punto P, hace que el medio en la proximidad de P gire respecto al eje Z'Z'' (paralelo al eje z) en un ángulo ε . Como se está tratando con deformaciones infinitesimales, ε debe de ser infinitesimal y se puede ignorar la curvatura de los desplazamientos y considerar que puntos como P' y P'' se desplazan paralelos al eje y, a los puntos Q' y Q''. Así, a medida que la onda viaja a lo largo del eje x, el medio se desplaza transversalmente a la dirección de la propagación, de allí el nombre de onda transversal, Además, como la rotación varía de un punto a otro en cualquier momento dado, el medio está sujeto a esfuerzos cortantes que varían a medida que la onda se mueve a lo largo; esto propicia el nombre de onda cortante.

Puesto que se podría elegir para ilustrar θ_y de la figura 3, en vez de θ_z , es claro que

estas ondas cortantes tienen dos grados de libertad, a diferencia de las ondas P que tienen solo uno a lo largo de la dirección radial. En la práctica, el movimiento de ondas S se descompone usualmente en una componente paralela y otra perpendicular a la superficie del suelo; estas se conocen como ondas SH y SV, respectivamente. Cuando la onda no viaja ni horizontal ni verticalmente, el movimiento se resuelve en una componente horizontal SH y en una componente en el plano vertical a través de la dirección de propagación. De ahora en adelante, la onda S será conocida como onda SV a menos que se indique otra cosa. [1].

Figura 3. Rotación del medio durante el paso de una onda S



Métodos de prospección sísmica en la investigación del subsuelo [1].

Dado que los dos grados de libertad de las ondas S son independientes, se puede tener una onda S que implique movimiento en solo un plano, por ejemplo movimiento SH o SV; se dice que esta onda es polarizada en un plano. También se puede tener una onda en que el movimiento SH y SV tenga la misma frecuencia y una diferencia de fase fija; esta onda está polarizada elípticamente. La polarización de ondas S es un factor usual en la exploración.

En el caso de un medio no homogéneo e isotrópico, resulta imposible resolver el

movimiento ondulatorio en ondas P y ondas S separadas. Sin embargo, las inhomogeneidades y la anisotropía en la Tierra son suficientemente pequeñas para que el supuesto de ondas P y S separadas sea válido para propósitos prácticos. [1].

2. METODOS SISMICOS BAJO LA SUPERFICIE Y ASPECTOS DEL TRABAJO DE CAMPO

2.1 Principios fundamentales

Los métodos sísmicos bajo la superficie son realizados con la misma fuente de Energía sísmica ó con geófonos detectores, ó ambos, en pozos a diferentes profundidades bajo la superficie. El objetivo de estos métodos es determinar las velocidades de las ondas compresionales (ondas P) y ondas de corte (ondas S), como función de posición debajo del nivel superficial. Estas velocidades son determinadas midiendo el tiempo de viaje de una señal sísmica, tiempo mínimo de viaje de la distancia entre la fuente y el detector. Las velocidades de las ondas P y S pueden ser usadas para calcular los parámetros elásticos dinámicos (módulo de corte, módulo de Young, módulos de volumen, y relación de Poisson) como funciones de la profundidad, y peso específico húmedo conocido. Como los niveles de esfuerzos involucrados en el método sísmico son pequeños, estos módulos dinámicos son válidos solo para deformaciones pequeñas. [1].

2.2 Tipos de métodos bajo la superficie.

Los tres métodos bajo la superficie son nombrados de acuerdo a la dirección predominante del viaje de las ondas sísmicas, las velocidades son medidas como sigue:

a) Método Uphole: la fuente de energía es colocada a una profundidad determinada y en un pozo, el tiempo de viaje es medido en un geófono sobre la superficie cercana a extremo superior del pozo. Las Ondas frontales o Método de Meissner, es una variación del método Uphole en el cual un juego de geófonos es ubicado en línea sobre la superficie en un incremento uniforme de distancias desde el pozo.

b) Método Downhole: la fuente de energía es colocada en la superficie cerca a la boca del pozo que contiene el o los geófonos colocados a una o más profundidades

c) Método Crosshole: La fuente de energía se coloca a un nivel determinado en un Pozo, mientras que los geófonos (en otras profundidades) son ubicados cerca al Pozo al mismo nivel y algunas veces también en puntos sobre o debajo de la superficie.

Muchos de los principios y detalles de los procedimientos son comunes para los tres métodos.

2.3 Método Uphole y Downhole.

En estos dos métodos, la trayectoria de viaje de la señal sísmica es obligada a cruzar todos los estratos entre la fuente y el detector. Por esta razón estos métodos son útiles para detectar y medir velocidades de onda en zonas ocultas o zonas subyacentes de baja velocidad las cuales normalmente no son perceptibles por el método de refracción sísmica. [1].

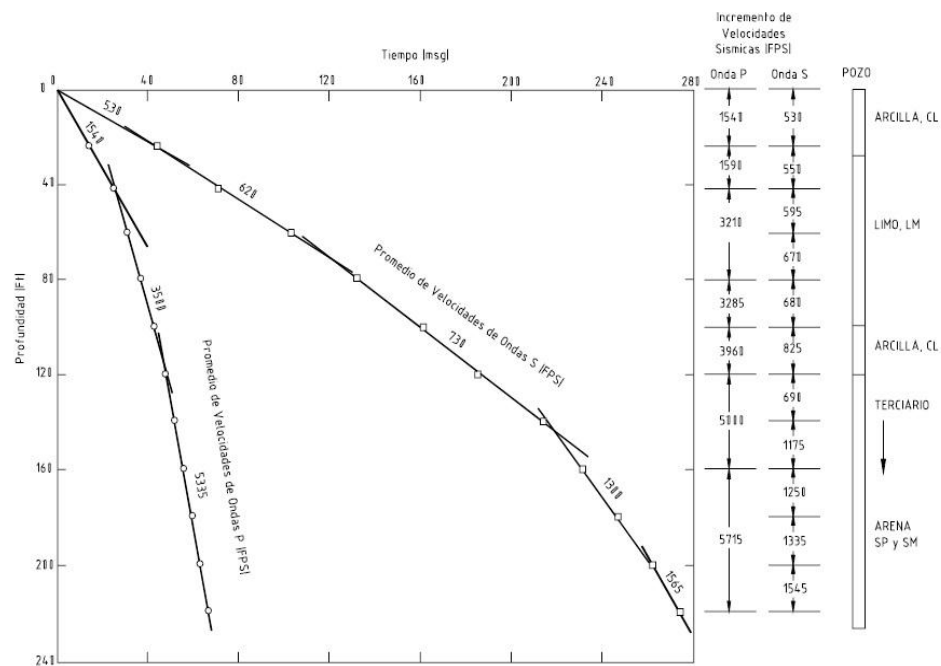
2.3.1 Medidas

En los métodos de Uphole y Downhole, una perturbación sísmica es generada por una fuente mecánica o explosiva en un extremo o una línea entre un punto en un pozo y un punto en la superficie. Los datos crudos medidos y registrados por el equipo consisten del tiempo requerido por las ondas P y S para viajar desde la fuente hasta un operador sísmico. Estos tiempos de viaje son medidos como el intervalo entre el instante de iniciación de la fuente sísmica (tiempo cero) hasta la reflexión inicial de la señal del geófono registrada (primera llegada) para señales de onda P. para señales de Onda S, el tiempo de viaje es el intervalo entre la iniciación y el salto de movimientos identificados al llegar como ondas S por interpretación del registro.

Empleando la distancia entre la fuente y el detector para cada ubicación de la prueba en el pozo, se realiza una gráfica del tiempo de llegada de las ondas P y S

para cada valor de profundidad. La figura 4 representa la inclinación inversa de las líneas verticales mejor ajustadas, los puntos promedios de deformación de las velocidades verticales de ondas P y S. Un cambio en la inclinación de una línea indica la interface entre dos capas bajo la superficie teniendo diferentes velocidades y la inversa de la pendiente de cada segmento de línea sucesiva da la velocidad de la capa. En resumen para las velocidades promedio el incremento de las velocidades verticales de las ondas P y S pueden ser determinados dividiendo las profundidades entre puntos adyacentes por el incremento del tiempo de viaje (la diferencia en tiempo de viaje total entre dos pruebas profundas adyacentes). Algún intervalo de tiempo asociado al intervalo de profundidad puede ser útil para calcular velocidades, particularmente si la correlación con la importancia de las fallas geológicas bajo la superficie o si el material de las capas notadas desde los datos de perforación son aceptables.

Figura 4 Velocidad de onda vertical P y S para estudios Downhole y Uphole



Métodos de prospección sísmica en la investigación del subsuelo [1].

2.3.2 Aplicaciones

Normalmente se realizan los métodos de Uphole y Downhole para complementar otras pruebas sísmicas y proporcionar redundancia en un programa de prueba geofísico. Un propósito muy importante es descubrir anomalías sísmicas, tales como si una capa de menor velocidad de onda P está bajo una capa de mayor velocidad, o una zona “oculta” (una capa de poco espesor baja velocidad para ser detectado desde una prueba de refracción sísmica superficial). [1].

El método de Downhole también puede proporcionar datos de velocidad de onda S de los substratos más profundos que los métodos de onda S superficiales, que son normalmente confiables para la investigación.

Una gran limitación de los métodos Uphole y Downhole es su área limitada de investigación, es decir, la vecindad inmediata de un pozo. También si dado el caso requiere de entubación para sostener la integridad del pozo, esto es posible que afecte seriamente la exactitud de medidas de tiempo.

2.3.3 Equipo

2.3.3.1 Fuentes sísmicas

Las fuentes sísmicas son escogidas según las necesidades del método, la primera consideración es determinar las velocidades de las ondas P o S. La fuente debe ser de acuerdo al tipo de energía requerida, es decir, producir buenos datos de la Onda P; la fuente sísmica debe transmitir la mayoría de su energía a la tierra en compresión o cambios de volumen, mientras se produce los buenos datos de la onda S, la fuente debe transmitir más de su energía a la tierra a través de distorsión de direccionalidad. Las mejores fuentes para generar ondas P son del tipo de impulso, como explosivos, almádenas, y caída de pesas. Las buenas fuentes para generar ondas S son los vibradores y fuentes del tipo impulso controlando su direccionalidad. Para una buena definición de onda S, las fuentes del tipo impulso deben ser reversibles y reparables. Con inversión de la polaridad de la fuente, se invierte la

polaridad de la onda S, mientras que la polaridad de la onda P es irreversible. Esto le permite al intérprete escoger la llegada de la onda S por comparación de las formas de señales registradas en pruebas sucesivas con polaridad inversa. [1].

Una fuente excelente para generar ondas S en el método Downhole es una comba que impacta un tablón grande de madera ubicado cerca de la boca del pozo. Las señales de polaridad opuesta pueden generarse golpeando los extremos opuestos del tablón. Otras técnicas siguen el mismo modelo, como el uso de una comba en hoyo rectangular pequeño, impactando en un plato de acero en la pared opuesta. La señal de polaridad opuesta puede generarse colocando el plato sobre la pared opuesta. Debido a que las ondas S son más fácilmente generadas desde la superficie, es preferible utilizar el método de Downhole para obtener información de la onda S.

2.3.3.2 Detectores

a). Tipo de velocidad de los geófonos: Estos detectores responden al movimiento de sus apoyos, si ellos se colocan en la superficie de la tierra, el movimiento del suelo en la ubicación del geófono será traducido en un voltaje que es proporcional a la velocidad del movimiento de este elemento. Debido a que sus elementos sensibles son direccionales, estos se configuran los geófonos para ser sensibles al movimiento en la dirección vertical u horizontal. Los geófonos orientados direccionalmente también pueden ser combinados ortogonalmente para formar una serie del Triaxial: el cual se aloja en una unidad con un resorte extensible totalmente para sujetarlo contra la pared de un pozo abierto. Normalmente se usan geófonos orientados en las tres direcciones en el comportamiento del método Uphole y Downhole. La serie debe orientarse cuidadosamente en el campo para que uno de los ejes horizontales este en línea con la dirección de propagación de la onda y el otro sea perpendicular a esa dirección.

b). Tipo de Presión: Estos detectores (Hidrófonos) responderán a los cambios de presión hidrodinámicos y para usarlos deben estar sumergidos en un fluido, como en

un pozo lleno de agua. Los Hidrófonos son omnidireccionales; ya que los detectores direccionales son casi una necesidad en la identificaciones de la primera llegada de la onda S, no se recomiendan hidrófonos para obtener los datos de la onda S en la prueba Uphole y Downhole. Mientras sea clara la llegada de la onda S se puede detectar en un registro del hidrófono, esto representa una onda P que se genera donde la onda S choca con el pozo abierto y se propaga a través del líquido hasta el hidrófono. Si se interpreta como una llegada verdadera de onda S, podría resultar sobrestimada la velocidad de la onda S. Pueden obtenerse archivos excelentes de registros de ondas P usando hidrófonos con la condición de que los materiales del suelo investigado tengan velocidades de ondas P mayores que el del fluido del pozo. [1].

2.3.4. Procedimiento de obtención de datos

2.3.4.1. Preparación del pozo abierto

Cuando el objetivo del estudio es información general del lugar, la ubicación de la perforaciones debe seleccionarse para ser representativas del lugar y deben ser de tal en número y profundidad para dar una muestra representativa de los materiales y variaciones del lugar. En la exploración para una estructura, como por ejemplo un dique, deben escogerse ubicaciones de las secciones críticas y en áreas del problema si las anomalías son sospechosas o conocidas. Las perforaciones deben realizarse ligeramente mayor de la profundidad del máximo interés. Las excavaciones también pueden usarse para obtener muestras inalteradas para pruebas de laboratorio o para ejecutar pruebas de SPT. Deben obtenerse muestras a intervalos de 5 pies y en cada cambio de estratos para clasificación visual de campo y laboratorio. El nivel del agua en las perforaciones también debe ser registrado. Esta información es necesaria para hacer una adecuada selección del punto del disparo y ubicaciones del geófono.

Pueden ser entubados o no entubados para los métodos uphole y downhole. Los huecos no entubados son preferibles cuando el material alrededor del hueco es

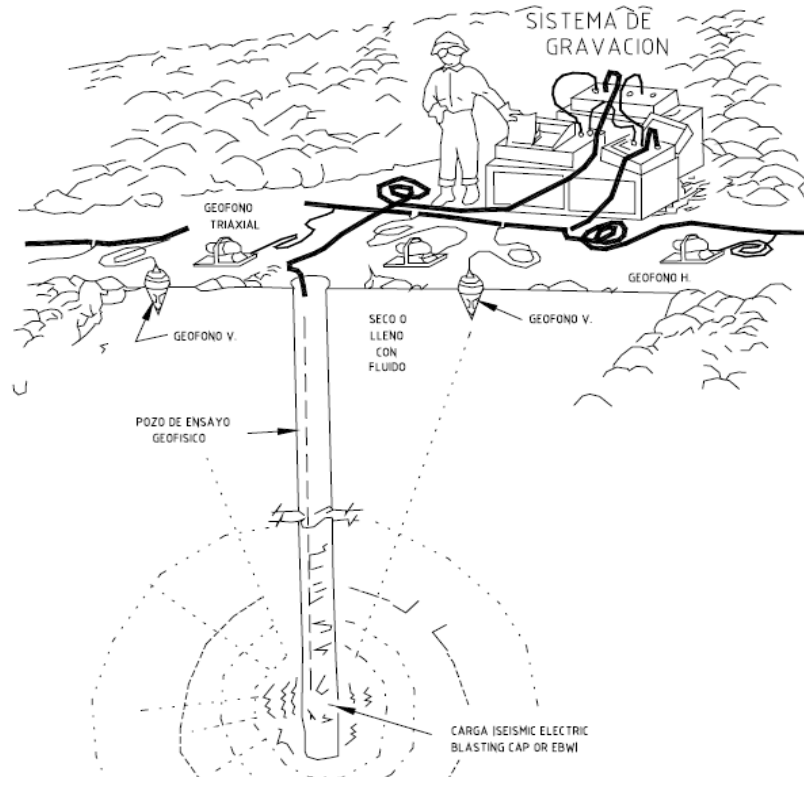
estable; si esto no se da, existe el riesgo de cavitaciones que pueden cerrar la perforación o puede producir pérdida de equipo. Si el hueco es entubado, 3 ó 4 pulg. El tubo plástico ID es normalmente empleado. No se recomienda tubo de acero porque mantiene un circuito corto de alta velocidad para la señal sísmica. La velocidad de ondas P del material o mezcla relleno o inyectado, en el entubado, con densidad aproximada al material del lugar, debe ser determinada. Una mezcla típica que simula la densidad de limos ó arenas pueden ser obtenida mezclando 1 lb de bentonita y 1 lb de cemento portland y 7.25 lb de agua. El propósito del tapón de inyección en el extremo del entubado es que el lodo ingrese al tubo durante la inyección la cual es realizada a través un hueco desde la parte superior del fondo. Si se encuentra el nivel freático durante la excavación y el entubado tiene un sello impermeable puede ser necesario llenarlo con agua para prevenir que este salga fuera del terreno durante la instalación.

2.3.5. Método Uphole

Este procedimiento generalmente es realizado iniciando un impulso sísmico en el pozo y midiendo el tiempo de llegada de la señal a uno o más geófonos en la superficie del terreno cerca de la boca del pozo, normalmente a 10 pies de distancia (Figura 4). Una fuente sísmica confiable repetible usa el descargo súbito de aire comprimido de alta presión. Estas pistolas de aire controlan las fuentes de energía y no destruirán las paredes del pozo, si se usa con discreción. Estos aparatos son caros y requieren la disponibilidad de un compresor grande en el lugar. Por consiguiente, la fuente sísmica normalmente usada es un explosivo. La carga explosiva consiste solamente de un dispositivo inicialmente eléctrico (un sismógrafo detonador instantáneo o un detonador explosivo dentro de la caja detonante) o puede ser una carga explosiva más grande detonada por un dispositivo inicial, dependiendo de la profundidad y características de la transmisión del suelo. El tamaño de la carga requerida debe ser determinado por ensayos en cada lugar.

Los disparos pueden dañar la perforación o entubados, de modo que esto generalmente no es posible para aumentar a profundidad disparos sucesivos, por consiguiente, el primer disparo se hace al fondo del pozo, o en la ubicación más profunda a ser probado. Se hacen disparos subsecuentes progresivamente a profundidades más superficiales. Los tiempos de llegada de las ondas P según estudios de Uphole son los tiempos de las primeras señales llegadas después de la detonación; entonces la dirección de propagación de onda es vertical, deben obtenerse datos con geófonos verticales. Las técnicas usadas registran los datos de las ondas S, que serían las mismas sólo deben usarse una serie triaxial de geófonos para facilitar la identificación de llegada de las ondas S. Entonces las fuentes Uphole (pozo) raramente son controlables en un plano horizontal, el enriquecimiento de las ondas S es difícil de lograr. Por esta razón, más estudios de ondas S verticales son realizados usando el método de Downhole.

Figura 5. Técnica del método Uphole



Métodos de prospección sísmica en la investigación del subsuelo [1].

2.4 Método Crosshole

En su sentido más amplio un estudio Crosshole consiste en determinar de forma detallada la distribución de un determinado parámetro del terreno en el espacio comprendido entre dos sondeos en situaciones se recomienda tres (ver figura 6) situados relativamente próximos entre sí. Repetidamente hemos venido comentando que entre los diversos parámetros físicos del terreno uno de los más significativos en el ámbito de las aplicaciones geotécnicas es la velocidad de transmisión de las ondas de compresión (V_p) a través del mismo.

Las posibles heterogeneidades puntuales del terreno tales como zonas de falla, rellenos, cavidades y contactos entre unidades litológicas representan contrastes notables en la distribución de los valores de V_p del medio rocoso y por lo tanto son susceptibles de detección y caracterización a partir de las medidas de V_p convenientemente realizadas entre sondeos o entre éstos y la superficie del terreno. [5].

2.4.1 Generalidades

“Para la ejecución de un estudio mediante el método Crosshole se requiere un mínimo de dos sondeos si bien para el reconocimiento detallado de un determinado espacio rocoso es conveniente utilizar diversas parejas de sondeos que definan secciones en las direcciones de mayor interés para cada caso.

En esencia la ejecución de estas medidas requiere emplazar en uno de los sondeos una serie de sensores (hidrófonos) regularmente espaciados y cubriendo en exceso toda la sección a reconocer. Con estos sensores se registra la señal sísmica producida en un determinado punto del segundo sondeo mediante sistemas capaces de generar específicamente ondas de compresión”. [5]

Figura 6. Método Crosshole

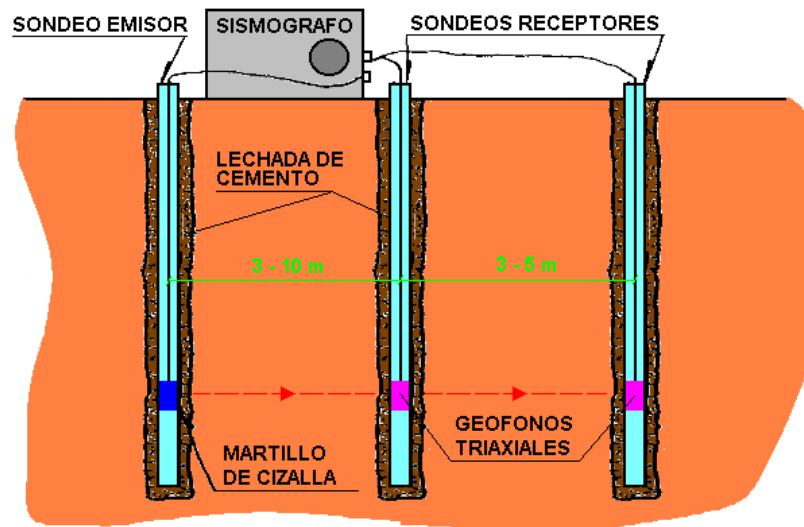


Imagen del método Crosshole (CEDEX)

Una vez registrada la señal sísmica para una determinada posición de los sensores y del punto de señal, éste se desplaza a lo largo del sondeo hasta una nueva posición, y se repite el proceso de registro con todos los sensores que permanecen en la misma posición, hasta recorrer completamente el sondeo donde se produce la señal.

Dependiendo del grado de resolución requerido en cada caso se establece el espaciado entre los sensores y entre los puntos de señal sísmica. Este espaciado suele ser el mismo en ambos sondeos, del orden de un metro o a veces inferior dependiendo de la resolución requerida.

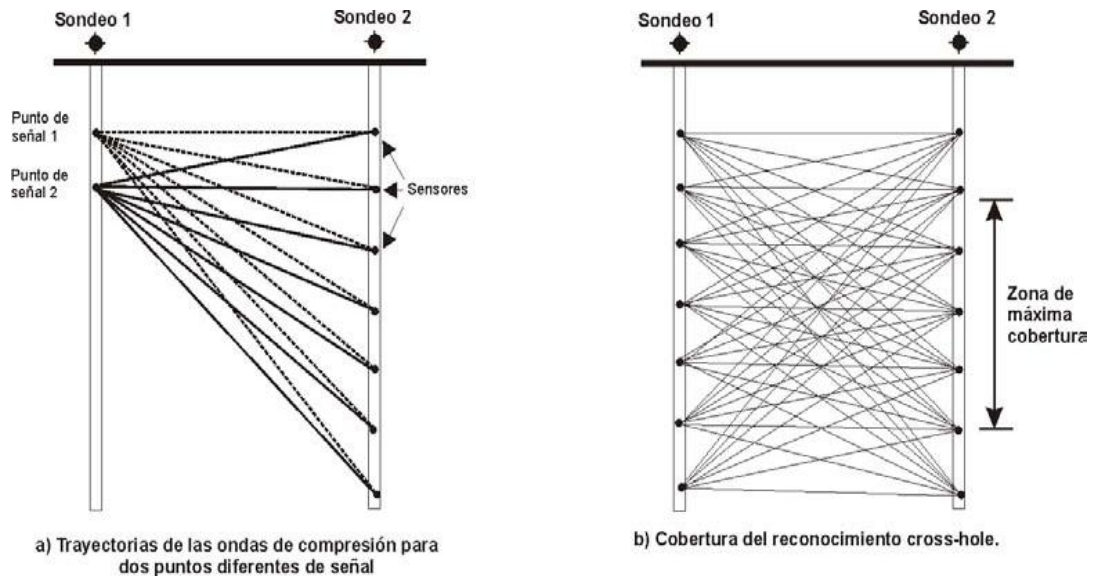
De la simple observación de los esquemas relativos a esta forma de realizar las medidas que presentamos en la Figura 7, se deducen dos aspectos básicos de este método geofísico:

a). La multiplicidad de las posibles trayectorias definidas por las diversas combinaciones punto de tiro-sensor que atraviesan cada elemento puntual del

espacio comprendido entre los dos sondeos hace que el muestreo de tal espacio sea exhaustivo.

b). La reducción de la cobertura de datos hacia los extremos superior e inferior de la sección definida por los dos sondeos aconseja que éstos se perforen hasta una profundidad que sobrepase claramente la zona de estudio propiamente dicha.

Figura 7 Esquema del método Crosshole



Curso de geotecnia para infraestructuras [5].

2.4.2 Medidas Sísmicas Crosshole

El método de las medidas sísmicas Crosshole consiste en su versión más sencilla, en provocar una señal sísmica en un sondeo y en registrarla mediante el adecuado receptor localizado en otro sondeo próximo, de modo que el punto donde se produce la señal y el receptor se encuentren a la misma cota. El proceso se repite desplazando ambos a pequeños intervalos a lo largo de los sondeos hasta recorrerlos en su totalidad. Son aspectos esenciales de este método los siguientes:

a). Se asume que la transmisión de la señal sísmica desde el emisor situado en el sondeo 1 hasta el receptor localizado en el sondeo 2 es directa, sin sufrir refracciones o reflexiones.

- b). La señal sísmica debe generar ondas P y ondas S con la particularidad de que estas últimas puedan controlarse cambiando su polaridad a voluntad del operador.
- c). La correcta identificación de las primeras llegadas de las ondas S en los sismogramas exige hacer al menos dos registros independientes para cada posición del sensor, con diferente sentido del impacto que produce las señales o bien el empleo de sensores especiales orientados diametralmente en sentidos opuestos.

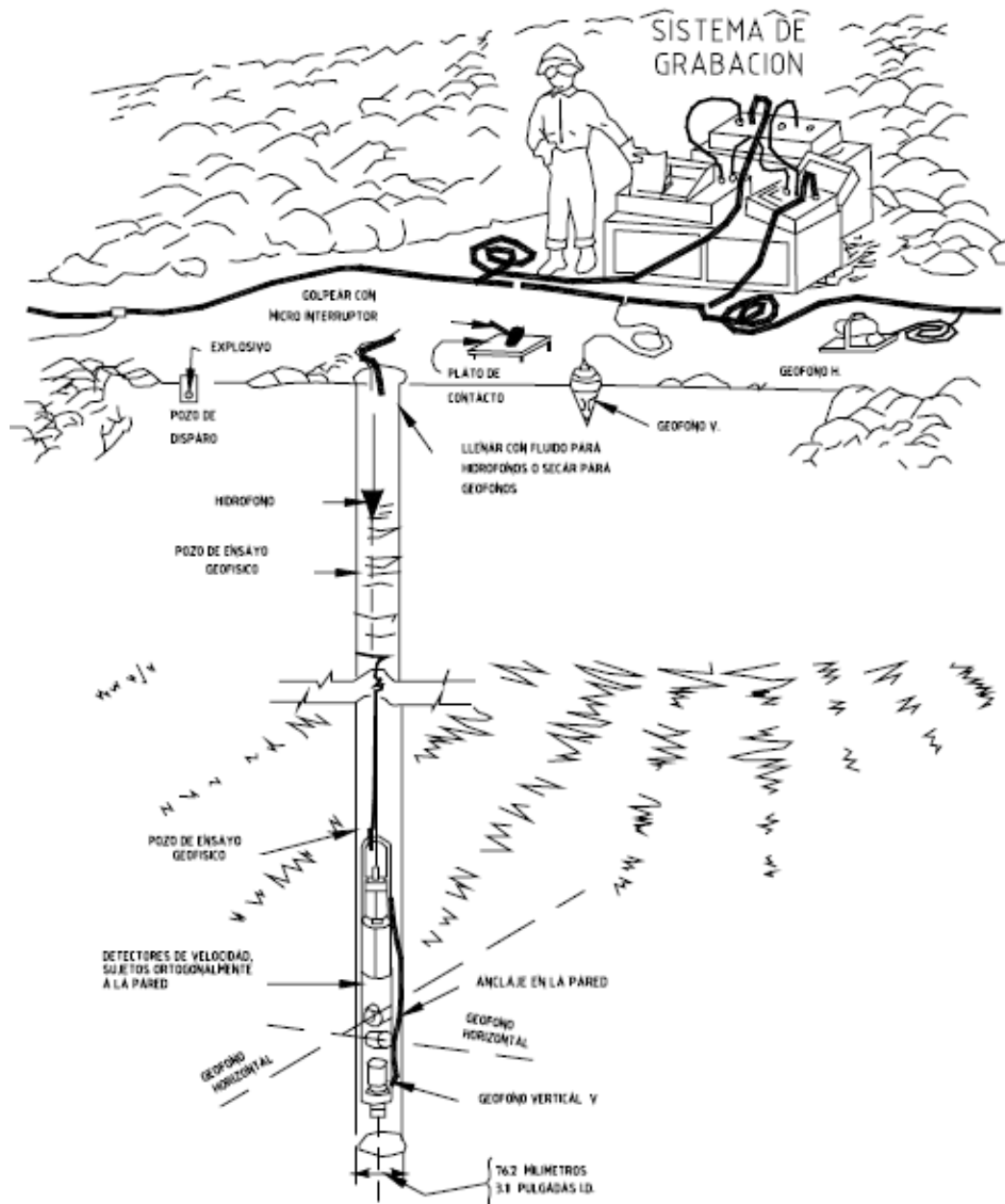
2.5 Método Downhole

Los estudios Downhole se realizan con una fuente sísmica explosiva o mecánica en la superficie del terreno y el receptor en el pozo, como se muestra en la figura 8.

Se usa un plato metálico en la tierra para recibir el impacto vertical del martillo porque proporciona una señal sísmica de ondas P más nítidas.

La fuente se localiza cerca al pozo, si la fuente es explosivo normalmente a 10 pies bajo la superficie, lo normal es utilizar una fuente mecánica en lugar de un explosivo para prevenir hundimientos en la parte superior del pozo. El sensor sísmico puede ser un hidrófono o un geófono vertical, o una serie triaxial de geófonos. Las llegadas de las ondas P son las primeras señales que arriban al geófono vertical o hidrófono. Si ambas ondas P y S requieren respuestas, deben usarse geófonos en una serie triaxial con un dispositivo para sujetar la serie en el pozo. La fuente sísmica recomendada para los estudios de ondas S es un impacto del martillo en el extremo de un tablón grande a una distancia de 1 metro de la boca del pozo. El tablón debe ser pesado para proporcionar un buen acoplamiento en al terreno. Se usa una comba para golpear horizontalmente el extremo del tablón, y el tiempo cero es proporcionado por un geófono horizontal adyacente al mismo extremo del tablón o por un interruptor de impacto en la comba. Se hace un registro de las señales sísmicas resultantes al geófono en el pozo así como al geófono de la superficie.

Figura 8 Técnica del método Downhole

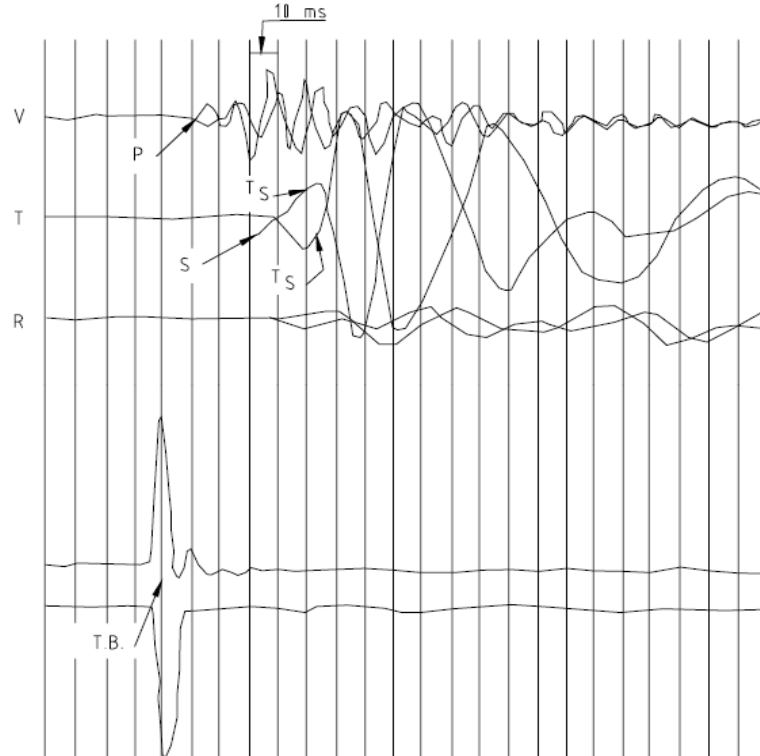


Métodos de prospección sísmica en la investigación del subsuelo [1].

El geófono de la superficie se mueve al otro extremo del tablón, se da un segundo golpe horizontal en el extremo del tablón, y se hace otro registro. Los dos archivos se superponen para comparar los rastros del geófono cuyo eje es paralelo al tablón (Figura 9).

El punto en el cual las sucesiones de la señal el geófono llegan a ser de polaridad opuesta, es decir, 180 grados fuera de fase, representa la verdadera llegada de la onda S. Este punto no es la primera llegada. La calidad de los datos obtenida por esta técnica depende del gran cuidado que se tome generando los dos signos contrarios de la onda S, se debe verificar que mientras ellos son de fase opuesta, también son por otra parte similares. En particular, la energía debe ser igual, y deben oponerse las direcciones de los dos reveses del martillo. Con las medidas de las ondas P o S, las observaciones se repiten en cada nueva posición de los receptores movidos en el pozo, normalmente a los intervalos de 1 a 3 metros, para obtener la relación del tiempo de viaje y profundidad. Las ubicaciones de los geófonos son elegidas en base a los resultados del estudio de datos de la clasificación de los sondajes y el estudio de refracción superficial. [1].

Figura 9. Oscilograma del estudio Downhole, muestra la llegada de las ondas S de 180 grados de interface.



Métodos de prospección sísmica en la investigación del subsuelo [1].

T = Trazo de la señal desde el geófono horizontal con el eje paralelo sensible al plano

R = Trazo de la señal del geófono horizontal con el eje perpendicular sensible al plano

V = Trazo de la señal del geófono vertical

TB = Descanso de tiempo o tiempo cero, tiempo de impacto del martillo en tablón

Ts = Señal trazada por el geófono horizontal con el eje sensible paralelo al tablón, impacto en un extremo de tablón.

TN = Señal trazada por el geófono horizontal con el eje sensible paralelo al tablón, impacto en el extremo opuesto de tablón.

P = Ondas P u ondas de compresión

S = Onda S u ondas de corte.

2.5.1 Trabajo de Campo

Dado que la manera para generar ondas en el método Uphole y Crosshole es mediante fuentes explosivas y debido a las complicaciones generales que tiene el método Crosshole en el cual se necesita de un sondeo adicional (en ocasiones se recomienda hacer el estudio con 3 sondeos) se procederá a realizar el trabajo de campo del método Downhole, Debido a la facilidad para generar las ondas en la superficie mediante golpes sobre un plato de acero y que en este método solo es necesario un sondeo.

2.5.1.1. Localización y Preparación del pozo abierto

En este paso se debe tener en cuenta la ubicación del sondeo el cual debe estar en un punto significativo del área a estudiar, una vez localizado se procede a hacer la excavación cuya profundidad varía dependiendo del tipo de proyecto. En este caso se trabajó con una profundidad de 20 metros y por motivos de seguridad con el equipo a utilizar se instaló un tubo de PVC de 2 pulgadas tipo pesado.

Una vez preparado el pozo se procede a la ubicación de la platina de acero, la cual para generar ondas verticales se colocara sin ninguna inclinación a una distancia relativamente corta al pozo en este caso la distancia fue de 1 metro; para generar ondas Radiales y transversales se colocó la platina con cierta inclinación y nuevamente a una distancia de 1 metro, en las tres ubicaciones de la platina se excavo un poco para que esta pudiera tener un mejor contacto con el suelo (ver foto 1)

Foto 1. Excavación previa a la colocación de la platina de acero



2.5.1.2. Equipo a Utilizar

El equipo utilizado en el Método Downhole es suministrado por la empresa Olson Instruments el cual consiste en un computador con un software específico en el cual se maneja la información generada, también consta de un geófono triaxial, un tubo guía el cual será el que guie el geófono a través del pozo, varios tipos de cables los cuales transportaran la información del geófono al equipo y otras tareas complementarias tales como llevar aire y transmitir la energía generada por el golpe en la platina al equipo receptor (ver figura 10)

Adicional a eso se requiere de otros instrumentos los cuales son de gran importancia para llevar a cabo el ensayo. Entre ellos están

- Porra de Acero
- Platina de acero

- Bomba de aire
- Hombre solo
- Cuerda
- Nivelador
- Barra metálica
- Pala
- Cinta métrica

Figura 10. Equipo a Utilizar



System Reference Manual 2007 Crosshole and Downhole Seismic Test [6].

Foto 2 Herramientas a Utilizar



Foto 3 Geófono, el tubo guía, la bomba de aire entre otros



En la foto 4 podemos apreciar los cables que irán conectados al Geófono en el cual el cable verde se encargara de llevar aire para que el geófono este en contacto con los bordes del tubo de PVC y un cable negro el cual un extremo ira al geófono y el otro ira conectado al computador, la función de este cable es medir el Tiempo de subida de la onda

Foto 4 Cables que van conectados al geófono



En la foto 5 se puede apreciar el sensor que va conectado de la platina de acero al computador, este sensor tiene la función de medir el tiempo que tarde la onda desde que se genera el golpe hasta que llega al geófono.

Foto 5 Sensor



2.5.2 Procedimiento para la toma de datos

Una vez se tiene listo el pozo abierto y el equipo a utilizar se procede a la toma de datos para lo cual lo primero que se debe hacer es conectar los respectivos cables al equipo y al geófono. En la foto 6 se puede ver como los cables se conectan al geófono y este a su vez se conecta al tubo guía antes de descender por el pozo

Foto 6 Conectando el geófono al tubo guía



Después de que el geófono se encuentra a la profundidad requerida (ver foto 7), procedemos a conectar el sensor a la platina y a su vez lo conectamos al computador, una vez esté conectado procedemos a hacer un golpe de prueba en la platina (se recomienda hacer esto cuando la platina no tiene inclinación) para poder calibrar el equipo (ver foto 8).

Foto 7 Geófono descendiendo junto con los respectivos cables y la cinta métrica



Foto 8 Sensor conectado al equipo

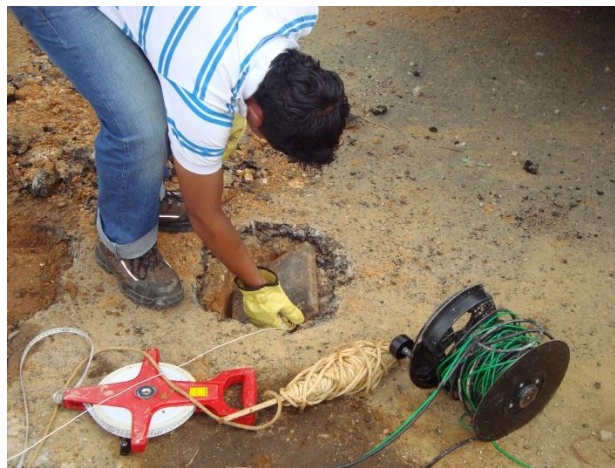


Una vez calibrado el equipo se procede a hacer al menos 2 registros independientes por cada posición de la platina, un Impacto vertical y para dos impactos tangenciales de sentidos contrarios. El estudio completo del sondeo se hace repitiendo el proceso anterior para diversas profundidades del geófono, en este ensayo el geófono fue ascendiendo cada 2 metros

Foto 9 Generando Ondas P mediante golpes en la platina de acero



Foto 10 cambia la posición de la platina para generar Ondas S



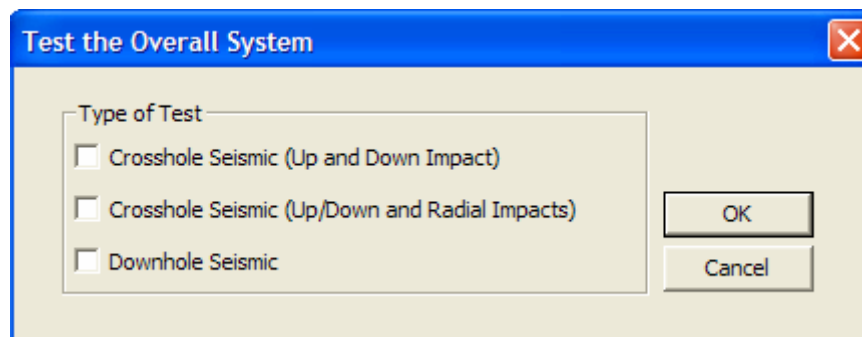
3. INTERPRETACION Y PROCESAMIENTO DE DATOS

3.1 Procedimiento en el Software Wingeo

En este capítulo mostraremos el procedimiento que se lleva a cabo en el sistema Wingeo desde su respectiva adquisición de datos hasta el procesamiento de los mismos.

Es estrictamente recomendado hacer una prueba general del sistema antes de iniciar el ensayo. Este paso permitirá al usuario chequear el sistema completo y calibrar el equipo para cada componente, de acuerdo a la energía desde cada dirección de impacto. Para hacer la prueba general del sistema, simplemente vaya a "Acquisition/Test the System" (o presione F2) y la ventana mostrada en la figura 11 aparecerá en la pantalla. Seleccionamos el ensayo a realizar, en este caso el Downhole Seismic.

Figura 11 Ventana donde seleccionamos el tipo de ensayo a realizar



System Reference Manual 2007 Crosshole and Downhole Seismic Test [6].

El Software nos preguntara por la primera dirección del impacto, en este caso para la prueba Downhole, El software nos preguntara por el impacto vertical, una vez el impacto vertical es realizado, el usuario puede ajustar el aumento para cada canal.

Manténgase rechazando la señal hasta que esté satisfecho con el resultado, una vez el usuario acepte el dato, los valores de aumento serán establecidos para todos los canales (ver figura 12). Luego el software preguntara al usuario para realizar en la siguiente dirección del impacto.

Figura 12 Configuración de canales para el Ensayo Downhole

	Transducer	Component	Calibration	Transducer location
<input checked="" type="checkbox"/> Channel 1	Geophone	Vertical	0	Top
<input checked="" type="checkbox"/> Channel 2	Geophone	Radial	0	Top
<input checked="" type="checkbox"/> Channel 3	Geophone	Transvers	0	Top
<input checked="" type="checkbox"/> Channel 4	Geophone	Vertical	0	Bottom
<input checked="" type="checkbox"/> Channel 5	Geophone	Radial	0	Bottom
<input checked="" type="checkbox"/> Channel 6	Geophone	Transvers	0	Bottom
<input checked="" type="checkbox"/> Channel 7	Force	Hammer	0	Bottom
<input type="checkbox"/> Channel 8	Force	Hammer	0	

OK Cancel

System Reference Manual 2007 Crosshole And Downhole Seismic Test [6].

3.1.1. Inicio del Ensayo

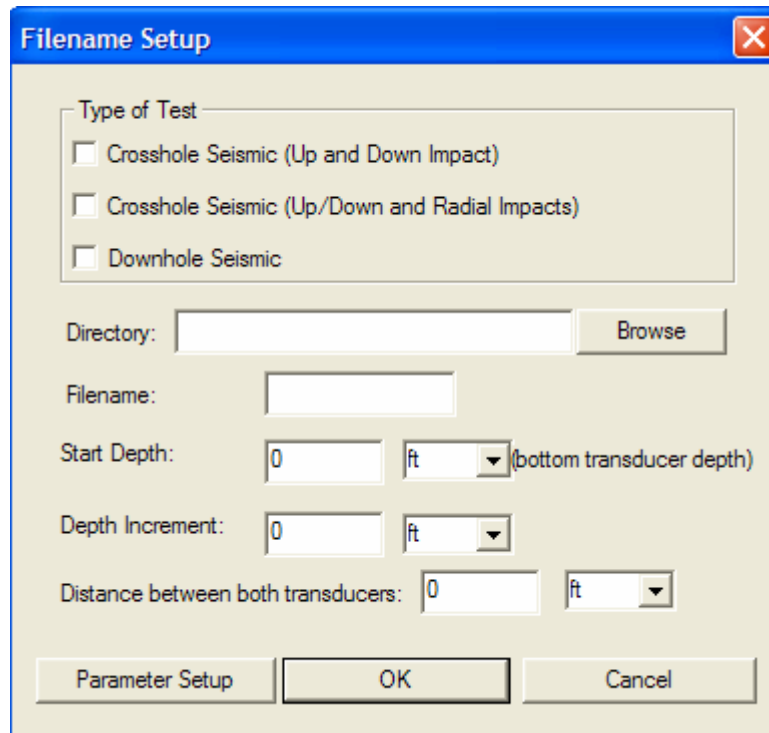
Para iniciar el Ensayo nos dirigimos a “Adquisición/Start CS/DS” (o presione F3). Una ventana mostrada como la de la figura 13 aparecerá en la pantalla para configurar la Geometría del ensayo y el nombre del archivo. Decidimos el directorio donde queremos guardar los datos (usando la tecla Browse), el nombre del archivo, profundidad de inicio e incrementos. Observe que el incremento de la profundidad es negativo si la prueba se está realizando hacia abajo y positivo en el caso contrario. La profundidad de inicio es siempre la parte baja del transductor de profundidad, en el caso el Ensayo Downhole el intervalo entre profundidades es requerido. En este ensayo la profundidad inicial es de 20 metros y el intervalo de toma de dato será cada 2 metros hasta llegar a la superficie.

Después de completar la información en la ventana de la figura 13, a continuación aparecerá el cuadro de dialogo de profundidad (ver figura 14); en este se debe confirmar si es la profundidad y la dirección correcta, de ser así se da clic en el botón “Acept”. El software va a esperar a los datos. Pulse el botón “Impact” en el módulo de emisores.

Una vez que se han obtenido los datos, el Software esperara la decisión del usuario de aceptar o rechazar el registro, Si dado caso se rechaza un dato, el Software simplemente esperara hasta que un nuevo dato sea suministrado, de no

ser así este no procederá al siguiente canal. Para este ensayo se tomaran dos datos por cada posición de la platina, es decir se tendrán dos datos verticales, radiales y transversales. Los cuales después en el procesamiento de datos se mirara si se trabaja con un dato o con el promedio de estos (este proceso se realizara para cada posición de la platina respectivamente)

Figura 13 Nombre y Configuración del Ensayo



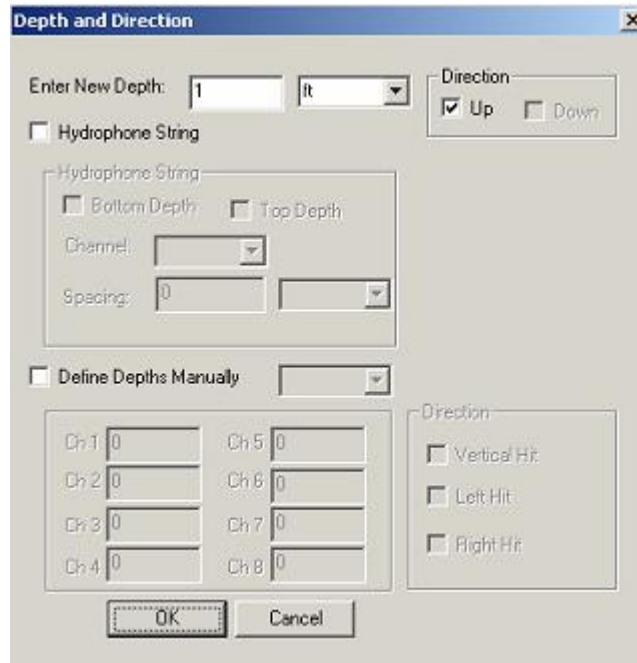
System Reference Manual 2007 Crosshole And Downhole Seismic Test [6].

Después que la adquisición de datos este completa para una posición de la platina se procede a la siguiente dirección, para eso se hace clic en “D” (o presiona Alt + D) en la barra de herramientas como se muestra en la figura 15

Después de la adquisición de datos para las 3 direcciones (Vertical, Radial, Transversal) se ha completado, se procede a cambiar de profundidad dando clic en “N” (o presiona Alt + N) en la barra de herramientas como se muestra en la figura 16

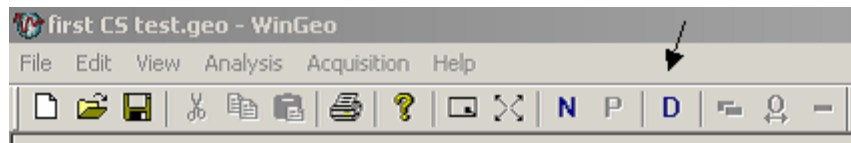
Los datos son guardados automáticamente cada vez que se cambia de profundidad, este proceso se repite para cada profundidad hasta llegar a la superficie.

Figura 14 Pantalla en la que se confirma la dirección y la profundidad



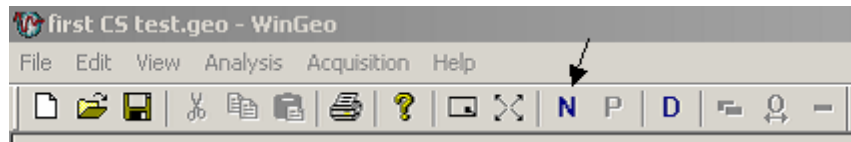
System Reference Manual 2007 Crosshole and Downhole Seismic Test [6].

Figura 15. Barra de Herramientas en ella se muestra el botón “D” para cambiar de dirección



System Reference Manual 2007 Crosshole and Downhole Seismic Test [6].

Figura 16. Barra de Herramientas en ella se muestra el botón “N” para cambiar de profundidad



System Reference Manual 2007 Crosshole and Downhole Seismic Test [6].

3.2 Procesamiento de Datos

El procesamiento de datos se hace con respecto a la profundidad, esto significa que el usuario puede procesar los datos para cada profundidad específica en la cual se le mostraran los componentes para cada posición de la platina.

Para abrir el archivo de datos, vamos a “File/Open” ahí se nos mostraran dos opciones las cuales aparecen en la ventana que se muestra en la figura 17; la opción de “All Trace” nos permite revisar los datos uno por uno y mirar si son aptos para el ensayo; si el usuario tiene confianza de que todos los datos son buenos para trabajar en el ensayo entonces utiliza la opción de “Average Trace Only” la cual nos llevara directamente a procesar los datos.

Figura 17 Menú de Entrada



System Reference Manual 2007 Crosshole and Downhole Seismic Test [6].

3.2.1 Superposición de Funciones

Para superponer los datos desde diferentes direcciones (izquierda y derecha para el método Downhole), hacemos clic en el símbolo de la superposición de la barra de herramientas como se muestra en la figura 18

Figura 18 Botón de Superposición de funciones en la barra de herramientas



System Reference Manual 2007 Crosshole and Downhole Seismic Test [6].

Ahora los datos en ambas direcciones se trazan en un mismo plano pero de diferente color, para la prueba Downhole, los datos de la dirección de la izquierda se representan en Magenta y los datos de la dirección de la derecha se representan en Azul. (El color Magenta representa la función Radial y el color Azul representa la función Transversal)

3.2.2 Definiendo el Cero

Para volver a cero los datos basados en el tiempo de llegada de la fuente, hacemos clic en el símbolo que se muestra en la figura 19

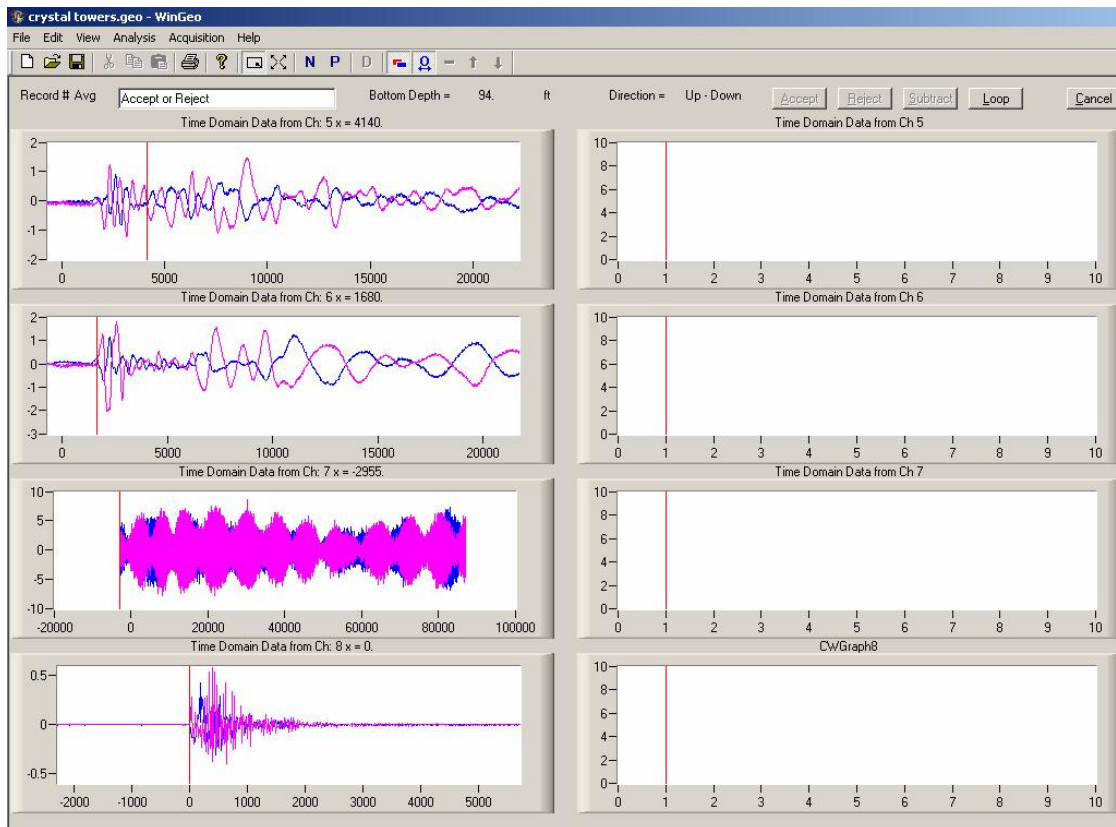
Figura 19 Botón para definir el cero en la barra de herramientas.



System Reference Manual 2007 Crosshole and Downhole Seismic Test [6].

Los datos de todos los componentes se basan en el cero del eje de coordenadas, es el tiempo de llegada de la fuente seleccionada. Esta función es útil cuando la fuente de disparo puede variar en el tiempo de diferentes direcciones. Ajustar el cero es de vital importancia a la hora de superponer funciones.

Figura 20. Ondas de compresión, después de superposición y de definir el cero



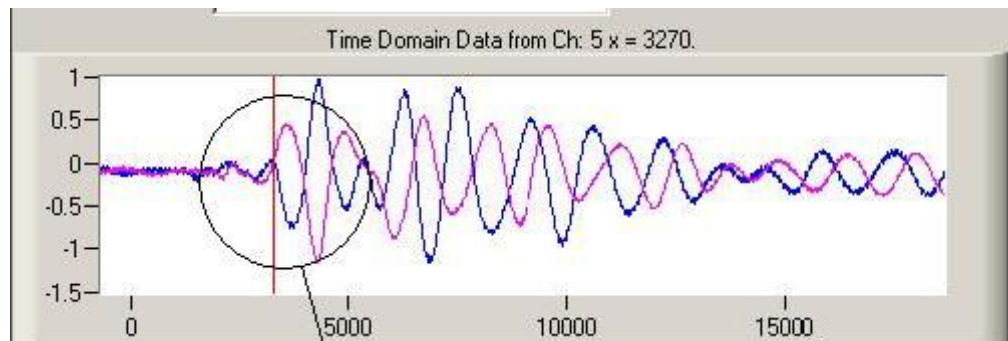
System Reference Manual 2007 Crosshole and Downhole Seismic Test [6].

3.2.3. Seleccionando tiempos de llegada

Para el método Downhole seleccionamos la onda de llegada de la onda de energía de corte en los componentes transversales (T1 y T2) y seleccionamos las ondas de compresiones de llegada de la energía en componentes verticales (V1 y V2).

La llegada de energía de la onda de corte suele ser indicada por una división en la polarización de la onda, como se muestra en la figura 21, la dirección del impacto hacia abajo se registra en Magenta, el corte de energía de onda correspondiente se mostrara como un salto positivo. Lo contrario sucede en la dirección del impacto hacia arriba, el corte de energía correspondiente se registra como una ruptura negativa.

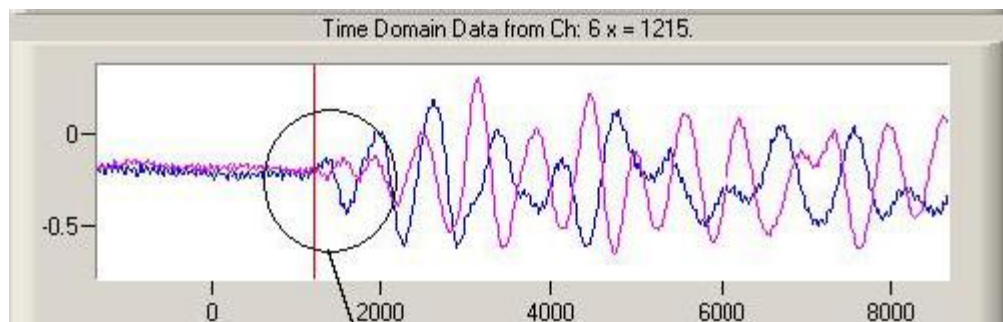
Figura 21 Llegada de la onda de corte



System Reference Manual 2007 Crosshole and Downhole Seismic Test [6].

La llegada de la energía de la onda de compresión es indicado por el primer descanso, positivo o negativo, a una profundidad dada después un desplazamiento (ver figura 22)

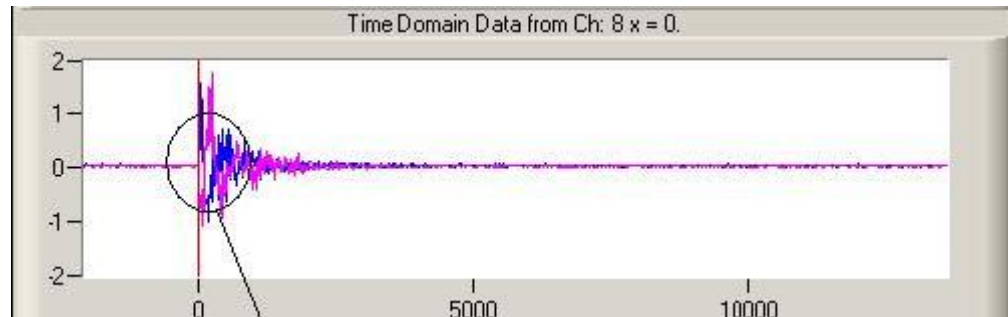
Figura 22 Llegada de la onda de Compresión



System Reference Manual 2007 Crosshole And Downhole Seismic Test [6].

El tiempo de llegada en el método Downhole se corrige a cero mediante la selección del punto de equilibrio para cada profundidad individual como se describió anteriormente. Una vez que el tiempo de descanso se ha seleccionado y se ha establecido el cero, tanto hacia arriba y hacia abajo los componentes deben estar alineados en el cero como se muestra en la figura 23

Figura 23. Fuente de energía con desplazamiento ajustado a cero



System Reference Manual 2007 Crosshole And Downhole Seismic Test [6].

Una vez realizado este procedimiento para una profundidad, procedemos a realizarlo para las siguientes, para cambiar de profundidad oprimimos “Alt + N” y para el cambio de dirección presionamos “Alt + D”

3.2.4. Exportación de datos.

Los datos se pueden exportar a un formato de texto para ello vamos a “File/Export Pick” los datos serán suministrados en un archivo .txt (Ver Anexo A) los cuales pueden ser leídos en Excel o en cualquier hoja de cálculo para posteriores cálculos a realizar.

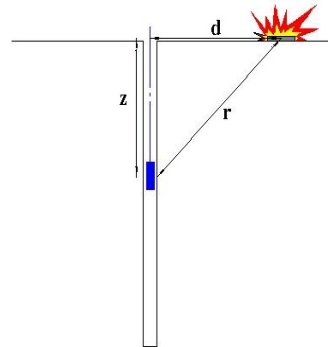
3.2.5. Cálculos para determinar el perfil del suelo

Exportamos los datos a una hoja de Excel para graficarlos y así tener una mejor interpretación de los datos, en ella procederemos a ver los datos por profundidad, tiempo, el tiempo es dado en picosegundos por lo que en la hoja de cálculo procederemos a pasarlo a segundos; también se puede apreciar la distancia que hay entre el geófono y la platina la cual llamaremos “r” la cual calculamos mediante el teorema de Pitágoras teniendo en cuenta que la distancia entre la platina y el sondeo (d) es igual a 1 metro (ver figura 24)

Para el cálculo de la velocidad procedemos a escoger entre el tiempo Radial o Transversal, el cual suponemos que es el mismo, el tiempo vertical no se tiene en cuenta ya que este es generado por ondas P, por lo tanto calcularemos la

velocidad teniendo en cuenta el tiempo transversal el cual es generado por las ondas S.

Figura 24 Distancia “r”



Geostru Downhole [4].

Una vez calculado “r” procedemos a corregir el tiempo mediante la ecuación 3.1

$$t_{\text{corr}} = \frac{z}{r} t \quad (3.1)$$

Una vez calculado la distancia “r” y el tiempo corregido, el cual es pasado a segundos, procedemos a repetir este paso para todas las profundidades como se puede apreciar en la tabla 1

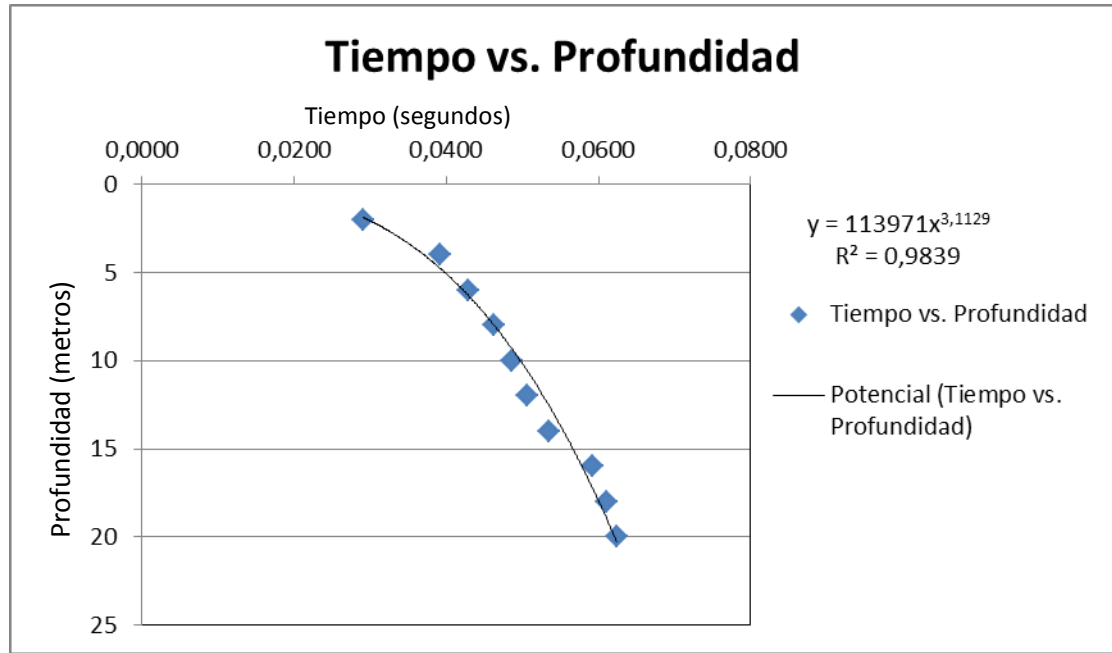
Tabla 1. Datos de Onda S con tiempo corregido

ONDA S TRANSVERSAL				
PROFUNDIDAD (mts)	TIEMPO (μs)	r (mts)	TIEMPO Crr (μs)	TIEMPO (sg)
20	62500	20,0250	62422,0	0,0624
18	61220	18,0278	61125,7	0,0611
16	59380	16,0312	59264,4	0,0593
14	53560	14,0357	53423,9	0,0534
12	50880	12,0416	50704,2	0,0507
10	48900	10,0499	48657,3	0,0487
8	46600	8,0623	46240,1	0,0462
6	43520	6,0828	42927,9	0,0429
4	40400	4,1231	39193,8	0,0392
2	32560	2,2361	29122,5	0,0291

Una vez calculado la distancia “r” y el tiempo corregido pasado a segundos, procedemos a graficar la profundidad contra el tiempo y basados en esta grafica

procedemos a sacar una línea de tendencia la cual tenga un coeficiente de correlación muy cercano a 1 (ver figura 25)

Figura 25 Grafica de Tiempo Vs Profundidad



Después de graficar hemos obtenido la línea de tendencia cuyo coeficiente de correlación es de 0.9839 lo cual es aceptable, ahora que tenemos la línea de tendencia del tiempo (3.2), procedemos a derivarla para así poder obtener valores de velocidad (3.3).

Ecuación del tiempo

$$y = 113971x^{3,1129} \quad (3.2)$$

Ecuación de la velocidad

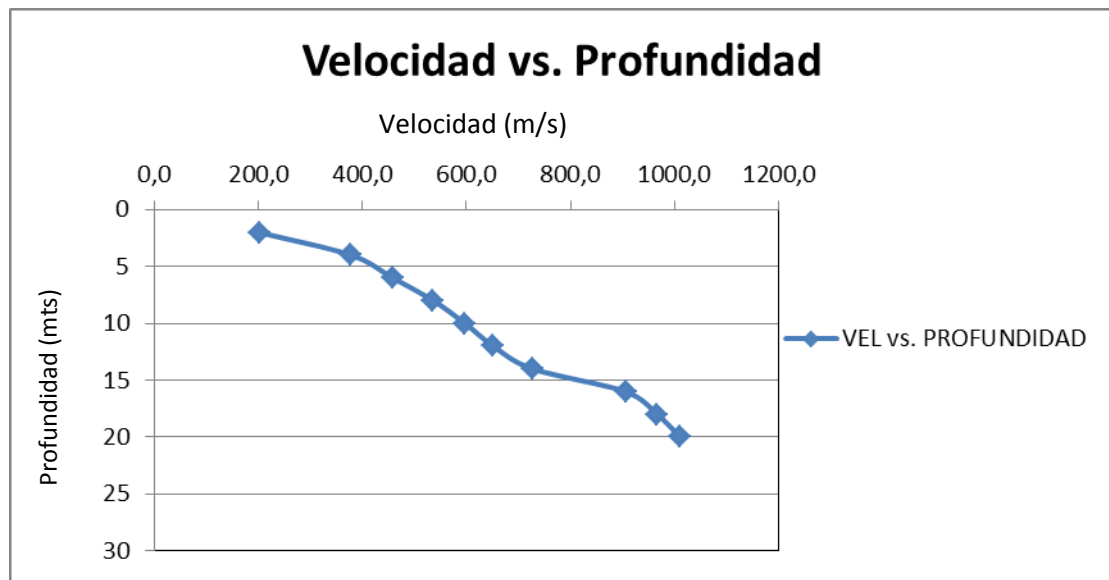
$$y = 354780.326x^{2,1129} \quad (3.3)$$

Una vez tenemos la ecuación de la velocidad, procedemos a reemplazar en ella los valores del tiempo corregido, para que podamos obtener los valores de velocidad con respecto a la profundidad, los cuales podemos ver en la Tabla 2 y posteriormente vemos graficados en la figura 26 para poder ver el comportamiento de los datos.

Tabla 2 Datos de tiempo y velocidad

PROFUNDIDAD (mts)	TIEMPO (sg)	VEL (m/s)
20	0,0624	1010,7
18	0,0611	966,9
16	0,0593	905,7
14	0,0534	727,4
12	0,0507	651,4
10	0,0487	597,1
8	0,0462	536,1
6	0,0429	458,2
4	0,0392	378,1
2	0,0291	201,9

Figura 26 Grafica de Velocidad Vs Profundidad



Una vez tenemos los datos de velocidad a su respectiva profundidad, procedemos a mirar en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR 10 en la tabla A.2.4-1 (Ver Anexo B) para poder clasificar el perfil de suelo, para ello simplemente miramos el valor de velocidad en la tabla; en la tabla 3 podemos apreciar que tipo de perfil de suelo se encuentra a respectiva profundidad.

Tabla 3. Tipos de Perfil de suelo

PROFUNDIDAD (mts)	TIEMPO (sg)	Velocidad(m/s)	Perfil
20	0,0624	1010,7	Perfil de suelo tipo B
18	0,0611	966,9	
16	0,0593	905,7	
14	0,0534	727,4	Perfil de suelo tipo C
12	0,0507	651,4	
10	0,0487	597,1	
8	0,0462	536,1	
6	0,0429	458,2	
4	0,0392	378,1	
2	0,0291	201,9	Perfil de suelo tipo D

Basados en los perfiles de suelo encontrados en la tabla 3 y referenciados con la NSR-10 podemos observar que en los primeros 2 metros el comportamiento del suelo es de un Perfil tipo D, entre 4 y 14 metros podemos encontrar un Perfil de suelo tipo C, y entre 16 y 20 metros podemos encontrar un perfil de suelo tipo B el cual se considera Roca de Rigidez media.

Basado en este perfil de suelo y en el tipo de edificación a construir con su respectivo calculo estructural, el constructor puede determinar hasta que profundidad debe llegar para poder encontrar suelo competente y en el construir los cimientos.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

4.1 Conclusiones

- Se hizo una comparación entre los métodos Crosshole, Uphole y Downhole en la cual se puede observar sus principios teóricos y sus diferencias en el trabajo de campo y debido a que las ondas S son más fácilmente generadas desde la superficie, es preferible utilizar el método Downhole para obtener información de las ondas S
- Debido a que en el método Downhole se pueden generar ondas S con facilidad en la superficie mediante golpes en una platina de acero, no se considera necesario la utilización de fuentes explosivas para generar ondas S; eso hace que este método sea uno de los más seguros y económicos.
- Se hizo un análisis detallado del método Downhole en su trabajo de campo y en su respectivo proceso en el Software Wingeo, mostrando los pasos a seguir para poder obtener los datos de tiempo, los cuales serán exportados a Excel para poder obtener sus respectivos datos de velocidad y así poder apreciar mejor el comportamiento del suelo mediante graficas de Velocidad contra profundidad
- Se entregó un perfil de suelo basado en los datos de velocidad obtenidos los cuales fueron comparados con los estándares de la norma NSR – 10 y por lo tanto se puede concluir que entre 4 y 14 metros se obtiene un perfil de suelo tipo C el cual es considerado un suelo muy denso, o una roca blanda, y entre 16 y 20 metros se encontró un perfil de suelo tipo B considerado roca de rigidez media.

4.2. Recomendaciones generales

- Para el normal y adecuado desarrollo del ensayo Downhole, es de vital importancia que los equipos estén en buen estado, calibrados y con todos sus accesorios completos.
- Es indispensable que el trabajador que se encargara de dar los golpes a la platina de hierro con una porra de metal cuente con un adecuado equipo de seguridad compuesto por casco, guantes, botas de punta de acero entre otros
- Es recomendado realizar la prueba general del sistema Wingeo antes de comenzar el ensayo, si se omite esta prueba, el usuario tendrá que configurar los ajustes manualmente para cada canal y para cada dirección de impacto cada vez que la prueba sea realizada a cada profundidad.
- El método Downhole nos entrega un perfil de suelo basado en la velocidad generada por las ondas S, pero una de sus limitaciones es que no nos entrega otras características del suelo, tales como humedad o color del suelo entre otros, por lo tanto si se requiere estas propiedades del suelo se recomienda hacer otro tipo de ensayo en el cual se pueda recuperar muestra tal como el ensayo de Penetración estándar (SPT)
- El Método Downhole requiere la vecindad inmediata de un pozo, pero si dado caso este es inestable y se quiere garantizar la seguridad del equipo se recomienda entubar con PVC ya que un tubo metálico podría afectar considerablemente la exactitud de medidas de tiempo.

BIBLIOGRAFIA

- [1]. **Aguilar R.A.** (2001). Métodos de Prospección Sísmica en la Investigación del Subsuelo. *Tesis de Pregrado. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú*
- [2]. **Comisión Asesora Permanente Para el Régimen de Construcciones Sismo Resistentes** (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. *Norma NSR-10 Título A. Bogotá. Colombia.*
- [3]. **Díaz S. L.** (2007). Caracterización de Suelos Arenosos Mediante Análisis de Ondas de Superficie. *Trabajo de Especialización. Universidad Panamericana. Guadalajara, México.*
- [4]. **Geostru Software s.a.s.** (2009). Geostru Downhole. User's Manual, Computer Program Geostru. *Italia.*
- [5]. **Granda A.** (2004). Curso de Geotecnia para Infraestructuras. *Comentarios Sobre Algunos Métodos Sísmicos Aplicados al Estudio en el Ámbito de la Geotecnia.*
- [6]. **Olson Instruments** (2007). System Reference Manual 2007 Crosshole and Downhole Seismic Test. User's Manual, Computer Program Wingeo. *Colorado, USA.*

ANEXOS

Anexo A. Datos exportados del Software Wingeo a un bloc de notas

Vertical	Radial	Transverse	Hammer
Depth, Direction, Picked Time,	Depth, Direction, Picked Time,	Depth, Direction, Picked Time,	Depth, Direction, Picked Time,
20.,1,33520.,	20.,1,23660.,	20.,1,42540.,	19.,1,300.,
20.,2,53480.,	20.,2,43620.,	20.,2,62500.,	19.,2,20260.,
20.,3,53480.,	20.,3,43620.,	20.,3,62500.,	19.,3,20260.,
18.,1,25240.,	18.,1,25800.,	18.,1,41140.,	17.,1,80.,
18.,2,45320.,	18.,2,45880.,	18.,2,61220.,	17.,2,20160.,
18.,3,45320.,	18.,3,45880.,	18.,3,61220.,	17.,3,20160.,
16.,1,26100.,	16.,1,20920.,	16.,1,39660.,	15.,1,1660.,
16.,2,45820.,	16.,2,40640.,	16.,2,59380.,	15.,2,21380.,
16.,3,45820.,	16.,3,40640.,	16.,3,59380.,	15.,3,21380.,
14.,1,41840.,	14.,1,39180.,	14.,1,53560.,	13.,1,21520.,
14.,2,41840.,	14.,2,39180.,	14.,2,53560.,	13.,2,21520.,
14.,3,41840.,	14.,3,39180.,	14.,3,53560.,	13.,3,21520.,
12.,1,31800.,	12.,1,15300.,	12.,1,30920.,	11.,1,300.,
12.,2,51760.,	12.,2,35260.,	12.,2,50880.,	11.,2,20260.,
12.,3,51760.,	12.,3,35260.,	12.,3,50880.,	11.,3,20260.,
10.,1,7420.,	10.,1,16960.,	10.,1,29580.,	9.,1,900.,
10.,2,26740.,	10.,2,36280.,	10.,2,48900.,	9.,2,20220.,

Vertical	Radial	Transverse	Hammer
Depth, Direction, Picked Time,	Depth, Direction, Picked Time,	Depth, Direction, Picked Time,	Depth, Direction, Picked Time,
10.,3,26740.,	10.,3,36280.,	10.,3,48900.,	9.,3,20220.,
8.,1,20000.,	8.,1,34800.,	8.,1,46600.,	7.,1,19760.,
8.,2,20000.,	8.,2,34800.,	8.,2,46600.,	7.,2,19760.,
8.,3,20000.,	8.,3,34800.,	8.,3,46600.,	7.,3,19760.,
6.,1,20700.,	6.,1,32380.,	6.,1,43520.,	5.,1,19880.,
6.,2,20700.,	6.,2,32380.,	6.,2,43520.,	5.,2,19880.,
6.,3,20700.,	6.,3,32380.,	6.,3,43520.,	5.,3,19880.,
4.,1,26520.,	4.,1,30280.,	4.,1,40400.,	3.,1,19980.,
4.,2,26520.,	4.,2,30280.,	4.,2,40400.,	3.,2,19980.,
4.,3,26520.,	4.,3,30280.,	4.,3,40400.,	3.,3,19980.,
2.,1,19940.,	2.,1,28780.,	2.,1,32560.,	1.,1,19800.,
2.,2,19940.,	2.,2,28780.,	2.,2,32560.,	1.,2,19800.,
2.,3,19940.,	2.,3,28780.,	2.,3,32560.,	1.,3,19800.,
0.,1,0.,	0.,1,0.,	0.,1,0.,	-1.,1,0.,

Anexo B. Tabla A.2. 4-1 de la NSR – 10 Titulo A, pagina A22

Tabla A.2.4-1

Clasificación de los perfiles de suelo

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$\bar{v}_s \geq 1500 \text{ m/s}$
B	Perfil de roca de rigidez media	$1500 \text{ m/s} > \bar{v}_s \geq 760 \text{ m/s}$
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$760 \text{ m/s} > \bar{v}_s \geq 360 \text{ m/s}$
	perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$\bar{N} \geq 50$, o $\bar{s}_u \geq 100 \text{ kPa} (\approx 1 \text{ kgf/cm}^2)$
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$360 \text{ m/s} > \bar{v}_s \geq 180 \text{ m/s}$
	perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > \bar{N} \geq 15$, o $100 \text{ kPa} (\approx 1 \text{ kgf/cm}^2) > \bar{s}_u \geq 50 \text{ kPa} (\approx 0.5 \text{ kgf/cm}^2)$
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$180 \text{ m/s} > \bar{v}_s$
	perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	$IP > 20$ $w \geq 40\%$ $50 \text{ kPa} (\approx 0.50 \text{ kgf/cm}^2) > \bar{s}_u$
F	<p>Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista de acuerdo con el procedimiento de A.2.10. Se contemplan las siguientes subclases:</p> <p>F₁ — Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc.</p> <p>F₂ — Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H > 3 m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas).</p> <p>F₃ — Arcillas de muy alta plasticidad (H > 7.5 m con Índice de Plasticidad IP > 75)</p> <p>F₄ — Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H > 36 m)</p>	