

Tesis de grado en Ingeniería Civil

MEDICIÓN DEL MÓDULO DE YOUNG Y
MÓDULO DE CORTE MEDIANTE TÉCNICAS
GEOFÍSICAS

Autor

Jorge Alberto Czelada

Director de Tesis

Ing. Alejo Oscar Sfriso

Co-Director de Tesis

Ing. Ernesto Strina

Tesis de grado en Ingeniería Civil

MEDICIÓN DEL MÓDULO DE YOUNG Y
MÓDULO DE CORTE MEDIANTE TÉCNICAS
GEOFÍSICAS

Autor

Jorge Alberto Czelada

Director de Tesis

Ing. Alejo Oscar Sfriso

Co-Director de Tesis

Ing. Ernesto Strina

Firma del autor:

Firma del director:

Firma del co-director:

Aceptada por:

Fecha: Diciembre 2009

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por el incondicional apoyo durante la carrera y especialmente durante esta última etapa. Y a todas las personas que directa o indirectamente colaboraron en la realización de este trabajo.

Al Ing. Alejo O. Sfriso y al Ing. Ernesto Strina, por su insistencia y motivación.

Al Ing. Mauro Codevilla por su gran disposición para los ensayos de campo.

A Cristian A. Morris por su colaboración sobre los temas de procesamiento de señal.

Al Ing. Juan M. Kelly integrante del Laboratorio de Circuitos Electrónicos - LACE- por su asistencia en la implementación del sistema de disparo.

A la Universidad de Buenos Aires, en especial a todos aquellos que trabajan en los laboratorios y departamentos de la FIUBA y que ayudaron a cumplir este objetivo, gracias.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1	3.4.9	Procedimiento de ensayo.....	25
2	TEORÍA DE PROPAGACIÓN DE ONDAS	2	3.5	EQUIPO DE ENSAYO	26
2.1	COMPORTAMIENTO DEL TERRENO.....	2	3.5.1	Transductores.....	26
2.2	PROPAGACIÓN DE ONDAS EN MEDIO CONTINUÓ. 2		3.5.2	Fuente de ondas.....	27
2.3	ONDAS DE VOLUMEN.....	2	3.5.3	Sistema de adquisición de datos.....	28
2.3.1	Ondas de compresión	3	3.5.4	Sistema de disparo.....	29
2.3.2	Ondas de corte.....	3	3.5.5	Cables.....	29
2.4	CONCEPTOS DE ÓPTICA	4	4	PROCESAMIENTO DE SEÑALES	30
2.5	VELOCIDADES DE PROPAGACIÓN.....	4	4.1	DIGITALIZACIÓN DE SEÑALES	30
2.6	ONDAS SUPERFICIALES.....	4	4.2	TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER.....	31
2.6.1	Medio Estratificado	5	4.2.1	Espectro de frecuencias.....	31
2.6.2	Solución teórica.....	6	4.2.2	Resolución	31
2.7	CAUSAS DE ATENUACIÓN	8	4.2.3	Ventana.....	32
2.7.1	Características del medio.....	8	4.2.4	Espectrograma	32
2.7.2	Interferencias.....	8	4.3	PROMEDIO DE SEÑALES	33
2.7.3	Propagación geométrica	8	4.4	CORRELACIÓN ANALÍTICA	33
2.8	DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA	9	4.5	RUIDO AMBIENTE.....	34
2.9	PROPAGACIÓN EN MEDIO SATURADO	9	5	ENSAYOS DE CAMPO	35
3	GEOFÍSICA APLICADA.....	10	5.1	INTRODUCCIÓN	35
3.1	PLANTEO GENERAL.....	10	5.2	SÍSMICA DE REFRACCIÓN	35
3.1.1	Definición de señal, sistema y modelo.....	10	5.3	SASW.....	35
3.1.2	Problema inverso.....	10	6	CONCLUSIONES	47
3.1.3	Tipo de ensayos	10	REFERENCIAS	49	
3.1.4	Limitaciones	10	ANEXO I.....	50	
3.2	SÍSMICA DE REFRACCIÓN.....	10	ANEXO II	52	
3.2.1	Respuesta teórica.....	11			
3.2.2	Configuración de ensayo	13			
3.2.3	Respuesta experimental	13			
3.2.4	Diseño de ensayo	14			
3.2.5	Control de calidad del ensayo	14			
3.2.6	Limitaciones	14			
3.3	STEADY STATE RAYLEIGH METHOD.....	15			
3.4	SASW	16			
3.4.1	Configuración de ensayo	16			
3.4.2	Curva de dispersión local.....	17			
3.4.3	Procedimiento analítico.....	19			
3.4.4	Función coherencia	20			
3.4.5	Variaciones laterales del terreno	21			
3.4.6	Respuesta experimental	21			
3.4.7	Curva de dispersión global.....	23			
3.4.8	Proceso de Inversión	24			

1 INTRODUCCIÓN

El objetivo de esta tesis es el desarrollo e implementación de técnicas de medición del módulo de Young y del módulo de corte de suelos naturales a través de la velocidad de propagación de ondas sísmicas.

El comportamiento mecánico del suelo depende del campo de tensiones aplicado y del nivel de deformación. En particular, existe una respuesta a baja deformación que es gobernada por los módulos de rigidez – Young y Corte – máximos, también denominados módulos dinámicos. Las técnicas que miden éstos módulos se denominan geofísicas ya que la magnitud física registrada es la velocidad de propagación de ondas – por lo general – en su superficie o en perforaciones.

Entre las ventajas de utilizar este tipo de técnicas se puede mencionar que los ensayos son de realización in-situ. Esto implica que no se alteran las propiedades del suelo que se estudian, como ocurre en los ensayos ex situ. Otras ventajas son la rapidez y economía de los ensayos, que permiten la investigación de áreas extensas o alineaciones de gran longitud. Por lo tanto, son métodos adecuados para completar información directa de campo, por ejemplo para mejorar el conocimiento de un terreno que haya sido investigado con sondeos alejados entre sí y establecer, en su caso, la necesidad de realización de sondeos intermedios.

En esta tesis se investigaron la técnica de sísmica de refracción y la técnica SASW (*Spectral Analysis of Surfaces Waves*). Ambas técnicas se realizan en la superficie del terreno y su objetivo es el conocer su estructura, por medio de la medición de velocidades de propagación. En el ensayo de sísmica de refracción se mide la velocidad de las ondas de compresión refractadas en estratos más profundos. Por otra parte, en el ensayo SASW se miden las ondas de Rayleigh que atraviesan el terreno para obtener el perfil de velocidades de onda de corte ya que se encuentra directamente relacionado con la estructura del mismo.

Este trabajo presenta seis capítulos y un conjunto de anexos. En el segundo capítulo se introduce la teoría de ondas mecánicas en medios continuos. Se describen los diferentes modos de propagación, su relación con los módulos de rigidez, las causas de su atenuación y como se ve afectada la velocidad de propagación en suelos saturados. Además, se hace referencia a la modelización de ondas Rayleigh en terrenos estratificados.

En el tercer capítulo se presenta la aplicación conceptual de las técnicas geofísicas, y se muestra la relación entre las magnitudes físicas registradas en campo con los modelos matemáticos, donde también se detallan los distintos tipos de ensayos, en particular los ensayos de sísmica de refracción y SASW. En la explicación del ensayo de sísmica de refracción se mencionan: las hipótesis utilizadas, la curva de arri-

bo, los esquemas de configuración de ensayo, su diseño y las limitaciones del procedimiento para determinados tipos de estratigrafías del terreno. Por otro lado en la explicación del ensayo SASW se menciona: el origen del método, las hipótesis utilizadas, la curva de dispersión experimental, la configuración y diseño de ensayo y por último, el planteo de la interpretación de resultados mediante técnicas de análisis inverso. Se describe el desarrollo del instrumental y herramientas computacionales utilizadas en los ensayos de campo, el sistema de adquisición de datos, los transductores y los diferentes tipos de impacto utilizados.

En el cuarto capítulo se trata el procesamiento de señales. Se exponen conocimientos básicos del área de la electrónica: digitalización de señales continuas, aplicación de la transformada de Fourier, espectro de frecuencias, espectrograma, técnica de apilado (*stacking*) y registros de ruido ambiente.

En el quinto capítulo se presentan los resultados experimentales obtenidos de diez ensayos de campo con el cálculo de los módulos de rigidez correspondientes. Cinco pertenecen a ensayos de sísmica de refracción y los otros cinco pertenecen a ensayos SASW.

En el octavo capítulo se presentan las conclusiones del trabajo y las oportunidades de investigación futura.

En el Anexo I se muestra el código creado en Wolfram Mathematica 7 que sirve para la obtención de la curva de dispersión experimental del ensayo SASW.

En el Anexo II se muestra el circuito utilizado para el disparador de ensayo.

2 TEORÍA DE PROPAGACIÓN DE ONDAS

Se define como onda a una perturbación que se propaga en espacio y tiempo, en el cual existe una transferencia de energía con el medio por el cual se propaga.

Una onda es mecánica si la perturbación deforma a un medio material. Entre ellas, una onda es elástica, si la perturbación permanece en el rango elástico. Para el caso de geomateriales naturales, las ondas elásticas se denominan sísmicas.

La propagación de ondas en el terreno es un fenómeno complejo, y su comportamiento se lo suele describir por medio de la propagación de ondas de volumen y ondas superficiales, que ocurren en condiciones ideales del terreno tanto en la superficie como en su interior. Las ondas de volumen se dividen a su vez en ondas de compresión y de corte; las superficiales se dividen en ondas de Rayleigh y de Love.

2.1 Comportamiento del terreno

El comportamiento mecánico del suelo es no lineal; presenta respuestas muy diferentes a bajas y grandes deformaciones. Un gráfico que permite el estudio de estos comportamientos es el de la curva τ - γ de un ensayo de corte directo, como se muestra en la figura 1, parte superior. El módulo de corte máximo G_{max} es el que corresponde al inicio de la curva, y es el que puede ser medido por las técnicas geofísicas, dado que generan en el terreno perturbaciones de muy baja amplitud.

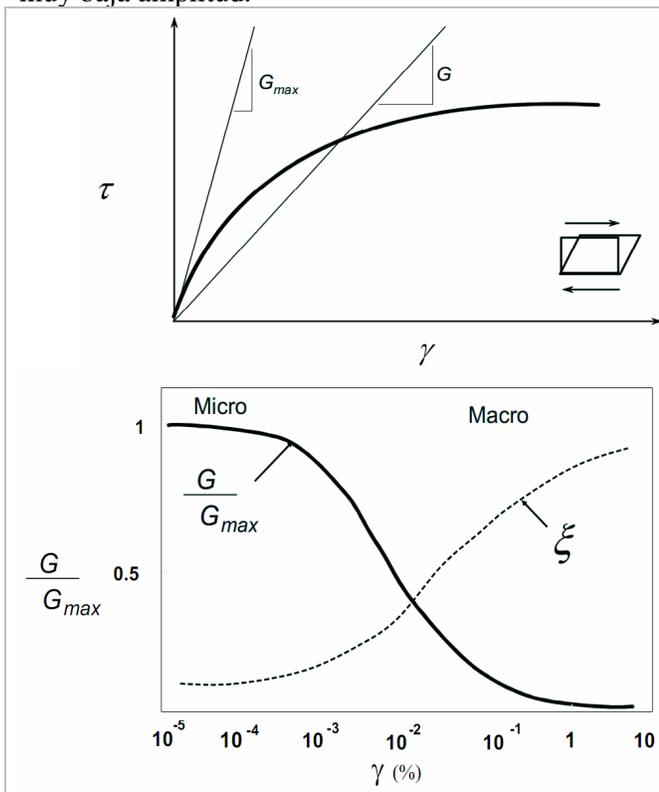


Figura 1: Comportamiento mecánico del sólido (Ortigao 2007).

En la parte inferior de la figura 1 se muestra la evolución del módulo de corte secante y de la disipación de energía con la amplitud de la distorsión. Puede verse que en el rango de distorsiones $<10^{-4}\%$ el comportamiento es esencialmente elástico – no se aprecia caída en el módulo de corte – mientras que para distorsiones mayores hay una degradación apreciable de rigidez que está asociada al desarrollo de deformaciones irreversibles.

Por lo tanto al aplicar las técnicas geofísicas en la superficie del terreno el suelo se comportara de manera elástica por lo que se podrá medir el módulo de corte máximo como también el módulo de Young máximo (Ortigao 2007, Luna 2000).

2.2 Propagación de ondas en medio continuo

El material atravesado por la onda puede considerarse como un medio continuo si tiene dimensiones características muy inferiores a la longitud de onda (Santamarina et al, 2001). En particular, las herramientas de la mecánica del continuo pueden emplearse en el caso de suelos, dado que las longitudes de onda empleadas están en el orden de metros, y atraviesan suelos cuyas partículas tienen tamaños del orden del milímetro.

Considerar al medio como continuo permite utilizar las relaciones de equilibrio y de compatibilidad. Además, la teoría de la elasticidad establece la ecuación constitutiva que permite completar la definición del problema.

Para el caso unidimensional se tiene:

Equilibrio:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + X = 0 \quad (1)$$

Compatibilidad:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x} \quad (2)$$

Constitutiva

$$M = \frac{\sigma_x}{\varepsilon_x}, \varepsilon_y = \varepsilon_z = 0 \quad (3)$$

2.3 Ondas de volumen

La propagación en un medio infinito esta gobernada por las ecuaciones anteriores. Considerando a un elemento de volumen infinitésimo, lineal, elástico e isótropo, y que pertenece a un medio homogéneo infinito sometido a perturbaciones pequeñas, el equilibrio del elemento requiere que se cumpla la siguiente ecuación:

$$\rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (4)$$

A través de las ecuaciones de compatibilidad y constitutivas del material, la ecuación (4) se puede expresar como:

$$\rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = (M - G) \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial x} + G \nabla^2 u_x \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = (M - G) \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial y} + G \nabla^2 u_y \quad (6)$$

2.3.1 Ondas de compresión

Las ondas de compresión – también denominadas ondas primarias o “P” – son ondas mecánicas cuyo sentido de movimiento coincide con el sentido de propagación. Las partículas alcanzadas por la onda se desplazan en la dirección de propagación como visualiza la siguiente figura (Santamarina et al, 2001).

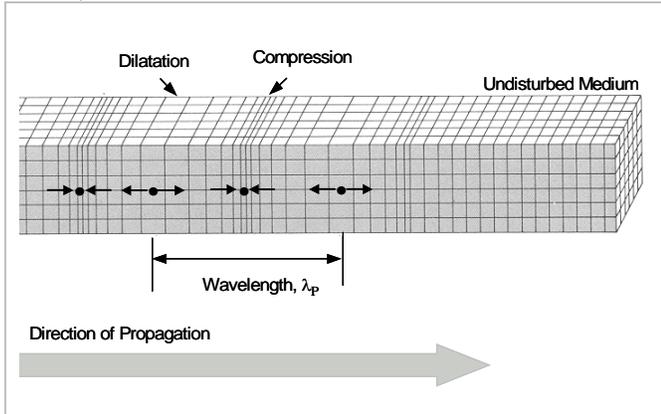


Figura 2: Onda de compresión.

Si se considera que la onda es plana y que la propagación coincide con la dirección x, la ecuación (5) se puede simplificar a:

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = \frac{M}{\rho} \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} \quad (7)$$

El movimiento de la partícula se describe mediante:

$$u_x = A e^{j(\omega t - kx)} \quad (8)$$

Si se reemplaza la ecuación (8) en la (7), se llega a la velocidad de fase de la onda P:

$$V_p = \frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{M}{\rho}} \quad (9)$$

o, en términos del módulo de Young, como:

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (10)$$

Si se mide experimentalmente la velocidad de fase, la ecuación 10 puede emplearse para calcular el módulo de Young solo si son conocidos los parámetros del medio ρ, ν de la siguiente manera:

$$E = V_p^2 \rho \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (11)$$

2.3.2 Ondas de corte

Las ondas de corte – también denominadas ondas secundarias o “S” – son ondas mecánicas cuyas partículas se desplazan perpendicularmente a la dirección de propagación como se visualiza en la siguiente figura (Santamarina et al, 2001).

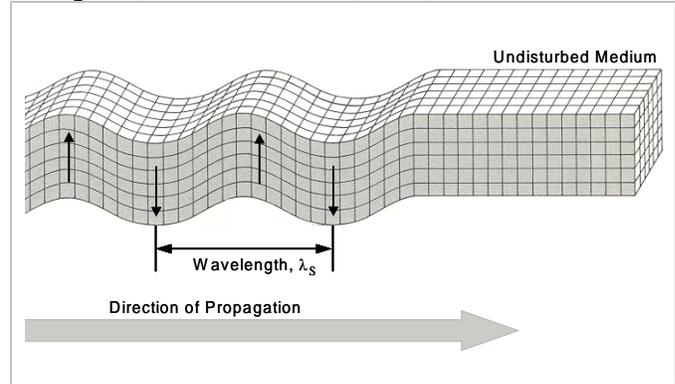


Figura 3: Onda de corte.

Considerando que la onda es plana, la ecuación 6 se simplifica en:

$$\frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = \frac{G}{\rho} \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} \quad (12)$$

El movimiento de la partícula se describe mediante:

$$u_y = A e^{j(\omega t - kx)} \quad (13)$$

Si se reemplaza la ecuación 13 en la 12, se llega a la velocidad de fase de las ondas S (Santamarina et al, 2001).

$$V_s = \frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (14)$$

Es interesante tener en cuenta que la relación entre las ondas P y ondas S sólo depende del módulo de Poisson, su relación es mayor a la unidad para cualquier valor del módulo de Poisson y como ejemplo para $\nu = 0.35 \rightarrow V_p = 2.08(V_s)$

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{(1-2\nu)}} \quad (15)$$

Las ecuaciones anteriores pueden reordenarse para calcular el módulo de Poisson

$$\nu = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2(V_p/V_s)^2 - 2} \quad (16)$$

Como también pueden ser ordenadas de tal manera que se pueda calcular el módulo de Young por medio de las velocidades de propagación de ondas S y P

$$E = \frac{\rho(3V_p^2V_s^2 - 4V_s^4)}{V_p^2 - V_s^2} \quad (17)$$

2.4 Conceptos de óptica

Para estudiar la propagación de ondas de volumen en el terreno se aplican los conceptos propagación de rayos de luz tales como el principio de Fermat, el principio de Huygens y Ley de Snell. (Dobrin, 1975).

El principio de Fermat dice que todo rayo en un medio sigue la trayectoria que implique el menor tiempo, por ejemplo en un medio homogéneo la trayectoria es una recta.

La Ley de Snell formula la relación entre la inclinación del rayo que incide y del que se refracta a través de la interfase de dos medios.

Aunque la ley de Snell fue formulada para explicar los fenómenos de refracción de la luz, se aplica a los rayos sísmicos (Figura 4a). Permite calcular la inclinación para la cual la onda incidente se propagará por la interfase de los medios. Dicho ángulo se conoce como ángulo crítico y se calcula con

$$i_{critico} = \sin^{-1}\left(\frac{V_0}{V_1}\right) \quad (21)$$

donde V_0/V_1 es la relación de velocidades de propagación entre el estrato de menor rigidez V_0 y el de mayor rigidez V_1 .

El principio de Huygens explica cómo tiene lugar la propagación de ondas. Cuando una onda alcanza un punto de un medio material, éste se comporta como un foco emisor que crea un frente de ondas secundarias (Figura 4b).

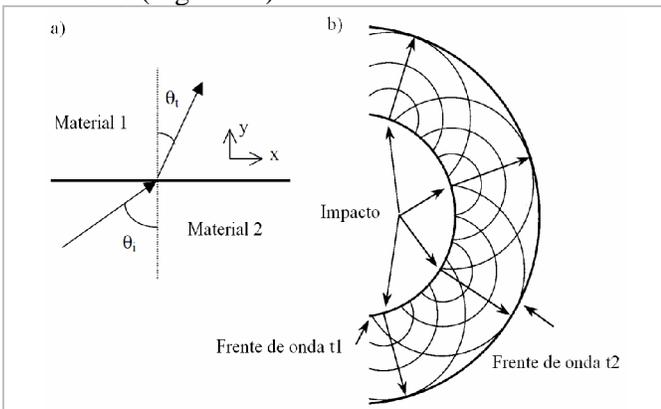


Figura 4: a) Ley de Snell; b) principio de Huygens

2.5 Velocidades de propagación

Las velocidades de onda de compresión de algunos materiales típicos se presentan en la Tabla 1 (ASTM D5777, 2000).

Tabla 1. Velocidades de compresión de algunos materiales

Material	Vp (m/s)
Suelo superficial erosionado	240 – 610
Grava o arena seca	460 – 915
Arena saturada	1220 – 1830
Arcilla saturada	915 – 2750
Roca de limo	2134 – 6100
Granito	4575 – 5800
Aire	330
Agua	1430 – 1665

2.6 Ondas superficiales

Cuando se analiza la propagación de ondas en la cercanía de la superficie se observa que se produce un movimiento de las partículas más complejo. Para este tipo de problema se conoce la solución propuesta por John Strutt Lord of Rayleigh (1885).

Rayleigh resolvió el problema de las ondas elásticas que generan tensiones paralelas a la superficie en un medio semi-infinito, lo que trae aparejado una disminución de la rigidez del cuerpo en la superficie, induciendo un movimiento de las partículas vertical y horizontal.

Si se analizan los desplazamientos provocados por el impacto a una cierta distancia, al frente de onda se lo considera como plano. Para un material homogéneo se demuestra que las velocidades del medio no varían con la frecuencia, adquiriendo el carácter de no dispersivo, y se lo describe con la siguiente ecuación (Santamarina et al, 2001).

$$\left[2 - \left(\frac{V_r}{V_s}\right)^2\right]^2 - 4 \left[1 - \left(\frac{V_r}{V_p}\right)^2\right]^{1/2} \left[1 - \left(\frac{V_r}{V_s}\right)^2\right]^{1/2} = 0 \quad (18)$$

Una buena aproximación de la ecuación 18 se obtiene con (Achenbach, 1975)

$$V_r \approx \frac{0.874 + 1.117\nu}{1 + \nu} V_s \quad (19)$$

Se observa que la variación entre V_s y V_r es pequeña. Para $\nu = 0.5$, $V_r/V_s = 0.955$ y para $\nu = 0.0$, $V_r/V_s = 0.874$. Esto nos permite conocer el módulo de corte del terreno a través de la medición de la velocidad de ondas de Rayleigh por la baja incidencia del módulo de Poisson.

En la figura 5 se normalizan las velocidades de propagación de distintos tipos de onda respecto a la velocidad de propagación de ondas de corte V_s de acuerdo con las ecuaciones 15 y 19. También se observa que para cualquiera valor de ν se cumple que $V_p > V_s > V_r$.

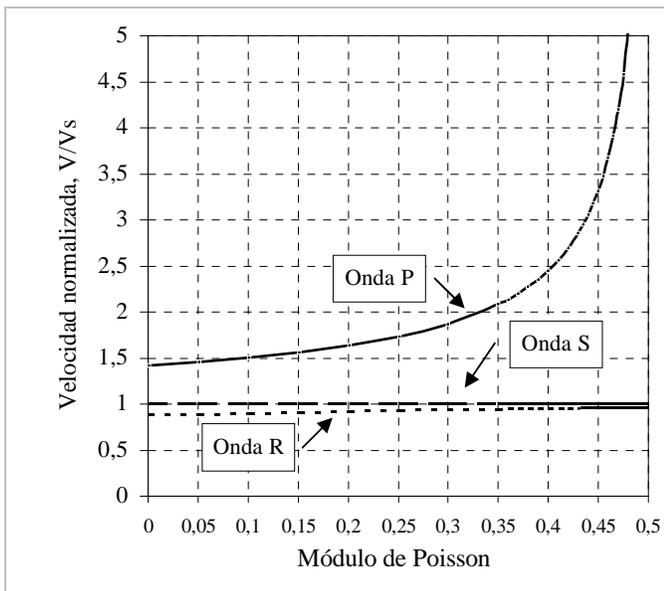


Figura 5: Velocidades de propagación normalizadas según la velocidad de ondas de corte.

Para el caso del semiespacio infinito el desplazamiento de las partículas provocado por las ondas de Rayleigh, es una combinación de movimientos horizontales y verticales. El resultado es un movimiento de partículas con forma de elipse que es antihorario en las cercanías de la superficie, pero que a partir de $z = 0.2 \lambda$ cambia su sentido, como se aprecia en la figura 6 (Stokoe y Santamarina, 2000).

En la siguiente figura puede verse el movimiento de las partículas en la superficie del terreno para este modo de propagación.

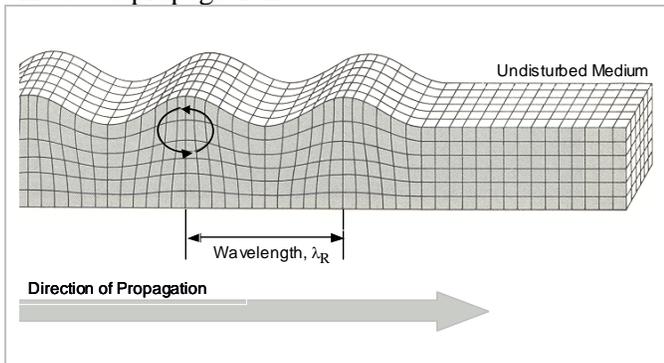


Figura 6: Onda de Rayleigh.

El desplazamiento de las partículas decrece exponencialmente con la profundidad. Por esta razón, la propagación de este tipo de ondas afecta únicamente a la capa de suelo de profundidad igual a la longitud de onda ($z = \lambda$). Las características mecánicas de los suelos inferiores a esta profundidad no influyen en el fenómeno (Figura 7) (Foti, 2000).

Otra de las principales contribuciones fue aportada por Horace Lamb en "On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid" (1904), que resolvió el campo de desplazamientos para una fuerza armónica aplicada puntualmente en la superficie de un semiespacio homogéneo. Y demostró que la superficie del terreno responde inicialmente con una

onda de pequeña energía y luego con una onda de mayor energía; a la primera se la asocia a las ondas P y la segunda a las ondas de corte y de Rayleigh (Figura 8) (Foti, 2000).

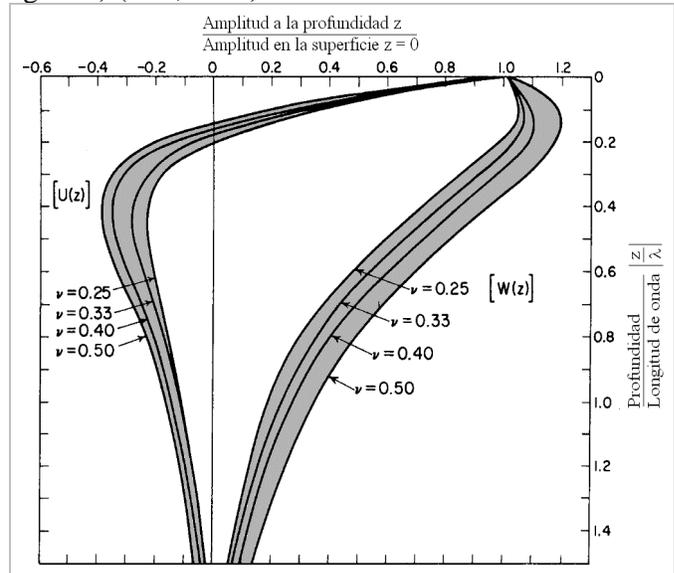


Figura 7: Desplazamiento y profundidad normalizadas de ondas de Rayleigh en semiespacio homogéneo; $W(z)$ desplazamiento vertical; $U(z)$ desplazamiento horizontal (Stokoe y Santamarina, 2000).

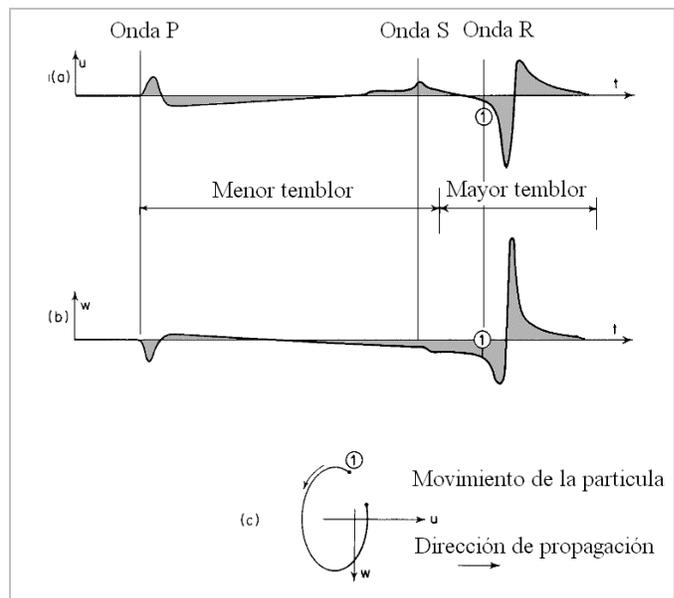


Figura 8: Desplazamientos en la superficie de un semiespacio homogéneo; (a) movimiento horizontal radial; (b) movimiento vertical; (c) sentido de ondas de Rayleigh (Foti, 2000).

2.6.1 Medio Estratificado

Este caso es más complejo que el anterior. Inicialmente se analiza el caso de dos estratos horizontales, donde el superior es de menor rigidez que el inferior. Las ondas de Rayleigh guardan una correlación entre la longitud de onda λ y la profundidad del medio por el cual se propagan. Un impacto en la superficie genera ondas que se propagan con diferentes longitudes de onda. De acuerdo con la figura 9, las de menor longitud de onda se propagarán a través del suelo superficial – el estrato superior en este caso –

mientras que las de mayor longitud se propagarán a través de ambos estratos (Stokoe et al 1994, Strobbia 2002).

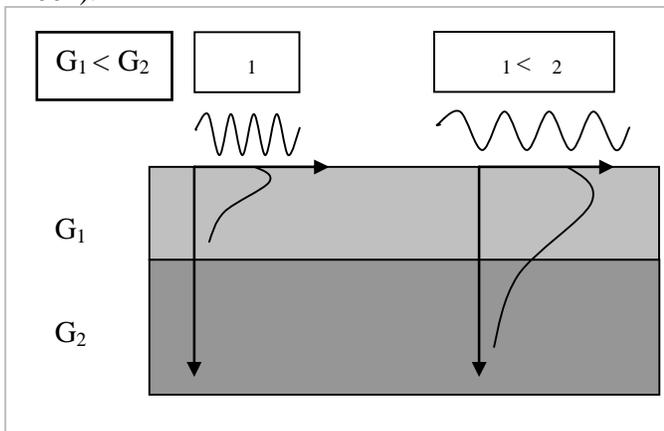


Figura 9: Modelo de dos capas, ondas de menor longitud de onda viajan por el estrato superior de menor rigidez mientras que las de mayor longitud de onda viajan a través de ambos estratos.

Las propiedades mecánicas del estrato superior afectarán la velocidad de propagación de las ondas de menor longitud de onda, mientras que las de mayor longitud se verán afectadas por las propiedades mecánicas de ambos estratos. Se debe recordar que el módulo de corte de cada estrato está directamente relacionado con la velocidad de corte, entonces se distingue un aumento en la velocidad de propagación a medida que aumenta longitud de onda, como se muestra en la siguiente figura (Stokoe et al, 1994).

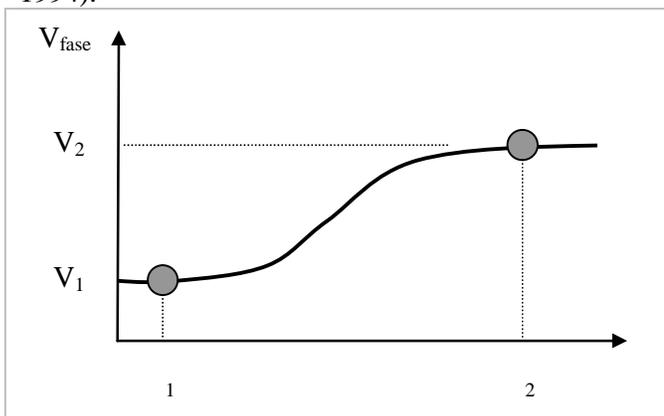


Figura 10: Variación de la velocidad de propagación de ondas de Rayleigh en función de la longitud de onda para el modelo de dos capas.

Entonces, la curva de velocidad en función de la longitud de onda es característica del terreno, exponiendo indirectamente la variación de la rigidez del suelo del terreno con la profundidad. A dicha curva se la conoce como curva de dispersión. Se suele diferenciar entre tres tipos de perfiles de terrenos: no dispersivo, normalmente dispersivo e inversamente dispersivo (Figura 11). El perfil no dispersivo es el que tiene un perfil de velocidades constante, lo que permite una solución directa del problema. Cuando la rigidez crece monótonamente con la profundidad

el perfil se denomina normalmente dispersivo, y en cambio cuando los estratos de mayor rigidez están por encima de otros de rigidez menor, el perfil se denomina inversamente dispersivo (Stokoe et al, 1994).

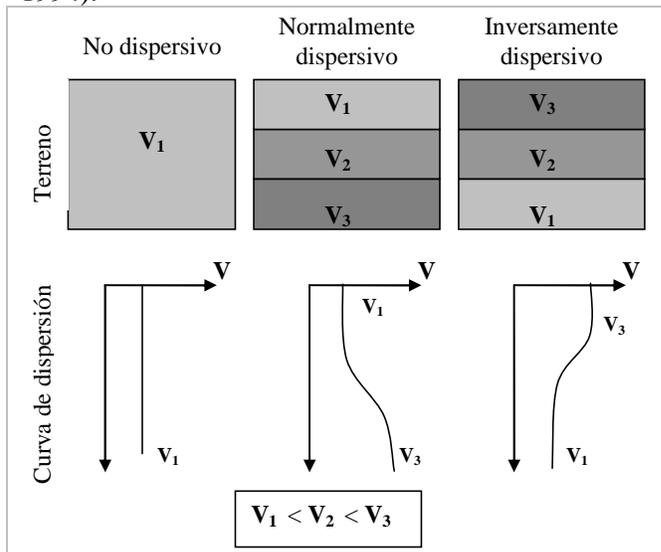


Figura 11: Curva de dispersión para terrenos de perfil no dispersivo, normalmente dispersivo e inversamente dispersivo.

2.6.2 Solución teórica

La solución teórica es la curva de dispersión y para un medio continuo elástico es la variación de la velocidad de fase de las ondas de Rayleigh en función de la frecuencia para un modelo de terreno adoptado. La misma también puede ser representada en función de la longitud de onda.

Existen varios métodos analíticos y en cada uno de ellos se deben proponer los parámetros del terreno para obtener la curva de dispersión teórica, este procedimiento se lo conoce como problema directo (Figura 12).

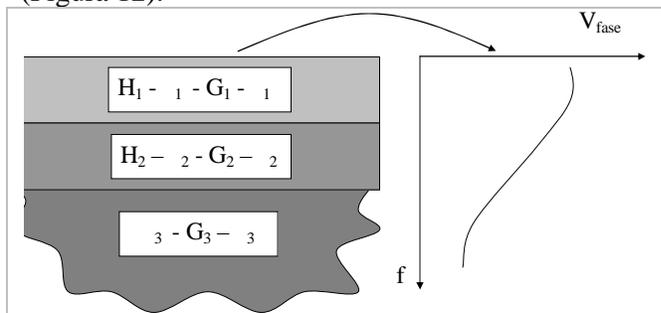


Figura 12: Modelo en capas.

El método de Haskell-Thomson describe la propagación de las ondas en medios conformados por capas. Este enfoque también se lo conoce como el método de la matriz de transferencia y es aplicable únicamente a los perfiles que se pueden representar por varias capas apiladas sobre una última que constituye el espacio semi-infinito (Thomson, 1950; Haskell, 1953).

Otro método es el de la matriz de rigidez dinámica, de Kausel y Roësset (1981). La principal característica de este método es la sustitución de la matriz

de transferencia de Thomson-Haskell con matrices de rigidez que son similares a las convencionalmente utilizadas en las matrices de rigidez estructural.

Otro método es el de los coeficientes de transmisión y reflexión elaborado por Kennett, y modificados y/o mejorados por otros investigadores Apse Luco, 1983; Chen, 1993; Hisada, 1994; Hisada, 1995 (Lai y Rix, 1998).

La ecuación característica que resuelve cada método se la puede escribir como

$$F_r [V_{s_n}, v_n, \rho_n, h_n, k_j, \omega] = 0 \quad (20)$$

A esta ecuación se la denomina ecuación de dispersión. Se resuelve un problema de autovalores para un modelo dado de parámetros fijos $V_{s_n}, v_n, \rho_n, h_n$ (Figura 13). La solución depende de la frecuencia angular ω y del modo de propagación k de la onda de Rayleigh. En este gráfico puede apreciarse la distribución de los modos armónicos y la forma que toma cada uno (Lai y Rix, 1998).

Otra característica de la solución es que a medida que aumenta la frecuencia, existe un incremento en el número de modos que tienden a un límite común que es la que corresponde a la velocidad de fase de ondas de Rayleigh de la capa superficial (Lai y Rix, 1998).

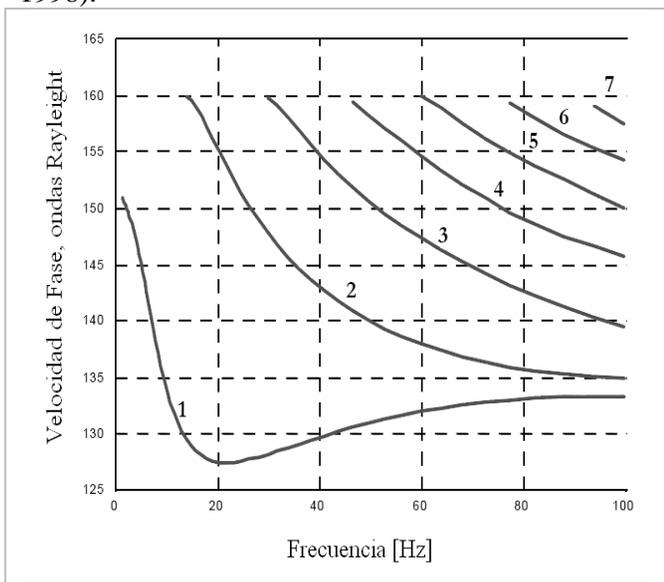


Figura 13: Ejemplo de solución de la ecuación de dispersión para los primero 7 modos (Rix y Lai 1998).

Desde el punto de vista físico, la existencia de los diferentes modos de propagación – a una frecuencia dada – puede explicarse por las interferencias entre las ondas. Cuando la rigidez varía continuamente con la profundidad, las trayectorias de los rayos son curvilíneas (como resultado del Principio de Fermat), y por lo tanto interfieren entre sí. En terrenos estratificados donde a cada estrato se lo considera homogéneo, los rayos son rectilíneos y se producen fenómenos de interferencia entre ondas debido a las múltiples reflexiones provocadas por las interfaces (Foti, 2000).

En un perfil normalmente dispersivo, la curva característica del suelo o curva de dispersión se encuentra descrita principalmente por el modo fundamental o primer modo (Figura 14). En cambio, en un perfil inversamente dispersivo comienzan a intervenir los restantes modos en la solución (Figura 15) (Foti, 2000; Gucunski y Woods, 1992).

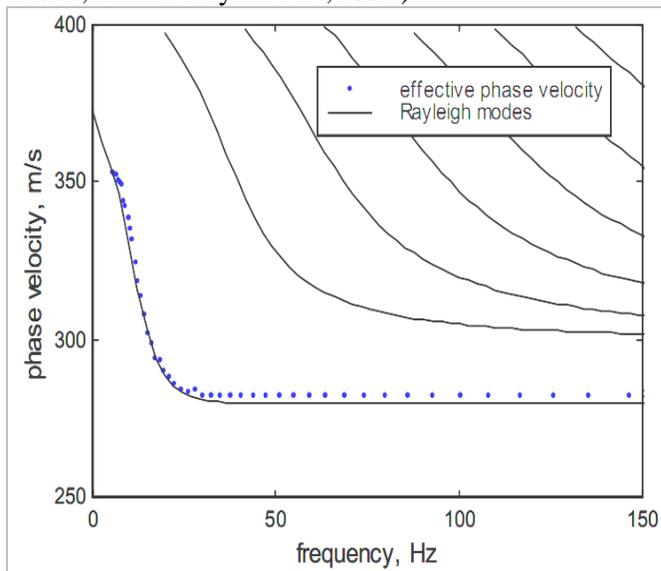


Figura 14: Relación entre la curva de velocidad de fase efectiva y la solución del modo fundamental para un suelo normalmente disperso (Foti 2000).

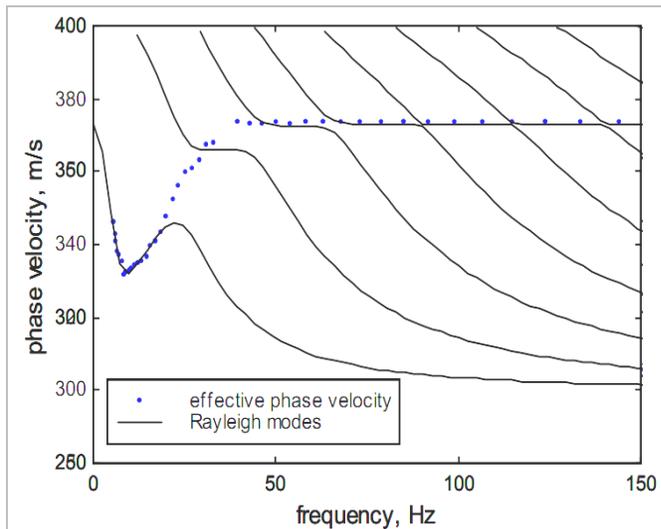


Figura 15: Relación entre la curva de velocidad de fase efectiva y el aporte a la solución de los modos para un suelo inversamente disperso (Foti 2000).

Cuando se tiene un perfil irregular de rigidez variable esta se comporta de la siguiente manera: inicialmente decrece para luego crecer con la profundidad. Para este caso, su comportamiento es como el de un perfil normalmente dispersivo a partir de una determinada longitud de onda y de una magnitud aproximadamente igual a la profundidad desde que la rigidez empieza a aumentar (Gucunski y Woods, 1992). En la figura 16 se normalizaron los desplazamientos en ambas direcciones con respecto al máximo desplazamiento vertical. Una de las características de la

solución es que existe una similitud entre la curva de desplazamientos descrita por el primer armónico en un terreno normalmente dispersivo con la curva de desplazamientos en un terreno no dispersivo (Lai y Rix, 1998).

Otra de las características de la solución es que los modos superiores tienden a penetrar una mayor profundidad que los modos inferiores, esto tiene gran importancia a la hora de la solución del problema inverso (Lai y Rix, 1998).

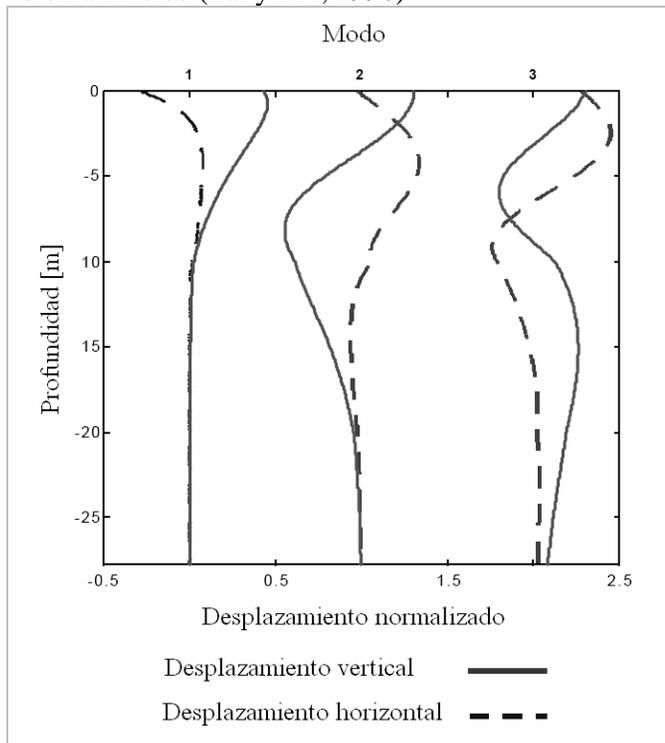


Figura 16: Curva desplazamientos para los tres primeros modos (Rix y Lai 1998).

2.7 Causas de atenuación

La atenuación se debe a la pérdida de energía que se produce durante la propagación de ondas y puede ser atribuida a tres causas diferentes: características del medio, existencia de interfases, propagación geométrica.

2.7.1 Características del medio

Existen varios mecanismos internos del medio que conducen a pérdidas de energía durante la propagación de las ondas, entre ellos se pueden destacar: cambios de energía relacionados con la termoelasticidad del sólido, rotura de uniones entre partículas, fricción entre partículas (solo en altas tensiones como por ejemplo mediante un terremoto), viscosidad y en sólidos saturados por acciones hidrodinámicas entre el fluido y las partículas (Stokoe y Santamarina, 2000).

2.7.2 Interferencias

La existencia de interfases produce ondas reflejadas y refractadas, de tal forma que se distribuye la ener-

gía inicial de la onda incidente en las ondas generadas por la interfase (Figura 17). También se muestra la diferencia entre cómo se reflejan las ondas con movimiento de sus partículas en el plano y fuera del plano (Santamarina et al, 2001).

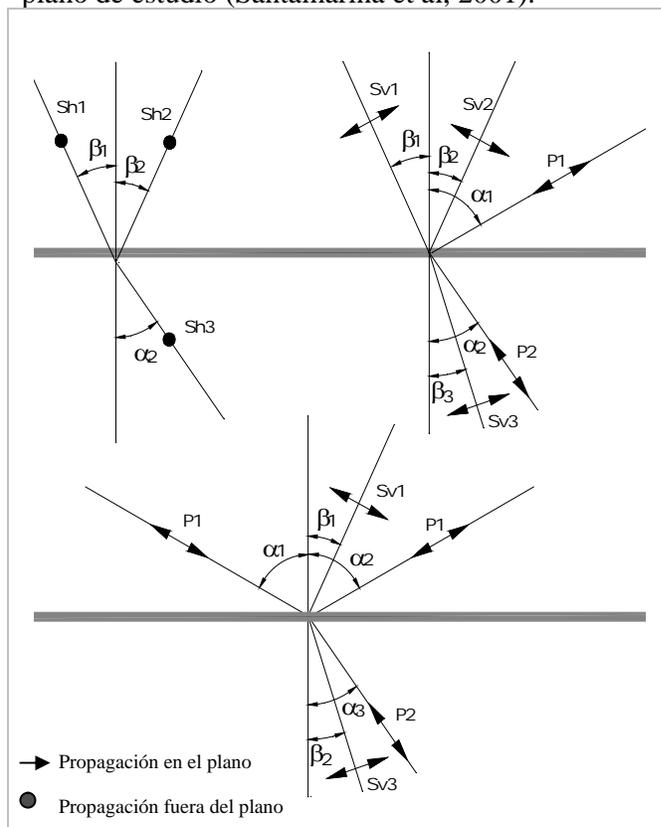


Figura 17: Interferencia- modos de conversión.

2.7.3 Propagación geométrica

La atenuación por propagación geométrica es que la amplitud de las ondas disminuye en función de la distancia recorrida.

La energía entregada por el impacto es distribuida uniformemente sobre el frente de onda; al estar en continuo movimiento disminuye la energía superficial. De los infinitos rayos sísmicos creados por el impacto se elige sólo uno y se analiza su energía.

Se llega a que la disminución se puede expresar como función del radio del frente de onda como se ve en la tabla 2; su variación se debe a que los frentes de ondas en los distintos modos de propagación difieren, entre esféricos para las de volumen y cilíndricos para las de Rayleigh. Esto explica el orden de la atenuación de cada uno de los valores de la tabla 2 (Foti 2000).

Tabla 2. Atenuación geométrica en función del radio r

Ondas de Volumen:	
En la superficie	r^{-2}
En el centro	r^{-1}
Ondas de Rayleigh	$r^{-0.5}$

2.8 Distribución de energía

Para una carga armónica que actúa en una placa circular sobre un medio semielástico lineal que oscila a frecuencia constante, Miller y Pursey en 1955 mostraron que del total de la energía entregada, 67% es empleada por las ondas de Rayleigh, un 26% por las ondas de corte y un 7% por las ondas de compresión. (Figura 18) (Foti 2000).

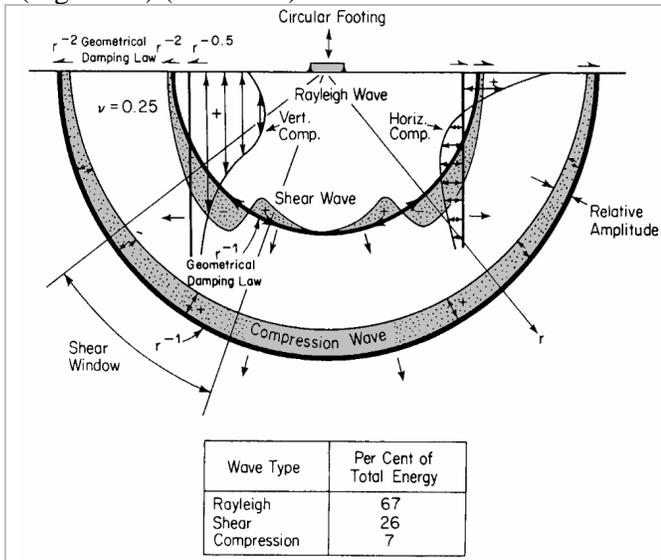


Figura 18: Campo desplazamientos, distribución de energía según el modo de propagación para una fuente armónica sobre semiespacio elástico lineal, homogéneo e isótropo y propagación geométrica (Foti 2000).

2.9 Propagación en medio saturado

El agua tiene rigidez al corte G nula, por lo que la velocidad de corte sólo estará relacionada con la rigidez al corte de la masa de suelo. Por otro lado, la velocidad de compresión estará controlada por la velocidad de propagación de la onda en el agua que se encuentre en la masa de suelo, ya que la rigidez del agua es superior a la del esqueleto de suelo (Figura 19) (Stokoe y Santamarina, 2000).

Esto no implica que el grado de saturación o la presión del agua no afecten la velocidad de propagación de ondas de corte. Por el contrario, el grado de saturación está fuertemente relacionado con la succión, que controla la presión efectiva sobre las partículas. Entonces, el grado de saturación – cantidad de agua – controla la presión efectiva entre partículas y ésta, a su vez, controla la velocidad de propagación de ondas de corte, que sólo se propagan entre las partículas sólidas (Figura 20) (Stokoe y Santamarina, 2000).

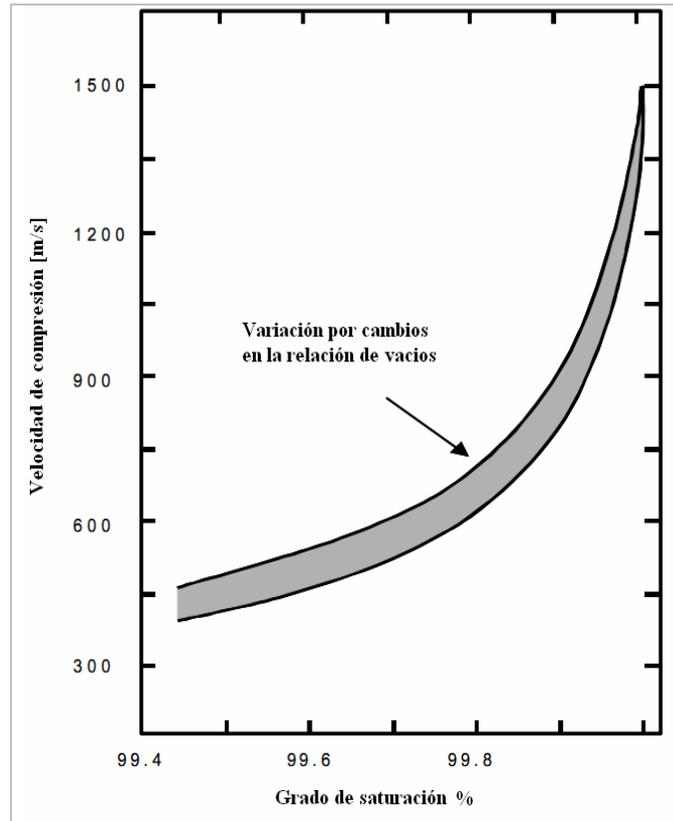


Figura 19: Variación de la velocidad de compresión con grado de saturación entre el 99.4% y el 100% para arena (Stokoe y Santamarina, 2000).

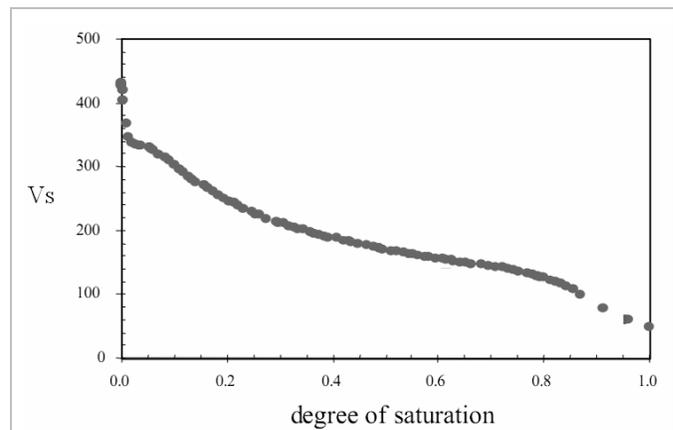


Figura 20: Velocidad de corte en función del grado de saturación para una arena (Stokoe y Santamarina, 2000).

3 GEOFÍSICA APLICADA

3.1 Planteo General

Las técnicas geofísicas de tipo sísmico se basan en la generación de ondas mecánicas que atraviesan la masa del material a investigar. Como la amplitud de las ondas generadas es muy pequeña, no se alteran las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales del material ensayado, lo que implica que la alteración del terreno es imperceptible o nula.

Estas características son propias de ensayos indirectos y no destructivos. La resolución de cada ensayo involucra la resolución de un problema inverso como se explica en las secciones siguientes.

3.1.1 Definición de señal, sistema y modelo

Una señal es información codificada y arreglada de forma tal que su contenido representa la variación de un parámetro con respecto a una o más variables independientes en un fenómeno físico (ej.: Registro de transductor) (Santamarina y Fratta, 1998).

Un sistema es un objeto que transforma una señal de entrada en otra de salida. Se lo estudia mediante modelos matemáticos que reproducen la señal de salida para cada señal de entrada dada.

3.1.2 Problema inverso

Para el caso de la sísmica de refracción, se produce una señal de entrada mediante un impacto en el terreno que produce ondas que se propagan por el suelo. El sistema es el terreno en sí mismo. La señal de salida es el registro de los transductores. El modelo es un semiespacio elástico lineal estratificado.

El problema inverso se plantea porque se conoce el registro de los transductores y la señal de entrada pero no se conoce la estratigrafía. En concreto, se ajusta el modelo de capas hasta que su respuesta sea similar a la respuesta del terreno (Santamarina y Fratta, 1998).

Cuando se verifica una buena correlación entre la salida del modelo y las mediciones experimentales se asume que el terreno está bien representado por el modelo (Figura 21). Deben analizarse otros modelos ya que la solución no es unívoca y más uno puede responder de manera similar.

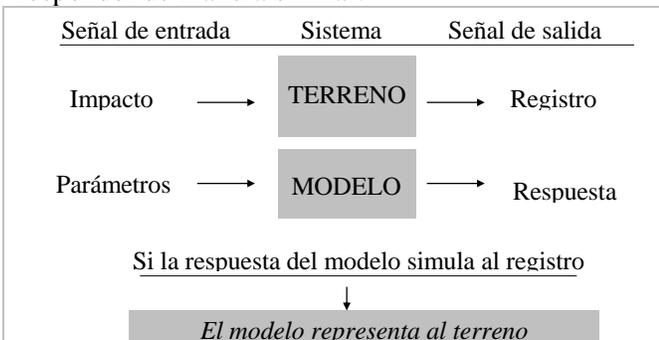


Figura 21: Esquema problema inverso

3.1.3 Tipo de ensayos

Existen actualmente diversos ensayos sísmicos, similares experimentalmente entre sí pero cuya modelización presenta características diferenciadas. Se los puede clasificar en: superficiales o profundos (Stokoe et al, 2004).

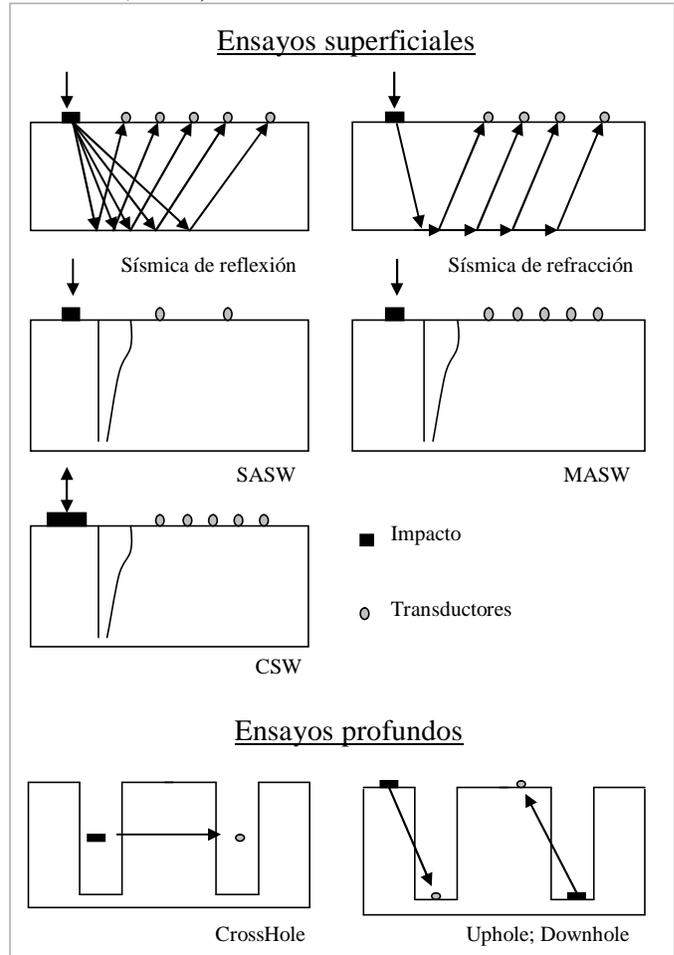


Figura 22: Esquema de ensayos superficiales y profundos

3.1.4 Limitaciones

Una de las limitaciones fundamentales en la realización de estos tipos de ensayos es que los resultados obtenidos mediante ellas no pueden ser correspondidos a una única estratigrafía del terreno. Con frecuencia, los ensayos superficiales por sí solos no pueden resolver todas las ambigüedades del terreno por lo que es necesaria información adicional derivada de otro tipo de ensayo, como por ejemplo un ensayo SPT (ASTM D5777, 2000).

Otra limitación de los ensayos superficiales es que la dispersión de los resultados crece con la profundidad.

3.2 Sísmica de refracción

La sísmica de refracción es una técnica que se encuadra dentro de los métodos de exploración geofísica que estudian la propagación de ondas sísmicas producidas artificialmente y establece una relación con la configuración geológica del suelo.

Se aplica a estudios geológicos, geotécnicos, hidro-lógicos, de exploración minera y petrolífera y a las investigaciones arqueológicas. Su objetivo es la obtención del perfil geológico, la detección de mantos de roca, napa freática, litología, estratigrafía, etcétera. También se la emplea para la medición indirecta de la rigidez de los estratos ensayados.

Una de las primeras experiencias sísmicas fue realizada en 1845 por Robert Mallet, considerado por muchos como el padre de la sismología instrumental. El midió el tiempo de viaje de una onda superficial provocada por una explosión.

El ensayo se sintetiza en tres etapas

- Recopilación de datos en el campo
- Medición de la curva de arribos
- Correlación con la estratigrafía del terreno.

3.2.1 Respuesta teórica

La respuesta del ensayo se visualiza mediante la curva de arribos que corresponde a un modelo de capas que cumple las siguientes hipótesis:

- Analogía con los conceptos de óptica
- $V_p > V_s > V_r$
- Frentes de ondas P esféricos

Se propone un modelo del terreno conformado por diferentes capas horizontales de parámetros V_p y Z , que deben conformar un perfil normalmente dispersivo. Si el terreno es inversamente dispersivo, la técnica pierde objetividad.

En la figura 23 se modela la propagación de las ondas P para dos capas horizontales de parámetros Z y $V_{p2} = 2 V_{p1}$. Para facilitar la comprensión se apilan en un mismo gráfico los diferentes frentes de ondas en intervalos de igual tiempo.

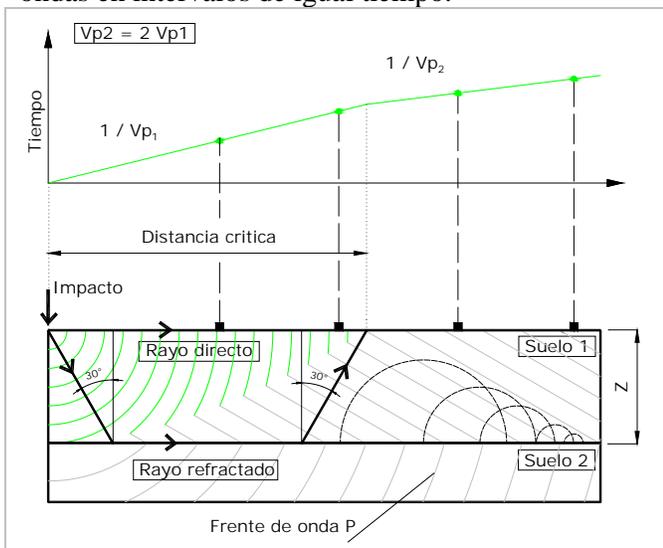


Figura 23: Modelo de dos capas horizontales; curva de arribos, propagación de frentes de ondas; rayo refractado.

La capa superficial transmite el frente de ondas proveniente del impacto de manera directa; cuando este frente alcanza la interfase entre capas, genera un frente secundario que se transmite por la interfase y

que genera, a su vez, infinitos frentes que se reflejan en la capa superior. A una determinada distancia del punto de impacto, los frentes de onda que viajan por la interfase y que se reflejan en la capa superior alcanzan la superficie del terreno antes que las ondas superficiales.

En otras palabras, a cierta distancia del impacto las primeras vibraciones en la superficie serán provocadas por las ondas que viajan por la interfase entre los estratos inferior y superior.

La velocidad de las ondas directas estará relacionada con las propiedades del estrato superficial, mientras que la velocidad de las refractadas estará relacionada con ambos estratos.

Esta es la razón por la cual la curva de arribos es representativa del terreno. Como se ve en la figura 23, la curva de arribos presenta un quiebre a partir del cual disminuye su pendiente. La inversa de la pendiente del primer tramo es V_1 , mientras que la inversa de la pendiente del segundo tramo es V_2 .

Si la interfase es horizontal (Figura 24), su profundidad puede ser calculada mediante la velocidad de propagación de cada estrato y de la distancia crítica (Dobrin, 1975; Department of the Army, 1995).

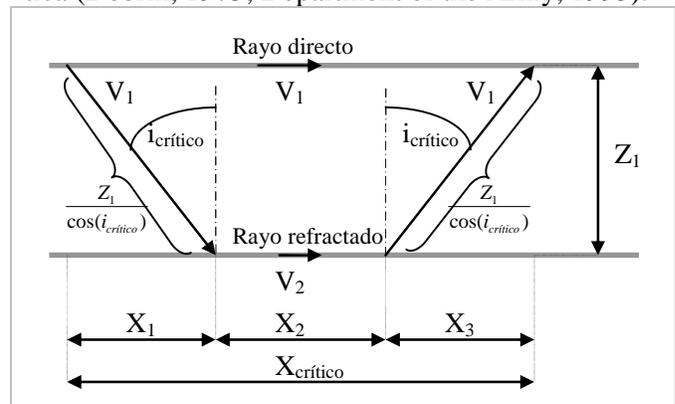


Figura 24: Esquema de análisis para hallar la profundidad de los estratos.

Para hallar la profundidad se iguala el tiempo de arribo entre el rayo directo y el rayo refractado para alcanzar un mismo punto de la superficie.

$$T_{\text{rayo directo}} = T_{\text{rayo refractado}} \quad (22)$$

en términos de velocidad y distancia crítica

$$\frac{X_{\text{critico}}}{V_1} = \frac{2Z_1}{V_1 \cos(i_{\text{critico}})} + \frac{X_{\text{critico}} - 2Z_1 \tan(i_{\text{critico}})}{V_2} \quad (23)$$

si se reemplaza por la ecuación (21) y por la identidad trigonométrica $\cos^2 i_c = 1 - \sin^2 i_c$ se obtiene

$$Z_1 = \frac{X_{c1}}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}} \quad (24)$$

V_1, V_2 = Velocidades del 1° y 2° estrato.

Z_1 = Espesor del primer estrato.

X_{c1} = Distancia crítica entre el 1° y 2° estrato.

En el caso de tres estratos horizontales, las ecuaciones son las siguientes.

$$Z_3 = Z_1 + Z_2 \quad (25)$$

donde Z_2 vale

$$Z_2 = \frac{X_{c2}}{2} \frac{V_3 - V_2}{\sqrt{V_3^2 - V_2^2}} - Z_1 \frac{V_2 \sqrt{V_3^2 - V_1^2} - V_3 \sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_1 \sqrt{V_3^2 - V_2^2}} \quad (26)$$

V_1, V_2, V_3 = Velocidades del 1° 2° y 3° estrato.

Z_1, Z_2, Z_3 = Espesor del 1° 2° y 3° estrato.

X_{c2} = Distancia crítica entre el 2° y 3° estrato

Si se estudia el terreno mediante la realización del ensayo de refracción sísmica en ambos sentidos se puede estudiar la inclinación de los estratos por la simetría de la curva de arribos obtenida. A continuación se visualiza el comportamiento de las curvas de arribos para los casos de estratos horizontales e inclinados (Figuras 25 y 26) (Department of the Army, 1995).

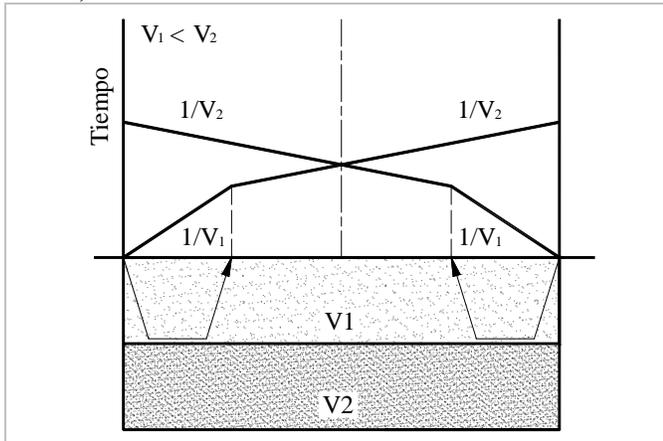


Figura 25: Modelo de dos capas horizontales.

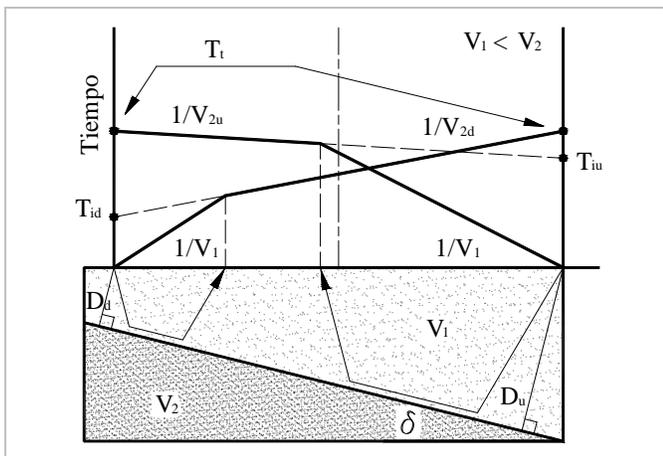


Figura 26: Modelo de dos capas inclinadas.

Las profundidades valen

$$D_u = V_1 T_{iu} / (2 \cos \alpha) \quad (27)$$

$$D_d = V_1 T_{id} / (2 \cos \alpha) \quad (28)$$

Por ser la interfase inclinada las velocidades obtenidas de la curva de arribos son "aparentes" y deben ser corregidas de la siguiente manera

$$V_2 = (V_{2u} V_{2d}) / (V_{2u} + V_{2d}) \cos \delta \quad (29)$$

y el ángulo de inclinación vale

$$\delta = \frac{1}{2} (\sin^{-1}(V_1 / V_{2d}) - \sin^{-1}(V_1 / V_{2u})) \quad (30)$$

$V_{2u}; V_{2d}$ = Velocidades aparentes.

= ángulo de inclinación.

A continuación se grafican diferentes tipos de estratigrafías y sus curvas de arribo. (Zohdy et al, 1974)

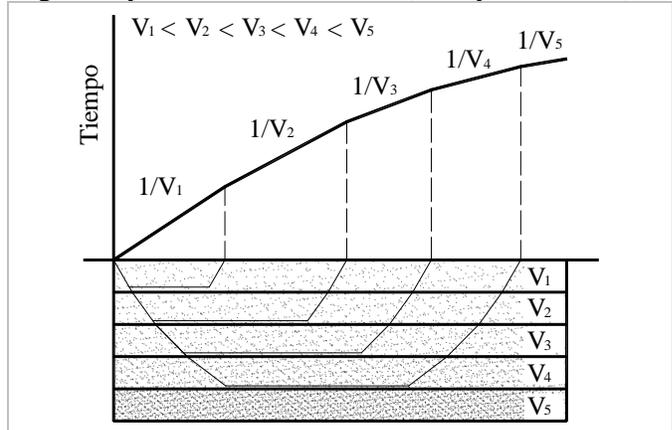


Figura 27: Modelo de cinco capas

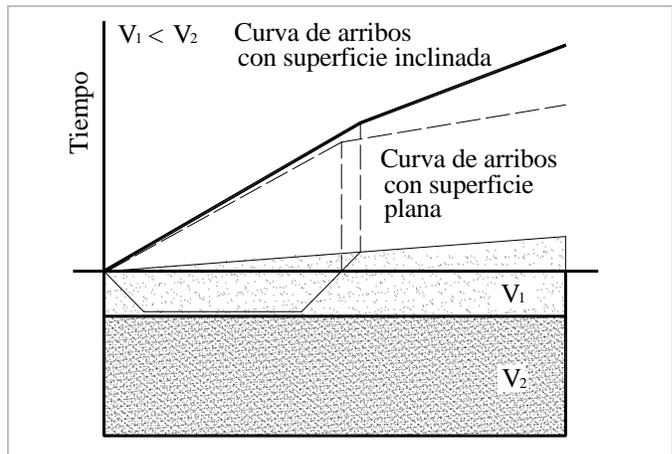


Figura 28: Modelo dos capas con desniveles en la superficie

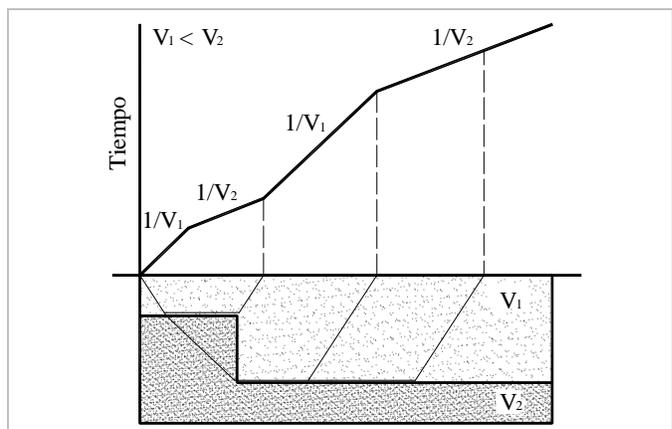


Figura 29: Modelo de dos capas con escalón.

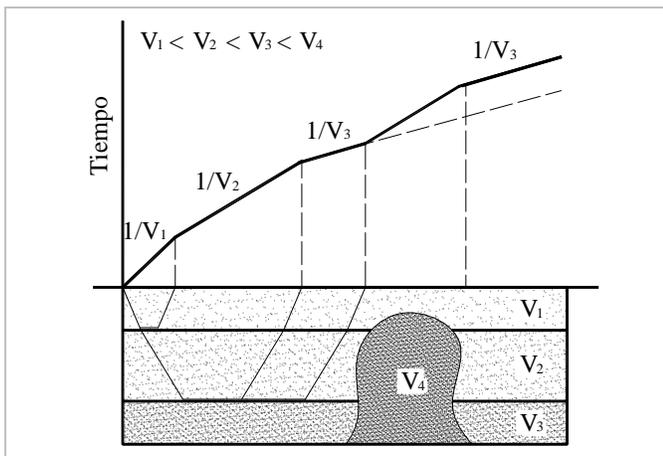


Figura 30: Modelo de tres capas con zona de discontinuidad.

3.2.2 Configuración de ensayo

Sobre la superficie del terreno se dispone una línea recta de transductores equiespaciados. Estos transductores son instrumentos que registran las vibraciones del terreno (Figura 31).

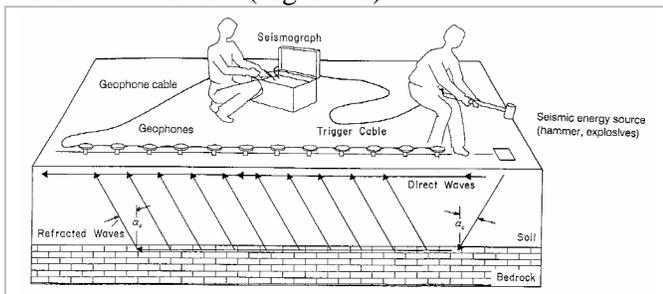


Figura 31: Esquema de ensayo de refracción sísmica. (ASTM D5778, 2000)

El ensayo puede llevarse a cabo con el empleo de uno o varios transductores. Cuando se utiliza un solo transductor, este debe ser desplazado cada vez que se genera el impacto con el fin de contemplar todos los puntos del terreno. En cambio, cuando se emplean varios transductores no se requiere desplazar los transductores. Se usan 6, 12, 24, 48 o más transductores (ASTM D5778, 2000).

Se recomienda que los transductores estén firmes en el suelo, verticales, alineados con el punto de impacto. Para geofísica superficial con objeto geotécnico, la separación es constante, entre 1 a 5 metros.

Se puede variar la ubicación del impacto – perteneciente a la línea de transductores – con el objeto de detectar estratos más profundos.

Si antes de realizar el ensayo se tiene información de la geología o estratigrafía del terreno, se pueden adoptar separaciones diferentes entre transductores tal que se evidencien las capas de suelo que se quiere investigar.

Una vez obtenido el registro (Figura 32) se miden los tiempos de arribo de las ondas P, y es el que corresponde al arribo del primer cambio de energía. La tarea de elegir dicho arribo puede hacerse manual o automáticamente, aunque en esta última es aconse-

jable el control de la curva de arribos, sobre todo en presencia de ruido ambiente.

3.2.3 Respuesta experimental

En la figura 32 se aprecia el registro de un ensayo de refracción sísmica, en el cual se utilizaron 15 geófonos espaciados equidistantes cada 2m.

Se graficó la curva de arribos experimental que une el inicio de las vibraciones de cada transductor, determinados de manera visual. Se observa un quiebre de la curva que evidencia la existencia de un estrato inferior de mayor rigidez. También se observó experimentalmente la bifurcación entre los arribos de menor y mayor energía propuesto por Lamb, Miller y Pursey.

En la figura 33 se analizan las respuestas de dos transductores separados en 14m. Para el transductor cercano al lugar del impacto se observa que la energía de la onda ocurre inicialmente en un tiempo determinado mientras que al aumentar la distancia, dicha energía se distribuye de forma diferente debido a la separación entre los arribos de los modos de propagación. Al arribo de mayor energía se lo asocia con las ondas de corte, mientras que a las de menor energía a las ondas de compresión.

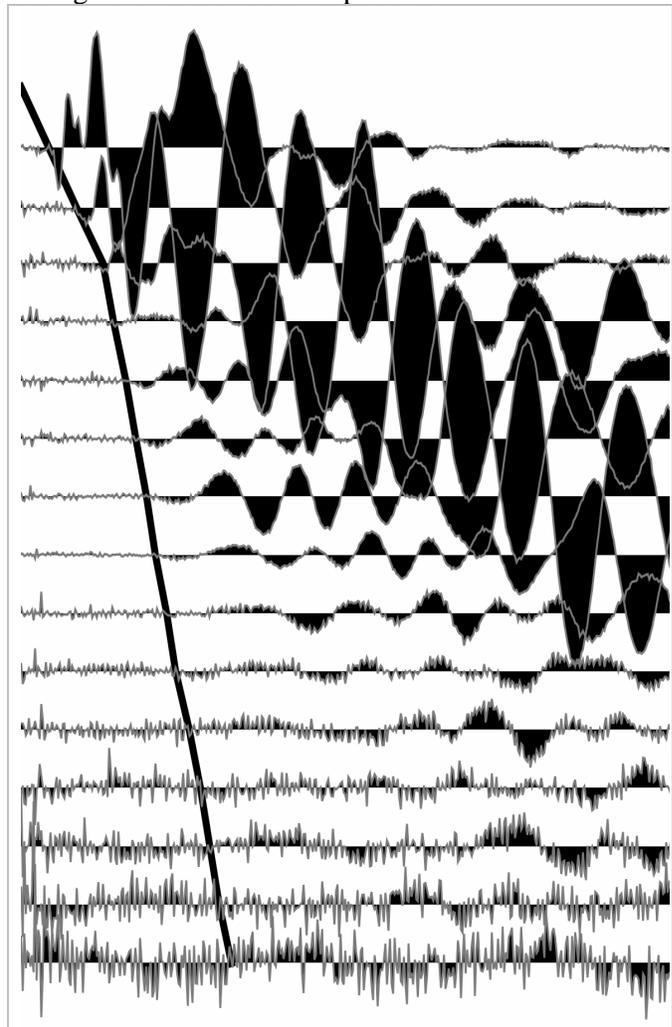


Figura 32 : Registro de 15 geófonos, línea de 30m.

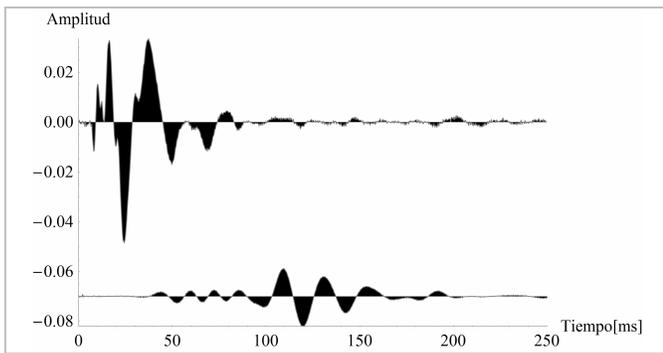


Figura 33: Bifurcación del arribo de energía entre distintos transductores a 2m y 16m del impacto.

3.2.4 Diseño de ensayo

La longitud de la línea de transductores está regulada por la profundidad del estrato a analizar. Puede ser estimada a priori por la ecuación (24), basándose en el conocimiento previo de las características del terreno V_p y Z .

La curva de la figura 34 proviene de la ecuación (24) y sirve para calcular la distancia crítica " X_c " de forma gráfica. La bibliografía recomienda ensayar el doble del X_c hallado (Department of the Army, 1995).

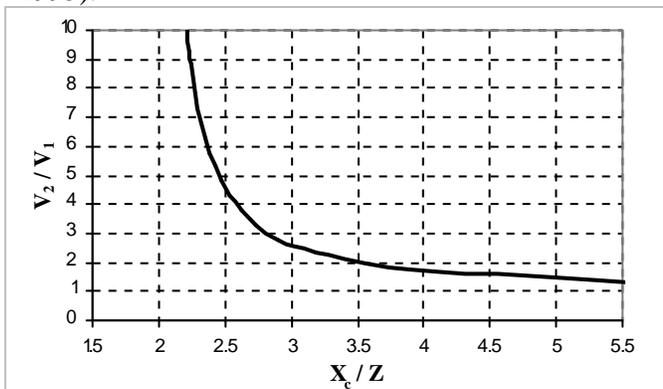


Figura 34: Diseño de configuración por la estimación de X_c a partir de V_2/V_1 y Z .

3.2.5 Control de calidad del ensayo

El control de calidad se realiza mediante los siguientes tests: de irregularidad, de tiempo recíproco y de paralelismo (ASTM D5778, 2000; Department of the Army, 1995). En el caso de que no verifiquen se debe rehacer la curva de arribos.

El test de irregularidad controla la consistencia de los tiempos de arribos provenientes de un estrato refractado. Si existe una gran desviación entre el tiempo de arribo para un transductor determinado y la línea recta que representa tal estrato se asume que el tiempo de arribo seleccionado es erróneo. La causa del error puede provenir de los datos de entrada, del ruido ambiente en la señal o por dispersión en las condiciones geológicas.

El test de tiempo recíproco controla los tiempos de arribo finales entre dos ensayos en diferentes direcciones. Si la diferencia entre los tiempos recíprocos es significativa entonces se asume que existe un error en la selección de los arribos.

El test de paralelismo controla la pendiente entre las curvas de los ensayos ya que, si provienen del mismo estrato, las curvas de arribo deben tener pendientes similares. Si esto no ocurre se asume que existe un error en la selección de los arribos o en los datos de entrada.

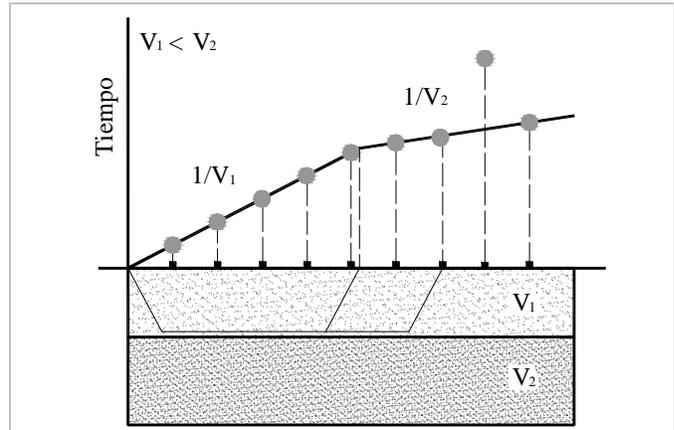


Figura 35: Test de irregularidad

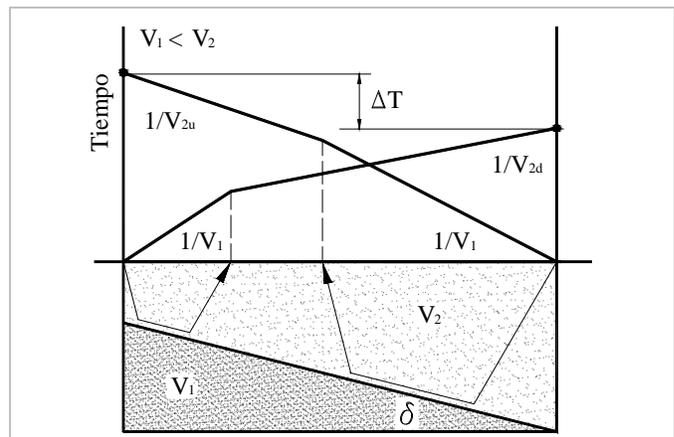


Figura 36: Test de tiempo recíproco

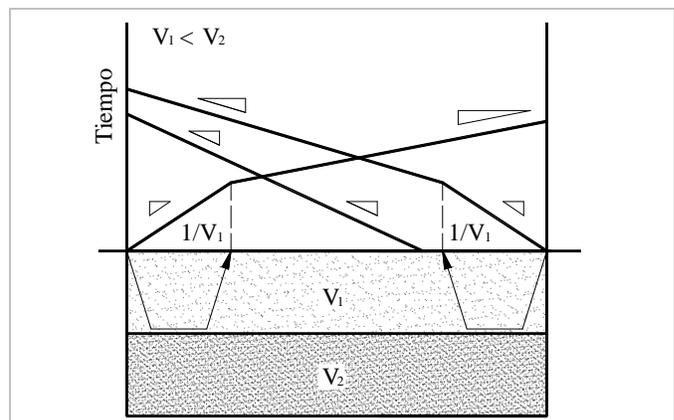


Figura 37: Test de paralelismo

3.2.6 Limitaciones

La primera limitación es que se asume que la velocidad de los estratos es uniforme e isotrópica. Si las condiciones actuales de cada estrato difieren significativamente del modelo ideal, entonces la interpretación de los resultados será errónea (Department of the Army, 1995).

La segunda es la llamada zona ciega (blind zone) que ocurre en presencia de estratos con similar velocidad de propagación que no pueden ser diferenciados (Figura 38).

La tercera limitación es la existencia de un espesor mínimo a ser registrado. Si se analiza la figura 39 se observa que la separación entre los transductores lleva a que el segundo estrato no pueda ser visualizado en la curva de arribos.

La última limitación ocurre cuando el perfil del terreno es inversamente dispersivo. Debido a esto la capa inferior no será detectada, por lo tanto la profundidad Z será mayor que la real (Figura 40).

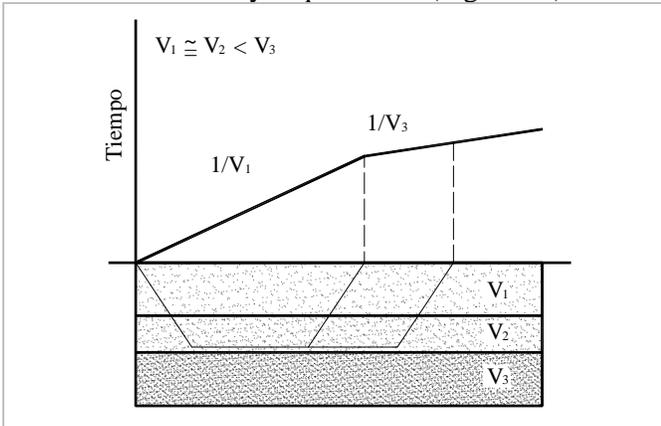


Figura 38: Limitación por zona ciega

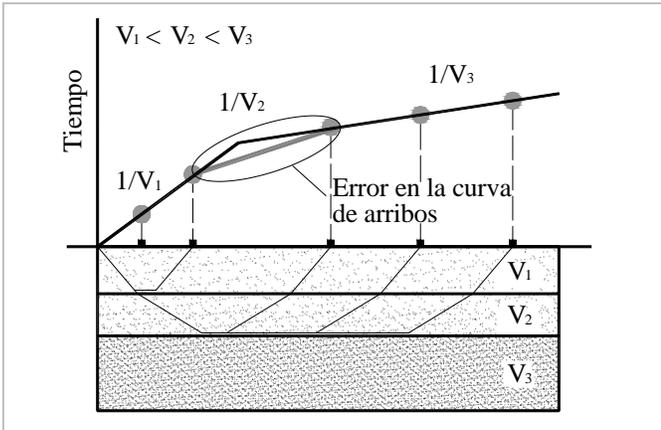


Figura 39: Limitación por estrato de poco espesor.

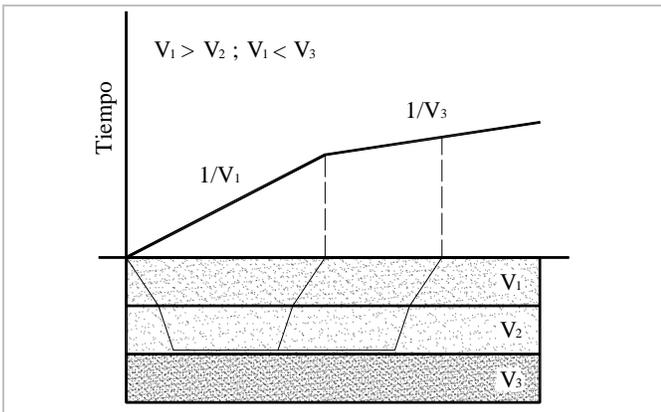


Figura 40: Limitación por terreno inversamente dispersivo.

3.3 Steady State Rayleigh method

Steady State Rayleigh method es el primer método para el estudio de las ondas superficiales, propuesto por Jones (1958;1962). Consiste en la generación de ondas por medio de una máquina vibradora a frecuencia constante, en la cual se mide la velocidad de la propagación de ondas superficiales por medio de dos transductores (Joh, 1996).

Si las ondas provocadas en la superficie del terreno son de frecuencia constante, con sólo conocer la longitud de onda se puede determinar la velocidad de fase, que se define como la velocidad con la cual se propaga una onda a una determinada frecuencia

$$V_{fase} = f \lambda \quad (31)$$

Para la medición de la longitud de onda se utilizan dos transductores donde uno permanece fijo en A y el otro móvil B según la figura 41. El transductor en B se mueve hasta la posición B* para que la lectura de ambos transductores estén en fase. Con esto se obtiene la longitud de onda para el primer ciclo.

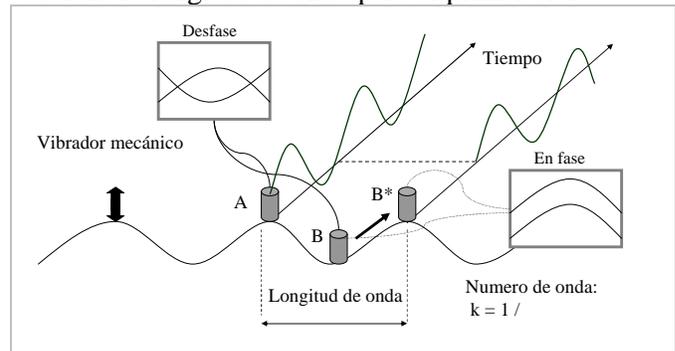


Figura 41: Configuración de Steady State Rayleigh method

Para que la medición sea representativa del terreno se debe ubicar el transductor en B en diferentes posiciones para que la onda propagada realice una mayor cantidad de ciclos pudiéndose calcular una longitud de onda promedio.

Se debe anotar tanto el número de onda como la distancia entre transductores. La inversa de la pendiente de la recta trazada por los puntos obtenidos es la longitud de onda promedio (Figura 42).

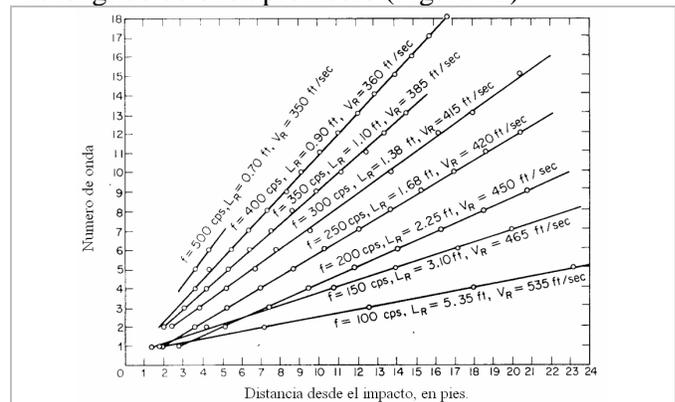


Figura 42: Determinación de la longitud de onda promedio con Steady State Rayleigh method (Joh, 1996).

El siguiente paso es cambiar la frecuencia de vibración de la máquina repitiendo el ensayo varias veces.

De este ensayo es importante destacar que Jones demostró que el terreno que para cada frecuencia de excitación las ondas en el terreno se propagaban a distintas velocidades, que es la curva de dispersión experimental del terreno (Figura 42).

En la actualidad este método se encuentra en desuso, ya que requiere una gran cantidad de tiempo de ejecución.

3.4 SASW

El análisis espectral de ondas superficiales (*Spectral Analysis of Surface Waves*) es un método que surge del ensayo *Steady State Rayleigh method*, pero recién se lo conoce a partir de 1980. El SASW se enfoca en el estudio de las ondas superficiales de Rayleigh ya que, como demostró Jones, las mismas contienen información relevante sobre las características mecánicas del medio por el cual se propagan.

Es una de las técnicas superficiales aceptadas tanto en investigación como en trabajos de ingeniería para el estudio de la estratigrafía del terreno. También es una técnica utilizada en el estudio de pavimentos.

La mejora que propone el SASW en relación al método anterior es la realización de la curva de dispersión en un menor tiempo de ensayo de campo, pero con una mayor demanda en el análisis de la señal. En comparación con el método anterior se podrá registrar un rango de frecuencias mayor en un menor tiempo para una separación fija entre transductores.

El ensayo se sintetiza en tres etapas diferentes:

- Recopilación de datos en el campo
- Curva de dispersión global
- Análisis inverso.

3.4.1 Configuración de ensayo

Existen dos tipos de configuraciones para el caso en que se utilizan dos transductores (Joh, 1996). Una de mantiene constante el punto medio entre transductores a medida que varía la distancia entre ellos (Figura 43). La ventaja de ésta configuración es que la porción del terreno que se estudia es siempre la misma.

En cambio, en la segunda configuración representada en la figura 44, se mantiene constante el punto de aplicación del impacto. Su ventaja de aplicación es la de poder realizar el ensayo en áreas reducidas de trabajo, pero con la desventaja de que el sector de suelo estudiado no permanece fijo como en la configuración anterior.

Se solía realizar el ensayo con solo dos canales ya que el hardware disponible no admitía más canales. Hoy en día se habilita el uso de múltiples canales que permiten lograr configuraciones de ensayos como el de las figura 45 o figura 46 (Lin, 2007). Como consecuencia de esto, se disminuye el tiempo de en-

sayo ya que los transductores se disponen en el terreno y luego lo único que se traslada es la posición del impacto para cada separación.

Otra ventaja del empleo de múltiples transductores es que el registro obtenido permite estudiar la inclinación de los estratos por medio de la técnica de sísmica de refracción.

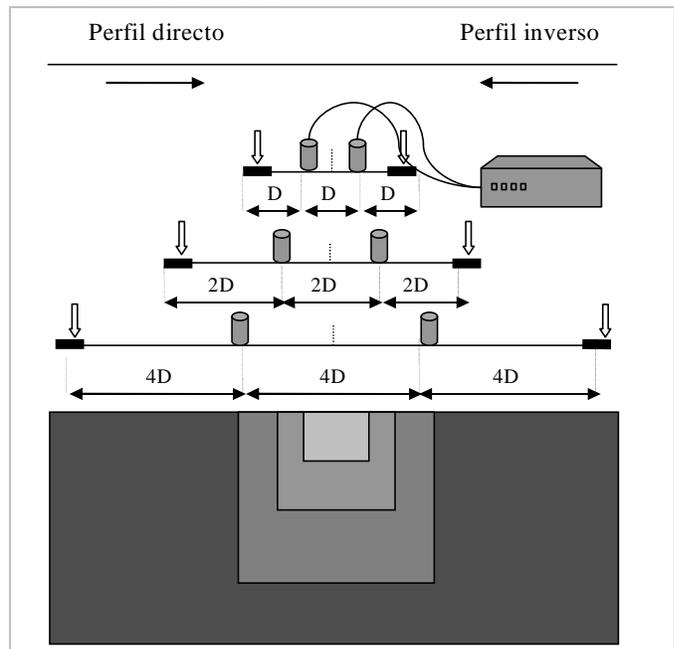


Figura 43: Configuración de punto medio invariable entre transductores.

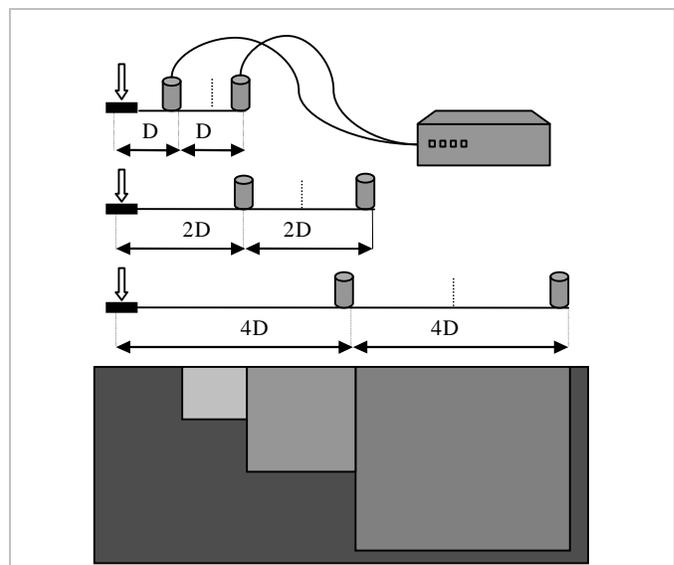


Figura 44: Configuración de impacto invariable.

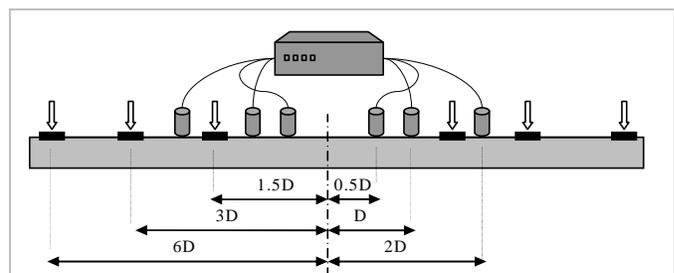


Figura 45: Configuración de punto medio invariable con múltiples canales

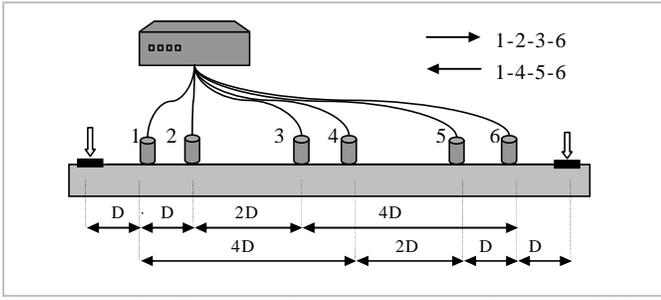


Figura 46: Configuración de impacto invariable con múltiples canales

3.4.2 Curva de dispersión local

La curva de dispersión local indica como varía la velocidad de fase de las ondas de Rayleigh con respecto a la frecuencia que se obtiene para cada separación entre transductores.

La distancia D entre transductores es establecida a priori por la configuración del ensayo, por lo que en la práctica se mide el tiempo transcurrido para cada frecuencia a través de la transformada de Fourier. En la figura 47 se observan dos transductores A y B por los cuales se propaga una onda sinusoidal que llega en el instante t_1 y t_2 respectivamente. El intervalo de tiempo se puede calcular mediante la diferencia de fase absoluta de las ondas registradas.

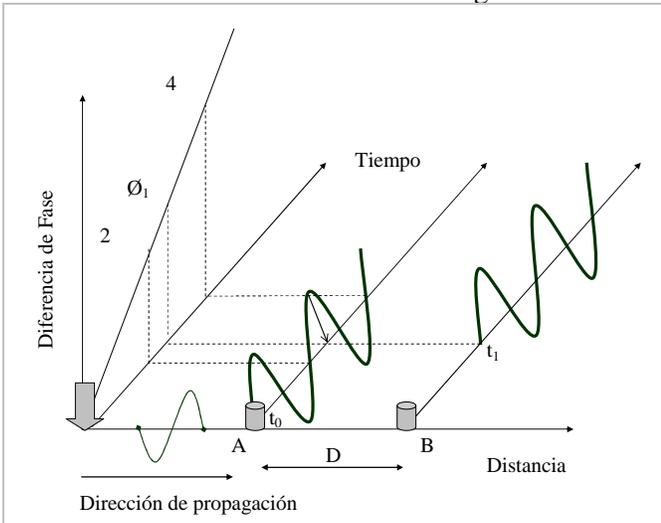


Figura 47: Diferencia de fase entre dos transductores para una determinada frecuencia de propagación.

Entonces la velocidad de fase de la figura 47 es

$$V_{fase} = \frac{D}{t_1 - t_0} = \frac{D}{(N^\circ \text{ ciclos}) \Delta t_{ciclo}} = \frac{D}{\left(\frac{\phi_1}{2\pi}\right) f} \quad (32)$$

El tiempo del ciclo es inversamente proporcional a la frecuencia

$$\Delta t_{ciclo} = T = \frac{1}{f} \quad (33)$$

de la ecuación (31) y ecuación (32) se obtiene la longitud de onda λ según

$$\lambda = \frac{D}{\left(\frac{\phi_1}{2\pi}\right)} \quad (34)$$

Lo expuesto en la figura 47 sólo considera una única onda sinusoidal. Sin embargo, al impactar sobre la superficie se obtienen ondas de diferentes formas con un contenido de frecuencias distinto como el que se muestra en la figura 48.

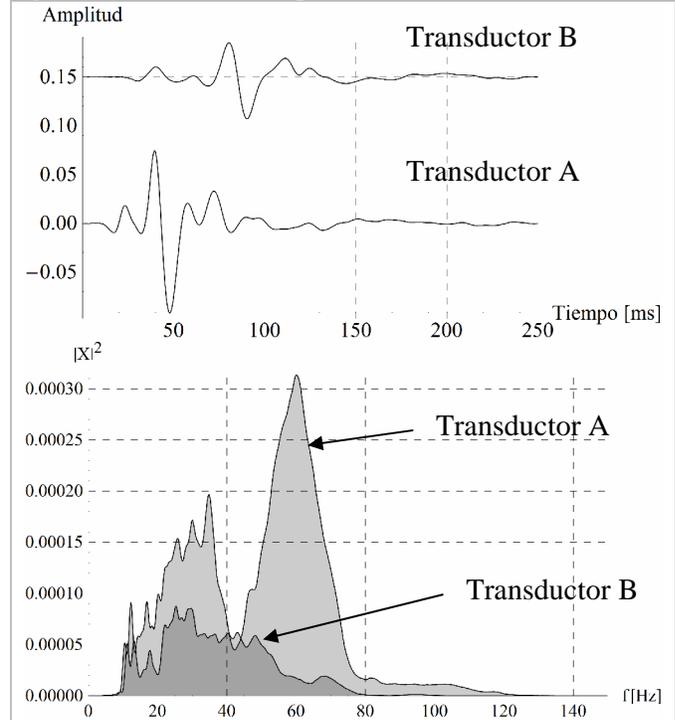


Figura 48: Registro del ensayo SASW con los correspondientes espectros transductores A y B.

El esquema planteado en la figura 47 ya no es válido por la existencia de una cantidad superior de ondas.

Para analizar que ocurre en este caso se estudia la diferencia de fase en función de la frecuencia de cada onda para los tres tipos de perfil del terreno correspondientes a la figura 10.

Si se considera al terreno como no dispersivo, la propagación de las diferentes ondas que muestra el espectro de la figura 48 viajarán con una velocidad de fase constante equivalente a la calculada por medio de la ecuación (18).

Entonces, si se despeja la diferencia de fase absoluta ϕ_1 de la ecuación (32), se obtiene una relación lineal con pendiente variable en función de la distancia entre transductores y de la velocidad de fase del terreno no dispersivo.

$$\phi_1(f) = \frac{D}{\left(\frac{V_1}{2\pi}\right)} f \quad (35)$$

La siguiente figura muestra como se propagan tres armónicos para una separación dada entre dos transductores en un suelo no dispersivo. La diferencia de fase para cada frecuencia será diferente y en particu-

lar las de mayor frecuencia realizan mayor cantidad de ciclos que las de menor frecuencia, para llegar al siguiente transductor en el intervalo de tiempo ΔT_1 .

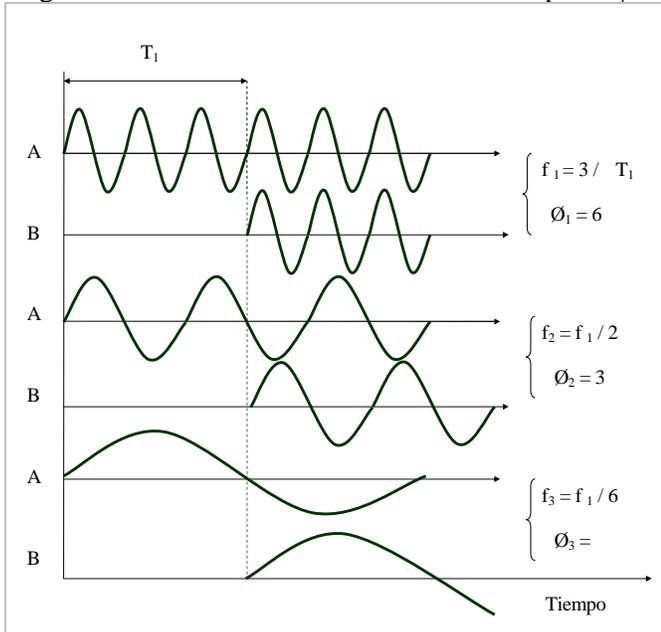


Figura 49: Ejemplos de tres armónicos con diferentes fases en un medio no dispersivo.

Al graficar cada diferencia de fase absoluta en función de la frecuencia se obtiene la figura 50a, y se observa la relación lineal expuesta por la ecuación 35 como también los tres armónicos de la figura 49.

Si se considera que el perfil de terreno es normalmente dispersivo, se pierde la linealidad con respecto al caso anterior debido a que ondas de diferentes frecuencias viajan a distintas velocidades, en otras palabras no es válida la ecuación 35. Si la onda de frecuencia f_2 atraviesa estratos de mayor rigidez, la velocidad de propagación será mayor en comparación con la onda de igual frecuencia que atraviesa el perfil no dispersivo. Por lo tanto el tiempo transcurrido entre los dos transductores será menor como también la diferencia de fase absoluta. Por lo tanto el punto P_1 desciende a P_2 ya que esta necesita realizar una menor cantidad de ciclos. En cambio, al analizar las frecuencias superiores a f_2 las diferencias de fase absoluta serán similares en ambos perfiles ya que la velocidad de propagación V_1 de la capa superficial es igual para ambos perfiles (Figura 50a).

Pero si al perfil se lo considera como inversamente dispersivo, la onda de frecuencia f_1 que atraviesa la capa superficial se propagará con una mayor velocidad V_3 en comparación con la onda de igual frecuencia de velocidad V_1 que se propagará en la capa superficial del perfil no dispersivo. Por lo tanto el tiempo transcurrido entre los dos transductores será menor como también la diferencia de fase absoluta entonces, el punto P_3 desciende a P_4 ya que necesita realizar una menor cantidad de ciclos. En cambio al analizar las frecuencias inferiores a f_1 las diferencias de fase absoluta serán similares en ambos perfiles ya

que la velocidad de propagación dependerá de la rigideces de los estratos mas profundos (Figura 50a).

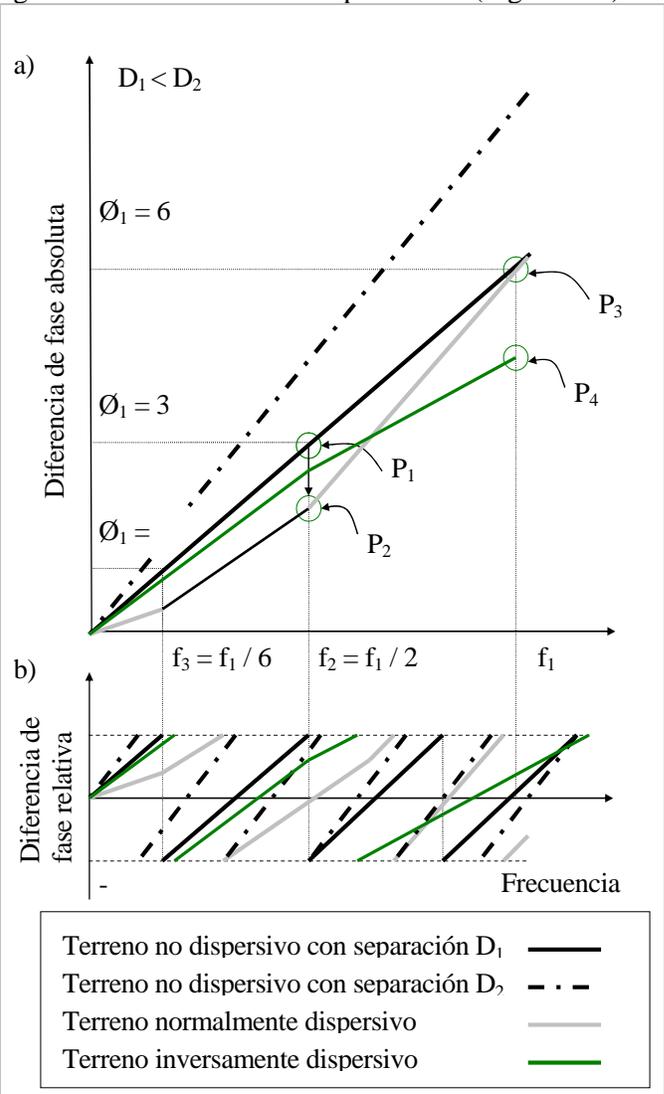


Figura 50: a) Diferencia de fase absoluta; b) Diferencia de fase relativa.

Lo antes mencionado para los dos últimos terrenos se puede analizar si se observa qué ocurre con la variación de diferencia de fase absoluta

$$\phi(f) = 2\pi D \left(\frac{f}{V_{fase}(f)} \right) \quad (36)$$

Para un perfil normalmente dispersivo a medida que se aumenta la frecuencia $f \uparrow$ la velocidad de fase disminuye $V \downarrow$ entonces $(f/V) \uparrow$ por lo tanto aumenta la pendiente de la curva de la diferencia de fase absoluta.

En cambio si al perfil se lo considera como inversamente dispersivo a medida que se aumenta la frecuencia $f \uparrow$ la velocidad de fase aumenta $V \uparrow$ entonces $(f/V) \downarrow$ por lo tanto disminuye la pendiente de la diferencia de fase absoluta.

3.4.3 Procedimiento analítico

La curva de dispersión se calcula mediante la transformada de Fourier que permite el cálculo de la diferencia de fase para un rango de frecuencias.

El registro en cada transductor se puede describir como

$$y_A(t) \xrightarrow{\text{Fourier}} Y_A(f) = A_A(f) e^{i\phi_A(f)} \quad (37)$$

$$y_B(t) \xrightarrow{\text{Fourier}} Y_B(f) = A_B(f) e^{i\phi_B(f)} \quad (38)$$

y la diferencia de fase entre cada transductor es

$$\Delta\phi_{AB}(f) = (\phi_B(f) - \phi_A(f)) \quad (39)$$

Al utilizar la transformada de Fourier, el fenómeno se describe como la superposición de diferentes ondas de forma sinusoidal de igual inicio. Entonces la diferencia de fase para cada frecuencia se encontrará acotada entre 0 $\Delta\phi$ 2π por lo que se denomina relativa.

Una de las herramientas de cálculo existente para obtener la diferencia de fase relativa es por medio del argumento del espectro cruzado (Joh, 1996). El espectro cruzado se define como

$$Y_{AB}(f) = Y_B(f) \overline{Y_A(f)} = A_B A_A(f) e^{i(\phi_B(f) - \phi_A(f))} \quad (40)$$

y su argumento es

$$\Delta\phi_{AB}(f) = (\phi_B(f) - \phi_A(f)) = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}(Y_{AB}(f))}{\text{Re}(Y_{AB}(f))} \right) \quad (41)$$

La correspondencia entre la diferencia de fase relativa calculada de esta manera y absoluta se puede observar en la figura 50b. Entonces la velocidad de fase se determina para cada frecuencia mediante

$$V_{fase}(f) = \frac{D}{\left(\frac{\phi(f)}{2\pi} \right)} f \quad (42)$$

Y la tarea más compleja dentro de la técnica SASW es la de calcular la diferencia de fase absoluta a partir de la diferencia de fase relativa ya que se deben adicionar varios ciclos (Joh, 1996).

$$\phi(f) = \Delta\phi(f) + n(f) 2\pi \quad (43)$$

La figura 51 muestra un ejemplo de cómo se obtiene la curva de dispersión calculada por medio de la ecuación 42 luego de haber acumulado la diferencia de fase relativa para hallar la absoluta.

La complejidad de hallar la diferencia de fase absoluta se debe a que la calidad de la diferencia de fase relativa no siempre es buena para las bajas frecuencias. Cuando el impacto se encuentra cerca de los transductores la calidad del argumento del espectro cruzado es relativamente buena, mientras que cuando se alejan del impacto la calidad empeora como se visualiza entre la figura 60 y la figura 69.

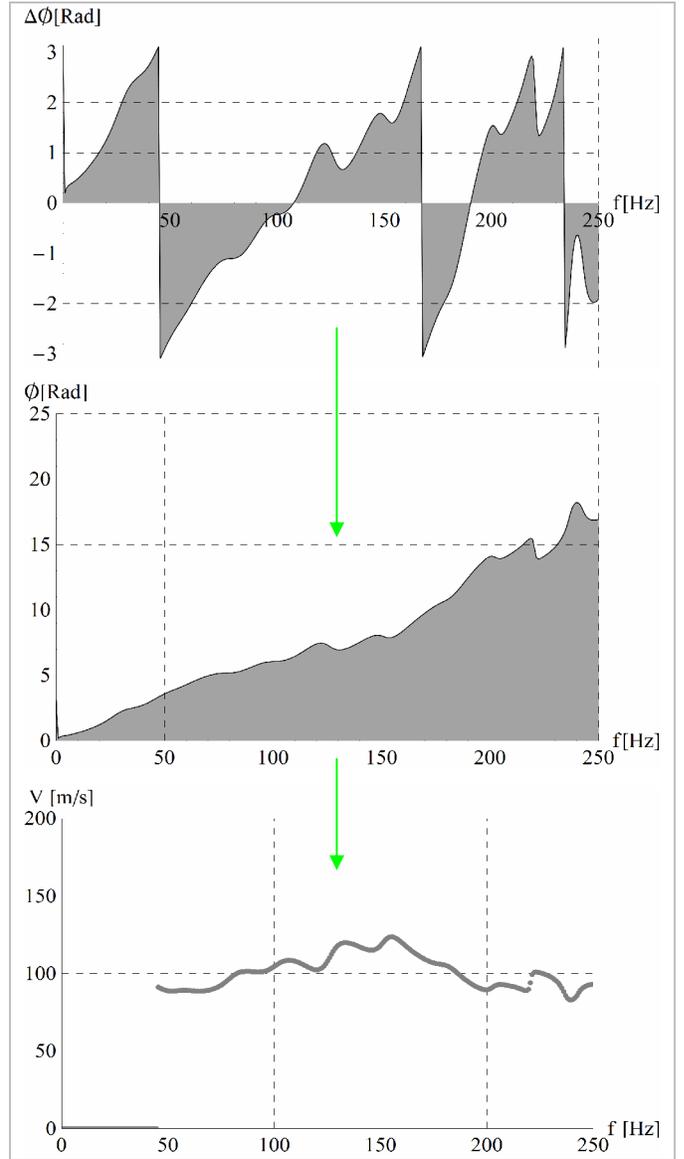


Figura 51: Diferencia de fase relativa, diferencia de fase absoluta y curva de dispersión para separación entre transductores de 1 m.

Al calcular la curva de dispersión experimental local, que es la que se obtiene del registro de dos transductores, puede que las velocidades de fase no sean puramente pertenecientes al movimiento de Rayleigh. Esto ocurre cuando al realizar el ensayo de campo el impacto se encuentra cerca de uno de los transductores, tal que se manifiestan las ondas de cuerpo S y P. A esta zona se la denomina campo cercano.

En cambio, en distancias lejanas donde la atenuación de las ondas de Rayleigh es inferior a la de las ondas de cuerpo, el fenómeno es gobernado por las ondas de Rayleigh y su frente de onda se puede considerar plano. A esta zona también se la conoce como campo lejano.

Por lo tanto para lograr seleccionar del registro la información que no se encuentre afectada por los efectos de la campo cercano como también el deterioro de la señal por la atenuación (Foti, 2000), se

utilizan criterios de filtrado que se expresan en función de la distancia entre transductores D_1 , D_2 y la longitud de onda

En la Tabla 3 se resumen los criterios expuestos en la bibliografía. Sin embargo la consecuencia más relevante en su aplicación es que limitan la información obtenida de los estratos más profundos ya que acotan las altas longitudes de onda. El utilizado en esta tesis fue el criterio propuesto por Joh, 1996.

También debe limitarse la mínima longitud de onda posible de registrar ya que los transductores tienen un diámetro físico tal que dificulta la lectura de ondas de gran frecuencia, entonces se puede limitar del registro longitudes de onda menores a cuatro veces el diámetro del transductor (Joh, 1996).

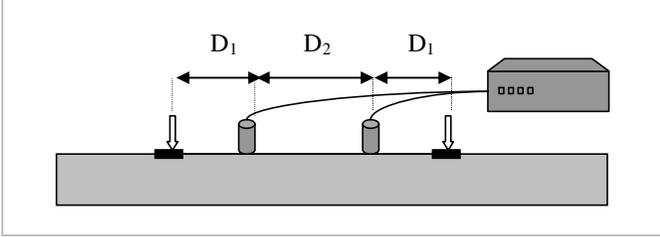


Figura 52: Distancias según criterio de filtrado.

Tabla 3. Separación de transductores según criterio de filtrado

Criterio	Primer transductor	Separación
a)	$d_1 = d_2$	$1/2 < d_2$
b)	$d_1 = d_2$	$< d_2 < 4$
c)	$1/2 < d_1$	-----
d)	$d_1 = d_2$	$/2 < d_2 < /3$

a) Joh, 1996; b) Gucunski and woods, 1992; c) Stokoe et al. 1994; d) Foti, 2000.

d_1 = distancia al primer transductor.

d_2 = distancia entre transductores.

3.4.4 Función coherencia

La función coherencia es una herramienta que se utiliza para admitir las frecuencias a tenerse en cuenta en el cálculo de la curva de dispersión (Joh, 1996).

La función coherencia surge de la técnica llamada "promedio de señales coherentes" (HP, 1985). Esta consiste en promediar las señales en el dominio de las frecuencias. A continuación se expresan las ecuaciones para su cálculo.

Espectro del transductor A

$$Y_{AA}(f) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_{A_i}(f) \overline{Y_{A_i}(f)} \quad (44)$$

Espectro del transductor B

$$Y_{BB}(f) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_{B_i}(f) \overline{Y_{B_i}(f)} \quad (45)$$

Espectro cruzado entre los transductores A y B

$$Y_{AB}(f) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_{A_i}(f) \overline{Y_{B_i}(f)} \quad (46)$$

Función coherencia:

$$\gamma^2(f) = \frac{Y_{AB}(f) \overline{Y_{AB}(f)}}{Y_{AA}(f) \cdot Y_{BB}(f)} = \frac{|Y_{AB}(f)|^2}{Y_{AA}(f) \cdot Y_{BB}(f)} \quad (47)$$

donde N es la cantidad de ensayos y $\overline{Y_A(f)}$ es el conjugado de $Y_A(f)$.

Conceptualmente, la función coherencia indica cómo están relacionadas las ondas entre los dos transductores e indica cómo es la respuesta del terreno.

El rango de valores de la función coherencia se encuentra acotado entre $0 \leq \gamma_f^2 \leq 1$, cuando $\gamma_f^2 = 1$ corresponde a una respuesta lineal del terreno.

Es interesante ver que la función coherencia evalúa el medio y como es su respuesta para cada fase. Por ejemplo si se calcula la función coherencia para un sistema de respuesta lineal la onda en el segundo transductor estará representada linealmente por la del primer transductor según

$$Y_B(f) = H(f) \cdot Y_A(f) \quad (48)$$

la función coherencia se reduce a:

$$\gamma^2 = \frac{\left(\overline{H} \sum_{i=0}^n Y_{A_n} \overline{Y_{A_n}} \right) \left(H \sum_{i=0}^n \overline{Y_{A_n}} Y_{A_n} \right)}{\left(\sum_{i=0}^n Y_{A_n} \overline{Y_{A_n}} \right) (H \cdot \overline{H}) \left(\sum_{i=0}^n Y_{A_n} \overline{Y_{A_n}} \right)} = \frac{H^2}{H^2} = 1 \quad (49)$$

Esto demuestra que si la función coherencia es cercana a 1, el medio se comporta de forma lineal entre la entrada y la salida para una frecuencia dada (Strobbia, 2002). Esta función adopta como límite inferior el valor de 0.90-0.95. La función pierde sentido si se realiza un solo ensayo ya que desaparece la sumatoria de las ecuaciones (45), (46) y (47).

$$\gamma^2 = \frac{(Y_{A_n} \overline{Y_{B_n}})(\overline{Y_{A_n}} Y_{B_n})}{(Y_{A_n} \overline{Y_{A_n}})(Y_{B_n} \overline{Y_{B_n}})} = 1 \quad (50)$$

Un ejemplo de la respuesta de la función se muestra en la siguiente figura y denota como para ciertas frecuencias la coherencia es menor que 0.95 lo que indicaría que esas ondas no se encuentran linealmente relacionadas.

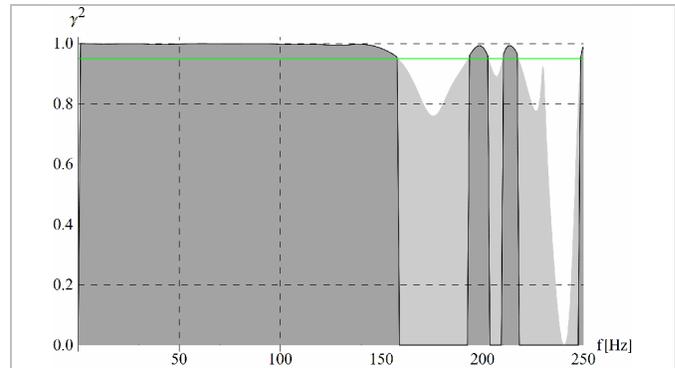


Figura 53: Función coherencia para separación entre transductores de 1 m.

3.4.5 Variaciones laterales del terreno

El modelo del terreno se compone de capas horizontales constituidas por un material elástico, homogéneo e isótropo.

En los casos donde existen estratos inclinados o una gran dispersión en la homogeneidad lateral estas hipótesis dejan de cumplirse y el perfil obtenido puede quedar fuertemente distorsionado. Por esta razón se deben realizar mediciones no sólo a lo largo de una línea recta sino también a lo largo de una dirección diferente, y tratar de evaluar la veracidad de las hipótesis del modelo.

De todas formas los efectos de las variaciones laterales pueden ser identificados y gracias a eso alertar a la hora de la aplicación del modelo del método. La información obtenida de estos ensayos no debe ser procesada con un modelo que no pueda representar dichas variaciones, y sólo información cualitativa podrá ser extraída de dicho ensayo en la presencia de estas variaciones.

Una de las posibilidades para evaluar la presencia de variaciones laterales (Figura 54), es por medio de la comparación entre las curvas de dispersiones experimentales obtenidas en la realización en los dos sentidos para una misma línea de ensayo. Si las dos curvas muestran una importante diferencia lo más probable es que exista algún tipo de variación lateral en cambio, si ambas son similares puede utilizarse la curva en el proceso de inversión (Foti 2000).

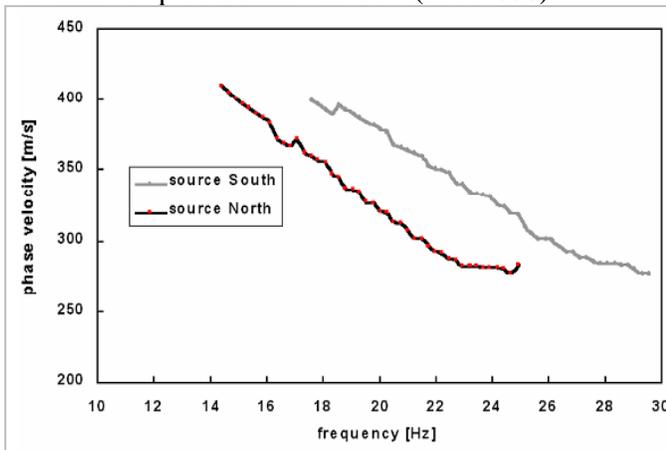


Figura 54: Visualización de las variaciones laterales al realizar ensayos en ambas direcciones. (Foti 2000)

3.4.6 Respuesta experimental

A continuación se muestra el registro de campo para separaciones entre transductores de 1m y 8m como también el contenido de frecuencias, espectrograma, diferencia de fase relativa, diferencia de fase absoluta, función coherencia y curva de dispersión en los dominios de la frecuencia y de la longitud de onda. Obtenidos del ensayo SASW VI.

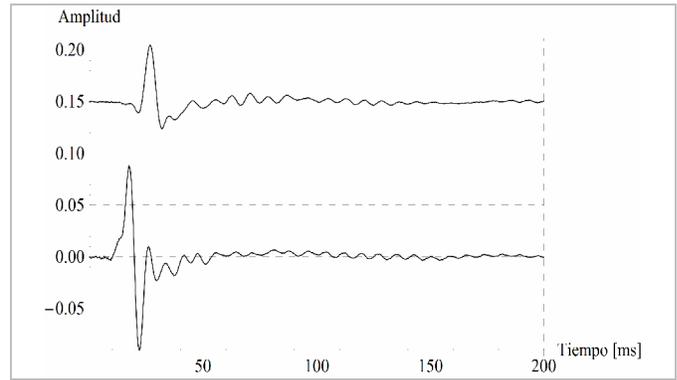


Figura 55: Registro de transductores con separación de 1m, ensayo VI.

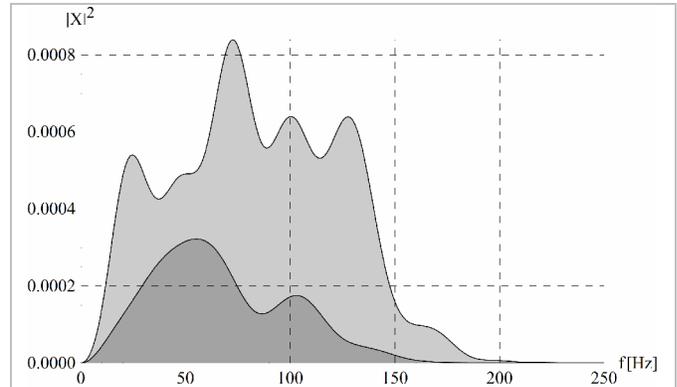


Figura 56: Energía espectral de transductores con separación de 1m, ensayo VI.

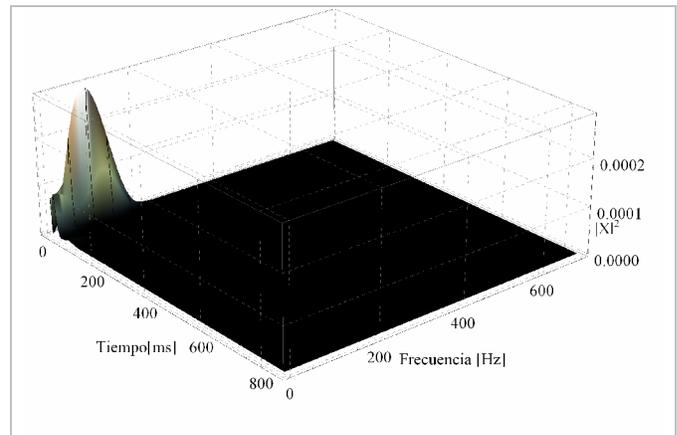


Figura 57: Espectrograma para transductor ubicado a 1m del impacto, ensayo VI.

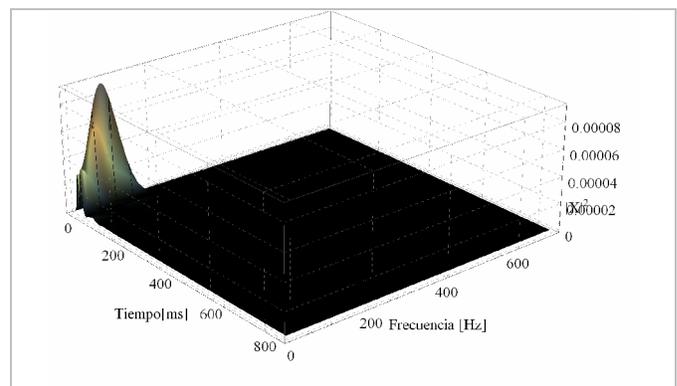


Figura 58: Espectrograma para transductor ubicado a 2m del impacto, ensayo VI.

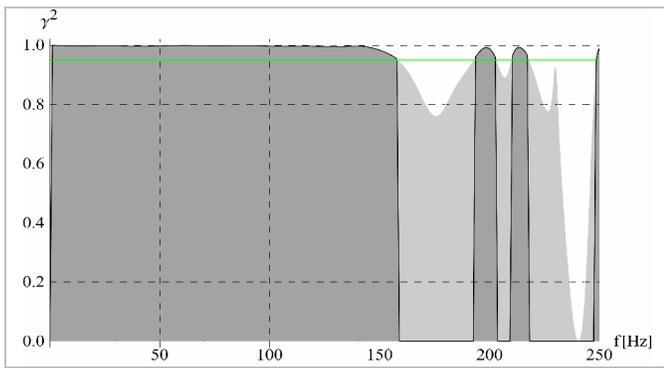


Figura 59: Respuesta de la función coherencia para transductores con separación de 1m, ensayo VI.

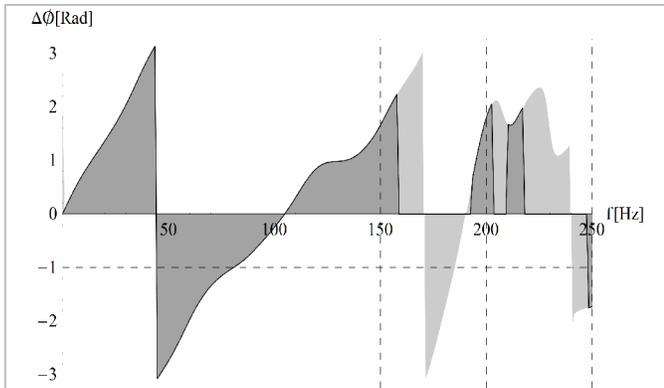


Figura 60: Diferencia de fase relativa para transductores con separación de 1m, ensayo VI.

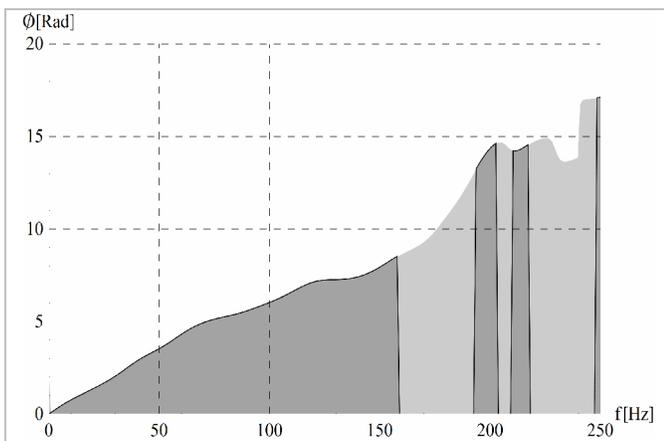


Figura 61: Diferencia de absoluta para transductores con separación de 1m, ensayo VI.

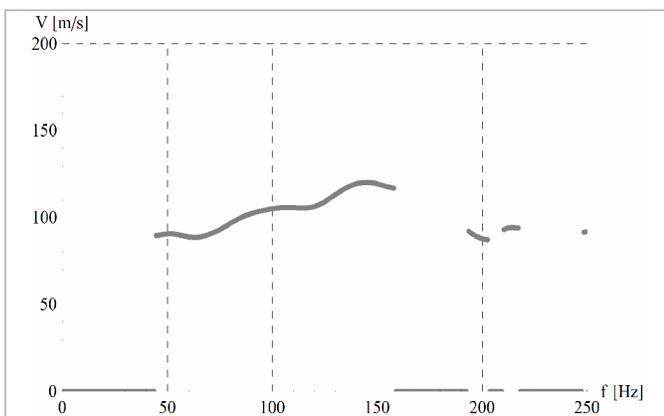


Figura 62: Curva de dispersión en función de la frecuencia para transductores con separación de 1m, ensayo VI.

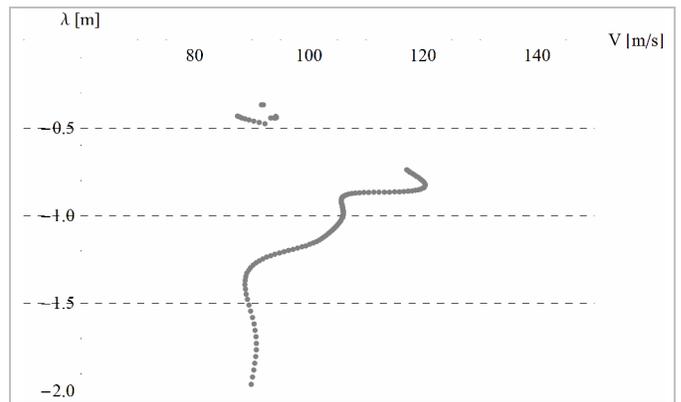


Figura 63: Curva de dispersión en función de la longitud de onda para transductores con separación de 1m, ensayo VI.

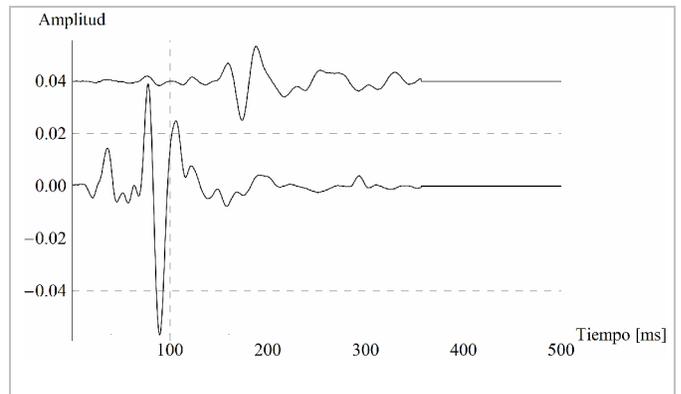


Figura 64: Registro de transductores con separación de 8m, ensayo VI.

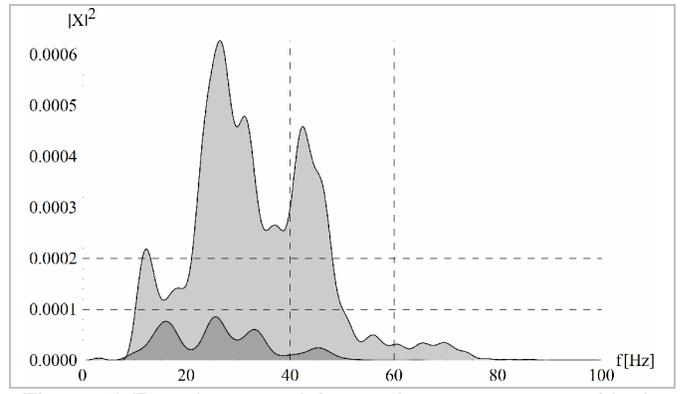


Figura 65: Energía espectral de transductores con separación de 8m, ensayo VI.

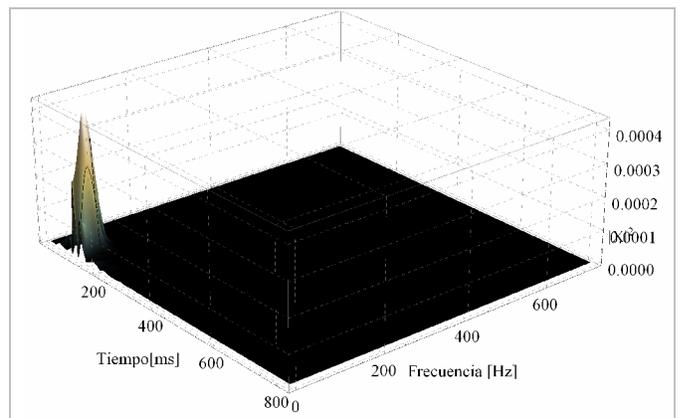


Figura 66: Espectrograma para transductor ubicado a 8m del impacto, ensayo VI.

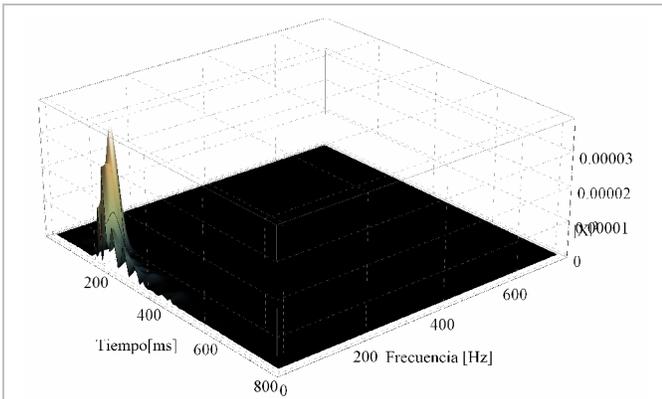


Figura 67: Espectrograma para transductor ubicado a 16m del impacto, ensayo VI.

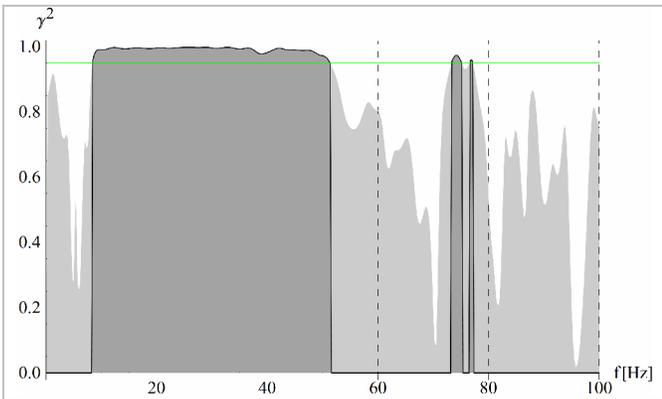


Figura 68: Respuesta de la función coherencia para transductores con separación de 8m, ensayo VI.

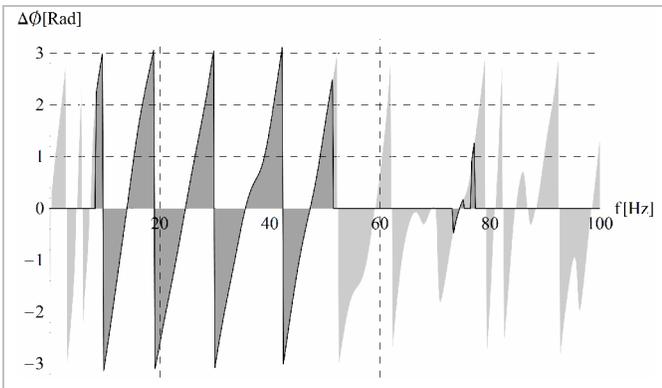


Figura 69: Diferencia de fase relativa para transductores con separación de 8m, ensayo VI.

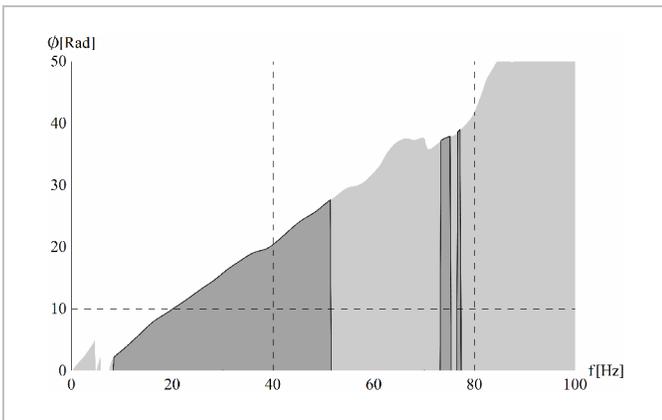


Figura 70: Diferencia de absoluta para transductores con separación de 8m, ensayo VI.

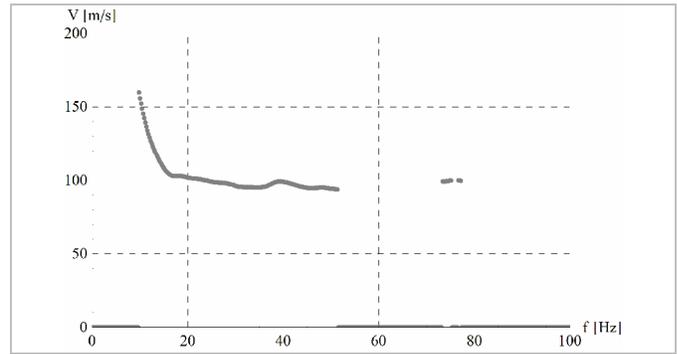


Figura 71: Curva de dispersión en función de la frecuencia para transductores con separación de 8m, ensayo VI.

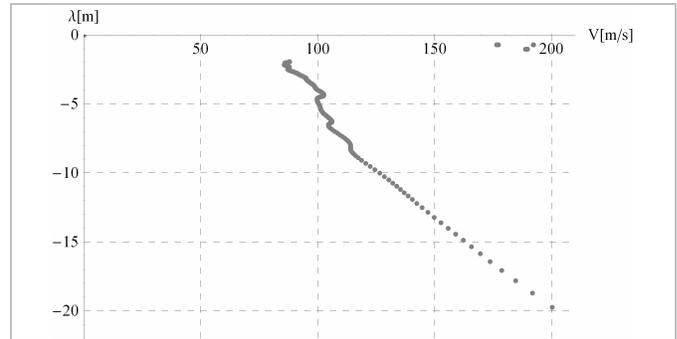


Figura 72: Curva de dispersión en función de la longitud de onda para transductores con separación de 1m, ensayo VI.

3.4.7 Curva de dispersión global

La curva de dispersión global representa en un solo gráfico las curvas de dispersión locales obtenidas para las distintas separaciones entre transductores y para ambos sentido de ensayo. Dicha curva es la información necesaria para poder calcular el perfil del terreno a través de un análisis inverso como se explica a continuación.

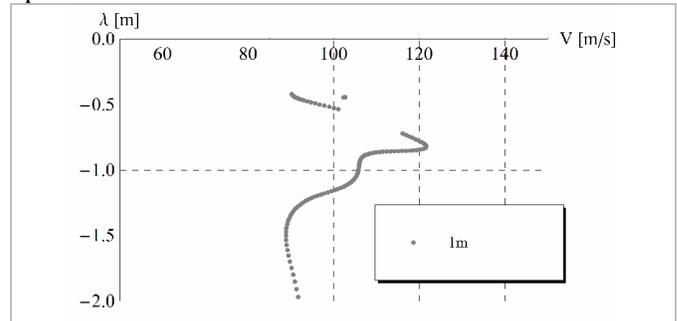


Figura 73: Curva de dispersión local, separación 1m, ensayo VI.

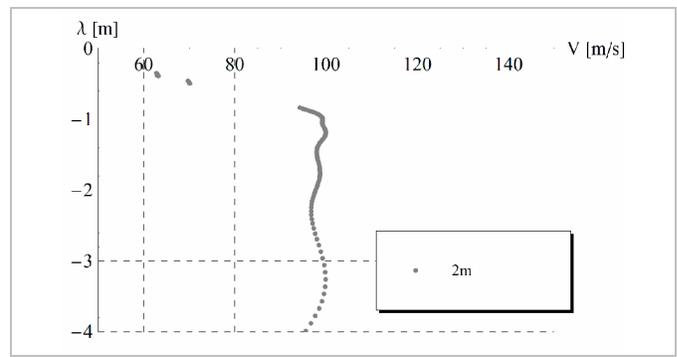


Figura 74: Curva de dispersión local, separación 2m, ensayo VI.

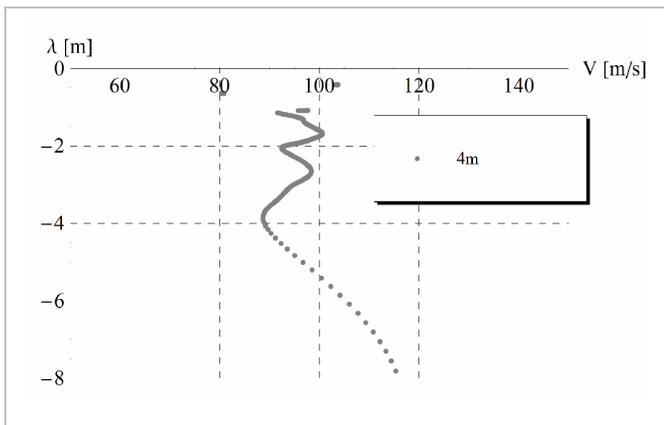


Figura 75: Curva de dispersión local, separación 4m, ensayo VI.

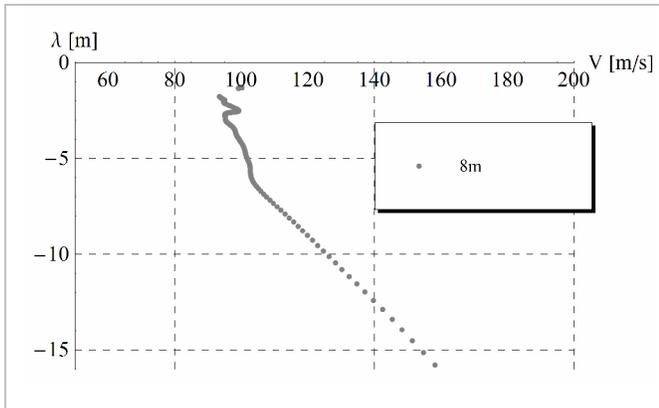


Figura 76: Curva de dispersión local, separación 8m, ensayo VI.

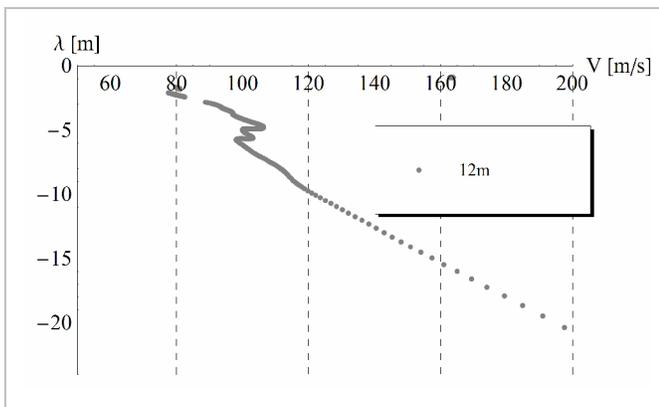


Figura 77: Curva de dispersión local, separación 12m, ensayo VI.

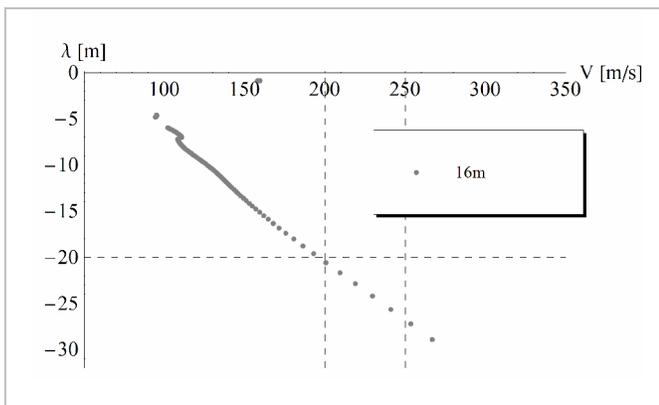


Figura 78: Curva de dispersión local, separación 16m, ensayo VI.

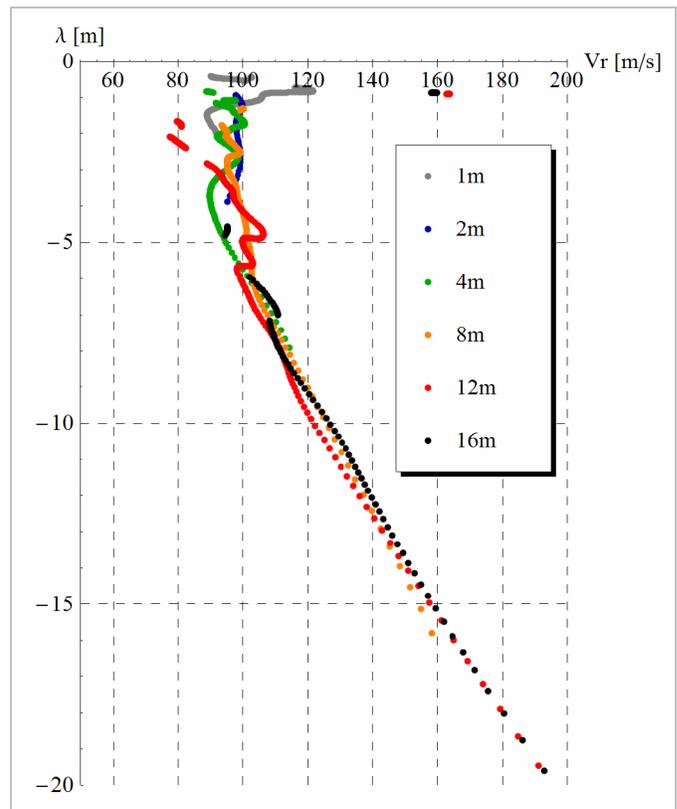


Figura 79: Curva de dispersión global, ensayo VI, dirección norte.

3.4.8 Proceso de Inversión

El proceso de inversión es el último paso del ensayo. Consta de la obtención de los parámetros del modelo de capas horizontales a partir de la curva de dispersión experimental global.

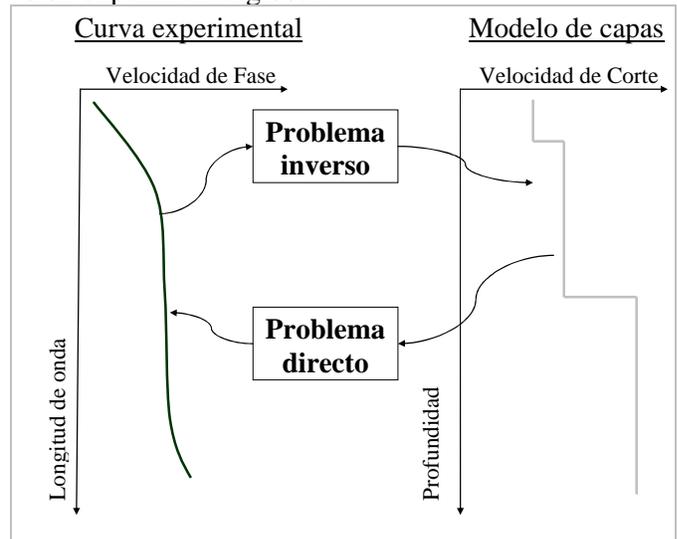


Figura 80: Problema directo e inverso en SASW.

Cualquier información sobre el sitio es muy importante para establecer limitaciones en la solución. Contar con datos aproximados acerca de la posición de interfaz acelera la convergencia en el proceso de inversión.

Se emplean dos procedimientos: uno empírico y otro teórico.

La inversión empírica es la técnica empleada en la *Steady-state Rayleigh method*. Se calcula el perfil de velocidades a partir de un cambio de escala de la curva de dispersión. (Figura 81). El frente de ondas debe ser plano para que sea aplicable la inversión.

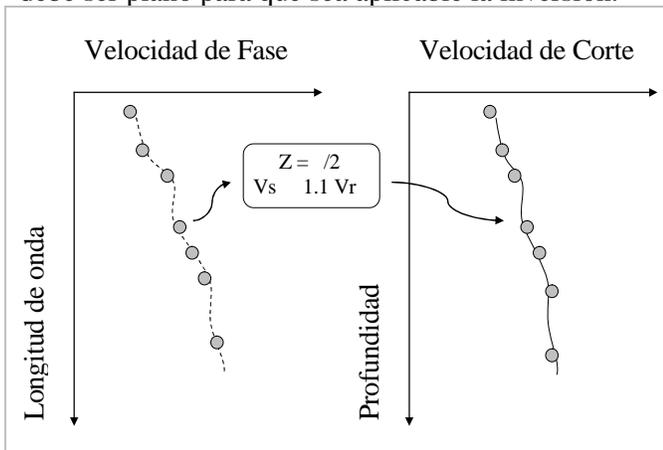


Figura 81: Determinación del perfil de velocidades de corte por el método de *Steady-state Rayleigh method*.

Si se considera que la velocidad de ondas Rayleigh es muy parecida a las de corte en un medio homogéneo se puede asumir

$$V_{corte} = 1.1V_{rayleigh} \quad (51)$$

Cuando el terreno es inhomogéneo es necesario asignar una profundidad a la cual se manifiesta la velocidad de corte calculada. Para un terreno normalmente dispersivo cuya rigidez aumenta con la profundidad de manera lineal o exponencial se encuentran las siguientes relaciones (Orozco, 2003).

Si el incremento de la rigidez al corte es exponencial entonces

$$H_{equivalente} = \lambda / 3 \quad (52)$$

si el incremento de la rigidez al corte es lineal entonces

$$H_{equivalente} = \lambda / 2 \quad (53)$$

El siguiente procedimiento es el teórico que utiliza la teoría de la propagación de ondas que posibilita el estudio de terrenos con estratigrafías complejas. Por la falta de linealidad en la resolución del problema directo, la inversión teórica no puede ser resuelta directamente y debe ser llevada a cabo de manera iterativa, resolviendo varias veces un problema directo hasta que la curva de dispersión teórica sea similar a la experimental mediante un criterio de comparación.

Los procedimientos que existen para realizar dicha comparación son del tipo local o global.

El procedimiento local trata de minimizar la diferencia que existe entre la curva de dispersión experimental y la curva de dispersión con parámetros a priori asumidos de manera local. Para poder asegu-

rar la convergencia es necesario que los parámetros asumidos sean cercanos a los de la solución.

El procedimiento global trata de minimizar la diferencia que existe entre la curva de dispersión experimental y la curva de dispersión con parámetros a priori asumidos de manera global por medio de varias simulaciones. Encontrar la solución por este procedimiento puede ser muy costoso ya que la inversión en el SASW es no lineal.

A continuación se estudia la cantidad de variables a determinar por estos procedimientos. (Orozco, 2003). El modelo que se adopta se encuentra conformado por L capas con parámetros (H - - G -), donde la última capa es considerada como un semi-espacio. La cantidad total de incógnitas M a resolver del sistema son

$$M = 4L - 1 \quad (54)$$

En los programas comerciales de inversión del SASW se puede optar entre la solución 2-D o 3-D. La solución 2-D corresponde a la propagación de ondas de Rayleigh en su primer modo de frente de ondas plano y sin la consideración de ondas de volumen. Dicha formulación trae buenos resultados cuando la variación de la velocidad al corte es gradual (Joh, 1996).

La solución 3-D representa la superposición de los diferentes modos de propagación de ondas de Rayleigh de frente cilíndrico y con la incorporación de las ondas de volumen. Esta es considerada como la mejor solución teórica del SASW (Joh, 1996).

3.4.9 Procedimiento de ensayo

Se resume el procedimiento en el siguiente diagrama de bloque.

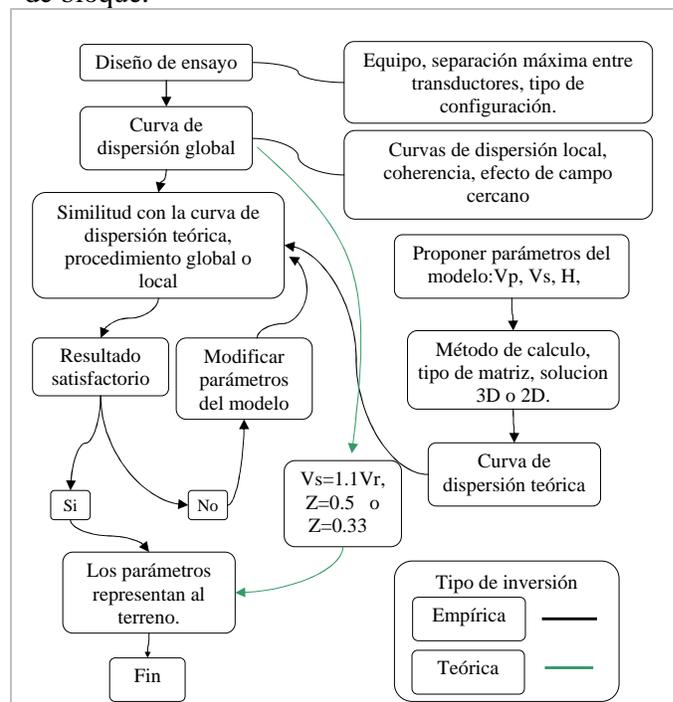


Figura 82 : Esquema general de procedimiento.

3.5 Equipo de Ensayo

El equipo de ensayo tanto como para sísmica de refracción y como para SASW se encuentra conformado por: transductores, un mecanismo de impacto, un sistema de adquisición de datos, software, cables y un sistema disparador.

3.5.1 Transductores

Los transductores son las unidades que están en contacto directo con la superficie del terreno y que convierten las vibraciones de la superficie en señales eléctricas. Los más empleados son los geófonos y acelerómetros.

Un geófono de tipo electromagnético consta de una bobina que se mueve en un campo magnético provocado por un imán suspendido. Al vibrar, se produce un movimiento relativo entre la bobina y el campo magnético del imán, de modo que la tensión inducida resulta proporcional a la velocidad del movimiento (Figura 83). (Dobrin, 1975).

La sensibilidad del instrumento depende de la fuerza del imán, de la cantidad de espiras de la bobina y de la configuración del sistema.

Se los distingue por su frecuencia natural, información propia del instrumento que indica el orden de frecuencias en el cual puede ser utilizado. Si las vibraciones que se miden están cerca de la frecuencia natural, la lectura registrada se altera tanto en amplitud como en tiempo.

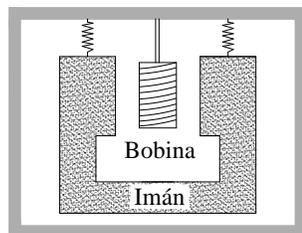


Figura 83: Esquema de geófono

La respuesta de los geófonos está caracterizada por las curvas de “velocidad vs frecuencia” y “desfase vs frecuencia”. En la figura 84a se observa como se ve afectada la amplitud de onda; en la figura 84b como se ve afectada la fase. En ambos casos se graficó la respuesta para diferentes amortiguamientos relativos. Una forma de modificar esta respuesta es a través de la utilización de resistencias “shunt resistor” (Foti, 2000).

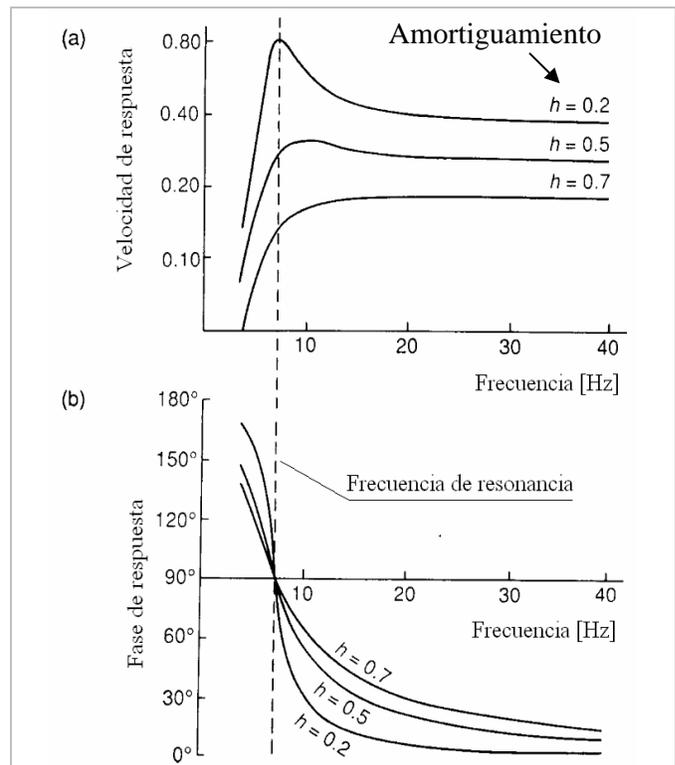


Figura 84: Curvas de respuestas del geófono, a) respuesta de velocidad, b) respuesta de la fase. (Foti, 2000).



Figura 85: Geófono de 5 Hz



Figura 86: Geófono de 18 Hz



Figura 87: Velocímetro de 30 Hz

3.5.2 Fuente de ondas

La fuente de ondas se puede clasificar en activa o pasiva. Una fuente activa genera ondas – por ejemplo mediante un impacto - mientras que una fuente pasiva está constituida por las ondas generadas por el ambiente.

Las fuentes activas se clasifican como continuas o de impulso; la energía entregada dependerá de la profundidad de que se quiera investigar.

Existen diferentes sistemas mecánicos para generar el impacto: martillo de 6 o 8 Kg, pesas de 60 o 80 Kg, explosivos o camiones vibradores.

En la figura 88 se muestra la maza de 8Kg, pesa de 10kg y placa metálica utilizada en los ensayos.



Figura 88: Maza de 8 Kg; pesa de 10 Kg; placa metálica



Figura 89: Pesa de 70 Kg



Figura 90: Explosión



Figura 91: *Thumper* (Stokoe, 2006)



Figura 92: *Liquidator* (Stokoe, 2006)



Figura 93: *T-Rix* (Stokoe, 2006)

La señal es afectada por la placa que se interpone entre el martillo y el terreno. Para comprobar este efecto, se registró la respuesta para distintas superficies de contacto: placa metálica, placa de madera, guía telefónica e impacto directo sobre el terreno. Para estos cuatro materiales, no se visualizó un cambio en el tiempo de arribo de las ondas aunque sí ocurrieron cambios en el contenido de frecuencias.

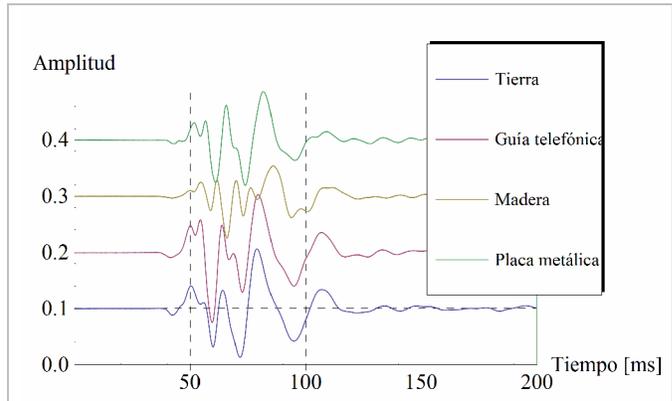


Figura 94: Registro para distintas superficies de contacto.

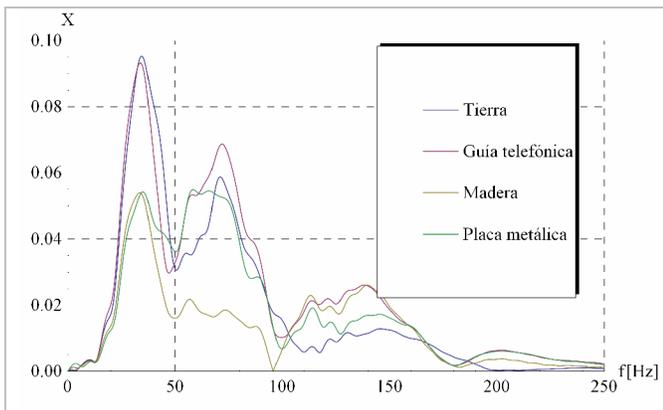


Figura 95: Variación en la energía espectral de un geófono a 6m por el cambio de la placa de contacto

3.5.3 Sistema de adquisición de datos

El hardware es un módulo adquisidor multifunción de 200 K S/s, 16 Bit y de 16 canales, asociado con el software LabVIEW. Este módulo puede realizar una variedad de funciones y conversiones analógicas - digitales (A/D) y operaciones del contador / temporizador.

Cuando se miden señales analógicas se debe considerar los siguientes factores que afectan la calidad de la señal digitalizada: modo (terminal común y diferencial), resolución, rango, frecuencia de muestreo y ruido.

El modo de conexión de la placa terminal es tierra común (compartida) es como se muestra en la figura 95. La conexión a cada canal es unipolar; la tensión medida está referida a una puesta a tierra común del sistema. Estas entradas se pueden utilizar cuando las señales son altas, los cables que corren desde la fuente de la señal hacia el hardware de entrada analógica son cortos y todas las entradas comparten una referencia de tierra común. Si las señales no cumplen con estas condiciones, se utilizan las entradas diferenciales. Con entradas diferenciales, cada entrada tiene diferentes potenciales con respecto a tierra. Las entradas diferenciales también reducen o eliminan los errores causados por ruido, ya que el ruido adquirido en modo anterior por las señales se cancela.

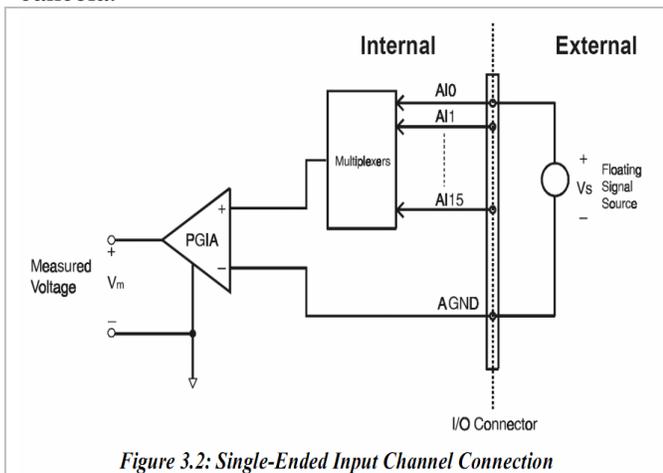


Figure 3.2: Single-Ended Input Channel Connection

Figura 95: Conexión con terminal común

La resolución es el número de bits que el convertidor analógico a digital utiliza para representar la señal analógica. Mientras mayor sea la resolución, mayor es el número de divisiones entre las cuales se divide el rango y por lo tanto, menor es el cambio detectable en el voltaje.

Se refiere como rango a los niveles de tensión máximo y mínimo que se puede adquirir. Se ofrecen rangos seleccionables (por lo general de 0 a 10 V o de - 10 a 10 V), por lo que puede ajustar el rango de la señal para aprovechar al máximo la resolución disponible para medir la señal con mayor precisión.

La ganancia se refiere a cualquier ampliación o atenuación de la señal que pueda ocurrir antes que la señal sea digitalizada. Al aplicar ganancia a la señal se disminuye efectivamente el rango de entrada y, por lo tanto, se permite que se utilice tantas divisiones digitales como le sea posible para representar a la señal.

El rango, la resolución y la ganancia disponible determinan el menor cambio detectable en la entrada de tensión. Este cambio en tensión representa un bit menos significativo (LSB) de valor digital y es usualmente llamado ancho de código.

La frecuencia de muestreo determina qué tan seguido van a ocurrir las conversiones analógico-digitales. Una frecuencia de muestreo rápida adquiere más puntos en un momento determinado y por lo tanto puede ofrecer una mejor representación de la señal original que una frecuencia de muestreo lenta. Todas las señales de entrada deben ser muestreadas a una frecuencia de muestreo lo suficientemente rápida para reproducir fielmente la señal analógica. El muestreo lento puede resultar en una representación pobre de la señal analógica. Los efectos de una frecuencia de muestreo muy lento producen una señal aparente con una frecuencia distinta a la verdadera.

La implementación del software de adquisición de datos ha sido realizada utilizando la herramienta Labview 8.2. Esta herramienta permitió convertir la información análoga adquirida en un formato digital compatible con las necesidades de análisis, así como para poder presentar adecuadamente los registros sísmicos.

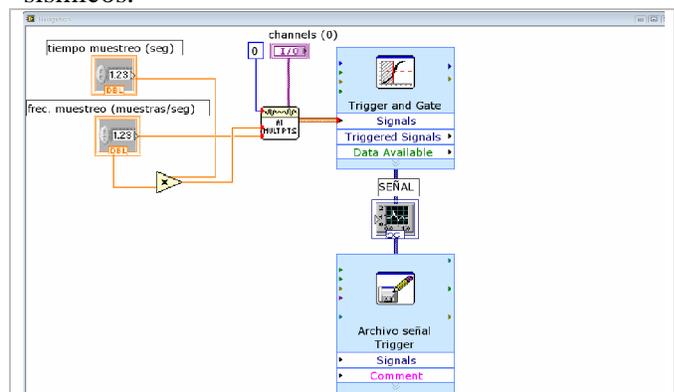


Figura 96 : Esquema de implementación del Labview 8.2.

3.5.4 Sistema de disparo

El sistema de disparo permite la sincronización de múltiples ensayos, requerida para el acondicionamiento de las señales y para la reducción de ruidos.

La sincronización se realizó de dos maneras diferentes: por medio de la correlación analítica con los registros del primer geófono y mediante un circuito abierto entre la placa metálica, el martillo y las baterías. Cuando se cierra el circuito – por el contacto entre la placa y el martillo – se registra un cambio de tensión que indica el momento del impacto del martillo en el terreno (Figura 97).

El sistema incorporó un circuito eléctrico de respuesta constante que indica si el circuito está abierto con 0.1 Vol o cerrado mediante un salto de tensión de 4 Vol. (Figura 98). Este sistema mejora la calidad de reconocimiento del inicio del ensayo.

El circuito eléctrico fue creado en Laboratorio de Circuitos Electrónicos LACE según la especificación del anexo.

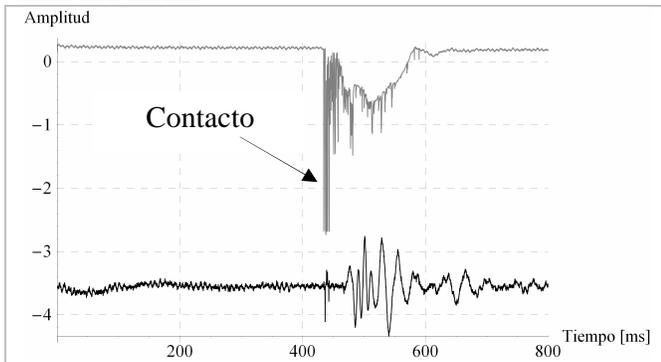


Figura 97: Respuesta del circuito compuesto por martillo, placa y batería.

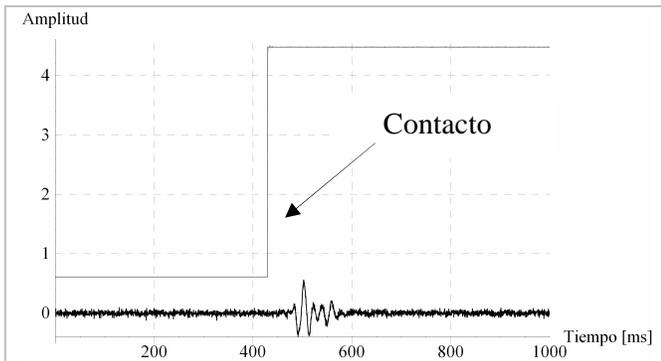


Figura 98: Respuesta del circuito eléctrico

3.5.5 Cables

Los cables son los portadores de las señales eléctricas entre los transductores y el sistema de adquisición. La fuente de error más común que introducen los cables es la captación de ruido ambiente.

La entrada de ruido ambiente depende del tipo de cable y de vibraciones externas al ensayo que provienen de la presencia de personal cercano, vehículos, maquinas de construcción, aviones, estructuras enterradas como también campos eléctricos generados por líneas de alta tensión.

Se deben tomar las precauciones necesarias para la que la conexión transductor/cable sea resistente al agua, ya que la señal se deteriora significativamente cuando hay contacto con agua de lluvia o pasto mojado (ASTM D5777, 2000).

En este trabajo se alcanzó una buena calidad de señal mediante el empleo de cables coaxiales. En la siguiente figura se muestra la diferencia de captación de ruido ambiente con cables coaxiales y comunes, para un ambiente de trabajo urbano típico. El cambio del cable hizo disminuir en un 80% el valor máximo del ruido.

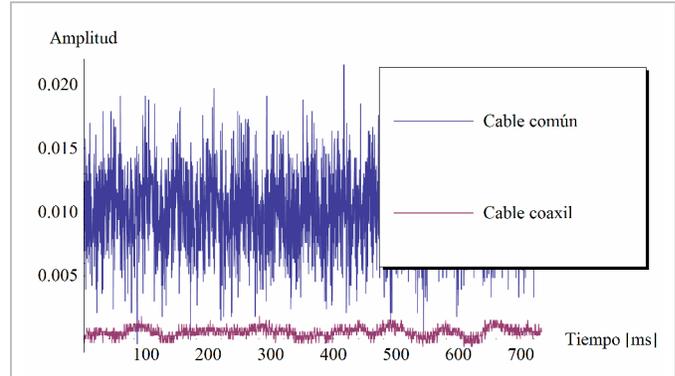


Figura 99: Registro de ruido ambiente con cables común y coaxial.

4 PROCESAMIENTO DE SEÑALES

4.1 Digitalización de señales

La digitalización de señales es el proceso por el cual se logra registrar de una señal continua una señal discreta que describe el mismo fenómeno físico para su posterior procesamiento.

Las vibraciones que ocurren en la superficie del terreno por la aplicación de las técnicas sísmicas son consideradas señales continuas en el dominio del tiempo. Al ser digitalizadas se obtiene una señal representada por una cantidad finita de puntos en un tiempo determinado.

Para digitalizar una señal se debe elegir una frecuencia de muestreo que indique la cantidad de muestras a registrar por unidad de tiempo. La selección de esta frecuencia es muy importante ya que trae consecuencias en el registro de la señal como se visualiza en las figura 100 y figura 101. En la primer figura la frecuencia de muestreo adoptada es correcta para representar la señal en cambio, en la segunda figura la frecuencia de muestreo es tal que la señal digitalizada no representa la señal continua del fenómeno (Santamarina y Fratta, 1998).

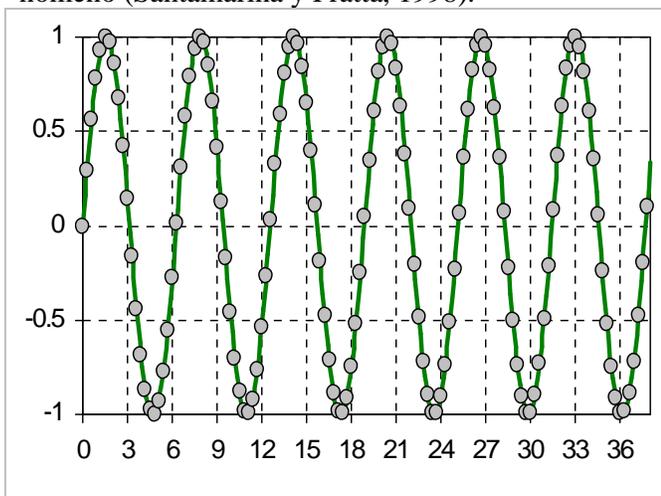


Figura 100 : Discretización de una señal continua al aplicar el teorema de Nyquist-Shannon.

Según el teorema de muestreo de Nyquist-Shannon, para poder reproducir con exactitud la forma de una señal continua es necesario que la frecuencia de muestreo sea superior al doble de la máxima frecuencia de la muestra

$$f_{\text{muestreo}} \geq 2f_{\text{de la muestra}} \quad (55)$$

Si se utiliza una frecuencia menor a la establecida por el teorema, se produce una distorsión conocida como *aliasing*; algunos autores traducen este término como solapamiento. El *aliasing* impide recuperar correctamente la señal cuando las muestras de ésta se registran a intervalos de tiempo demasiado largos (Figura 101).

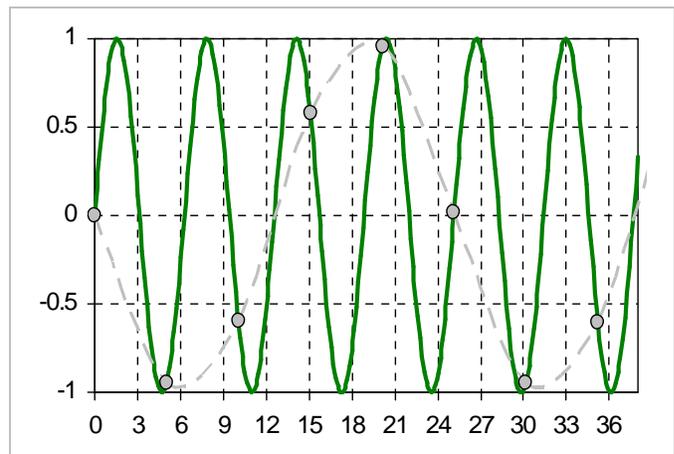


Figura 101 : Fenómeno de *aliasing*.

La frecuencia de muestreo según Nyquist-Shannon es un mínimo que debe ser respetado, de todas maneras en la práctica se recomienda una mayor tasa de muestreo tal que se registren aproximadamente 10 puntos por ciclo. (Santamarina y Fratta, 1998). El elegir una frecuencia de muestreo superior a la propuesta por Nyquist-Shannon, trae como consecuencia una mayor cantidad de muestras que el sistema adquirente de datos debe ser capaz de almacenar, como también aumenta el ruido en la señal ya que la máxima frecuencia a registrar es igual a la mitad de la frecuencia de muestreo seleccionada.

Para conocer la frecuencia de la muestra que es desconocida se calcula el contenido de frecuencias del registro de un transductor ubicado a 1m del impacto y como se puede observar, la máxima frecuencia registrada por el espectro de energía y el espectrograma es de aproximadamente 200Hz.

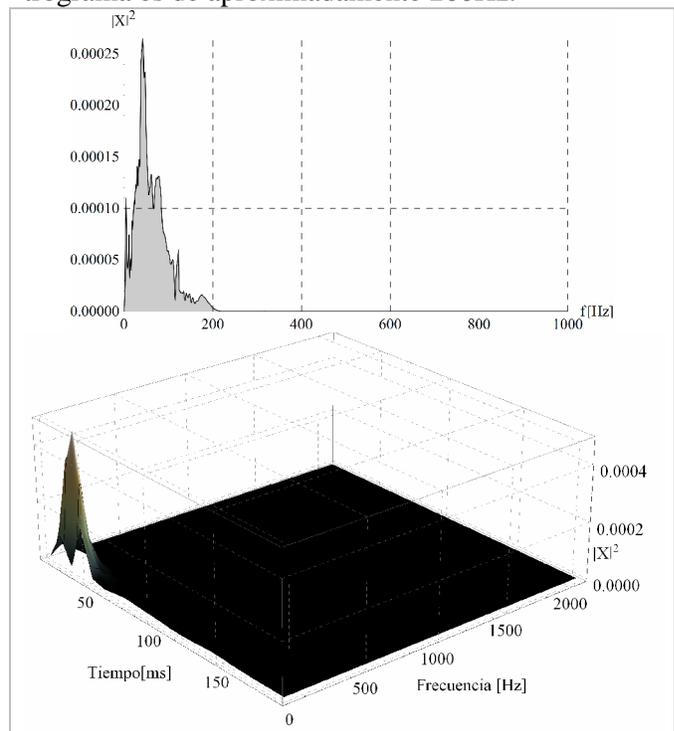


Figura 102 : Espectro de energía y espectrograma, se observa que las ondas provocadas por el impacto no superan los 200Hz.

Aunque se muestre un solo ejemplo se obtuvo una respuesta similar en la totalidad de los ensayos. En los ensayos realizados en éste trabajo se adoptaron frecuencias de muestreo mayores a 3KHz por la falta de conocimiento del contenido de frecuencias de las ondas provocadas por el impacto en la superficie. Luego del estudio de varios de los registros se recomienda para este tipo de ensayo una frecuencia de muestreo que pueda como máximo registrar ondas de frecuencias de 200Hz, por lo que la frecuencia de muestreo se encuentra entre 400Hz y 2KHz.

4.2 Transformada discreta de Fourier

En 1822 un matemático francés, el barón Jean Baptiste-Joseph Fourier, publicó el tratado Teoría analítica del calor, donde sentó las bases del hoy llamado ‘análisis armónico’ o también ‘análisis de Fourier’. Fourier descubrió que fenómenos complejos pueden ser descompuestos en componentes muy simples, como las funciones trigonométricas ‘seno’ y ‘coseno’, de distinta amplitud y frecuencia.

Su importancia radica en la transformación de señales de manera que permita obtener nueva información que antes no era evidente a simple vista. Aunque se haya modificado su visualización, el fenómeno físico permanece intacto.

El requerimiento de la transformada de Fourier es que la señal a analizar pueda ser considerada como periódica (Figura 103) (Santamarina y Fratta, 1998).

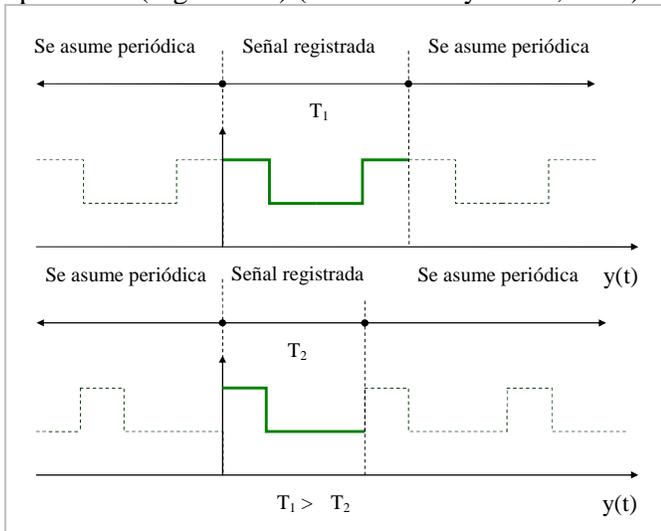


Figura 103 Implicancia de Fourier, se asume periódica la señal registrada.

La señal que se quiere analizar es transformada a una señal periódica constituida por una serie de senos y cósenos, con la posibilidad de ser reversible y de no perderse información al aplicarse. La transformada de Fourier puede ser escrita como

$$y_1(t) \xrightarrow{\text{Fourier}} Y_1(f) = A_1(f) e^{i\phi_1(f)} \quad (56)$$

si se reemplaza por las identidades de Euler:

$$e^{i\phi_1(f)} = \cos(\phi) + i \sin(\phi) \quad (57)$$

$$y_1(t) \xrightarrow{\text{Fourier}} Y_1(f) = A_1(f) (\cos(\phi) + i \sin(\phi)) \quad (58)$$

4.2.1 Espectro de frecuencias

El espectro de frecuencias es la descripción de una señal por medio de su contenido de frecuencias. Los utilizados en esta tesis son: energía espectral, espectro cruzado, espectro de fase. Lo importante a visualizar en estos gráficos son los puntos máximos ya que denotan las ondas dominantes en todo el registro.

La figura 104 se muestra el caso de dos ondas de igual amplitud que ocurren en tiempo distintos. La transformada convierte la forma de la onda del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia y comprime toda la información de las dos ondas sinusoidales de tiempo infinito a solo dos puntos. El espectro evidencia dos picos, de los cuales el de la baja frecuencia prevalece por su mayor energía, y aunque las ondas sean de igual amplitud ésta última recorre un mayor tiempo.

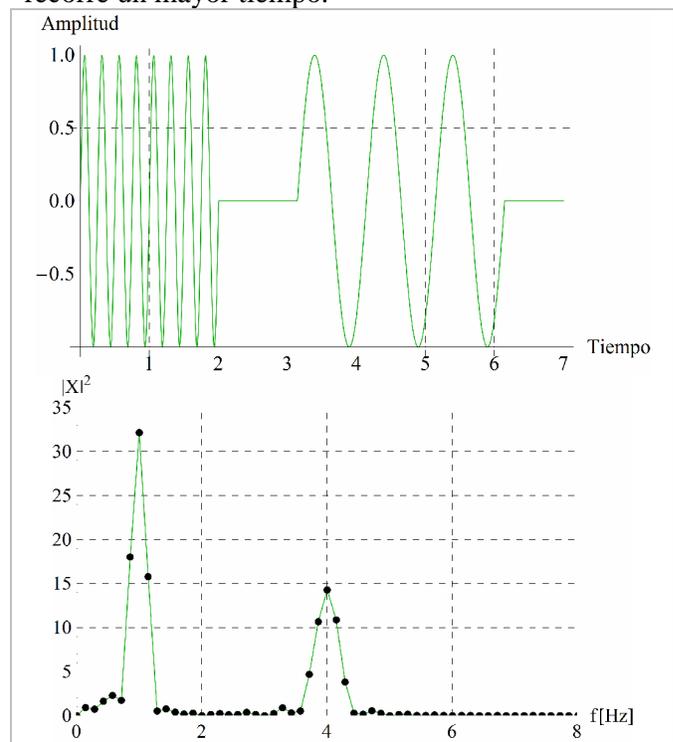


Figura 104 : a) Respuesta en el tiempo de ondas sinusoidales; b) Energía espectral.

4.2.2 Resolución

La resolución en el dominio del tiempo de un registro está definida como el intervalo de tiempo entre dos puntos consecutivos, denominado como el intervalo de muestreo \$\Delta t\$, con un tiempo máximo del registro de \$T_{\max} = N \Delta t\$ con \$N\$ muestras. La menor frecuencia a registrar será \$f_{\min} = 1 / (N \Delta t)\$ y sus respectivos armónicos \$f_u = u / (N \Delta t)\$.

Si la resolución en frecuencia es determinada por el intervalo entre dos armónicos consecutivos, entonces

$$\Delta f = f_{u+1} - f_u = \frac{1}{N\Delta t} \rightarrow N = \frac{1}{\Delta f \Delta t} \quad (59)$$

Esta formulación proviene del principio de incertidumbre, que indica que para una cierta cantidad de muestras N , la resolución en frecuencia solo podrá ser mejorada a expensas de la resolución en tiempo.

Una de las aplicaciones de este principio es el de "Zero padding" que mejora la resolución en frecuencia de un registro luego de su muestreo (Santamarina y Fratta, 1998). Consta en agregar ceros en la cola del registro ya que no se agregan frecuencias espurias, y se mejora la resolución en frecuencia como se visualiza en la figura 105. También se puede agregar ceros al comienzo del registro, pero se debe tener presente que trae aparejado un desfase de las ondas.

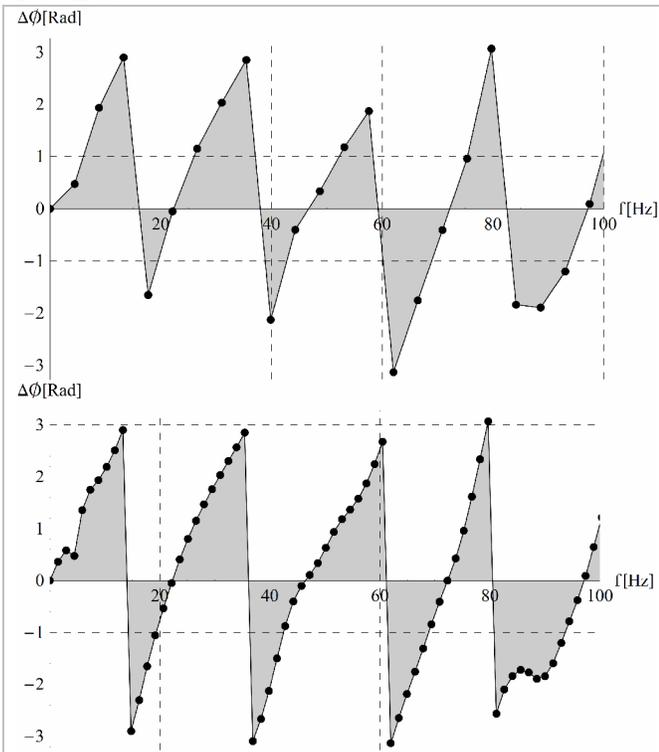


Figura 105 : Mejora en la resolución de frecuencias por la aplicación de Zero padding en el argumento del espectro cruzado del registro entre dos traductores a 4m.

4.2.3 Ventana

La ventana es una señal adicional a la señal que se quiera analizar y puede ser cuadrada, exponencial, etcétera. Se utiliza para registrar señales o para el procesamiento de las mismas.

En la figura 106 se observa la misma onda pero con diferentes espectros, esto se debe a la falta de periodicidad del segundo ejemplo. Una de las formas de atenuar este efecto es por medio de una ventana de Hanning, que al multiplicarse con la señal del segundo ejemplo se convierte en una señal que puede ser considerada como periódica, de tal manera se co-

rige el espectro a costas de una disminución en el en la energía (Figura 107).

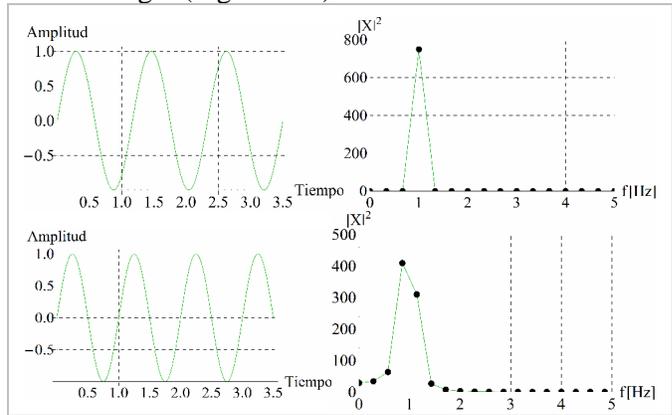


Figura 106 : Modificación en el espectro por falta de periodicidad.

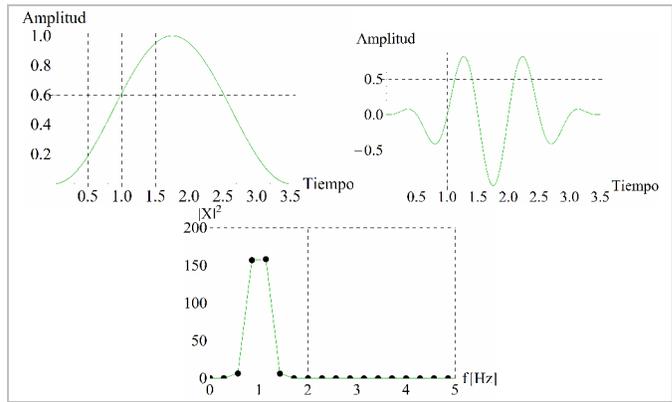


Figura 107 : Mejoramiento en la respuesta del espectro por la aplicación de la ventana de Hanning.

4.2.4 Espectrograma

El espectrograma es la herramienta que se utiliza para poder distinguir el tiempo en el arribo al transductor de las distintas ondas descompuestas en sus espectros de frecuencia.

El espectrograma básicamente utiliza la transformada de Fourier en diferentes porciones del registro y luego proporciona el tiempo medio de cada porción como también el contenido de frecuencias. Entonces se deben tomar diferentes partes del registro como se grafica en la siguiente figura.

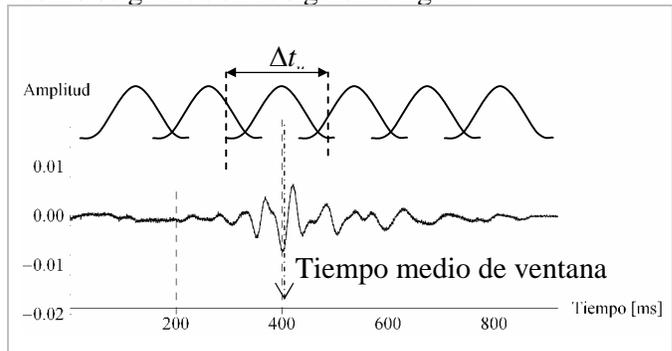


Figura 108 : Esquema para la obtención de diferentes porciones del registro por medio de ventanas de Hanning.

La forma analítica de obtener partes del registro es por medio de la multiplicación con otra señal, mayor

que cero en la parte que se quiera estudiar y nula en el resto.

Si cada porción se obtiene por la aplicación de una ventana rectangular se distorsionaría el espectro por falta de periodicidad, por lo tanto se utilizó una ventana de *Hanning* para atenuar este error.

El resultado de espectrograma se puede visualizar tanto en 2D como en 3D. La siguiente figura en 3D es el espectrograma de la figura 109.

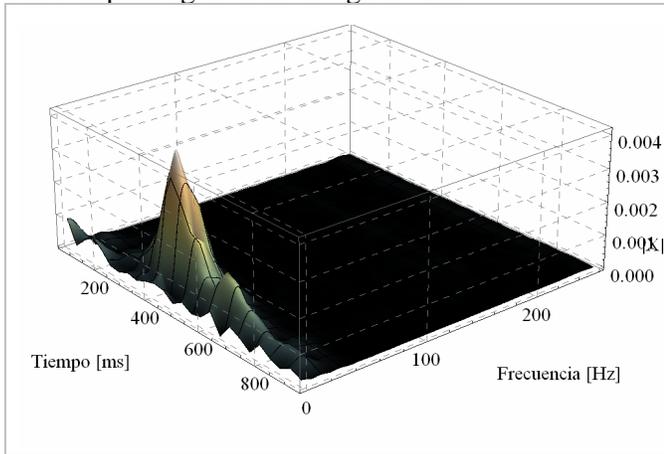


Figura 109 : Respuesta del espectrograma 3D para un geófono distanciado 32m del impacto.

4.3 Promedio de señales

El promediar señales es una herramienta que sirve para atenuar el ruido ambiente. Consiste en promediar punto a punto la información de varias señales para cancelar la componente aleatoria.

Se verificó experimentalmente la repetitiva del ensayo que permite la utilización de esta técnica como se visualiza en la siguiente figura.

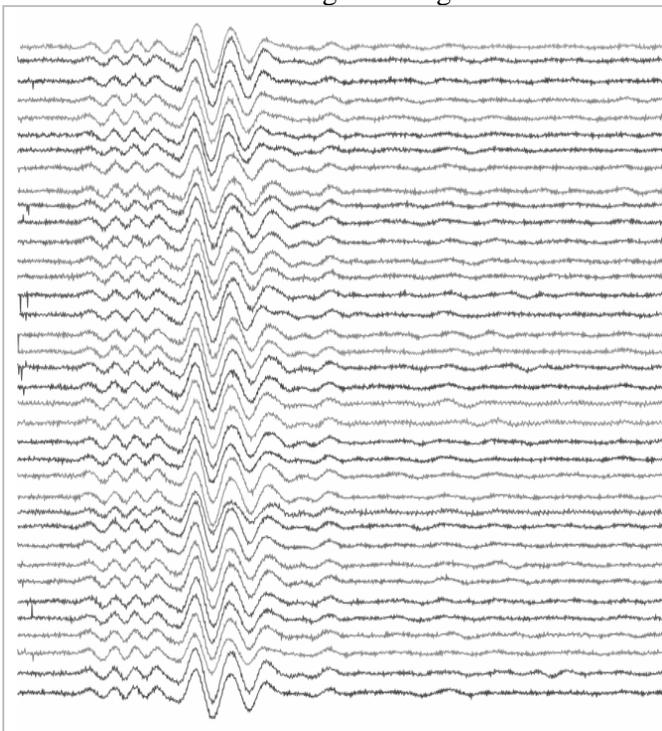


Figura 110: 37 ensayos que muestran una respuesta similar del medio

Promediar las señales sirve solo para la atenuación del ruido ambiente por ser considerado aleatorio al ensayo, y la relación Señal/Ruido crece en función de la cantidad de ensayos realizados según \sqrt{n} como muestra en la siguiente figura (Santamarina y Fratta, 1998).

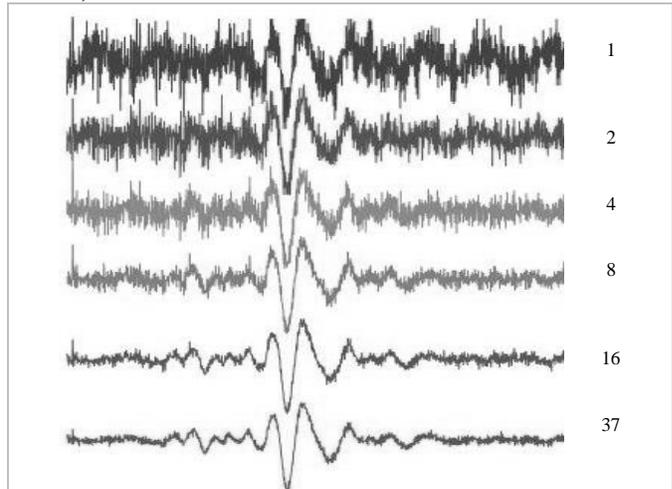


Figura 111: Mejora de la señal por calcular el promedio entre los registros de varios ensayos.

4.4 Correlación analítica

La correlación analítica es una herramienta que sirve para sincronizar diferentes ensayos al utilizar la señal registrada por el primer transductor. Las señales deben ser similares ya que la técnica se basa en el desplazamiento de una señal con respecto a las otras hasta que se obtiene la mejor coincidencia (Santamarina y Fratta, 1998).

En la figura 112, el desfase entre dos señales discretas es un cierto tiempo constituido por k elementos. Para hallar k se desplaza la primera señal y se calcula el error cuadrático de la resta de ambas señales. El desplazamiento es progresivo, hasta encontrar el mínimo error, que corresponde al k que debe moverse la señal (Figura 113). El resultado puede visualizarse en la figura 114 y la función correlación entre las señales se expresa mediante

$$Ccm(k) = \sum_i (x_i - z_{i+k})^2 \quad (60)$$

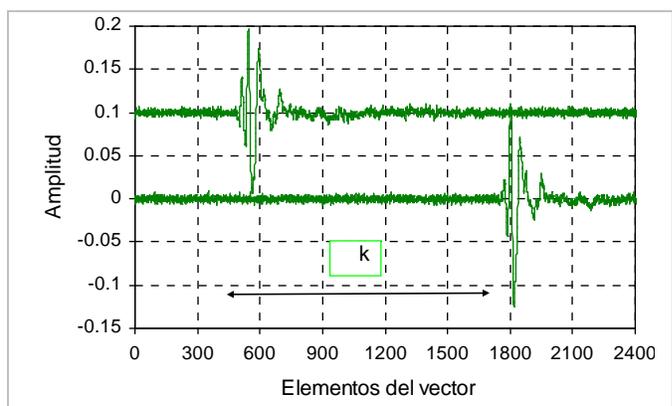


Figura 112 : Desfase entre señales

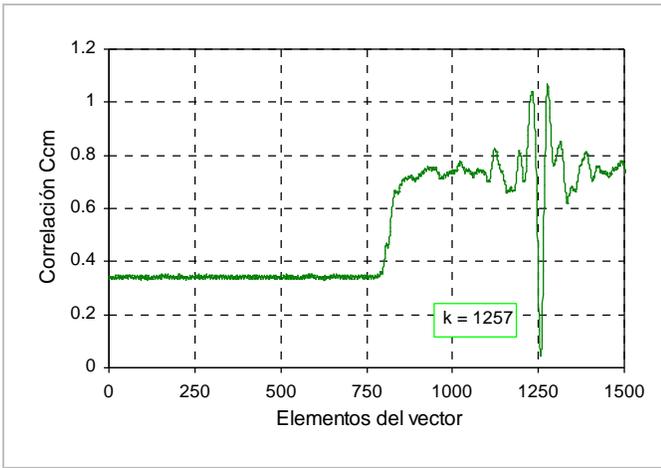


Figura 114 : Función correlación respecto a la cantidad de elementos corridos, el mínimo valor corresponde al k buscado.

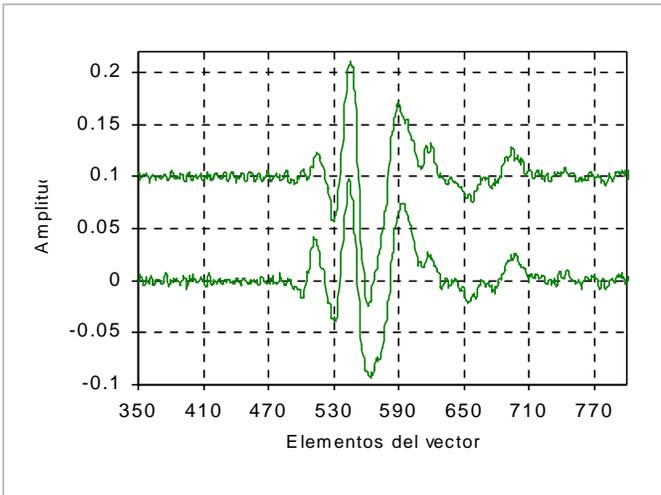


Figura 118 : Resultado por correlación analítica.

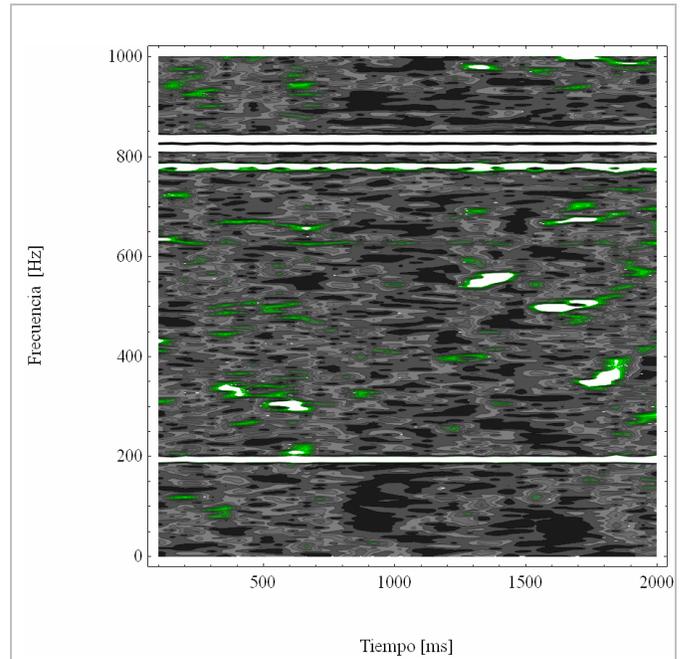


Figura 120 : Espectrograma del registro de ruido ambiente.

4.5 Ruido ambiente

El ruido ambiente es generado externamente por cualquier tipo de vibraciones, tráfico, maquinas, personas, viento, etc. Es aleatorio con respecto al ensayo.

En la figura 119 se muestra el registro de las vibraciones ambiente; el espectro revela frecuencias de mayor energía a partir de los 200 Hz; según el espectrograma en 2D dichas frecuencias de gran energía ocurren en todo momento (Figura 120).

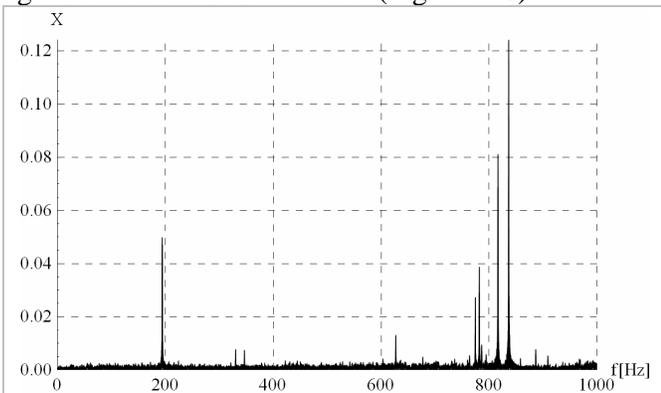


Figura 119 : Energía espectral del registro de ruido ambiente.

5 ENSAYOS DE CAMPO

5.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados de todos los ensayos de campo ejecutados, tanto de sísmica de refracción como de SASW.

5.2 Sísmica de refracción

Se efectuaron cinco ensayos en las siguientes ubicaciones:

- Estacionamiento de la facultad: I, II, III y IV
- Parque Thays: V

En las páginas siguientes se presentan las mediciones experimentales y los resultados de los análisis de señales. Los resultados principales de los ensayos se indican en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultado de los ensayos I, II, III y IV

	V ₁	V ₂	X _c	Z	E ₁	E ₂
Valor	367	712	10.3	2.51	1.22°	178 682
Error	34	54	3.0	0.81	0.58°	20 115
	9%	7%	30%	32%	47%	11% 15%

V [m/s]; X_c [m]; Z [m]; [deg]; E[MPa]; Error = dispersión entre los ensayos I, II, III y IV

Tabla 5. Resultado del ensayo V

	V ₁	V ₂	X _c	Z	E ₁	E ₂
Valor	331	910	6.0	2.05	6.34°	129 1062

V [m/s]; X_c [m]; Z [m]; [deg]; E[MPa];

5.3 SASW

Se efectuaron cinco ensayos en las siguientes ubicaciones:

- Tigre VI y VII
- Parque Thays: VIII y IX
- Estacionamiento de la facultad: X

También en este caso, en las páginas siguientes se presentan las mediciones experimentales y los resultados de los análisis de señales. Los resultados principales de los ensayos se indican en la Tabla 6.

Tabla 6. Resultado de los ensayos VI, VII, VIII, IX y X

	VI	VII	VIII	IX	X
V _r	75-250	75-200	125-225	120-350	150-275
f	10-200	10-100	10-100	20-80	25-100
	0.5-25	2-20	2-14	1-15	1.5-7
G	10-110	10-65	20-85	20-200	40-120
Z	0.25-13	1-10	1-7	0.5-8	1-5

V_r [m/s]; f [Hz]; [m]; Z [m]; G [Mpa]; Z [m];

El registro del ensayo V de sísmica de refracción de separación 2m entre geófonos, se utilizó posteriormente para obtención de la curva de dispersión del ensayo SASW. Es el ensayo IX de configuración de

impacto invariable y su resultado es disperso en comparación de la configuración del ensayo VIII, probablemente sea porque el suelo ensayado cambia a medida que cambia la posición de los geófonos.

La siguiente tabla muestra los valores del módulo de Poisson y del módulo Young obtenidos mediante las ecuaciones 16 y 17 respectivamente, entre los ensayos de sísmica de refracción y SASW. Solo se consideró para este cálculo el valor de V_p correspondiente a la primera capa y el valor de V_s correspondiente a la separación más chica entre transductores.

Tabla 7. Módulo de Young y Módulo de Poisson superficial

Sísmica de refracción	SASW	E ₁	ν
I, II, III y IV	X	95	0.39
V	VIII	93	0.36
V	IX	107	0.33

ν = Módulo de Poisson para las mínimas velocidades; E [MPa];

A continuación se muestra el resultado de un ensayo SPT realizado en las cercanías de los ensayos de SASW VI y VII.

El perfil que describe el SPT denota una capa superficial de mayor rigidez la cual disminuye para hacerse aproximadamente constante hasta los 4 metros, para luego aumentar con la profundidad (Figura 122). Las curvas de dispersión locales del ensayo VI muestran un estrato superficial de mayor rigidez (Figura 123), un estrato de comportamiento no dispersivo (Figura 124) y desde los 4m de longitud de onda crece la rigidez (Figura 125).

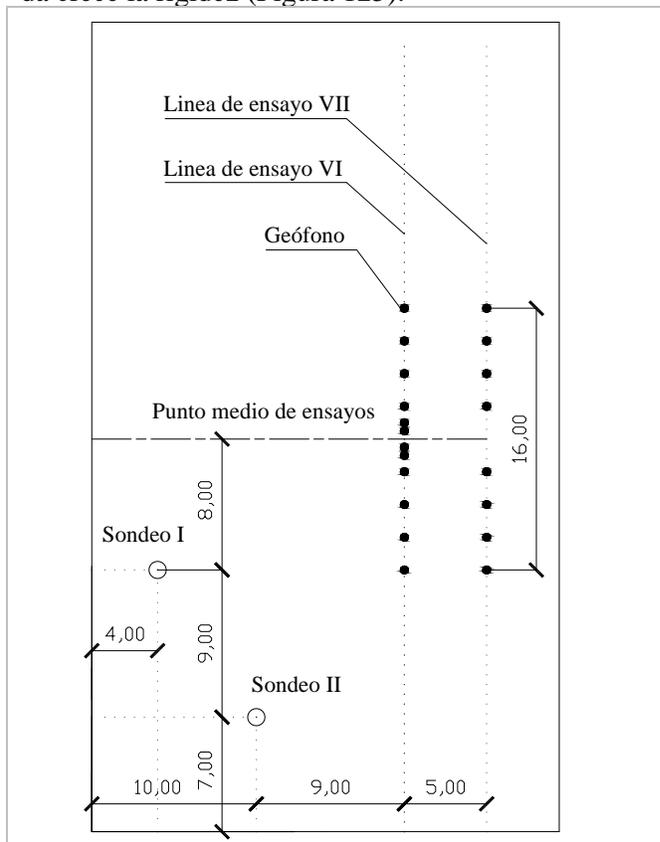


Figura 121: Ubicación del ensayo SPT y de los ensayos VI y VII.

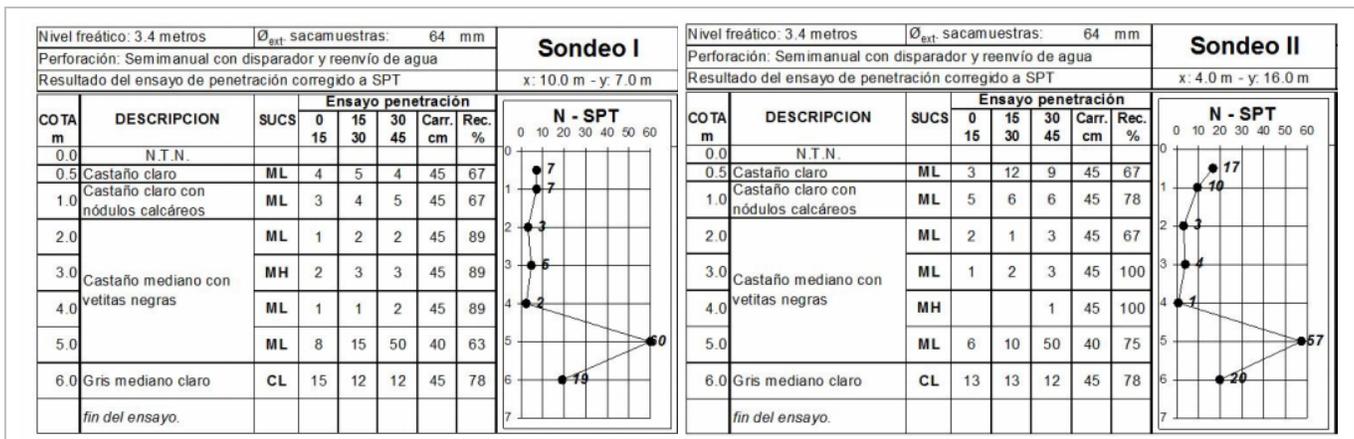


Figura 122: Ensayo SPT.

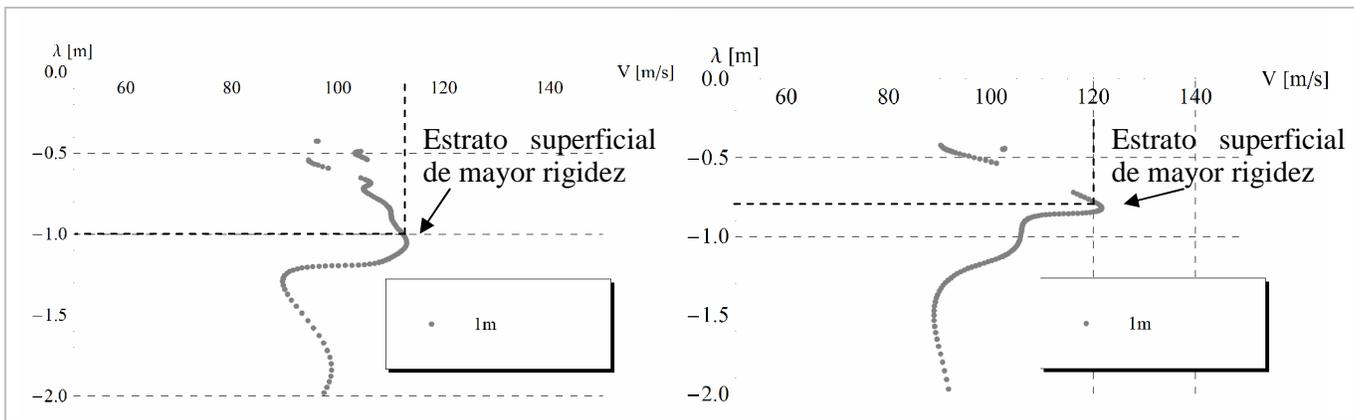


Figura 123: Curvas de dispersión locales para ambas direcciones de ensayo, separación 1m, ensayo VI.

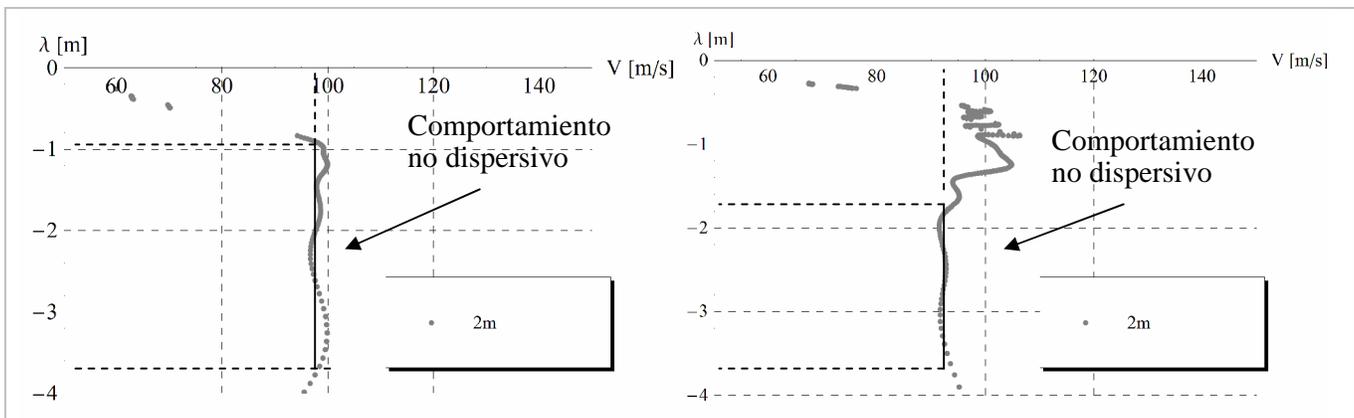


Figura 124: Curvas de dispersión locales para ambas direcciones de ensayo, separación 2m, ensayo VI.

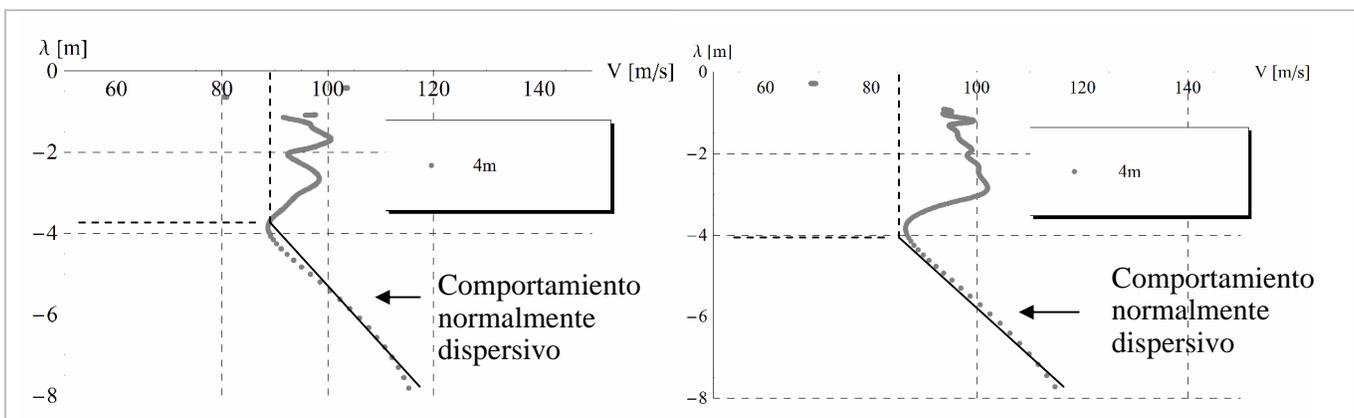


Figura 125: Curvas de dispersión locales para ambas direcciones de ensayo, separación 4m, ensayo VI.

Tabla 8. Resultado de ensayo I

Equipo	Fuente		Transductores		Cantidad de ensayos	Muestras por segundo		Correlación			
	Pesa 10Kg/Placa metálica		5 Geófonos de 5 Hz		11	3000		Análítica			
	Cables comunes		2 Pick up de 18Hz								
Resultados de ensayo	V ₁ m/s	V _{2u} m/s	V _{2d} m/s	V ₂ m/s	grados	X _c m	Z m	ρ gm/cm ³	ν	E ₁ MPa	E ₂ MPa
	344.83	686.30	663.62	659.96	1.40°	5.25	1.47	1.8	0.3	156	571

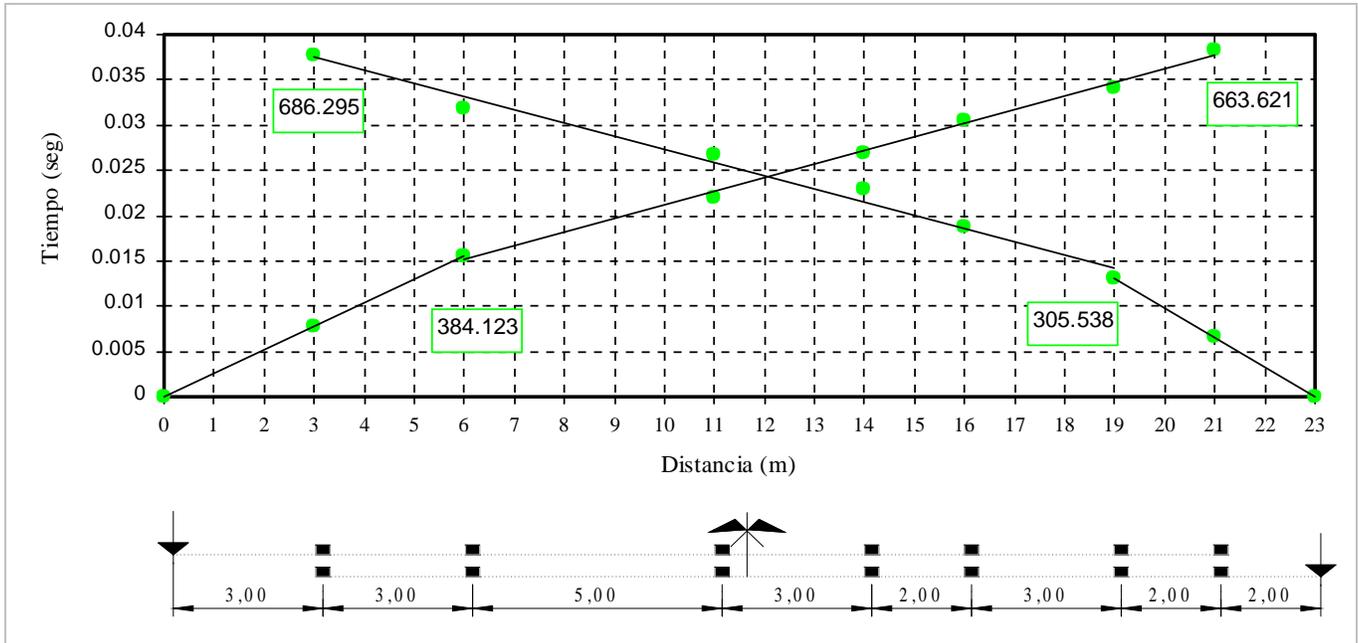


Figura 126: Ensayo I, Sísmica de refracción

Tabla 9. Resultado de ensayo II

Equipo	Fuente		Transductores		Cantidad de ensayos	Muestras por segundo		Correlación			
	Pesa 10Kg/Placa metálica		5 Geófonos de 5 Hz		10	3000		Análítica			
	Cables comunes		2 Pick up de 18Hz								
Resultados de ensayo	V ₁ m/s	V _{2u} m/s	V _{2d} m/s	V ₂ m/s	grados	X _c m	Z m	ρ gm/cm ³	ν	E ₁ MPa	E ₂ MPa
	334.17	800.93	730.27	765.60	1.33°	10.5	3.25	1.8	0.3	161	839

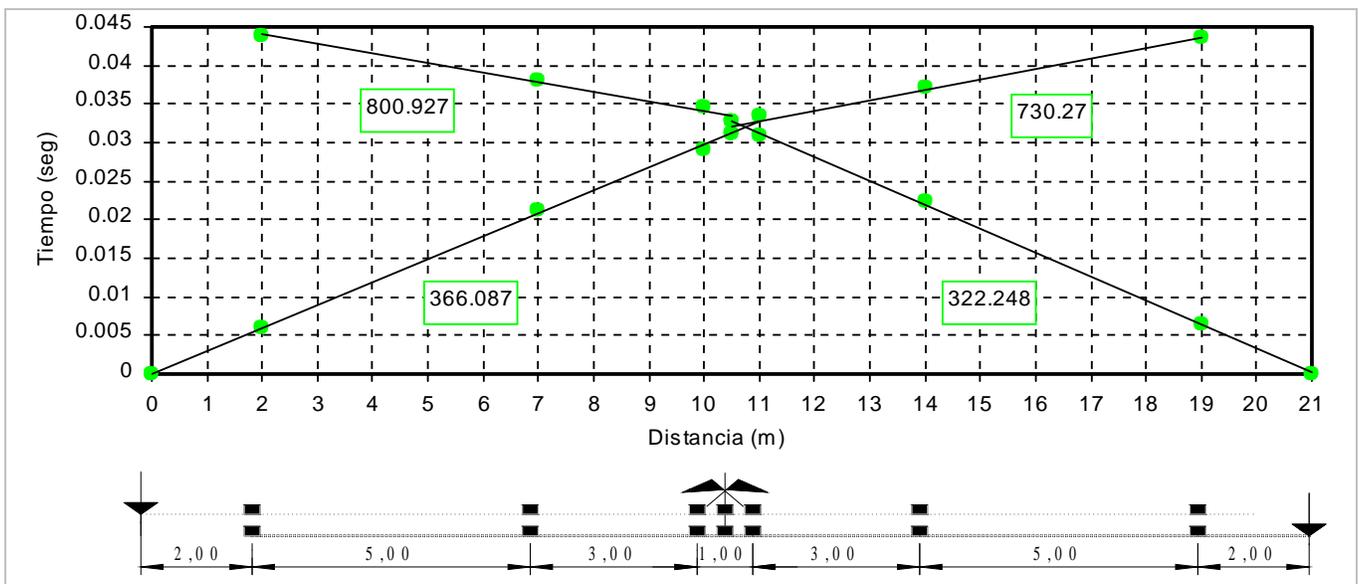


Figura 127 : Ensayo II, Sísmica de refracción

Tabla 10. Resultado de ensayo III

Equipo	Fuente		Transductores		Cantidad de ensayos	Muestras por segundo		Correlación			
	Pesa 10Kg/Placa metálica Cables comunes		5 Geófonos de 5 Hz 2 Pick up de 18Hz		15	37500		Analítica			
Resultados de ensayo	V ₁ m/s	V _{2u} m/s	V _{2d} m/s	V ₂ m/s	X _c grados	Z m	ρ gm/cm ³	ν	E ₁ MPa	E ₂ MPa	
	393.77	410.89	461.86	436.38	0.07°	13.0	1.97	1.8	0.3	203	249

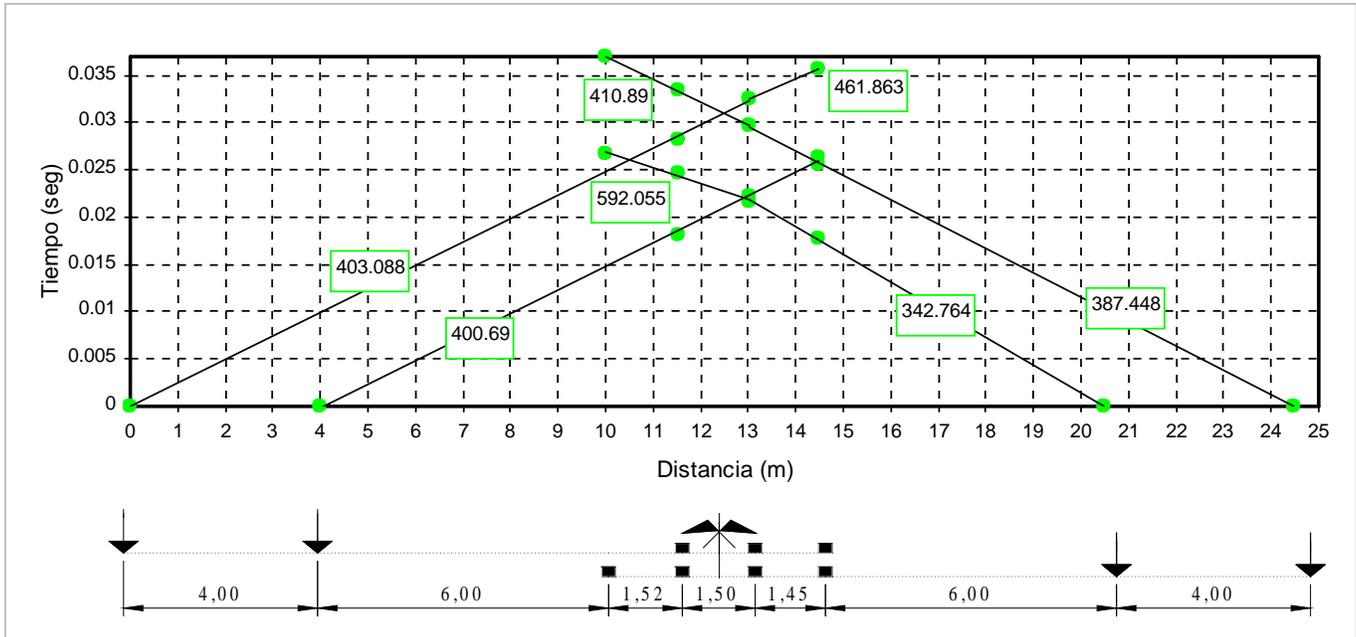


Figura 128 : Ensayo III, Sísmica de refracción

Tabla 11. Resultado de ensayo IV

Equipo	Fuente		Transductores		Cantidad de ensayos	Muestras por segundo		Correlación			
	Pesa 10Kg/Placa metálica Cables comunes		5 Geófonos de 5 Hz 2 Pick up de 18Hz		10	3000		Analítica			
Resultados de ensayo	V ₁ m/s	V _{2u} m/s	V _{2d} m/s	V ₂ m/s	X _c grados	Z m	ρ gm/cm ³	ν	E ₁ MPa	E ₂ MPa	
	383.18	734.70	658.53	696.61	2.07°	12.5	3.37	1.8	0.3	192	635

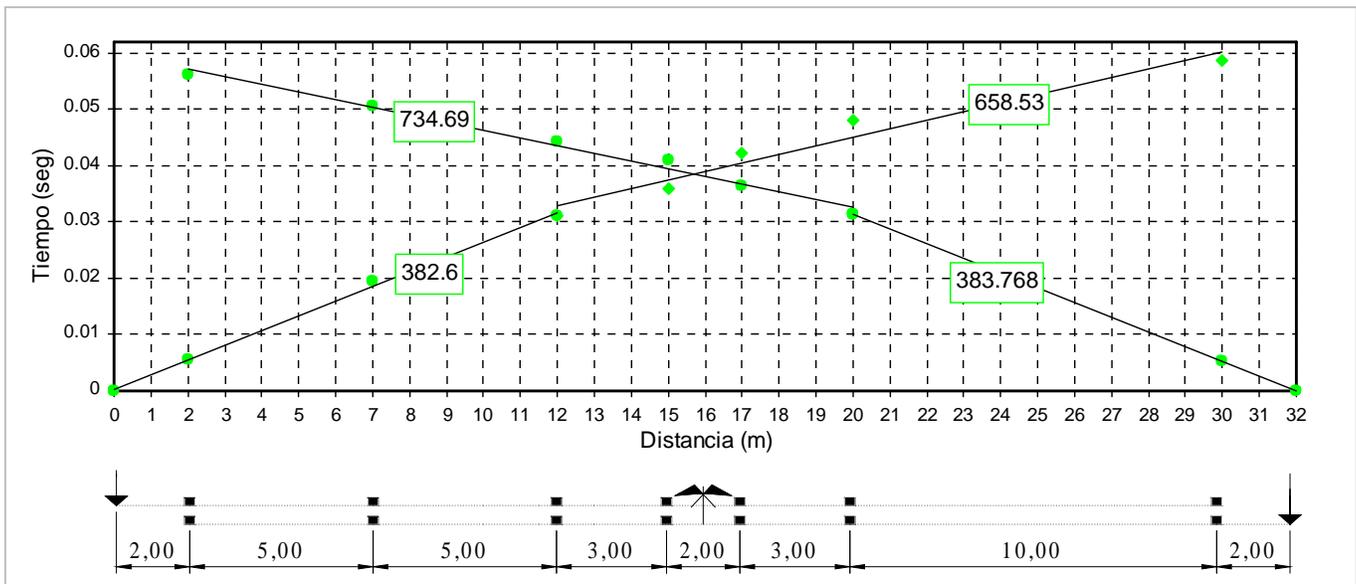


Figura 129 : Ensayo IV, Sísmica de refracción

Tabla 12. Resultado de ensayo V

Equipo	Fuente	Transductores	Cantidad de ensayos	Muestras por segundo	Correlación						
	Martillo 8Kg/Placa metálica Cables comunes	15 Geófonos de 18 Hz	40	3000	Mecanismo de disparo						
Resultados de ensayo	V_1 m/s	V_{2u} m/s	V_{2d} m/s	V_2 m/s	α grados	X_c m	Z m	ρ gm/cm ³	ν	E_1 MPa	E_2 MPa
	331.00	947.39	872.29	909.84	6.34°	6.0	2.05	1.8	0.3	129	1062

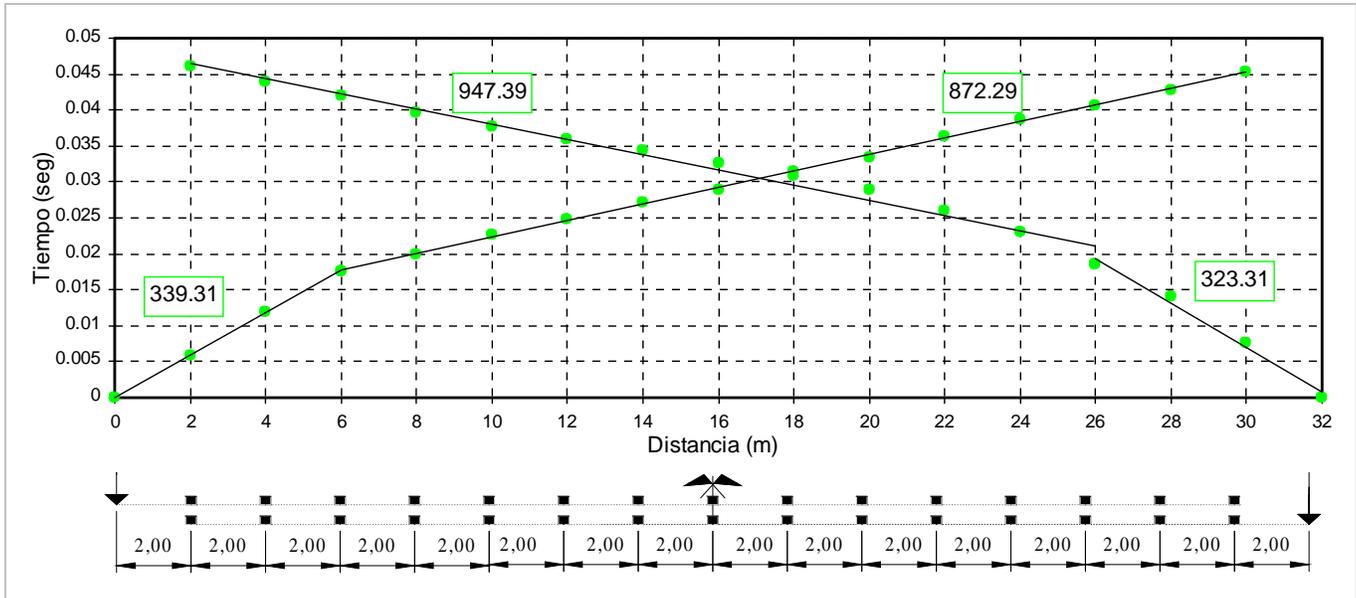


Figura 130 : Ensayo IV, Sísmica de refracción

Tabla 12. Resultado de ensayo VI

Equipo	Fuente	Transductores	Cantidad de ensayos	Muestras por segundo	Correlación	Inversión
	Martillo 8Kg/Placa metálica Cables coaxiales	2 Geófonos de 5 Hz	10	3000	Mecanismo de disparo	Empírica $Z=0.5$

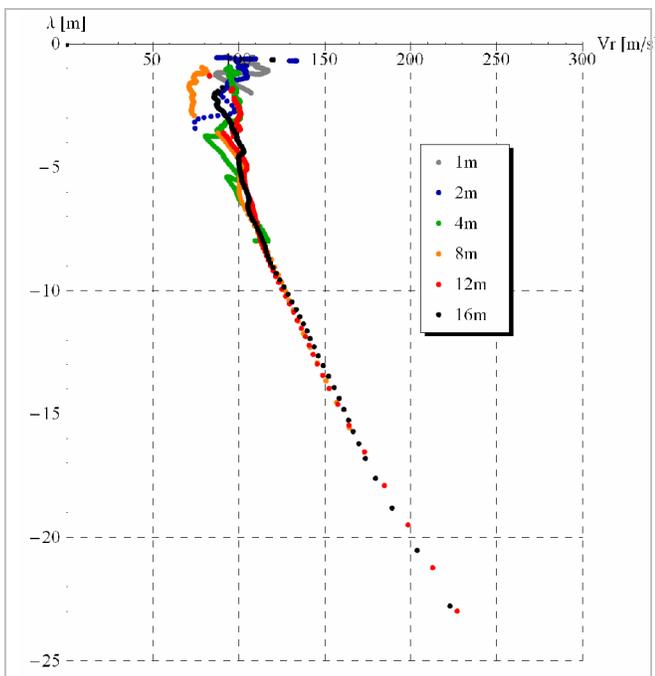


Figura 131: Ensayo VI, Curva de dispersión en función de la longitud de onda para el primer sentido de ensayo

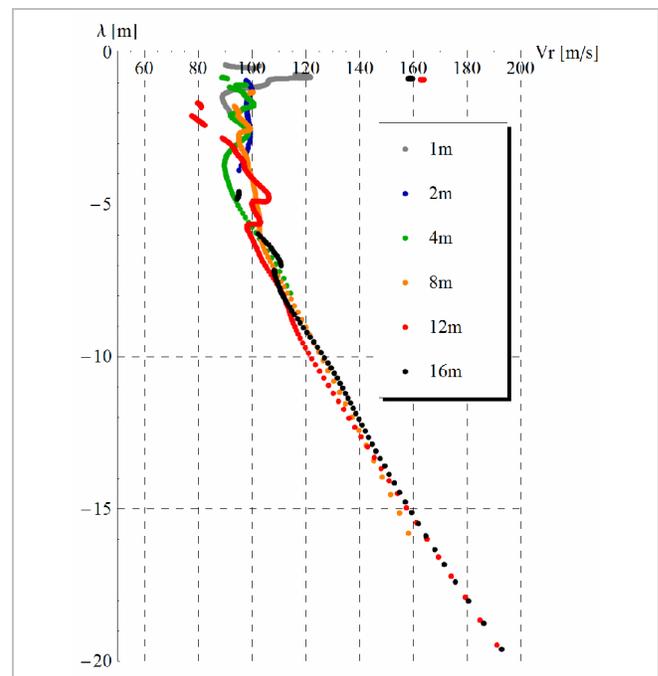


Figura 132: Ensayo VI, Curva de dispersión en función de la longitud de onda para el segundo sentido de ensayo

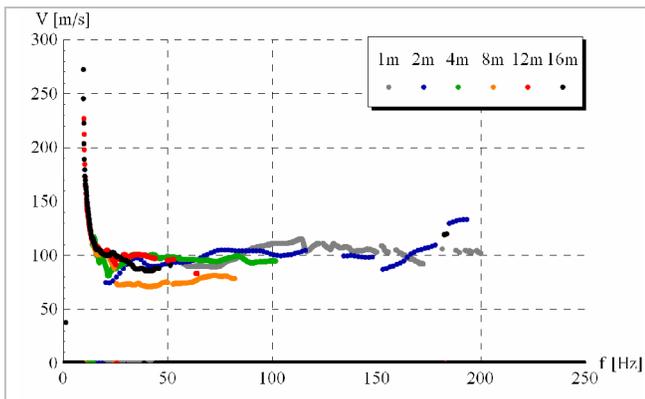


Figura 133: Ensayo VI, Curva de dispersión en función de la frecuencia para el primer sentido de ensayo.

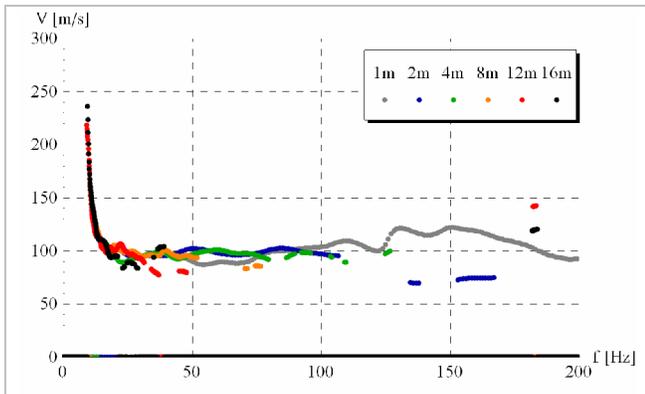


Figura 134: Ensayo VI, Curva de dispersión en función de la frecuencia para el segundo sentido de ensayo.

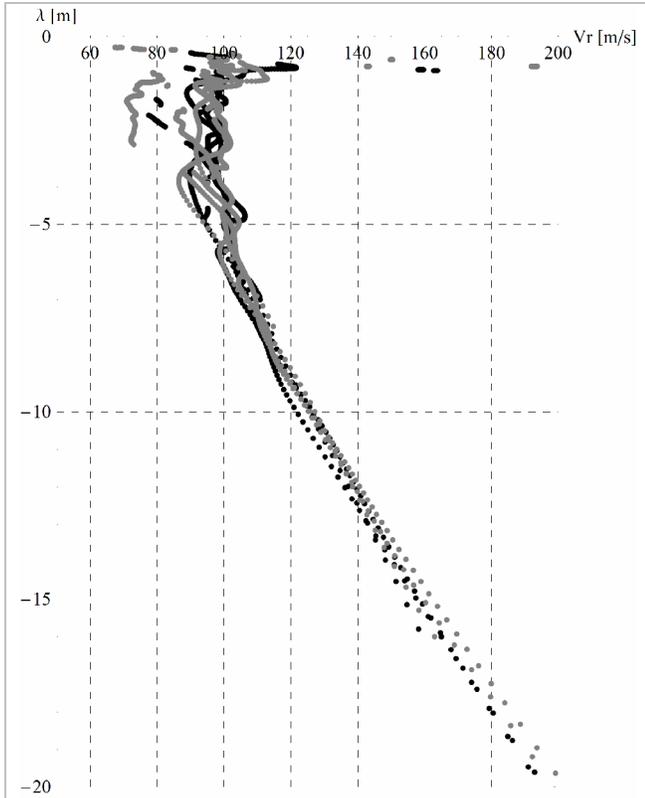


Figura 135: Ensayo VI, Curva de dispersión en función de la longitud de onda para ambos sentido de ensayo.

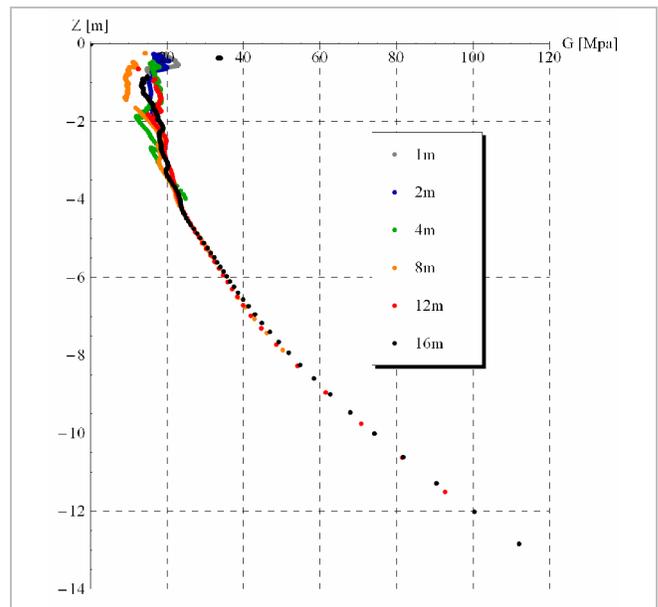


Figura 136: Ensayo VI, Variación del módulo de corte en función de la profundidad para el primer sentido de ensayo

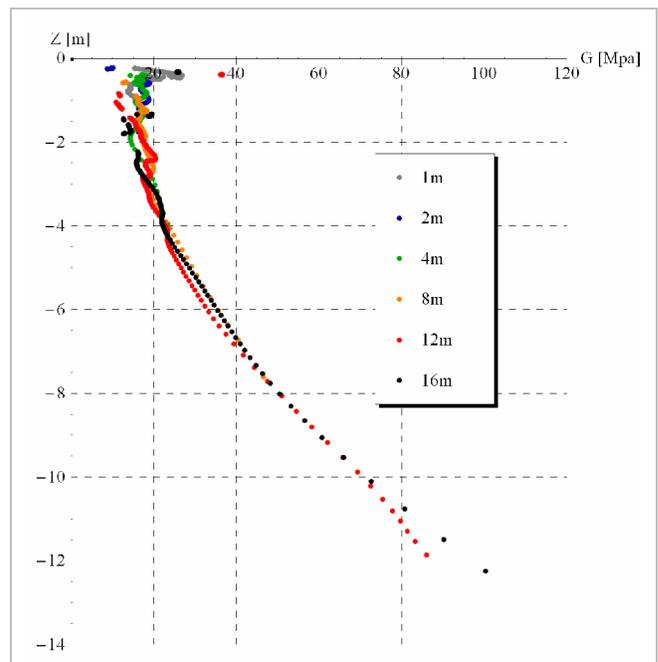


Figura 137: Ensayo VI, Variación del módulo de corte en función de la profundidad para el segundo sentido de ensayo

Tabla 12. Resultado de ensayo VII

Equipo	Fuente	Transductores	Cantidad de ensayos	Muestras por segundo	Correlación	Inversión
	Martillo 8Kg/Placa metálica Cables coaxiales	2 Geófonos de 5 Hz	10	3000	Mecanismo de disparo	Empírica Z=0.5

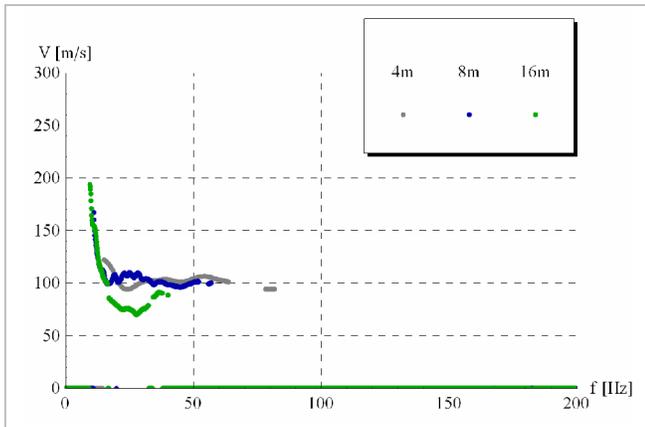


Figura 138: Ensayo VII, Curva de dispersión en función de la frecuencia para el primer sentido de ensayo.

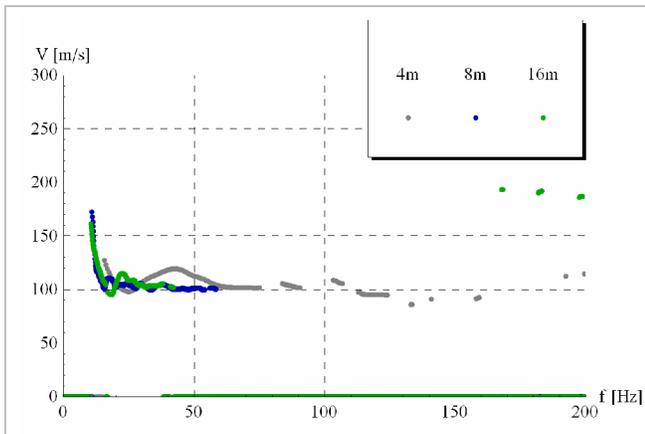


Figura 139: Ensayo VII, Curva de dispersión en función de la frecuencia para el segundo sentido de ensayo

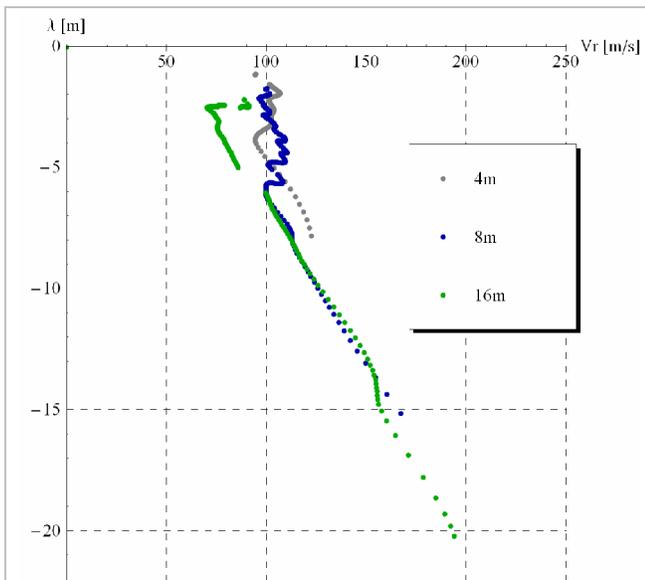


Figura 140 : Ensayo VII, Curva de dispersión en función de la longitud de onda para el primer sentido de ensayo

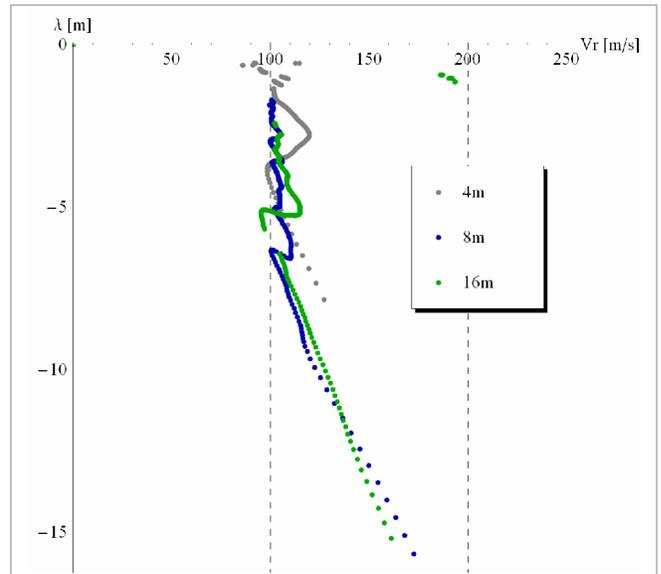


Figura 141 : Ensayo VII, Curva de dispersión en función de la longitud de onda para el segundo sentido de ensayo

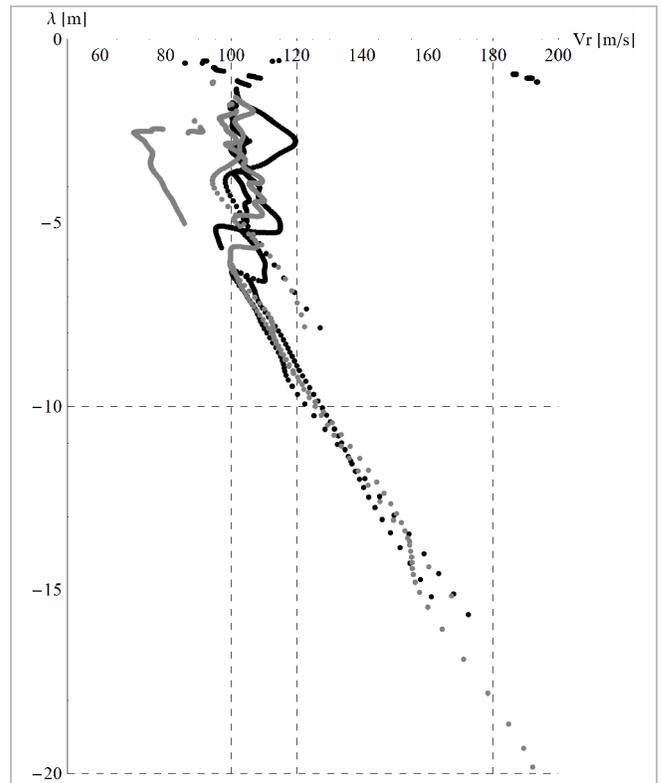


Figura 142: Ensayo VII, Curva de dispersión en función de la longitud de onda para ambos sentido de ensayo.

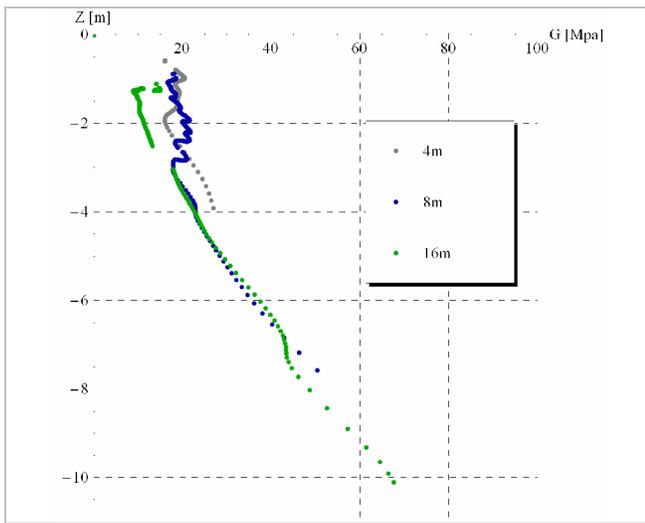


Figura 143 : Ensayo VII, Variación del módulo de corte en función de la profundidad para el primer sentido de ensayo

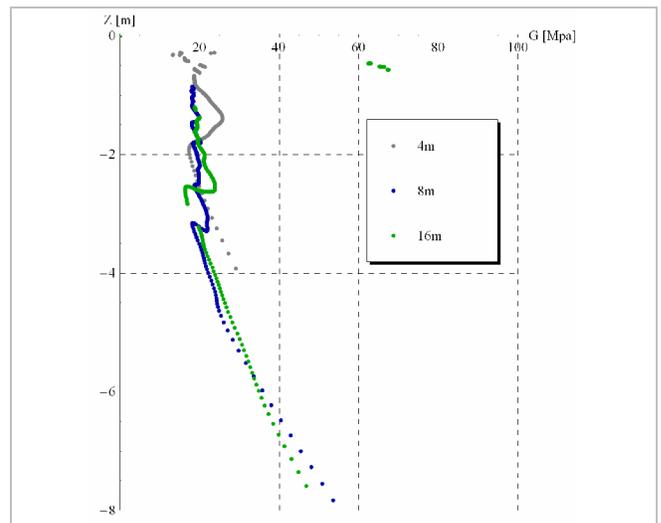


Figura 146 : Ensayo VII, Variación del módulo de corte en función de la profundidad para el segundo sentido de ensayo

Tabla 12. Resultado de ensayo VIII

Equipo	Fuente	Transductores	Cantidad de ensayos	Muestras por segundo	Correlación	Inversión
	Martillo 8Kg/Placa metálica Cables coaxiales	2 Geófonos de 5 Hz	20	3000	Mecanismo de disparo	Empírica Z=0.5

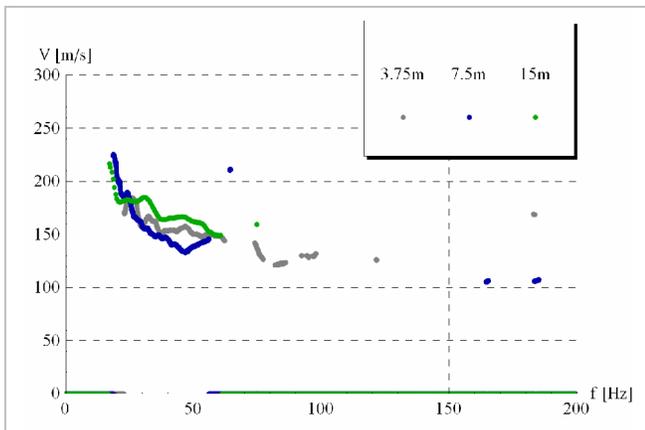


Figura 144 : Ensayo VIII, Curva de dispersión en función de la frecuencia para el primer sentido de ensayo

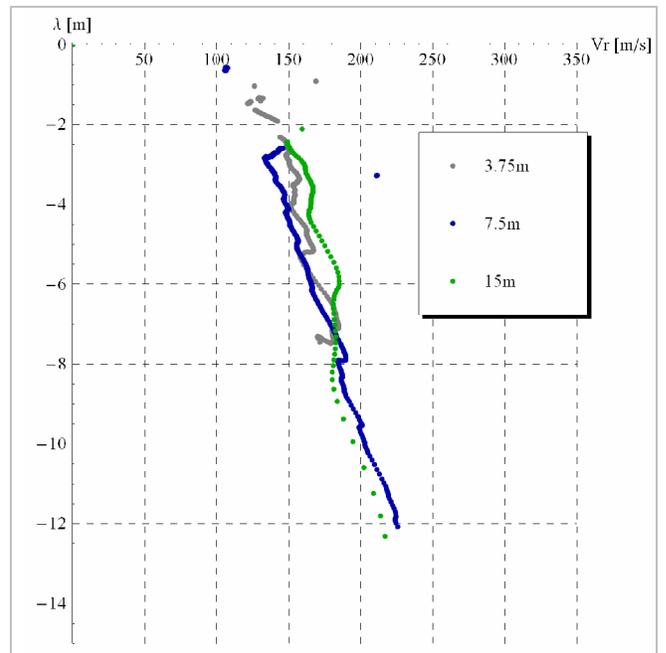


Figura 147 : Ensayo VIII, Curva de dispersión en función de la longitud de onda para el primer sentido de ensayo

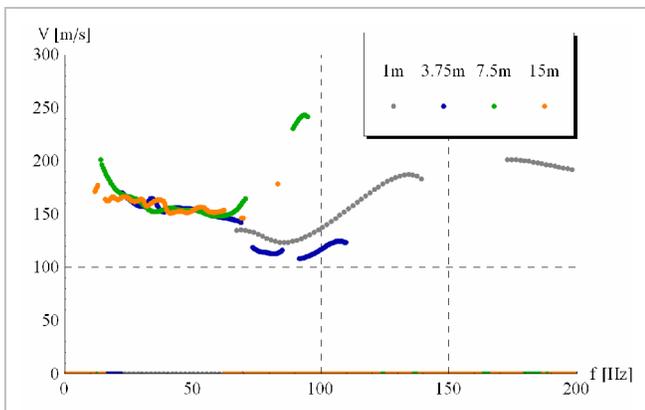


Figura 145 : Ensayo VIII, Curva de dispersión en función de la frecuencia para el segundo sentido de ensayo

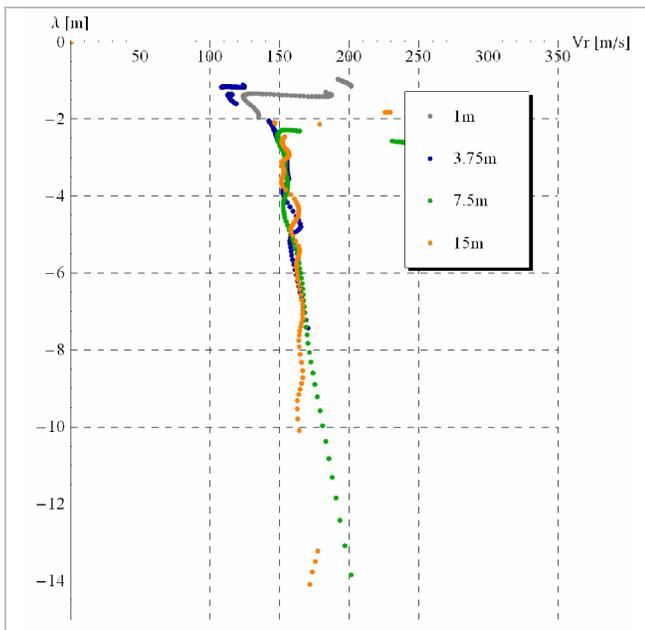


Figura 148 : Ensayo VIII, Curva de dispersión en función de la longitud de onda para el segundo sentido de ensayo

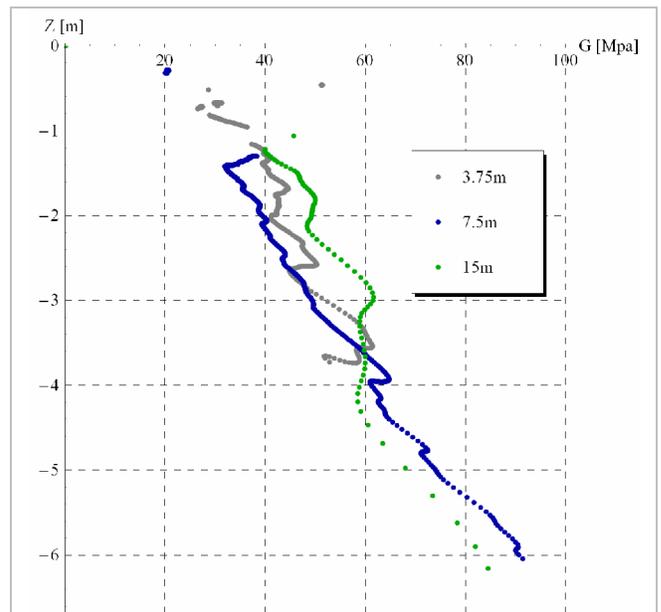


Figura 150 : Ensayo VIII, Variación del módulo de corte en función de la profundidad para el primer sentido de ensayo

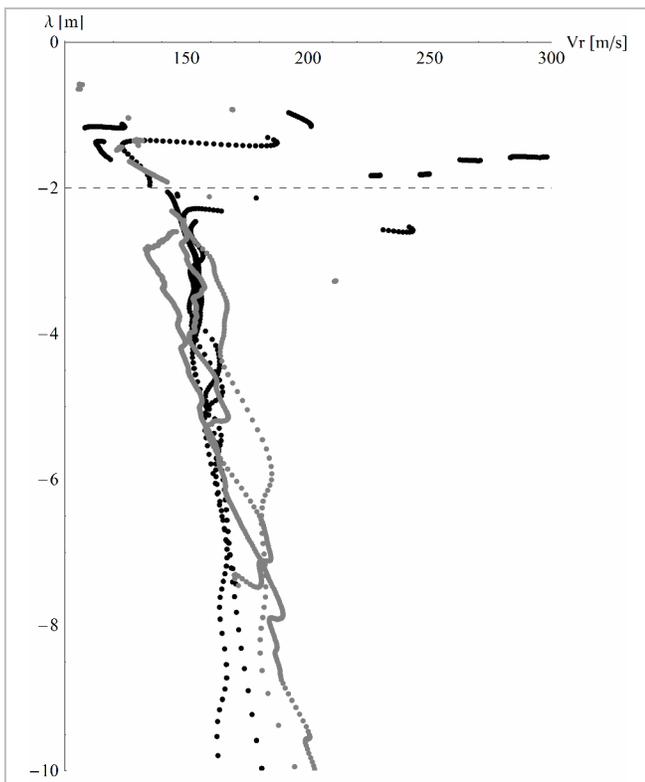


Figura 149 : Ensayo VIII, Curva de dispersión en función de la longitud de onda para ambos sentido de ensayo.

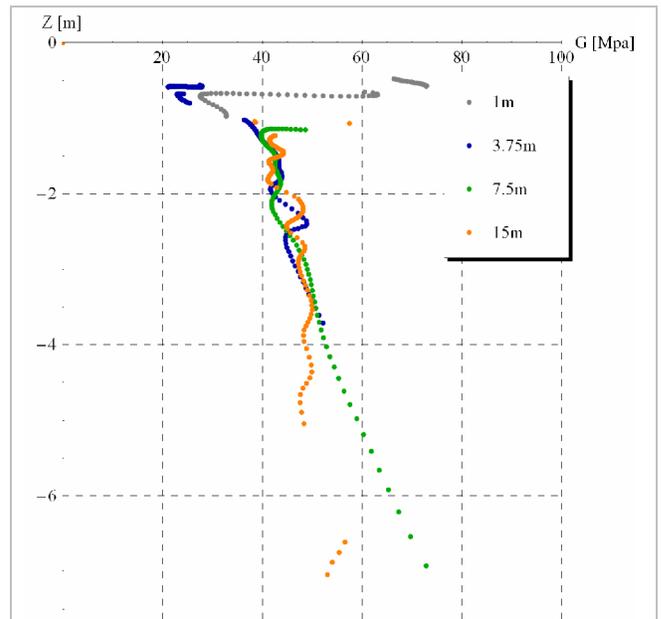


Figura 151 : Ensayo VIII, Variación del módulo de corte en función de la profundidad para el segundo sentido de ensayo

Tabla 12. Resultado de ensayo IX

Equipo	Fuente	Transductores	Cantidad de ensayos	Muestras por segundo	Correlación	Inversión
	Martillo 8Kg/Placa metálica Cables coaxiales	2 Geófonos de 5 Hz	4	3000	Mecanismo de disparo	Empírica $Z=0.5$

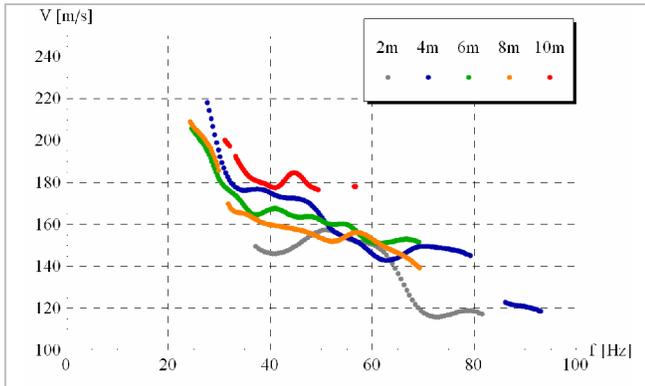


Figura 152 : Ensayo IX, Curva de dispersión en función de la frecuencia para el primer sentido de ensayo

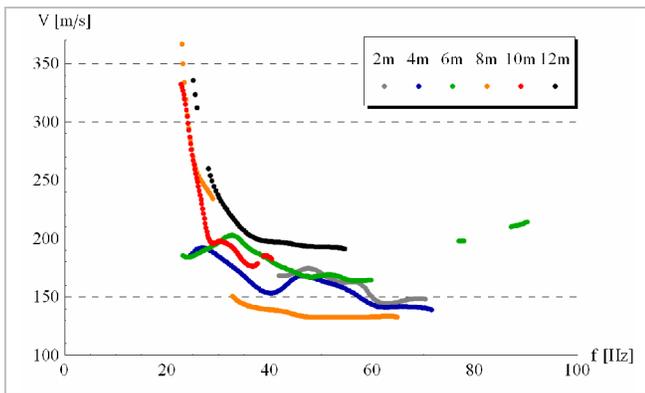


Figura 153 : Ensayo IX, Curva de dispersión en función de la frecuencia para el segundo sentido de ensayo

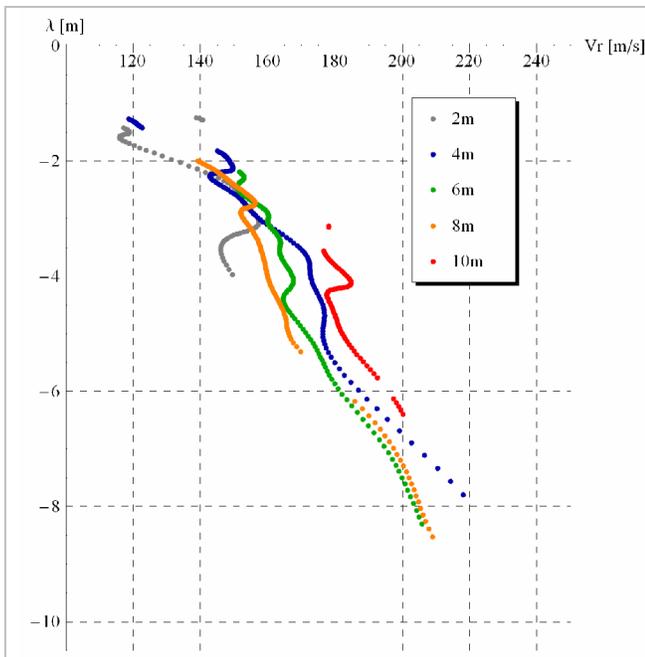


Figura 154 : Ensayo IX, Curva de dispersión en función de la longitud de onda para el primer sentido de ensayo

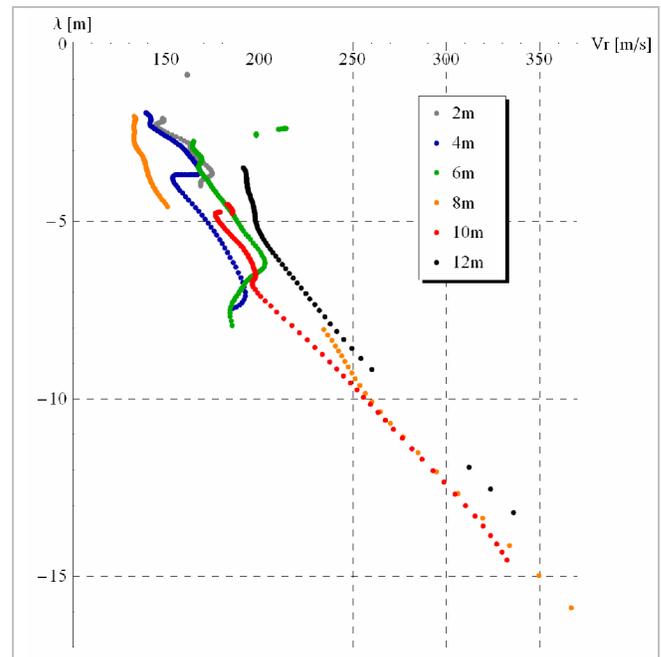


Figura 155 : Ensayo IX, Curva de dispersión en función de la longitud de onda para el segundo sentido de ensayo

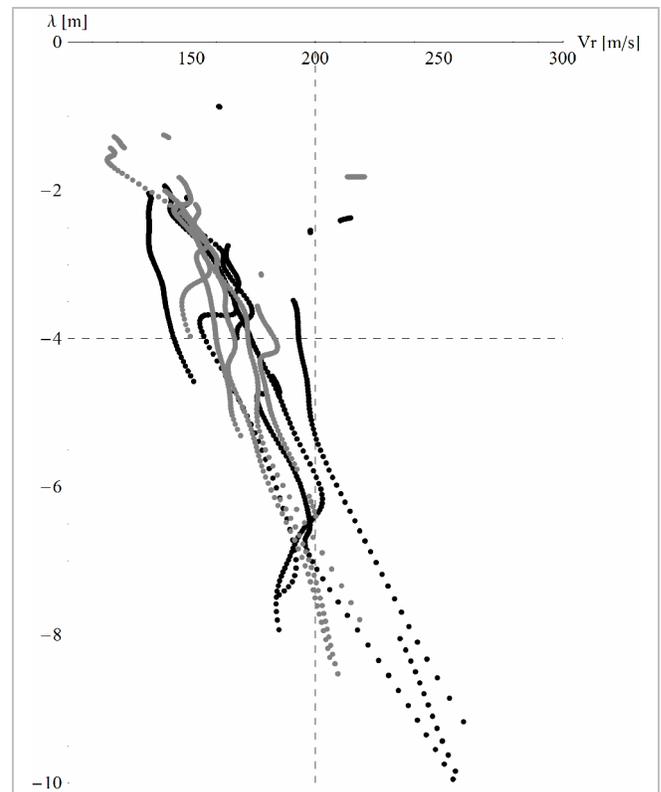


Figura 156 : Ensayo IX, Curva de dispersión en función de la longitud de onda para ambos sentido de ensayo

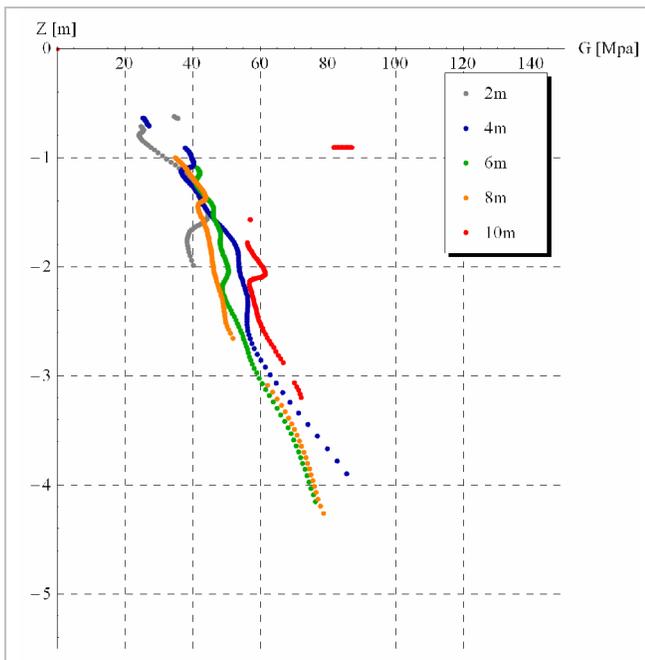


Figura 157 : Ensayo IX, Variación del módulo de corte en función de la profundidad para el primer sentido de ensayo

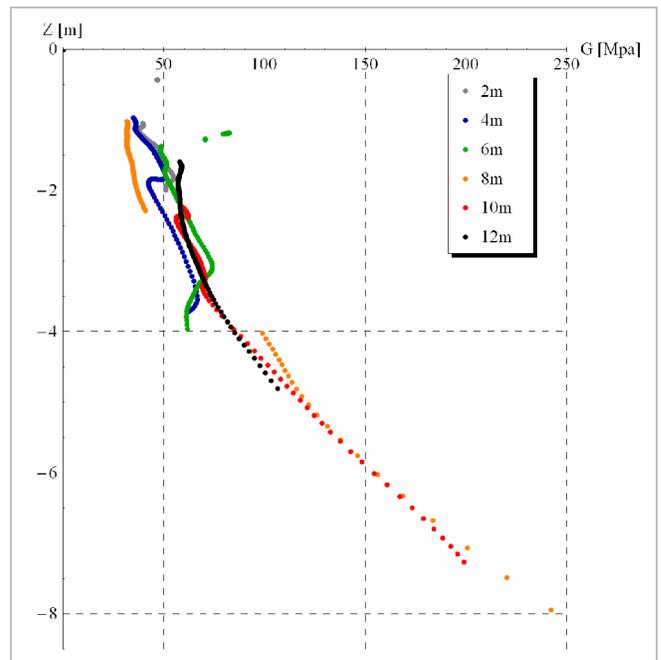


Figura 160 : Ensayo IX, Variación del módulo de corte en función de la profundidad para el segundo sentido de ensayo

Tabla 12. Resultado de ensayo X

Equipo	Fuente	Transductores	Cantidad de ensayos	Muestras por segundo	Correlación	Inversión
	Martillo 8Kg/Placa metálica Cables coaxiales	2 Geófonos de 5 Hz	10	2000	Mecanismo de disparo	Empírica Z=0.5

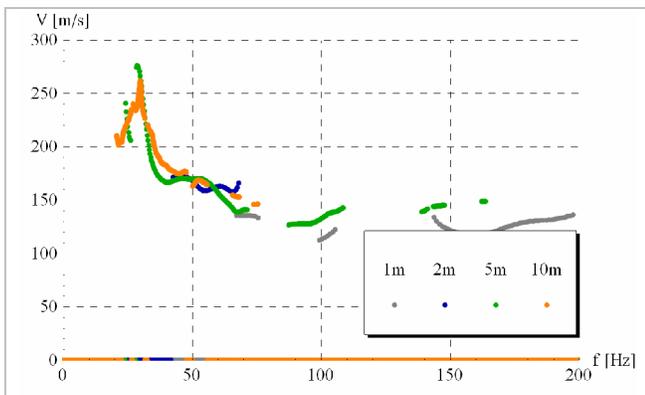


Figura 158 : Ensayo IX, Curva de dispersión en función de la frecuencia para el primer sentido de ensayo

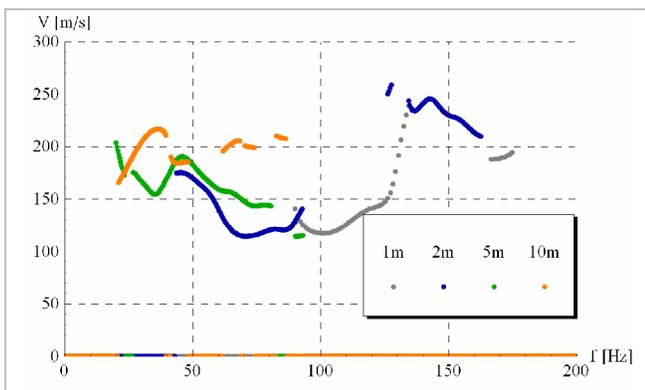


Figura 159 : Ensayo IX, Curva de dispersión en función de la frecuencia para el segundo sentido de ensayo

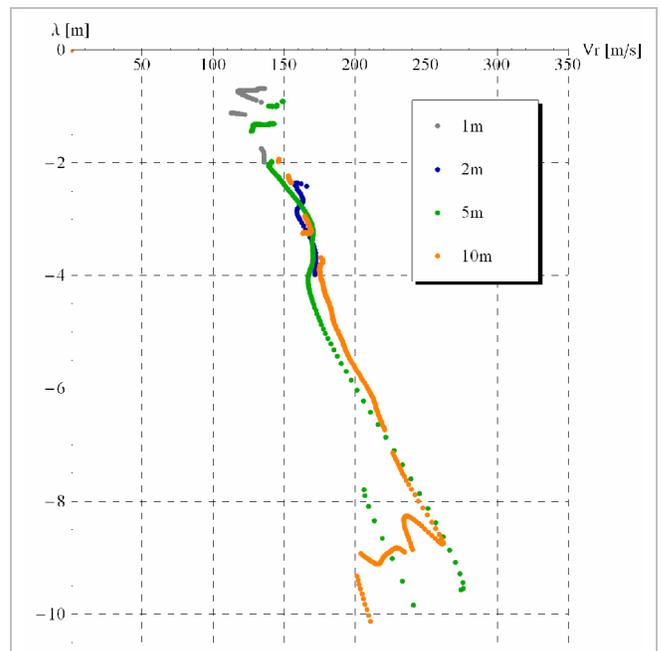


Figura 161 : Ensayo IX, Curva de dispersión en función de la longitud de onda para el primer sentido de ensayo

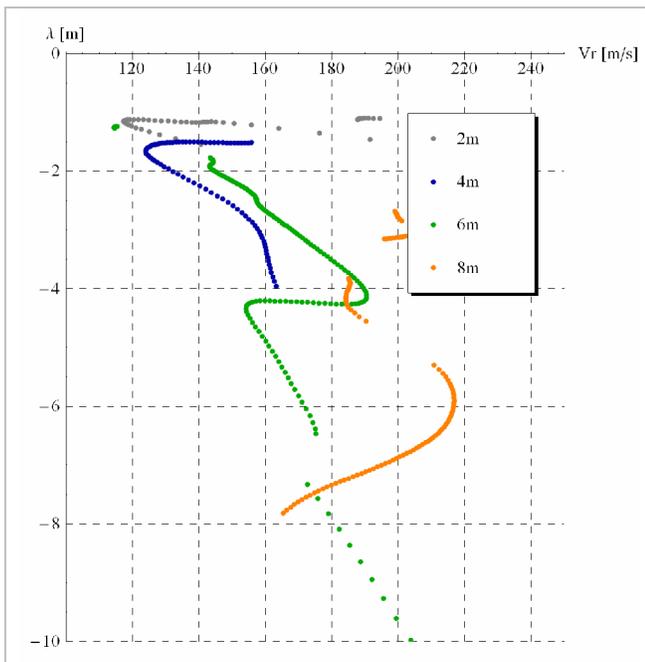


Figura 162 : Ensayo IX, Curva de dispersión en función de la longitud de onda para el segundo sentido de ensayo

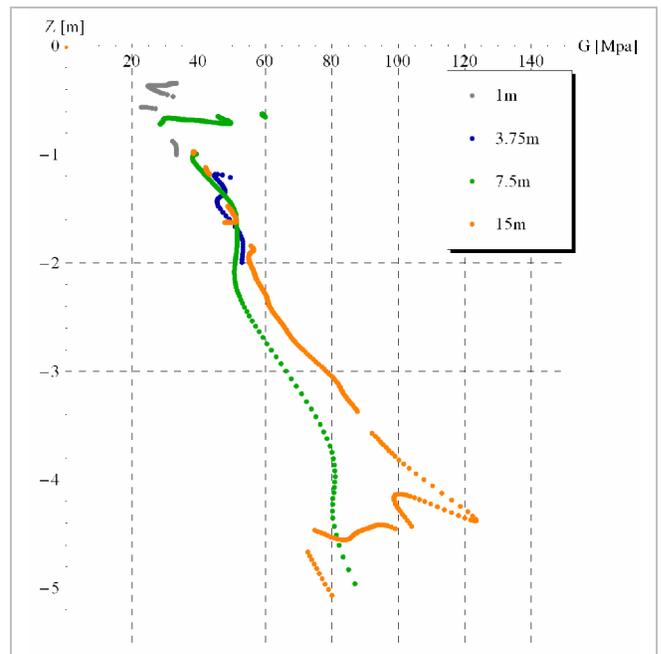


Figura 164 : Ensayo IX, Variación del módulo de corte en función de la profundidad para el primer sentido de ensayo

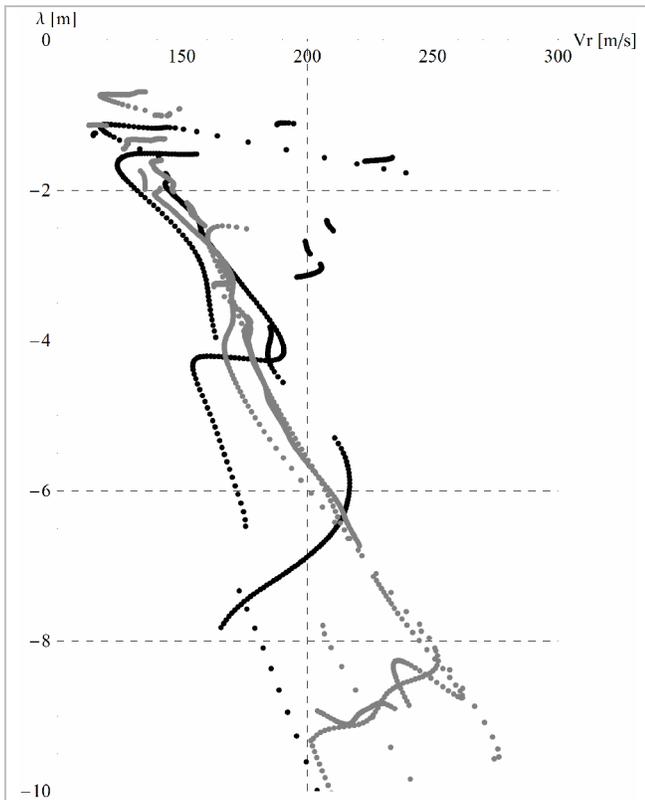


Figura 163 : Ensayo IX, Variación del módulo de corte en función de la profundidad para el segundo sentido de ensayo

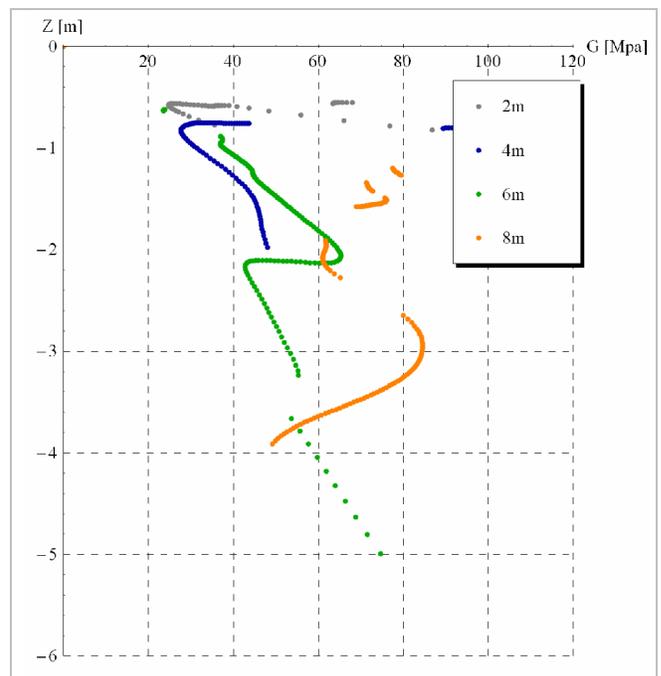


Figura 165 : Ensayo IX, Variación del módulo de corte en función de la profundidad para el segundo sentido de ensayo

6 CONCLUSIONES

En este trabajo se midieron las velocidades de propagación de ondas de compresión y ondas de Rayleigh mediante las técnicas geofísicas de sísmica de refracción y SASW respectivamente. Ya que los resultados de campo se encuentran de acorde a los modelos planteados.

Se introdujo la teoría de propagación de ondas de manera conceptual, con el objetivo de conocer el comportamiento de las ondas de compresión y las ondas de Rayleigh cuando se propagan a través de terrenos con diferentes estratigrafías. Además, se pudieron obtener las propiedades mecánicas del suelo a través de las velocidades de propagación de las ondas P y R, cumpliendo con el objetivo de esta tesis el cual era calcular el módulo de Young y el módulo de Corte a baja deformación.

Para poder calcular el módulo de Young por las mediciones que se obtienen de la técnica de sísmica de refracción se debió adoptar el módulo de Poisson, y es esta la razón que hace a esta técnica imprecisa al calcular el módulo de Young.

Por otra parte para poder calcular el módulo de corte por las mediciones que se obtienen de la técnica SASW, se presenta como dificultad que dicha técnica se basa en la medición exclusiva de las ondas de Rayleigh de todas las ondas existentes en el registro, ya que ellas son las únicas utilizadas en el proceso de inversión. Una de las desventajas más importantes de esta técnica es que el resultado no es unívoco y pueden encontrarse varios perfiles que verifiquen con el análisis inverso.

Estas técnicas por sí solas dejan varias ambigüedades sin resolver, por lo que deben ser utilizadas con información adicional como también tratar de combinarse y hallar por ejemplo el módulo de Poisson experimental.

Se presentaron los resultados de campo de 5 ensayos de sísmica de refracción. Para poder visualizar el arribo de las ondas P se tuvo que utilizar la técnica de apilado de señales para la eliminación del ruido ambiente, ya que los arribos obtenidos fueron de muy pequeña energía en comparación a todo el registro. Al trazar la curva de arribos se obtienen las velocidades de propagación de las ondas de compresión que se encuentran entre 330~910m/s. Para poder calcular el módulo de Young por dicha técnica se supuso el módulo de Poisson en 0.3 y la densidad en $\rho=1.8\text{gm/cm}^3$, entonces el módulo de Young arroja valores entre 129~1062MPa.

Se presentaron los resultados de campo de 5 ensayos SASW, en particular uno se desarrolló en su totalidad para lograr entender como se halla la curva de dispersión global experimental del ensayo. Se observó experimentalmente que las ondas de Rayleigh tienen una mayor energía que es de gran ventaja en comparación con el método anterior. También se vio que existe una correlación entre el

perfil del terreno investigado por un ensayo SPT y las curvas de dispersión locales. Las velocidades de propagación de ondas Rayleigh medida en campo se encuentran en el rango 75~350m/s, y el cálculo del módulo de corte para $\rho=1.8\text{gm/cm}^3$ varía entre 10~200MPa.

También se utilizaron los resultados de ambas técnicas para el cálculo del módulo de Poisson para la capa superficial y el mismo se encuentra entre 0.33~0.39

Se estudiaron conceptos básicos del procesamiento de señal y se aplicaron herramientas de procesamiento de señal, como también el desarrollo de la curva de dispersión experimental de la técnica SASW.

Se observó experimentalmente que el rango de frecuencias provocadas por el impacto se encuentra entre 0~200 Hz. A partir de estos resultados, se propone una frecuencia mínima de muestreo de 400Hz según el criterio de Nyquist.

En los ensayos de refracción sísmica y SASW las señales responden adecuadamente hasta una distancia de 22m con el equipo utilizado.

Se buscó mejorar la energía de las ondas con el cambio en el material de la placa de contacto, pero no se logró tal objetivo aunque sí varió el contenido de frecuencias de los registros.

Para el ensayo SASW se empleó la técnica de inversión empírica para la obtención del perfil a partir de la curva de dispersión experimental. Se reconoce que esta técnica no es la más recomendable para el estudio de la estratigrafía del terreno.

A continuación se exponen diferentes oportunidades de investigación futura:

- Estudiar el efecto de la energía de impacto para el ensayo de sísmica de refracción.
- Utilizar ondas de corte horizontales en la técnica de sísmica de refracción, ya que el arribo de la onda puede ser reconocido mediante polarización de señales. Esta técnica puede usarse para el reconocimiento de estratos y el estudio del módulo de corte transversal.
- Implementar algoritmos para la detección de los tiempos de arribo.
- Investigar otros métodos como f-k, MASW o CSW. Como la aplicación de cada uno de ellos en campo es muy similar, la implementación conjunta de varios de ellos podría mejorar la determinación de la curva de dispersión.
- Investigar los procesos de inversión para reducir los tiempos de análisis.
- Investigar sobre las fuentes de error y dispersión de la técnica SASW, tanto para inversión analítica como experimental.

- Investigar la determinación de la curva de dispersión con el método *harmonic wavelet transform*, puesto que se obtiene la curva de dispersión sin la necesidad de agregar ciclos a la curva de diferencia de fase relativa que es uno de los principales problemas del método SASW.
- Investigar el comportamiento de las ondas de Rayleigh y analizar los criterios de filtrado según la separación, mediante el empleo de geófonos direccionales.
- Investigar la implementación del método SASW para el control de calidad de pavimentos y túnel de hormigón.

REFERENCIAS

- Achenbach, J. D. (1975). "Wave Propagation in Elastic Solids". North Holland, 425p.
- Andrus, R. D.; Stokoe, K. H., II; Chung, R. M.; Bay, J. A. (1998). "Liquefaction evaluation of densified sand at approach to Pier 1 on Treasure Island, California, using SASW method". National Institute of Standards and Technology, Building and Fire Research Laboratory, NISTIR 6230, Gaithersburg, MD, pp. 80. Internet: <http://www.fire.nist.gov/bfrlpubs/build98/art045.html>.
- American Society for Testing and Materials (2000). "Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation". ASTM D5777-00.
- Department of the Army (1995). "Engineering and Design: Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Applications". Engineer Manuel EM 1110-1-1802, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C. Internet: <http://140.194.76.129/publications/engine-manuals/em1110-1-1802/toc.htm>
- Dobrin, M. B. (1975). "Introducción a la prospección geofísica". Ed. Omega, Barcelona, España.
- Foti, S. (2000). "Multistation Methods for Geotechnical Characterization using Surface Waves". Ph.D. Dissertation, Politecnico di Torino, Italy, pp. 229. Internet: http://www2.polito.it/ricerca/soilmec/sasw/SF_PhD_diss.pdf
- Gucunski, N. and Woods, R. D. (1992). "Numerical simulation of the SASW test." Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 11 (4), pp. 213-227.
- Haskell, N.A. (1953). "The Dispersion of Surface Waves on Multilayered Media". Bulletin of the Seismological Society of America, Vol 43, pp. 17-34.
- Joh, S.-H. (1996). "Advances in the Data Interpretation Technique for Spectral-Analysis-of-Surface-Waves (SASW) Measurements," Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, pp. 240.
- Kausel, E., y Roësset, J.M. (1981). "Stiffness matrices for layered soils". Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 71 (6), pp. 1743-1761.
- Kramer, S.L. (1996). "Geotechnical Earthquake Engineering". Prentice-Hall, New Jersey, pp. 653.
- Lai, C. G. y Rix, G. J. (1998). "Simultaneous Inversion of Rayleigh Phase Velocity and Attenuation for Near-Surface Site Characterization". Report No. GIT-CEE/GEO-98-2, School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, pp. 258. Internet: http://geosystems.ce.gatech.edu/soil_dynamics/docs/Lai_Rix_98.pdf
- Lin, Y-C (2007). "Characterizing Vs Profiles by the SASW Method and Comparison with Other Seismic Methods". Ph.D. Dissertation, University of Texas at Austin. Internet: <http://hdl.handle.net/2152/3079>
- Luna, R., and Jadi H. (2000). "Determination of Dynamic Soil Properties Using Geophysical Methods". Proceedings of the First International Conference on the Application of Geophysical and NDT Methodologies to Transportation Facilities and Infrastructure, St. Louis, MO.
- Ortigao, J.A.R. (2007). "Wave Propagation and Microstrain Behaviour of Soils". Terratek. Internet: <http://www.terratek.com.br/downloads/CPTU%20and%20Seismic%20CPTU/2007%20Wave%20propagation%20in%20soils%20Terratek%20report.pdf>
- Orozco, M. C. (2003). "Inversion Method for Spectral Analysis of Surface Waves (SASW)". Ph.D. Dissertation, School of Civil and Environmental Engineering Theses and Dissertations, Georgia Institute of Technology. Internet: <http://hdl.handle.net/1853/5124>
- Redpath, B. B. (1973). "Seismic refraction exploration for engineering site investigations," Technical Report E-73-4, U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Explosive Excavation Research Laboratory, Livermore, California, 55 p.
- Santamarina, J.C. y Fratta, D. (1998). "Introduction to Discrete Signals and Inverse Problems in Civil Engineering". ASCE Press, Reston, VA., pp. 327.
- Santamarina, J. C., Klein, K. A. and Fan, M.A. (2001). "Soils and Waves : Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring". John Wiley & Sons
- Stokoe, K.H., II, Joh, S.-H., Woods, R.D. (2004). "Some Contributions of In Situ Geophysical Measurements to Solving Geotechnical Engineering Problems". International Conference on Site Characterization (ISC-2), Porto, Portugal.
- Stokoe, K.H., II y Santamarina, J.C. (2000). "Seismic-Wave-Based Testing in Geotechnical Engineering". International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, GeoEng 2000, Melbourne, Australia, pp. 1490-1536.
- Stokoe, K. H., II, Wright, S. G., Bay, J. A. y Roesset J. M. (1994). "Characterization of Geotechnical Sites by SASW Method". ISSMFE Technocal Committe 10 for XIII ICSMFE, Geophysical Characteristics of Sites, A.A. Balkema Publishers/Rotterdam & Brookfield, Netherlands, pp.146.
- Stokoe, K. H., II, Cox, B.R., Lin, Y.-C., Jung, M.J., Menq F.-Y., Bay, J.A, Rosenblad, B. and Wong, I. (2006) "Use of Intermediate to Large Vibrators as Surface Wave Sources to Evaluate Vs Profiles for Earthquake Studies". SA-GEEP , 19th Annual Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, Seattle, WA.
- Strobbia, C. (2002) "Surface Wave Methods: Acquisition, processing and inversion". PhD dissertation, Politecnico di Torino, Italy. Internet: <http://www2.polito.it/ricerca/engel/downloads/ClaudioStrobbia.pdf>
- Thomson, W.T. (1950). "Transmission of Elastic Waves through a Stratified Solid Medium". Journal of Applied Physics, Vol 21, pp. 89-93.
- Zohdy, A.R., Eaton, G.p. y Mabey, D.R. (1974) "Application of Surface Geophysics to Groundwater Investigations: Techniques for Water Resources Investigations of the U.S". Geol. Surv., Book2, Chap. D1. U.S.A., U.S. Geol. Surv.

ANEXO I

Código fuente para el cálculo de la curva de dispersión del ensayo SASW en Mathematica.

Transductores: Vector de dimensión "2 x Cantidad de elementos de cada registro x Cantidad de ensayos", constituida por dos submatrices de los registros del transductor 1 y del transductor 2 en cada columna.

Constantes

```
LongitudDeDatos:=3000;(*Cantidad de elementos de los registros*)
t:=0,003;(*Lapso de tiempo entre muestras expresado en seg*)
DistanciaEntreTransductores:=2;(*Distancia entre transductores expresada
en m*)
MáximaFrecuencia:=250;(*Máxima frecuencia de análisis expresada en Hz*)
Criterio:=0.95; (*Valor limite de la función coherencia*)
:=1800; (*Densidad del suelo expresada en kg/m3*)
```

Energía espectral de cada traductor:

```
EnergíaEspectralDelTransductor1:= Mean[Re[Fourier[Transductores[[1]]]
Conjugate[Fourier[Transductores[[1]]]]];
EnergíaEspectralDelTransductor2:= Mean[Re[Fourier[Transductores[[2]]]
Conjugate[Fourier[Transductores[[2]]]]];
```

Energía espectral cruzada entre traductores:

```
EspectroCruzado:= Mean[Fourier[Transductor[[1]]]
Conjugate[Fourier[Transductor[[2]]]]];
```

Función coherencia:

```
FunciónCoherencia:= Re[EspectroCruzado Conjugate[EspectroCruzado]]/((
EnergíaEspectralDelTransductor1) (EnergíaEspectralDelTransductor2));
```

Diferencia de fase relativa entre traductores:

```
DiferenciaDeFaseRelativa:=
If[Position[Mean[Transductores[[1]]],Max[Mean[Transductores[[1]]]]<
Position[Mean[Transductores[[2]]],Max[Mean[Transductores[[2]]]]], -
Arg[EspectroCruzado],Arg[EspectroCruzado]];
(*No hace falta tener en cuenta el orden entre los registros del
transductor 1 y del transductor 2 cuando se calcula la deferencia de
fase en ambos sentidos de ensayo*)
```

Diferencia de fase absoluta entre los transductores:

```
salto[x1_,x2_] :=Module[{s,r},s=Abs[x2-x1]/(2 p);If[s 0.9,r=x2+2 p
Round[s],r=x2];r]
DiferenciaDeFaseAbsoluta=DiferenciaDeFaseRelativa;
Do[DiferenciaDeFaseAbsoluta[[i]]=salto[DiferenciaDeFaseAbsoluta[[i-1]],
DiferenciaDeFaseRelativa [[i]]],{i,2,LongitudDeDatos}];
```

Curva de dispersión en función de la frecuencia:

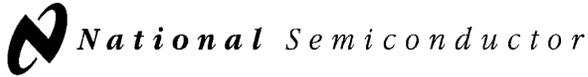
```
VelocidadDeFaseEnFunciónDeLaFrecuencia:= Table[If[FunciónCoherencia
[[i]]>Criterio&& DiferenciaDeFaseAbsoluta[[i]]> Pi&&
DiferenciaDeFaseAbsoluta[[i]]< DistanciaEntreTransductores 2 Pi/0.2 &&i<
MáximaFrecuencia t LongitudDeDatos,( DistanciaEntreTransductores 2 Pi
i/(( DiferenciaDeFaseAbsoluta [[i]]) LongitudDeDatos
t)),0],{i,Round[MáximaFrecuencia t LongitudDeDatos]};
(*Tiene en cuenta el criterio de la función coherencia y los criterios
filtrado de longitud de onda*)
```

Curva de dispersión en función de la longitud de onda:

```
VelocidadDeFaseEnFunciónDeLaLongitudDeOnda:=Table[Table[If[j=1,
VelocidadDeFaseEnFunciónDeLaFrecuencia[[i]],-
VelocidadDeFaseEnFunciónDeLaFrecuencia[[i]]/(i/( t
LongitudDeDatos))],{j,2}],{i,Round[MáximaFrecuencia t
LongitudDeDatos]};
```

Perfil del terreno G vs Z:

```
PerfilDelTerreno:=Table[Table[If[j=1, (1.1
VelocidadDeFaseEnFunciónDeLaFrecuencia [[i]])^2/1000000,-
VelocidadDeFaseEnFunciónDeLaFrecuencia[[i]]/(2i/( t
LongitudDeDatos))],{j,2}],{i, LongitudDeDatos }];
(*Se utilizó la inversión empírica con la relación de z=0.5 y
Vs=1.1Vr*)
```



June 1989

54LS74/DM54LS74A/DM74LS74A Dual Positive-Edge-Triggered D Flip-Flops with Preset, Clear and Complementary Outputs

General Description

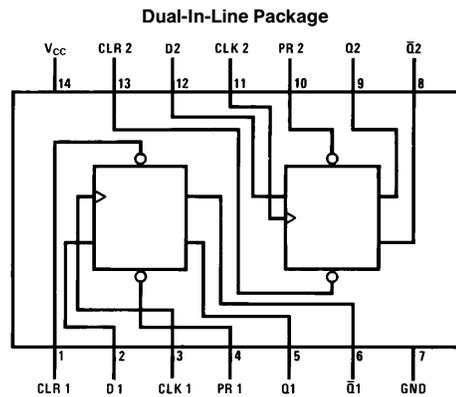
This device contains two independent positive-edge-triggered D flip-flops with complementary outputs. The information on the D input is accepted by the flip-flops on the positive going edge of the clock pulse. The triggering occurs at a voltage level and is not directly related to the transition time of the rising edge of the clock. The data on the D input may be changed while the clock is low or high without affecting the outputs as long as the data setup and hold times are not

violated. A low logic level on the preset or clear inputs will set or reset the outputs regardless of the logic levels of the other inputs.

Features

- Alternate military/aerospace device (54LS74) is available. Contact a National Semiconductor Sales Office/Distributor for specifications.

Connection Diagram



Order Number 54LS74DMQB, 54LS74FMQB, 54LS74LMQB, DM54LS74AJ, DM54LS74AW, DM74LS74AM or DM74LS74AN
See NS Package Number E20A, J14A, M14A, N14A or W14B

Function Table

Inputs				Outputs	
PR	CLR	CLK	D	Q	\bar{Q}
L	H	X	X	H	L
H	L	X	X	L	H
L	L	X	X	H*	H*
H	H	↑	H	H	L
H	H	↑	L	L	H
H	H	L	X	Q ₀	\bar{Q}_0

H = High Logic Level

X = Either Low or High Logic Level

L = Low Logic Level

↑ = Positive-going Transition

* = This configuration is nonstable; that is, it will not persist when either the preset and/or clear inputs return to their inactive (high) level.

Q₀ = The output logic level of Q before the indicated input conditions were established.

54LS74/DM54LS74A/DM74LS74A Dual Positive-Edge-Triggered D Flip-Flops with Preset, Clear and Complementary Outputs

Absolute Maximum Ratings (Note)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

Supply Voltage	7V
Input Voltage	7V
Operating Free Air Temperature Range	
DM54LS and 54LS	−55°C to +125°C
DM74LS	0°C to +70°C
Storage Temperature Range	−65°C to +150°C

Note: The “Absolute Maximum Ratings” are those values beyond which the safety of the device cannot be guaranteed. The device should not be operated at these limits. The parametric values defined in the “Electrical Characteristics” table are not guaranteed at the absolute maximum ratings. The “Recommended Operating Conditions” table will define the conditions for actual device operation.

Recommended Operating Conditions

Symbol	Parameter	DM54LS74A			DM74LS74A			Units
		Min	Nom	Max	Min	Nom	Max	
V _{CC}	Supply Voltage	4.5	5	5.5	4.75	5	5.25	V
V _{IH}	High Level Input Voltage	2			2			V
V _{IL}	Low Level Input Voltage			0.7			0.8	V
I _{OH}	High Level Output Current			−0.4			−0.4	mA
I _{OL}	Low Level Output Current			4			8	mA
f _{CLK}	Clock Frequency (Note 2)	0		25	0		25	MHz
f _{CLK}	Clock Frequency (Note 3)	0		20	0		20	MHz
t _w	Pulse Width (Note 2)	Clock High	18		18			ns
		Preset Low	15		15			
		Clear Low	15		15			
t _w	Pulse Width (Note 3)	Clock High	25		25			ns
		Preset Low	20		20			
		Clear Low	20		20			
t _{SU}	Setup Time (Notes 1 and 2)	20 ↑			20 ↑			ns
t _{SU}	Setup Time (Notes 1 and 3)	25 ↑			25 ↑			ns
t _H	Hold Time (Note 1 and 4)	0 ↑			0 ↑			ns
T _A	Free Air Operating Temperature	−55		125	0		70	°C

Note 1: The symbol (↑) indicates the rising edge of the clock pulse is used for reference.

Note 2: C_L = 15 pF, R_L = 2 kΩ, T_A = 25°C, and V_{CC} = 5V.

Note 3: C_L = 50 pF, R_L = 2 kΩ, T_A = 25°C, and V_{CC} = 5V.

Note 4: T_A = 25°C and V_{CC} = 5V.

Electrical Characteristics over recommended operating free air temperature range (unless otherwise noted)

Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ (Note 1)	Max	Units
V_I	Input Clamp Voltage	$V_{CC} = \text{Min}, I_I = -18 \text{ mA}$			-1.5	V
V_{OH}	High Level Output Voltage	$V_{CC} = \text{Min}, I_{OH} = \text{Max}$ $V_{IL} = \text{Max}, V_{IH} = \text{Min}$	DM54	2.5	3.4	V
			DM74	2.7	3.4	
V_{OL}	Low Level Output Voltage	$V_{CC} = \text{Min}, I_{OL} = \text{Max}$ $V_{IL} = \text{Max}, V_{IH} = \text{Min}$	DM54		0.25	V
			DM74		0.35	
			$I_{OL} = 4 \text{ mA}, V_{CC} = \text{Min}$	DM74		
I_I	Input Current @Max Input Voltage	$V_{CC} = \text{Max}$ $V_I = 7\text{V}$	Data		0.1	mA
			Clock		0.1	
			Preset		0.2	
			Clear		0.2	
I_{IH}	High Level Input Current	$V_{CC} = \text{Max}$ $V_I = 2.7\text{V}$	Data		20	μA
			Clock		20	
			Clear		40	
			Preset		40	
I_{IL}	Low Level Input Current	$V_{CC} = \text{Max}$ $V_I = 0.4\text{V}$	Data		-0.4	mA
			Clock		-0.4	
			Preset		-0.8	
			Clear		-0.8	
I_{OS}	Short Circuit Output Current	$V_{CC} = \text{Max}$ (Note 2)	DM54	-20	-100	mA
			DM74	-20	-100	
I_{CC}	Supply Current	$V_{CC} = \text{Max}$ (Note 3)		4	8	mA

Note 1: All typicals are at $V_{CC} = 5\text{V}, T_A = 25^\circ\text{C}$.

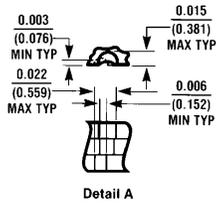
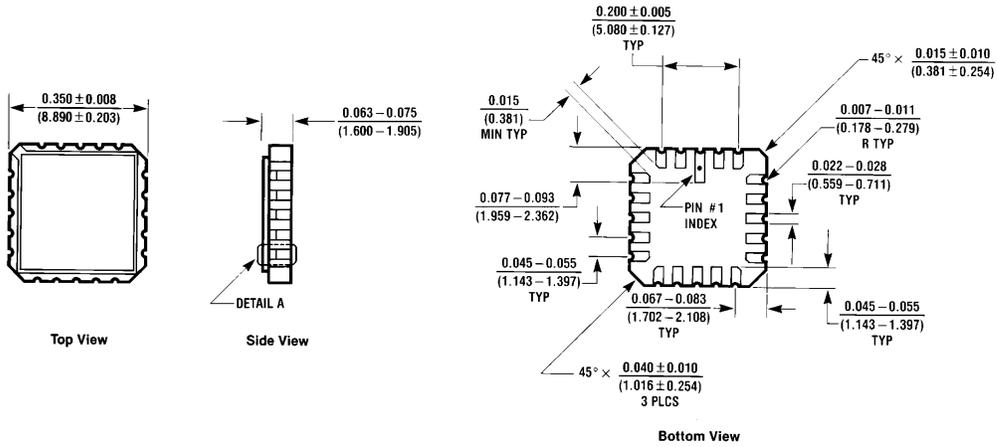
Note 2: Not more than one output should be shorted at a time, and the duration should not exceed one second. For devices, with feedback from the outputs, where shorting the outputs to ground may cause the outputs to change logic state an equivalent test may be performed where $V_O = 2.25\text{V}$ and 2.125V for DM54 and DM74 series, respectively, with the minimum and maximum limits reduced by one half from their stated values. This is very useful when using automatic test equipment.

Note 3: With all outputs open, I_{CC} is measured with CLOCK grounded after setting the Q and \bar{Q} outputs high in turn.

Switching Characteristics at $V_{CC} = 5\text{V}$ and $T_A = 25^\circ\text{C}$ (See Section 1 for Test Waveforms and Output Load)

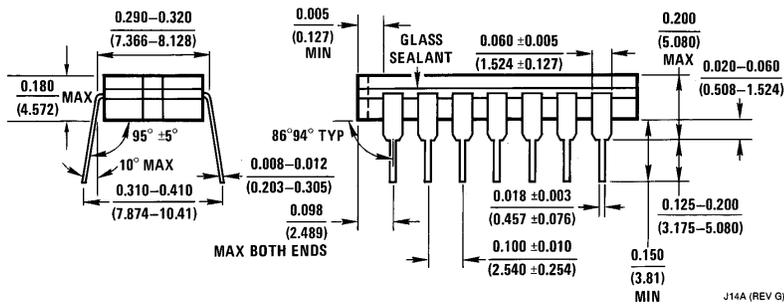
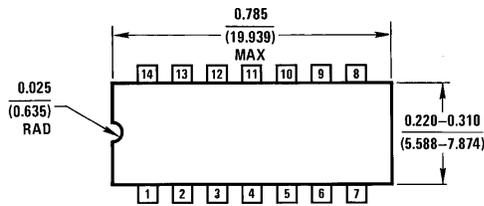
Symbol	Parameter	From (Input) To (Output)	$R_L = 2 \text{ k}\Omega$				Units
			$C_L = 15 \text{ pF}$		$C_L = 50 \text{ pF}$		
			Min	Max	Min	Max	
f_{MAX}	Maximum Clock Frequency		25		20		MHz
t_{PLH}	Propagation Delay Time Low to High Level Output	Clock to Q or \bar{Q}		25		35	ns
t_{PHL}	Propagation Delay Time High to Low Level Output	Clock to Q or \bar{Q}		30		35	ns
t_{PLH}	Propagation Delay Time Low to High Level Output	Preset to Q		25		35	ns
t_{PHL}	Propagation Delay Time High to Low Level Output	Preset to \bar{Q}		30		35	ns
t_{PLH}	Propagation Delay Time Low to High Level Output	Clear to \bar{Q}		25		35	ns
t_{PHL}	Propagation Delay Time High to Low Level Output	Clear to Q		30		35	ns

Physical Dimensions inches (millimeters)



Ceramic Leadless Chip Carrier Package (E)
 Order Number 54LS74LMQB
 NS Package Number E20A

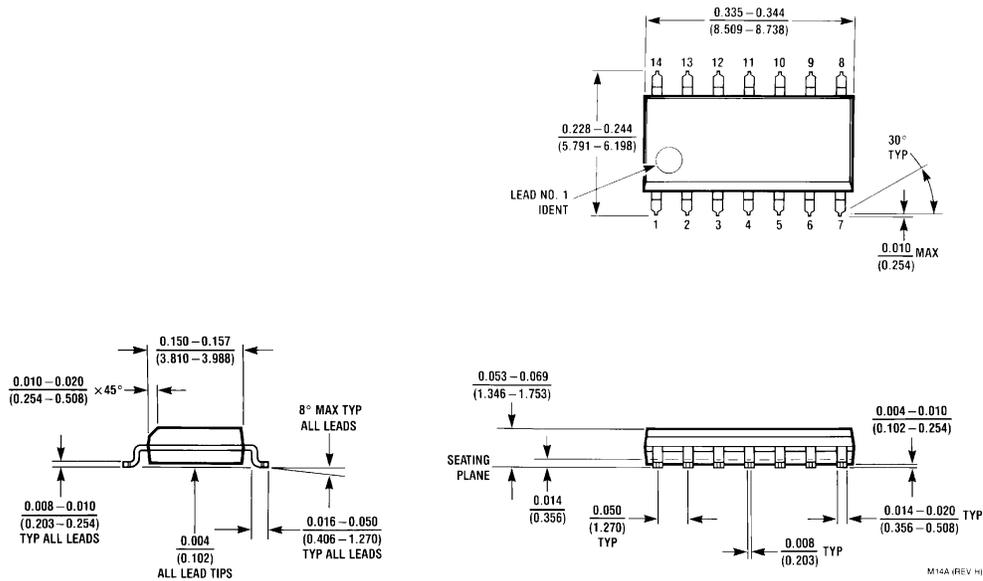
E20A (REV D)



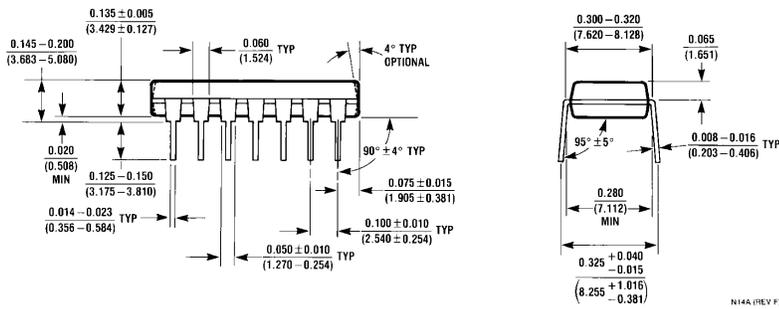
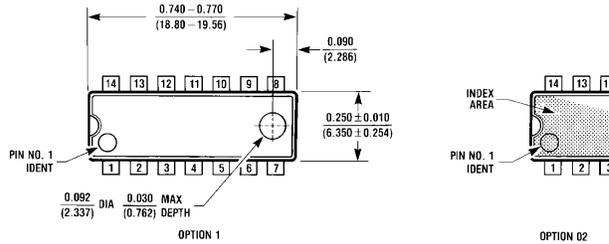
14-Lead Ceramic Dual-In-Line Package (J)
 Order Number 54LS74DMQB or DM54LS74AJ
 NS Package Number J14A

J14A (REV G)

Physical Dimensions inches (millimeters) (Continued)



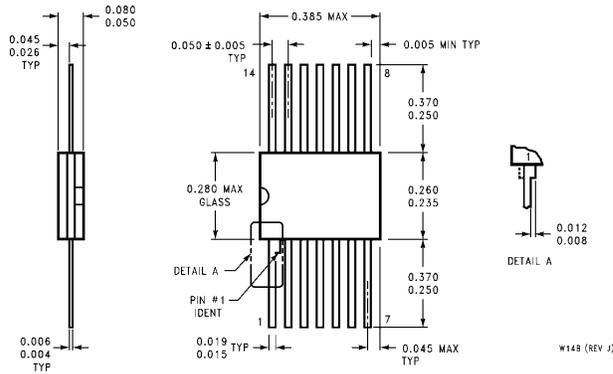
14-Lead Small Outline Molded Package (M)
Order Number DM74LS74AM
NS Package Number M14A



14-Lead Molded Dual-In-Line Package (N)
Order Number DM74LS74AN
NS Package Number N14A

**54LS74/DM54LS74A/DM74LS74A Dual Positive-Edge-Triggered
D Flip-Flops with Preset, Clear and Complementary Outputs**

Physical Dimensions inches (millimeters) (Continued)



14-Lead Ceramic Flat Package (W)
Order Number 54LS74FMQB or DM54LS74AW
NS Package Number W14B

LIFE SUPPORT POLICY

NATIONAL'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT OF NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, and whose failure to perform, when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury to the user.
2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.



National Semiconductor Corporation
 1111 West Bardin Road
 Arlington, TX 76017
 Tel: 1(800) 272-9959
 Fax: 1(800) 737-7018

National Semiconductor Europe
 Fax: (+49) 0-180-530 85 86
 Email: onjwge@tevm2.nsc.com
 Deutsch Tel: (+49) 0-180-530 85 85
 English Tel: (+49) 0-180-532 78 32
 Français Tel: (+49) 0-180-532 93 58
 Italiano Tel: (+49) 0-180-534 16 80

National Semiconductor Hong Kong Ltd.
 19th Floor, Straight Block,
 Ocean Centre, 5 Canton Rd.
 Tsimshatsui, Kowloon
 Hong Kong
 Tel: (852) 2737-1600
 Fax: (852) 2736-9960

National Semiconductor Japan Ltd.
 Tel: 81-043-299-2309
 Fax: 81-043-299-2408

National does not assume any responsibility for use of any circuitry described, no circuit patent licenses are implied and National reserves the right at any time without notice to change said circuitry and specifications.

This datasheet has been download from:

www.datasheetcatalog.com

Datasheets for electronics components.