

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**CLASIFICACIÓN LOCAL DE LOS SUELOS DE CHIMBOTE
MEDIANTE MÉTODOS GEOFÍSICOS**

TESIS

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO CIVIL

NILSSON MORI SÁNCHEZ

Lima- Perú

2015

ÍNDICE

	Pág.
RESUMEN.....	3
LISTA DE FIGURAS	5
LISTA DE TABLAS	6
LISTA DE SIMBOLOS Y SIGLAS.....	7
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	8
1.1. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	8
1.2. OBJETIVOS	8
1.2.1. Objetivo General	8
1.2.2. Objetivo Especifico	8
1.3. ANTECEDENTES	9
CAPÍTULO II: ÁREA DE ESTUDIO Y ASPECTOS GEOLÓGICOS - GEOTÉCNICOS	11
2.1. CIUDAD DE CHIMBOTE.....	11
2.2. GEOLOGÍA.....	15
2.2.1. Geología Regional	15
2.2.2. Geología Local.....	16
2.3. GEOTECNIA.....	18
CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO.....	20
3.1. TEORÍA DE ONDAS	20
3.2. ONDAS DE CUERPO	20
3.3. ONDAS DE SUPERFICIE	22
3.4. MÉTODO DE GENERACIÓN DE ONDAS	25
3.4.1. Métodos Activos.....	25
3.4.2. Métodos Pasivos.....	25
3.5. PROSPECCIÓN GEOFÍSICA.....	26
3.5.1. Ensayo MASW.....	26
3.5.2. Ensayo de Refracción Sísmica.....	26
3.5.3. Descripción del Equipo de Medición.....	27
3.5.4. Ensayo de Microtrepidaciones	28
3.5.5. Descripción del Equipo de Medición.....	29
3.6. ANÁLISIS DE MICROTREPIDACIONES.....	30
3.6.1. Método Espectral	30
3.6.2. Método Espectral de Nakamura (H/V).....	31

3.7.	CLASIFICACIÓN SÍSMICA DE SUELOS SEGÚN ASCE 2010	32
3.8.	CLASIFICACIÓN DE SUELOS SEGÚN NORMA TÉCNICA DE DISEÑO SISMORESISTENTE E-030	33
3.9.	PARÁMETROS DINÁMICOS DEL SUELO.....	34
	CAPÍTULO IV: MÉTODOS APLICADOS	38
4.1.	ANÁLISIS DE ONDAS SUPERFICIALES EN ARREGLOS MULTICANALES	38
4.1.1.	Registro de Ondas de Corte.....	38
4.1.2.	Procesamiento de Ondas de Corte	38
4.1.3.	Resultados de las Mediciones	39
4.2.	REFRACCIÓN SÍSMICA	51
4.2.1.	Registro de Ondas Compresionales.....	51
4.2.2.	Procesamiento de Ondas Compresionales	52
4.2.3.	Resultados de las Mediciones.....	53
4.3.	MEDICIÓN DE MICROTREMORES – MÉTODO NAKAMURA	53
4.3.1.	Registro de Microtremores	53
4.3.2.	Procesamiento de Microtremores.....	54
4.3.3.	Resultado de las Mediciones.....	55
	CAPÍTULO V: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	56
5.1.	ANÁLISIS DE LAS ONDAS DE CORTE Y COMPRESIÓN	56
5.2.	ANÁLISIS ESPECTRAL – MÉTODO DE NAKAMURA.....	61
5.3.	COMPARACIÓN DE PERIODOS CARACTERÍSTICOS OBTENIDOS POR LOS ENSAYOS MASW Y MICROTREMOR	62
5.4.	PROPAGACIÓN ONDAS DE CORTE EN SUELOS POTENCIALMENTE LICUABLES	65
	CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	67
6.1.	CONCLUSIONES.....	62
6.2.	RECOMENDACIONES	65
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

RESUMEN

La ciudad de Chimbote está cimentada sobre depósitos aluviales del río Lacramarca constituidos por arenas limpias y arenas limosas, estos depósitos en su gran extensión no son adecuados para cimentaciones simples ello se evidenció en el sismo del 31 de mayo de 1970, el cual tuvo una magnitud de Ms 7.8, profundidad focal de 45 km y con epicentro a 50 km de la costa del Perú al oeste de Chimbote; como producto de ésta catástrofe murieron 50,000 personas, desaparecieron 20,000 y quedaron heridos 150,000 sin contar con las cuantiosas pérdidas materiales.

En la actualidad surge la preocupación de estar preparados ante un evento sísmico similar o de mayores proporciones, es por ello que en los análisis realizados se utiliza ondas sísmicas similares a las que se generan durante un evento sísmico.

La principal fuente de información para el desarrollo de la clasificación sísmica de suelos son las ondas compresionales obtenidas de los ensayos de refracción sísmica y las ondas de corte obtenidas de los ensayos MASW.

La clasificación sísmica consiste en ubicar mediante ensayos geofísicos zonas con diferentes comportamientos dinámicos, por ello la información se plasmará en un plano donde se señalará los diferentes tipos de suelos siguiendo la recomendación de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles, dicho plano se aplica para tener una visión del comportamiento dinámico del suelo en los 30 metros más superficiales, así como también para planes de uso de suelo.

Con los ensayos geofísicos de refracción sísmica y MASW se calculó los parámetros dinámicos del suelo a diferentes profundidades evidenciando un incremento de la rigidez al incrementar la profundidad de análisis.

El módulo de elasticidad dinámico E_d es utilizado para construir planos a diferentes profundidades de análisis desde una cimentación superficial hasta una cimentación profunda, estos planos son aplicados para visualizar el comportamiento dinámico de los materiales a diferentes profundidades y elegir un nivel adecuado de cimentación.

Con los ensayos de microtrepidaciones se determinó el período de vibración fundamental del suelo que contribuirá para determinar el comportamiento dinámico del suelo. Finalmente, con la información de cada punto analizado se construye un plano de isoperíodos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Unidad estratigráfica regional.....	17
Figura 3.1. Onda de compresión V_p	22
Figura 3.2. Onda de corte V_s	22
Figura 3.3. Componentes de las ondas de Corte.....	23
Figura 3.4. Onda Rayleigh.....	24
Figura 3.5. Normalización de la onda de corte.....	24
Figura 3.6. Onda Love.....	25
Figura 3.7. Ensayo MASW.....	27
Figura 3.8. Ensayo de refracción sísmica.....	28
Figura 3.9. Equipo de medición para ensayos de refracción sísmica y MASW.	29
Figura 3.10. Ensayo de microtrepidaciones.....	30
Figura 3.11. Equipo de medición de microtrepidaciones.....	31
Figura 3.12. Ciclo de histeresis.....	36
Figura 4.1. Procesamiento de ondas de corte.....	40
Figura 4.2. Procesamiento de ondas compresionales.....	53
Figura 4.3. Procesamiento de los registros de microtremor.....	55
Figura 5.1. Comparación de los periodos obtenidos por ensayos de microtrepidaciones y ensayos MASW.....	63
Figura 5.2. Comparación de los periodos obtenidos por ensayos de microtrepidaciones y ensayos MASW para errores menores a 10%.....	64
Figura 5.3. Suelos potencialmente licuables para $V_s < 200$ m/s.....	65

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1. Clasificación según la ASCE.....	34
Tabla 3.2. Parámetros del suelo según la norma E-030.....	35
Tabla 3.3. Variación de las propiedades del suelo con la deformación cortante.....	36
Tabla 5.1. Clasificación de suelos según ASCE y la norma técnica de diseño sismoresistente E-030.....	57
Tabla 5.2. Parámetros elásticos para $D_f=1.5m$	59
Tabla 5.3. Parámetros elásticos para $D_f=8.0m$	60
Tabla 5.4. Parámetros elásticos para $D_f=15.0m$	61
Tabla 5.5. Período de vibración fundamental del suelo.....	61
Tabla 5.6. Comparación de periodos de vibración obtenidos por el método de microtrepidaciones y MASW.....	63
Tabla 5.7. Comparación de periodos de vibración obtenidos por el método de microtrepidaciones y MASW para un error menor de 10%.....	64
Tabla 5.8. Ensayos MASW realizados en los sectores potencialmente licuables.....	65

LISTA DE SIMBOLOS Y SIGLAS

ASCE	Sociedad Americana de Ingenieros Civiles
A.A.H.H	Asentamiento Humano
E-030	Norma Técnica de Diseño Sismorresistente
MASW	Análisis de Ondas Superficiales en Arreglo Multicanal
MMI	Escala Modificada Mercalli de Intensidades de Sismos
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
SIG	Sistema de Información Geográfica
SPT	Ensayo de Penetración Estándar
T₀	Periodo característico del suelo
Vs30	Velocidad Promedio de las ondas de corte de los 30m más superficiales

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

El presente tema de investigación encuentra justificación en la importancia que demanda tener una clasificación de los suelos de Chimbote, aplicando métodos que dentro del análisis utilice ondas de cuerpo y de superficie similares a las que se encuentra en un evento sísmico, teniendo un panorama del posible comportamiento de los suelos ante un sismo, identificando las zonas críticas y los períodos de vibración naturales del suelo de una forma rápida y económica. Para estos fines se aplica la metodología recomendada tanto por la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles con siglas en inglés (ASCE 2010), y el profesor Nakamura, apoyados en métodos de prospección geofísica tales como el ensayo MASW, refracción sísmica y medición de microtrepidaciones.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

Determinar las características dinámicas del suelo de Chimbote mediante ensayos geofísicos a través del conocimiento de la velocidad de ondas de corte, así como períodos de vibración natural.

1.2.2. Objetivo Específico

Mediante ensayos MASW se intentará obtener el parámetro V_{s30} para cada punto analizado y mediante el sistema de información geográfica (SIG) se integrará la data procesada de campo, obteniendo con ello un plano de los diversos tipos de suelos, aplicando la metodología recomendada por la ASCE 2010.

De la combinación de los resultados obtenidos de los ensayos MASW y de la refracción sísmica se podrá determinar los parámetros dinámicos del suelo.

Asimismo, mediante ensayos de microtrepidaciones y haciendo uso del método de Nakamura se obtendrá el período de vibración natural del suelo, ésta

información se integrará en un sistema de información geográfica (SIG) dando como resultado un plano de isoperíodos.

1.3. ANTECEDENTES

El Perú se encuentra ubicado dentro del denominado "Cinturón de Fuego del Pacífico" y casi al borde del encuentro de dos placas tectónicas, la placa de Sudamericana y la de Nazca, en dicho lugar se produce el efecto de subducción, el mismo que ha provocado sismos de gran poder destructivo.

Chimbote es una ciudad costera que por su ubicación geográfica está propensa a un evento sísmico considerable, ello se evidenció en el sismo del 31 de mayo de 1970, cuyas consecuencias fueron lamentables ya que hubieron muchas pérdidas humanas, así como millonarias pérdidas materiales. Desde el año 1970 la ciudad de Chimbote se encuentra en un silencio sísmico, lo cual advierte que debemos estar preparados para un evento sísmico de gran magnitud

El sismo del año 1970 marcó un precedente para empezar a desarrollar investigaciones de vulnerabilidad sísmica, evaluación de potencial de licuación de suelos; y seguir desarrollando hoy en día investigaciones que brinden información de la característica dinámica de los suelos de Chimbote.

En el Perú se vienen aplicando ensayos geofísicos tales como ensayos MASW, refracción sísmica y microtrepidaciones, como medios rápidos y versátiles para conocer las características dinámicas del suelo, ya que por medio de ésta información se tendrá un panorama del estado actual de los suelos donde se encuentra cimentada la ciudad de Chimbote detectando así las áreas que resultarían más afectadas ante un evento sísmico.

En la ciudad de México se realizaron estudios similares con ésta metodología, la cual utiliza el parámetro V_{s30} , el cual se obtiene de calcular el promedio de los 30m más superficiales del terreno; ésta profundidad de análisis es conocida también como roca ingenieril. (Ref. Lermo, J ;D.F. México, 1994)

De acuerdo al valor promedio de la velocidad de ondas de corte se otorga la clasificación sísmica recomendada por la ASCE 2010; la cual sugiere clasificar a los suelos en seis grupos diferentes.

Así como también se realizaron campañas de registros de microtremor para obtener las formas espectrales de la técnica de Nakamura y posteriormente el período característico de vibración del suelo.

CAPÍTULO II: ÁREA DE ESTUDIO Y ASPECTOS GEOLÓGICOS - GEOTÉCNICOS

2.1. CIUDAD DE CHIMBOTE

Chimbote es una ciudad cosmopolita ubicada en la costa norte del Perú, es la capital de la provincia de Santa, departamento de Ancash. Esta ciudad tuvo un gran crecimiento demográfico, por tal motivo es considerada, según el Instituto Nacional de Estadística e Informática, como la octava ciudad más poblada del Perú, albergando a la fecha a medio millón de habitantes.

La principal actividad económica es la pesca, siendo considerada a mediados del siglo XX, como el puerto pesquero con mayor producción en el mundo.

En la década de los años 70, la ciudad tuvo una caída económica debida básicamente a dos factores: (i) la sobrepesca y contaminación ambiental, producto de la industria que agotó los cardúmenes de la costa; y (ii) factores climáticos como el Fenómeno del Niño. Asimismo, en el año 1970 se produjo el terremoto de gran magnitud que redujo a escombros gran parte de la ciudad, provocando con ello numerosas muertes.

Es por esta catástrofe que se realiza un análisis de los registros sísmicos históricos e instrumentales, observando que no ha ocurrido un sismo de gran magnitud desde el año 1970, por lo que Chimbote actualmente se encuentra en un silencio sísmico.

Los eventos sísmicos documentados que tuvieron un impacto en la ciudad de Chimbote son [26]:

- **Sismo del 02 de Enero de 1902.**

A las 09.08 horas se produjo un fuerte y prolongado movimiento de tierra en las ciudades de Casma y Chimbote, el mismo que causó gran alarma en la población. El movimiento fue sentido desde Paita hasta Lima, y las intensidades fueron: en Casma y Chimbote de V (MMI); y en Chiclayo de IV (MMI).

- **Sismo del 20 de Mayo de 1917.**

A las 23.45 horas se produjo un fuerte temblor en la ciudad de Trujillo, el cual causó daños en edificios públicos. El sismo se sintió con mayor fuerza en las ciudades de Zaña, Chimbote y Casma. Las intensidades fueron: en Trujillo de VI (MMI); y en Zaña, Chimbote y Casma de IV (MMI).

- **Sismo del 05 de Marzo de 1935.**

A las 17.35 horas ocurrió un fuerte sismo que fue sentido en la costa peruana, entre las latitudes 5° y 11°, el mismo que causó graves daños en la ciudad de Trujillo, ligeros daños en las ciudades de Cutervo, Cajamarca, Chimbote y Casma. Asimismo, fue sentido en las poblaciones del Callejón de Huaylas hasta Chiquián, en Celendín, San Marcos y Pomabamba. En la ciudad de Ticapampa fueron destruidas seis casas y provocó la inestabilidad de otras ocho. La intensidad en la ciudad fue de VI (MMI).

- **Sismo del 19 de Agosto de 1955.**

A las 02.45 horas se produjo un fuerte movimiento de tierra que estremeció la zona norte del país. Dicho sismo fue ligeramente destructor en la Hacienda Cartavio y en la ciudad de Chimbote. El mismo fue sentido desde Piura hasta Lima. Las intensidades fueron: en las ciudades de Cartavio y Salaverry de VI (MMI); y en las ciudades Chimbote y Trujillo de V (MMI).

- **Sismo del 17 de Febrero de 1956.**

A las 20.37 horas ocurrió un temblor que fue sentido en los departamentos de La Libertad y Ancash. En la ciudad de Chimbote la intensidad fue de V (MMI).

- **Sismo del 29 de Octubre de 1956.**

A las 10.42 horas se produjo un sismo ligeramente destructor en las ciudades de Huánuco y Tingo María, cuyas intensidades fueron de VI y VII (MMI), respectivamente. Dicho sismo fue sentido fuertemente en los pueblos aledaños al río Marañón, en el Puerto de Chimbote - Departamento de Ancash; y levemente en la ciudad de Lima.

- **Sismo del 3 de Julio de 1961.**

A las 9.51 horas un violento temblor en la ciudad de Chimbote que tuvo una intensidad de grado VI (MMI) causó alarma en las ciudades de Trujillo y Huaraz. Se produjo una agitación del mar en las costas de las ciudades de Chimbote, Salaverry y Buenos Aires. La intensidad del sismo en la ciudad de Trujillo fue de V (MMI).

- **Sismo del 15 de Noviembre de 1962.**

A las 18:25 horas, ocurrió un sismo en la costa del país, específicamente frente a la ciudad Trujillo. Dicho movimiento se sintió también en las ciudades de Chiclayo, Trujillo y Chimbote. La intensidad en la ciudad de Trujillo fue de V (MMI); y en las ciudades de Chiclayo y Chimbote de IV (MMI).

- **Sismo del 24 de Setiembre de 1963.**

A las 11.30 horas se produjo un movimiento sísmico destructor en los pueblos de la Cordillera Negra. El mismo que causó fuertes daños a las casas de adobe de los pueblos de Huayllacayán, Cajacay, Malvas, Cotaparaco, Cajamarquilla, Ocros, Raquia, Congas y Llipa. Se provocó muchas averías en los canales de regadío y caminos. En la ciudad de Huaraz se produjeron daños en varias construcciones, con caída de tejas y cornisas. En la ciudad de Huarney se destruyeron viviendas antiguas de adobe; asimismo se produjeron algunas rajaduras en inmuebles antiguos del norte de la ciudad de Lima. Además el sismo fue sentido con fuerte intensidad en las ciudades de Chimbote y Salaverry. La intensidad fue de VI - VII (MMI) en Huarney; VI (MMI) en Cajacay, Congas, Cotaparaco, Huayllacayán, Malvas, Ocros, Raquia y Llipa.

- **Sismo del 17 de Octubre de 1966.**

A las 16.41 horas se sintió en el ciudad de Lima uno de los sismos más destructores de la historia, después del sismo de 1940, producto del mismo se perdieron cien vidas. La fuerza destructiva se sintió a lo largo de la franja litoral entre Lima y Supe. La intensidad máxima se estimó en VIII (MMI). La aceleración producida en Lima fue de 0.4g. Las intensidades fueron de VIII (MMI) en la ciudad de Huacho, Huaura, Chancay, Puente Piedra y Supe; de VII (MMI) en la ciudad de Lima y Cajatambo; de VI (MMI) en la ciudad Chimbote y Virú, y de V (MMI) en la ciudad de Trujillo.

- **Sismo del 31 de Mayo de 1970.**

A las 15.23 horas se produjo uno de los sismos más catastróficos ocurridos en el Perú, murieron 50,000 personas, y desaparecieron unas 20,000, además se tuvo un saldo de 150,000 heridos, según informe de CRYRZA. Con la evaluación de daños que ésta entidad realizó se puede tener una idea de la catástrofe:

60,000 viviendas necesitan reconstrucción.

38 poblaciones fueron afectadas, 15 quedaron con viviendas destruidas en más del 80%, el resto sufrió daños de consideración.

Los alcantarillados de 18 ciudades del país quedaron destruidos afectando a un total de 309,000 habitantes.

6,730 aulas fueron destruidas.

La capacidad de energía eléctrica de los departamentos de Ancash y La Libertad quedaron reducidas a un 10%, por la serie de daños causados en la Central Hidroeléctrica de Huallanca.

Quedaron dañadas las facilidades para irrigar 110,000 ha.

El 77% de los caminos de los departamentos de La Libertad y Ancash se interrumpieron, así como el 40% de los existentes en las ciudades de Chancay y Cajatambo.

Como características del sismo, se puede mencionar que en la zona de la costa cercana al epicentro, se produjeron fenómenos de licuación, deslizamiento de los taludes de la Cordillera y el gran aluvión que arrasó con la ciudad de Yungay al desprenderse la cornisa norte del Nevado Huascarán, arrastrando piedras, nieve y lodo.

En el Callejón de Huaylas se produjeron varios deslizamientos y escarpas; a la altura de la ciudad de Recuay se represó el Río Santa; en la zona de la costa se agrietó el suelo con eyección de agua, arena y lodo, hasta una altura de un metro.

El sismo fue sentido desde el departamento de Tumbes hasta Ica y desde la costa del país hasta Iquitos, produciéndose intensidades de IX (MMI) en las ciudades de Casma y Chimbote; de VIII (MMI) en el Callejón de Huaylas y de VII (MMI) en las ciudades de Trujillo, Moche y Paramonga.

- **Sismo del 18 de Abril de 1993.**

A las 04.16 horas, ocurrió un fuerte sismo que sacudió la ciudad de Lima y alrededores. El sismo originó daños considerables en las viviendas construidas con materiales inestables en los alrededores de la ciudad, y en las zonas altas de Lima. La intensidad fue de VII (MMI) en la zona de San José de Palle y La Molina; de VI (MMI) en las zonas de Ñaña y Chosica; de V (MMI) en las ciudades de Canta, Santa Rosa de Quives; de IV (MMI) en las ciudades de Huaros, Cañete y Chimbote; de III (MMI) en las ciudades de Ica, Huaraz y Cerro de Pazco, y de II (MMI) en la ciudad de Chiclayo.

2.2. GEOLOGÍA

2.2.1. Geología Regional

En el ámbito regional que comprende el área de estudio se tiene las unidades litológicas que abarcan desde el Mesozoico (Cretáceo Inferior) hasta el Cenozoico (Cuaternario), donde la Fm. La Zorra (Grupo Casma) está compuesta por flujos lávicos (andesitas) y piroclastos en capas delgadas intercaladas con limolitas y areniscas. Los materiales Cuaternarios están formados básicamente por depósitos marinos, aluviales y eólicos. También se tiene presencia de Unidades Intrusivas del Cretáceo como la súper unidad Patap (microdiorita, diabasa, gabro, diorita), súper unidad Santa Rosa (tonalitas) de batolitos, plutones, diques, sills, etc. (Ref. INGEMMET, Boletín N° 59 Serie A : Carta Geológica Nacional, Geología de los Cuadrángulos de Chimbote, Casma y Culebras)

La Unidad Estratigráfica Regional, que presenta el área de estudio, se resume en la Figura 2.1 (Ref. INGEMMET, Mapa Geológico del Cuadrángulo de Chimbote hoja 19 -f)

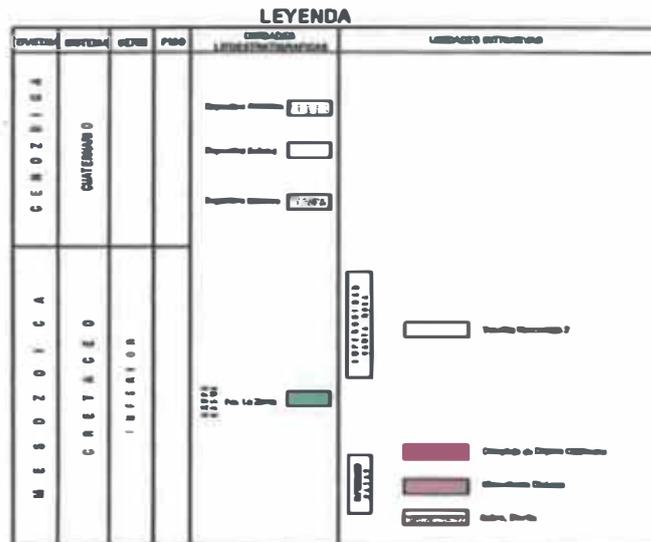


Figura 2.1. Unidad estratigráfica regional

2.2.2. Geología Local

La geología del área está representada por tres tipos de constituyentes: (i) el Volcánico Casma - Fm. La Zorra (derrames andesíticos y riolíticos), (ii) el Intrusivo (granodiorita), y (iii) el Cuaternario (depósitos de arenas eólicas y aluvional). El tipo de suelo que predomina en la zona es arenoso y areno limoso con presencia de cantos en profundidad.

- **Geomorfología**

Las geoformas que se presentan en Chimbote, están relacionados con la composición litológica, y determinan condiciones más específicas del suelo y los recursos hídricos. Asimismo, se presentan unidades de geoformas como cerros, planicies, pampas, bahías, islas, etc. Estas geoformas están asentadas sobre un terreno árido y seco rodeado de estribaciones costeras y entre los cuales desemboca el río Lacramarca, que tiene un régimen irregular.

- **Litoestratigrafía**

En la presente tesis sólo se mencionan las unidades que afloran en los alrededores del área de estudio de la investigación.

MESOZOICO:

Cretáceo

Gpo. Casma (Fm. La Zorra)

La Formación “La Zorra”, pertenece al Grupo Casma; esta formación consiste en flujos de andesita en capas delgadas y piroclastos intercalados con sedimentitas, que consisten en limolitas y areniscas. Sobreyaciendo a la Formación “La Zorra” está dispuesta la “Formación Junco”, que también pertenece al Grupo Casma, y el cual consiste en lavas en almohadillas intercaladas con algunos paquetes de aglomerados y flujos lávicos. El grosor de los paquetes de almohadillas oscila en promedio entre 50 cm. y 1 m.

CENOZOICO:

Cuaternario

Depósitos Eólicos (Q-e)

Se encuentran constituidos por arenas eólicas de grano fino a medio, que evidencian como mantos de arenas de grosor variable o como pequeños barjanes en movimiento con dirección predominante NE; en ciertas zonas las arenas han quedado estabilizadas por la acción de la humedad y crecimiento de vegetación. Los mismos que son de depósito reciente y cubren grandes sectores de la zona evaluada.

Depósitos Aluviales (Q-al)

Son depósitos modernos alongados constituidos por un conglomerado inconsolidado de matriz limo-arenosa, siendo frecuente observar la ocurrencia de capas lenticulares de arcillas. Estas son las áreas de mayor valor agrícola, pues son objeto de un cultivo intensivo; y conforman los lechos y conos de deyección de ríos y quebradas.

Rocas Intrusivas

Son rocas que están presentes en los cerros aledaños de la zona del proyecto en su sector Occidental y están constituidas básicamente por granitos, dioritas,

microdioritas, gabros; todos ellos pertenecientes a las súper unidades Patap y Santa Rosa.

Para mayor detalle, en el plano **P-01** se tienen sectorizadas las unidades litológicas presentes en la ciudad de Chimbote, especialmente los depósitos Cuaternarios que se sub dividen en Sector A, B, C, D, E, F y G, siendo el Sector E netamente de afloramientos de macizo rocoso recubiertos en algunas zonas por arenas eólicas (Ref. Morimoto, R ; Overseas Technical Cooperation Agency, Government of Japan, March ,1971) .

2.3. GEOTECNIA

La ciudad de Chimbote está situada sobre depósitos aluviales del río Lacramarca constituidas por arenas limpias y arenas limosas saturadas con compacidad suelta, media y densa.

Con el propósito de otorgarle una característica como el material del que está conformado el suelo de Chimbote de acuerdo a la velocidad promedio de ondas de corte, se recopiló información de investigaciones geotécnicas anteriores.

Dentro de las exploraciones geotécnicas resaltan los ensayos de penetración estándar SPT, el ensayo de cono Holandés y la posteadora manual, de las muestras alteradas extraídas se puede inferir que la mayor parte son arenas finas mal gradadas a limosas.

De los estudios de mecánica de suelos realizados por la PNUD 2000, se puede determinar que la ciudad de Chimbote se encuentra dividida en tres sectores:

- (i) Sector Norte, que abarca los A.A.H.H de San Pedro, Pensacola, la Siderúrgica, la Urbanización La Caleta y el Casco Urbano. Generalmente se presenta un estrato potente de arena fina a media con lentes en escaso porcentaje de limo o caliche y gravas.

Los sectores de la Siderúrgica y La Caleta presentan una capa superior variable de material orgánico o mezclado con material limo arenoso. En el caso de la Siderúrgica, la roca basal se encuentra de 10 a 15 mts. de profundidad, la napa freática se encuentra a un promedio de 1.50mts. de

profundidad, encontrándose a mayor profundidad (5.00 mts.) en las áreas altas como San Pedro y a menor profundidad (0.5–1 mts.) en la zona baja, como en la Siderúrgica.

- (ii) Sector Central, el cual abarca desde el A.A.H.H. 21 de Abril por el extremo Norte hasta Villa María Baja al Sur, en donde el suelo está cubierto por material fino de relleno o material orgánico como en Miramar Bajo. En general, el estrato superior es arenoso de granos finos a medios hasta los 10 mts., subsiguientemente se observa arenas limosas o con lentes de arcillas y grava fina, como en el caso de Miramar Bajo y Gran Trapecio, respectivamente.

La napa freática en promedio se encuentra a poca profundidad entre 0.70 y 1.40 mts., salvo el caso de Villa María Baja donde la napa freática es superficial.

- (iii) Sector Sur, abarca los barrios de Villa María Alta, las Urb. de Buenos Aires y Casuarinas. El suelo está cubierto superficialmente de arenas eólicas, en el estrato superior de 20mts. de profundidad contiene arena gruesa a fina pobremente gradada que en ciertos casos se observa pequeños porcentajes de arcilla. Así también, se caracterizan por poseer napa freática profunda a partir de los 16mts.

CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO

3.1. TEORÍA DE ONDAS

Las ondas sísmicas poseen diferentes orígenes, ya sea originada por una falla, por una interacción entre placas, por pequeños golpes inducidos a la tierra, etc. Producto de estas excitaciones del medio se generan dos grupos de ondas, (i) las de cuerpo y, (ii) las de superficie que se propagan a través de la tierra.

Las ondas de cuerpo, a su vez se subdividen en ondas "S", denominadas también ondas de corte o de cizalla, y las ondas "P", denominadas también ondas de compresión.

Dentro de las ondas superficiales, las más importantes para la ingeniería, son las ondas Rayleigh y las ondas Love; todo éste conjunto de ondas pueden ser originadas por medios naturales, tales como sismos y ruido ambiental; así como por medios artificiales como el uso de explosivos, cargas pesadas, uso de combas. Las características del movimiento de las ondas están en función de las propiedades físicas de los medios, tales como la densidad y elasticidad.

Toda la información que contienen las ondas será registrada en diversos equipos tales como acelerógrafos, sismómetros de alta sensibilidad, sismógrafos dependiendo de la intensidad de las excitaciones al medio. (Ref. Cuadra, P; Venezuela, 2007)

3.2. ONDAS DE CUERPO

La existencia de las ondas de cuerpo fue predicha matemáticamente por Simeon Poisson (1831). Estas ondas se propagan a través del interior de la tierra siguiendo caminos curvos debido a la variada densidad y composición de la tierra.

Las ondas de cuerpo se transmiten en los temblores preliminares de un terremoto pero poseen poco poder destructivo, según su modo de vibración las ondas de cuerpo pueden ser de dos clases, ondas "P" y ondas "S".

- **Ondas P.-**

Denominadas también ondas de compresión o longitudinales, en este tipo de ondas la dirección de movimiento de las partículas coincide con la dirección de propagación de la onda que se desplazan en un medio generando compresiones y dilataciones, tal como se evidencia en la Figura 3.1.

De todas las ondas sísmicas las ondas "P" son las más veloces, en consecuencia son las primeras en llegar y ser registradas por los equipos de adquisición y son las más utilizadas en la prospección sísmica.

La velocidad de propagación de las ondas "P" es de $V_P = [(K + 3/4G)/\rho]^{1/2}$ (módulo de compresibilidad, módulo de rigidez, densidad) y se desplazan a una velocidad de entre 70 y 140% mayor que las ondas "S" para valores de la relación de Poisson (ν) entre 0.25 y 0.4 rango usual en suelos y rocas [20].

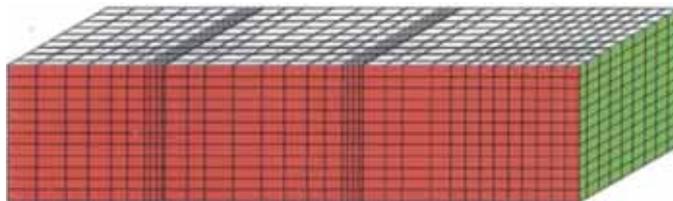


Figura 3.1. Onda de compresión V_p

- **Ondas S.-**

Denominadas también ondas torsionales o de corte, en este tipo de ondas la dirección de movimiento de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación de la onda; por lo que, están asociadas con deformaciones del terreno de tipo de cizalla, evidenciándose en la Figura 3.2

La velocidad de propagación de las ondas "S" es $V_s = (G/\rho)^{1/2}$ (módulo de rigidez, densidad), las ondas "S" no se propagan a través de los líquidos ya que estos no pueden soportar los esfuerzos cortantes.

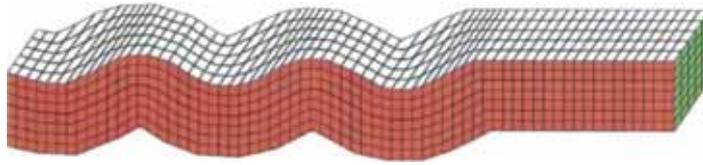


Figura 3.2. Onda de corte Vs

La componente vertical de la onda “S” se denota por Sv, mientras que la componente horizontal se denota por SH, según se muestra en la Figura 3.3.

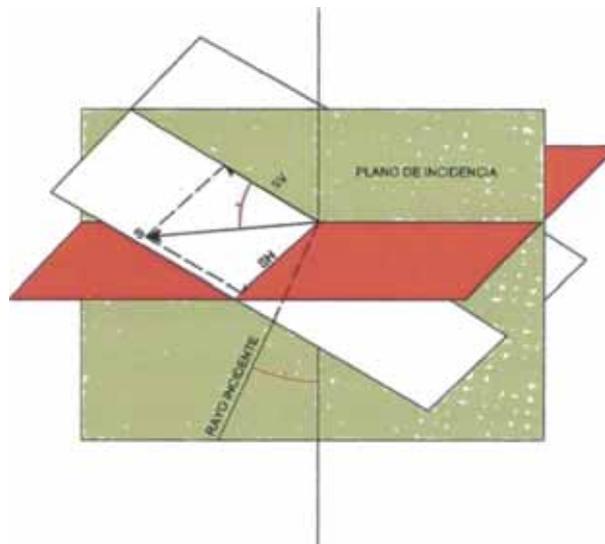


Figura 3.3. Componentes de las ondas de Corte

3.3. ONDAS DE SUPERFICIE

Las ondas de superficie poseen una amplitud mayor que las ondas “S”, lo que las convierte en las ondas más destructivas en lugares más allá del epicentro de un terremoto.

Dentro de este grupo se encuentran las ondas Rayleigh y las ondas Love, las cuales se generan por la interacción de ondas de cuerpo sobre una interfaz o una superficie libre, presentando una máxima amplitud en la superficie y nula en profundidad.

Dichas ondas sufren el fenómeno de dispersión, es decir su velocidad de propagación está en función de la longitud de onda; esta naturaleza dispersiva de la propagación de ondas de superficie en un semiespacio elástico y estratificado, conforman las bases de los métodos de análisis.

Debido a su baja frecuencia, las ondas de superficie provocan resonancia en edificios con mayor facilidad que las ondas de cuerpo, en consecuencia son las ondas sísmicas más destructivas.

- **Ondas Rayleigh.-**

La existencia de esta onda fue predicha por Lord Rayleigh, llamado John Strutt, (1885). Son generadas por la interacción entre las ondas "P" y la componente Sv de la onda de corte, son polarizadas verticalmente.

El movimiento de la partícula se presenta en una elipse vertical paralela a la dirección de propagación a lo largo de la superficie, presentando dirección retrógrada hasta cierta profundidad donde se vuelve prograda, como se evidencia en la Figura 3.4. Debido a las características del movimiento de estas ondas, son consideradas como las principales causantes de las sacudidas durante un evento sísmico; y en consecuencia son los principales causantes de los daños a las estructuras.

La velocidad de propagación de las ondas Rayleigh es ligeramente menor que la de corte; aproximadamente en un 7% ($V_R=93\%V_s$), como se observa en la Figura 3.5

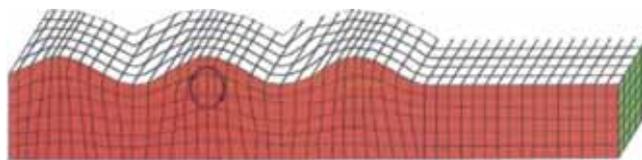


Figura 3.4. Onda Rayleigh

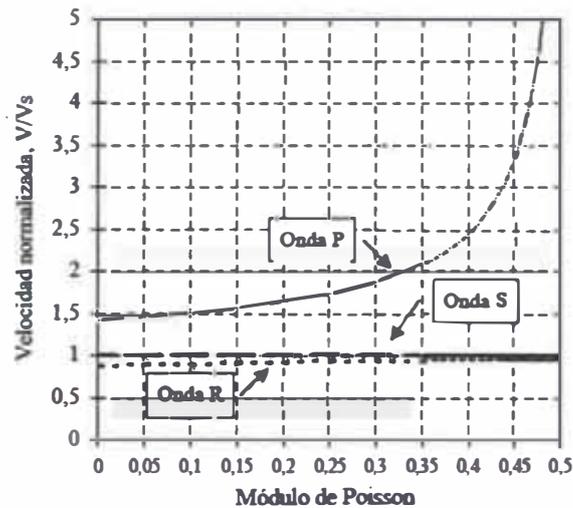


Figura 3.5. Velocidades de propagación normalizadas según la velocidad de ondas de corte [26]

- **Ondas Love.-**

La existencia de esta onda fue predicha por Augustus Love. (1911) y son generadas por la interacción entre las ondas SH.

Las ondas Love no son registradas en forma vertical, ya que están polarizadas horizontalmente, estas ondas hacen que la superficie se mueva de lado a lado en un plano horizontal, de manera perpendicular a la dirección de la propagación, como está señalada en la Figura 3.6.

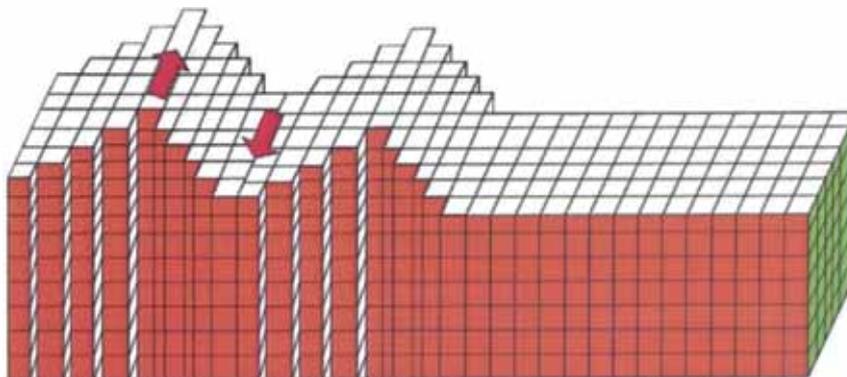


Figura 3.6. Onda Love

3.4. MÉTODO DE GENERACIÓN DE ONDAS

Gracias al avance de la electrónica, desde los principios de la década de los 70 se viene realizando estudios geofísicos para caracterizar al suelo mediante ensayos como refracción sísmica, downhole, crosshole; con el avance de la tecnología estos métodos se fueron perfeccionando y actualmente son ampliamente aplicados por ingenieros en los ensayos de refracción sísmica, MASW, microtremor, etc, como medios para caracterizar un depósito de suelo obteniendo de él la distribución estratigráfica, perfiles unidimensionales de ondas de corte, parámetros dinámicos y períodos fundamentales de vibración .

Los métodos aplicados para la generación de las ondas dependerán de las condiciones circundantes del área de estudio, de la sensibilidad del equipo y de los alcances que se desea obtener, estos métodos se conocen como activos y pasivos (Ref. Cuadra, P; Venezuela, 2007 y Kramer, S; USA 1996)

3.4.1. Métodos Activos

Estos métodos necesitan una fuente impulsiva, dentro de los métodos activos se menciona a dos de los ensayos más aplicados a la ingeniería actualmente, como son los ensayos de refracción sísmica y MASW.

La elección de una fuente impulsiva y la separación de los sensores en la superficie dependerán de la profundidad de análisis que se desea alcanzar.

3.4.2. Métodos Pasivos

Los métodos pasivos no necesitan de una fuente impulsiva para generar una señal, ya que se activa mediante la vibración ambiental que es generada por la actividad humana, viento, olas de mar, etc. El objetivo de este método es evaluar al terreno de forma indirecta y no destructiva.

Dentro de los métodos pasivos cabe mencionar al ensayo más aplicado actualmente, como es la medición de microtremores.

3.5. PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

3.5.1. Ensayo MASW

Este método de campo fue desarrollado en los años 90s por Choon Park y colaboradores. El ensayo MASW es un método activo de exploración geofísica que permite obtener el perfil unidimensional del suelo en función de la propagación de las ondas de corte “Vs”. El ensayo consiste en registrar los tiempos de viaje de las ondas de corte (ondas S), generada por una fuente de energía impulsiva en unos puntos localizados en cada extremo del tendido de la línea.

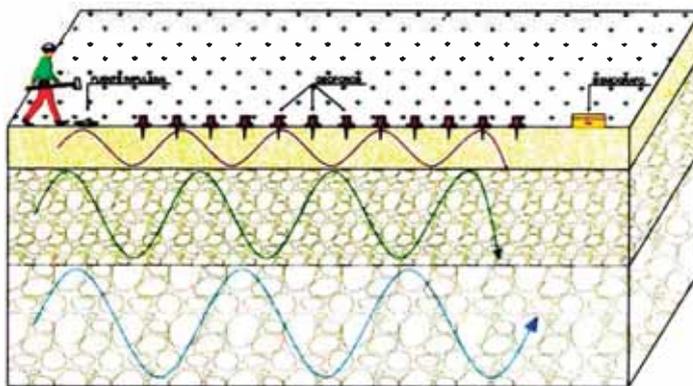


Figura 3.7. Ensayo MASW

3.5.2. Ensayo de Refracción Sísmica

El Ensayo de Refracción Sísmica consiste en la medir los tiempos de viaje de las ondas compresionales (ondas P), generada por una fuente de energía impulsiva en unos puntos localizados a diferentes distancias a lo largo de la línea denominados shot.

La fuente de energía es generalmente producida por el golpe de una comba. La energía es detectada, amplificada, y registrada mediante un proceso de conversión análogo digital, de tal manera que puede determinarse su tiempo de arribo en cada punto. El instante del impacto “Tiempo cero”, también es registrado conjuntamente con las vibraciones del suelo que arriban de los

geófonos. Por lo tanto, en general, los datos consisten en tiempos de viaje y distancias, siendo el tiempo de viaje el intervalo entre el “Tiempo cero” y el instante en que el geófono empieza a responder a la perturbación.

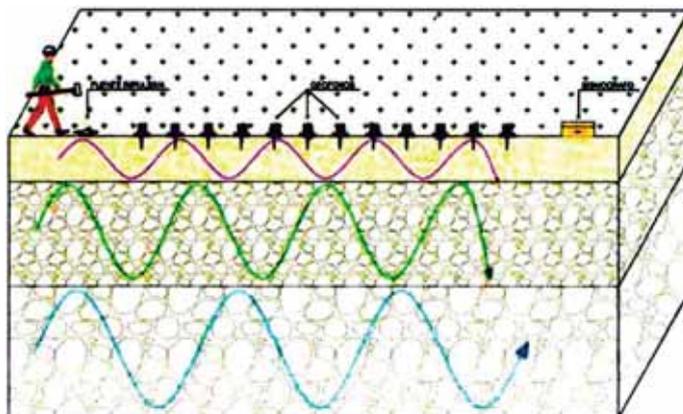


Figura 3.8. Ensayo de refracción sísmica

3.5.3. Descripción del Equipo de Medición

Para realizar los ensayos de refracción sísmica y MASW se utilizó un equipo de prospección geofísica GEODE, desarrollado por la empresa GEOMETRICS (ver Figura 3.9) el cual consta de 24 canales de entrada, cada uno tiene un convertidor A/D individual con resolución 24bit y alta velocidad de muestreo.

- 24 sensores o geófonos de 4.5 Hz de frecuencia, con los cuales se realiza en ensayo MASW.
- 24 sensores o geófonos de 14 Hz de frecuencia, con los cuales se realiza en ensayo de refracción sísmica.
- Computadora portátil.
- Un cable de refracción utilizado para conectar los geófonos con el sismógrafo.
- Un cable trigger que servirá de conexión entre el sismógrafo y la fuente impulsiva.
- Batería de 12v.
- Comba.



Figura 3.9. Equipo de medición para ensayos de refracción sísmica y MASW

3.5.4. Ensayo de Microtrepidaciones

Los microtemblores también denominados microtemblores, microtrepidaciones, ruido ambiental, oscilaciones omnipresentes son vibraciones inducidas en el suelo, ocasionadas por fuentes naturales y artificiales.

Las amplitudes de los microtemblores son dependientes de las fuentes y de la hora en la que se realiza el ensayo; sin embargo los periodos no varían de manera considerable, ya que dependen de las propiedades dinámicas de los suelos.

Los microtemblores ocurren en el intervalo de frecuencias de 0.01 a 30 Hz, para fines de exploración geofísica sólo interesa la banda comprendida de 0.1 a 10 Hz, en la que parte de la energía se transmite como ondas Rayleigh, cuyos modos y velocidades de propagación pueden ser estimados y medidos mediante arreglos instrumentales, como se muestra en la Figura 3.10 (Ref. Cuadra, P; Venezuela, 2007 y Bard,P; Balkema, 1999)

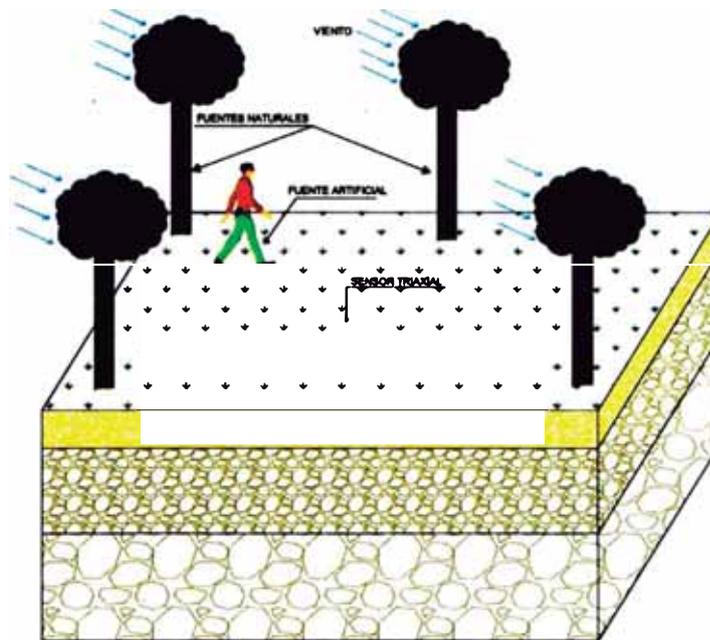


Figura 3.10. Ensayo de microtrepidaciones

- **Vibraciones producidas por fuentes naturales**

Denominados también microsismos son causados por relámpagos, oleaje, presión atmosférica, viento, actividad volcánica, etc. Debido a este tipo de fuentes estas vibraciones son muy inestables, por lo que dan origen a los microtemores de período largo que varían de 2 a 3 segundos; asimismo estas vibraciones están compuestas principalmente por ondas Rayleigh

- **Vibraciones producidas por fuentes artificiales**

Son vibraciones causadas por la actividad humana, maquinarias, peatones, explosiones, exploraciones subterráneas, etc. Debido a éste tipo de fuentes muy estables se da origen a los microtemor de período corto que varían de 0.1 a 1 segundo, por lo que son vibraciones compuestas principalmente por ondas S y Rayleigh.

3.5.5. Descripción del Equipo de Medición

Para realizar la toma de información de las microtrepidaciones se utilizó un equipo desarrollado por la empresa BUTTAN SERVICE (ver Figura 3.11) el cual consta de:

- 01 Sistema de Adquisición de Datos GEODAS 15-HS.
- 01 Computadora portátil NEC, modelo VersaPro VS-8
- 03 sensores para medición de velocidad del suelo tipo CR4.5-1S triaxiales.
- 01 GPS GARMIN modelo GPS16x-LVS.
- Cables de 50 m de longitud.
- 01 cable de conexión para batería.
- Software de adquisición de datos: Microtremor Observation.
- Software de procesamiento de datos: m2n.exe, mtpln2.exe, calHVm4.



Figura 3.11. Equipo de medición de microtrepidaciones

3.6. ANÁLISIS DE MICROTREPIDACIONES

3.6.1. Método Espectral

Este método es utilizado en el análisis de registros de microtremores y de eventos sísmicos. El método se basa en compensar los efectos de fuente y trayecto usando registros de microtremores en dos estaciones, en la que una de ellas debe cumplir con las características de una estación de referencia; por lo tanto deberá estar instalada en roca y la estación de interés en un suelo blando.

Suponiendo que los dos tienen efectos similares de fuente y de trayecto, y para la estación de referencia hay una respuesta de sitio despreciable al realizar la

razón espectral de las componentes horizontales, tanto la estación de interés como la de referencia se obtiene como resultado el efecto de sitio.

3.6.2. Método Espectral de Nakamura (H/V)

Fue propuesto por Nakamura (1989) y se fundamenta en relacionar los espectros de Fourier de los componentes horizontales y verticales (**H/V**) del registro de microtemores registrados en superficie. Este es uno de los métodos más utilizados en el análisis de microtemores debido a su bajo costo y simplicidad en la toma de datos con un sensor triaxial. El método permite conocer mediante los cocientes espectrales la frecuencia fundamental del suelo.

Para obtener los cocientes espectrales se analizará las componentes (**E-W, N-S** y vertical) de los registros de microtemor.

Nakamura se basa en tres hipótesis para desarrollar su técnica

- El ruido ambiental es generado por la reflexión y refracción de ondas de corte al interior de capas de suelo superficiales y por ondas de superficie.
- Fuentes superficiales locales de ruido no afectan el ruido ambiental en la base de la estructura no consolidada.
- Capas de suelo blando no amplifican la componente vertical del ruido ambiental.

Las funciones **SE** y **AS** que representan la respuesta sísmica intrínseca del sitio y el efecto singular de la onda Rayleigh pueden ser definidos como:

$$SE = HS/HBAS = VS/VB$$

Donde **H** y **V** representan, respectivamente, los espectros de las componentes horizontales y verticales del ruido ambiental en superficie (**S**) o en el basamento (**B**). La respuesta sísmica del sitio que no incluye la contribución de la fuente son definidas por **SM** como:

$$SM = \frac{SE}{AS} \rightarrow SM = \left(\frac{HS}{VS}\right) \times \left(\frac{VB}{HB}\right)$$

Nakamura (1989) [22] y Theodulidis et al. (1996) [31] demostraron que el espectro de las componentes vertical (**VB**) y horizontal (**HB**) son equivalentes a la base de la estructura.

$$\text{Si: } \frac{Hs}{vs} = 1 \rightarrow SM = HS/VS$$

La respuesta sísmica del sitio **SM** puede ser expresada como el cociente espectral de las componentes horizontal y vertical del ruido ambiental en superficie. (Ref. Nakamura, Y, 1989)

3.7. CLASIFICACIÓN SÍSMICA DE SUELOS SEGÚN ASCE 2010

Actualmente, las categorías del suelo usados en códigos de edificaciones para diseño sísmico son generalmente basados en, o al menos correlacionado con la velocidad de las ondas que se propagan por las capas superficiales.

De acuerdo a la (ASCE 2010), los suelos se clasifican en seis grupos diferentes que están en función del promedio de todas las velocidades de onda de corte, correspondientes a cada capa existente en una potencia de 30m más superficiales (Tabla 3.1). El concepto de Vs30 está basado en la idea de que la amplificación del terreno y los efectos de sitio ocurren principalmente en los primeros 30 metros de profundidad.

$$v_{s30} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_{si}}}$$

v_{s30} = velocidad de onda cortante en m/s

d_i = espesores de las capas comprendidas entre 0 y 30m

$\sum_{i=1}^n d_i = 30\text{m}$

n = número de capas

Con la información del parámetro Vs30 se puede calcular de manera preliminar el periodo de vibración fundamental del suelo siendo la relación siguiente:

$$T_0 = 4H/Vs30$$

T_0 = Periodo característico del suelo

Tabla 3.1. Clasificación sísmica de suelos según la ASCE 2010

Tipo de suelo	Nombre de suelo	PROPIEDADES PROMEDIO EN LOS 30 METROS MAS SUPERFICIALES		
		Velocidad de onda de corte, V_s (m/s)	Resistencia a la penetración estandar, N	Resistencia al corte no drenada, S_u (psf)
A	Roca muy dura	$v_s > 1500$	N/A	N/A
B	Roca	$760 < v_s < 1500$	N/A	N/A
C	Suelo muy denso o roca blanda	$360 < v_s < 760$	$N > 50$	$S_u \geq 2,000$
D	Suelo rígido	$180 < v_s < 360$	$15 \leq N \leq 50$	$1,000 \leq S_u \leq 2,000$
E	Suelo blando	$v_s < 180$	$N \leq 15$	$S_u < 1,000$
	-	Cualquier perfil de suelo con mas de 3m de espesor que tenga las siguientes características 1. Índice de plasticidad (IP) > 20 2. Contenido de humedad (w) ≥ 40 3. Resistencia al corte no drenada $S_u < 500$ psf		
F	-	Cualquier perfil de suelo que contenga una o mas de las siguientes características 1. Suelos vulnerables a una posible fractura o colapso bajo efecto sísmico, por ejemplo: suelos licuables, arcillas altamente sensibles y suelos debilmente cementados. 2. Turbas y/o arcillas altamente orgánicas (H > 3m de turba y/o arcillas altamente organica, donde H= espesor del suelo) 3. Arcillas de muy alta plasticidad (H > 7.6m con índice de plasticidad IP > 75) 4. Arcillas suaves a medias (H > 36m)		

(*) Suelos vulnerables a potencial de falla o colapso ante cargas sísmicas

3.8. CLASIFICACIÓN DE SUELOS SEGÚN NORMA TÉCNICA DE DISEÑO SISMORESISTENTE E-030

Según la norma peruana de diseño sismoresistente E-030 los perfiles de suelo se clasifican tomando en cuenta las propiedades mecánicas del suelo, el espesor del estrato, el periodo fundamental de vibración y la velocidad de propagación de ondas de corte. Los tipos de perfiles de suelos son cuatro :

- **Perfil tipo S1: Roca o suelos muy rígidos .**

A este tipo corresponden las rocas y los suelos muy rígidos con velocidades de propagación de onda similar a una roca en los que el periodo fundamental para vibraciones de baja amplitud no excede de 0.25 s.

- **Perfil tipo S2: Suelos intermedios.**

Se clasifican como de este tipo los sitios con características intermedias entre las indicadas para los perfiles S1 y S3

- **Perfil tipo S3: Suelos flexibles o con estratos de gran espesor.**

Corresponden a este tipo los suelos flexibles o estratos de gran espesor en los que el periodo fundamental, para vibraciones de baja amplitud, es mayor que 0.6 s.

- **Perfil tipo S4: Suelos flexibles o con estratos de gran espesor.**

A este tipo corresponden los suelos excepcionalmente flexibles y los sitios donde las condiciones geológicas y/o topográficas son particularmente desfavorables.

Sólo será necesario considerar un perfil tipo S4 cuando los estudios geotécnicos así lo determinen.

Tabla 3.2. Parámetros del suelo según la norma E-030

Tipo	Descripción	T_0 (S)
S1	Roca o suelos muy rígidos	0.4
S2	Suelos intermedios	0.6
S3	Suelos flexibles o con estratos de gran espesor	0.9
S4	Condiciones excepcionales	*

3.9. PARÁMETROS DINÁMICOS DEL SUELO

La respuesta del suelo ante cargas cíclicas depende del nivel de deformación (Tabla 3.3). Los distintos niveles de deformación cortante producen comportamiento elástico, elasto plástico o falla del suelo [13].

Por lo tanto se define el módulo cortante del suelo (G) como la pendiente de la secante que une los puntos extremos de un ciclo, G1 y G2.

Para deformaciones muy pequeñas menores a $10^{-4}\%$ el módulo cortante viene dado por la pendiente de la tangente a la curva esfuerzo – deformación en el origen y recibe el nombre de módulo cortante máximo Go ó Gmax y tiene la característica de ser el valor más grande del módulo de cortante en el rango lineal - elástico del suelo.

Los distintos niveles de deformación cortante producen comportamiento elástico, elastoplástico o falla del suelo, mediante los análisis geofísicos realizados se induce deformaciones despreciables al terreno recuperando su estado inicial, en este proceso el suelo tiene comportamiento lineal y elástico sin pérdida de energía, determinando así los valores máximos de módulo de corte, módulo de Young y módulo volumétrico.

La determinación in situ de los parámetros dinámicos requiere de la medición de ondas Rayleigh para lo cual se aplican técnicas sísmicas como el ensayo MASW. La relación entre la velocidad de ondas de corte y el módulo cortante dinámico es:

$$G_d = \gamma V_s^2$$

Donde:

γ = Densidad del suelo

V_s = Velocidad de ondas de corte

Los ensayos de refracción sísmica permiten obtener la velocidad de propagación de las ondas compresionales P (primarias) y mediante el ensayo MASW se obtiene las ondas de corte S (secundarias). Con estos valores de velocidad de propagación de las ondas P y S (V_p y V_s), a través del terreno y los pesos volumétricos obtenidos se determina la relación de Poisson (ν).

$$\nu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}$$

De la teoría de elasticidad el módulo cortante G se relaciona con el módulo de elasticidad E_d de la siguiente manera :

$$E_d = 2.G_d(1+\nu)$$

Donde:

ν = Relación de Poisson, adimensional. Valor obtenido de la interacción de ondas de corte V_s y ondas compresionales V_p .

De la teoría de elasticidad el módulo cortante de elasticidad E_d se relaciona con el módulo volumétrico K_d de la siguiente manera

$$K_d = \frac{E_d}{3.(1-2\nu)}$$

Las formulaciones son válidas para materiales que tienen un comportamiento isotrópico es decir las propiedades físicas no dependen de la dirección en que son examinadas.

CAPÍTULO IV: MÉTODOS APLICADOS

4.1. ANÁLISIS DE ONDAS SUPERFICIALES EN ARREGLOS MULTICANALES

Mediante el ensayo MASW o Análisis de Ondas Superficiales en Arreglos Multicanales se puede determinar el perfil unidimensional del suelo que está ligado con la rigidez del material.

Para el presente trabajo, se efectuaron un total de 25 líneas de 75m de longitud cada una distribuidas de manera adecuada en toda la ciudad de Chimbote teniendo en cuenta la geología del lugar, obteniendo perfiles unidimensionales de ondas de corte, las cuales serán utilizadas al momento de calcular los parámetros dinámicos a diferentes profundidades.

4.1.1. Registro de Ondas de Corte

Para registrar las señales de las ondas de corte “Vs” se realiza un arreglo lineal de geófonos de 4.5 Hz de frecuencia, la fuente impulsiva que genera la señal estará alejada como mínimo a 10 % de la longitud de la línea.

El sismógrafo Geode se encarga de registrar las señales convirtiéndolas de analógicas a digitales, el intervalo de toma de datos varía de 0.5 a 1ms y el registro es de 1s

4.1.2. Procesamiento de Ondas de Corte

Las señales obtenidas del ensayo serán procesadas mediante el software Seismager y sus componentes surface wave analysiswizard y waveEq.

El procesamiento consiste en obtener las señales de las ondas de corte en un sistema que muestre el espaciamiento de los geófonos (m) y el tiempo de adquisición (ms), a partir de este registro se procede a obtener la curva de dispersión que están en un sistema de frecuencia (Hz) y velocidad de fase (m/s). En la curva de dispersión se selecciona el modo fundamental del suelo que se ve representado por un color intenso, el cual denota una mayor energía.

Mediante un proceso de inversión de ondas e iteraciones se obtiene el perfil unidimensional del suelo que tiene un sistema de profundidad (m) y velocidad de ondas de corte en (m/s) (ver Figura 4.1)

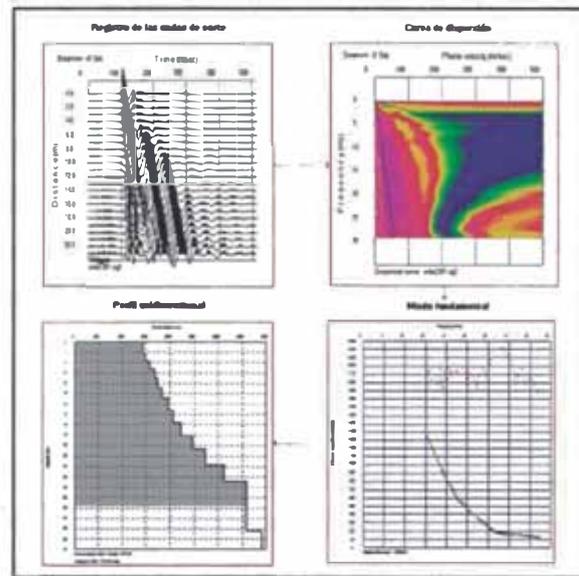


Figura 4.1. Procesamiento de ondas de corte

Mediante este procedimiento se determina el perfil unidimensional de ondas de corte y el parámetro V_{s30} .

4.1.3. Resultados de las Mediciones

Los ensayos MASW realizados en la ciudad de Chimbote presentan perfiles unidimensionales de 30m. de profundidad; Por lo que, tomando en cuenta la información geológica y geotécnica recopilada se puede describir los perfiles obtenidos a continuación:

- **MASW-01**

Línea de 75 m. de longitud que genera resultados confiables hasta una profundidad de 30m., los cuales evidencian la presencia de tres estratos, la velocidad de ondas de corte promedio para los 30m. más superficiales es $V_{s30} = 831$ m/s.

El primer estrato de 0 a 3 m. de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 455m/s. Correspondiente a una roca intensamente fracturada.

El segundo estrato de 3 a 18m. de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 809 m/s. Correspondiente a una roca moderadamente fracturada.

El tercer estrato de 18 a 30 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 1170 m/s. Correspondiente a una roca levemente fracturada.

- **MASW-02**

Línea de 75 m de longitud que genera resultados confiables hasta una profundidad de 30m., los cuales evidencian la presencia de tres estratos, la velocidad de ondas de corte promedio para los 30m. más superficiales es $V_{s30} = 845$ m/s.

El primer estrato de 0 a 3 m. de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 548m/s. Correspondiente a una roca intensamente fracturada.

El segundo estrato de 3 a 18m. de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 761 m/s. Correspondiente a una roca moderadamente fracturada.

El tercer estrato de 18 a 30m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 1234 m/s. Correspondiente a una roca levemente fracturada.

- **MASW-03**

Línea de 75 m de longitud que genera resultados confiables hasta una profundidad de 30m., los cuales evidencian la presencia de tres estratos, la velocidad de ondas de corte promedio para los 30m más superficiales es $V_{s30} = 326$ m/s.

El primer estrato de 0 a 7 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 204m/s. Correspondiente a una arena limosa de suelta a medianamente densa.

El segundo estrato de 7 a 13 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 333 m/s. Correspondiente a una arena limosa de medianamente densa a densa.

El tercer estrato de 13 a 30 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 428 m/s. Correspondiente a una arena limosa densa.

- **MASW-04**

Línea de 75 m de longitud que genera resultados confiables hasta una profundidad de 30m, los cuales evidencian la presencia de tres estratos, la velocidad de ondas de corte promedio para los 30m más superficiales es $V_{s30} = 345$ m/s.

El primer estrato de 0 a 5 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 197m/s. Correspondiente a una arena limosa suelta.

El segundo estrato de 5 a 8 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 269 m/s. Correspondiente a una arena limosa de medianamente densa a densa.

El tercer estrato de 8 a 30 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 440 m/s. Correspondiente a una arena limosa densa.

- **MASW-05**

Línea de 75 m de longitud que genera resultados confiables hasta una profundidad de 30m, los cuales evidencian la presencia de tres estratos, la velocidad de ondas de corte promedio para los 30m más superficiales es $V_{s30} = 311$ m/s.

El primer estrato de 0a 3m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 137m/s. Correspondiente a un depósito aluvial suelto.

El segundo estrato de 3 a 15 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 294 m/s. Correspondiente a un depósito aluvial de medianamente denso a denso.

El tercer estrato de 15 a 30 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 440 m/s. Correspondiente aún depósito aluvial denso.

- **MASW-06**

Línea de 75 m de longitud que genera resultados confiables hasta una profundidad de 30m, los cuales evidencian la presencia de tres estratos, la velocidad de ondas de corte promedio para los 30m más superficiales es $V_{s30} = 494$ m/s.

El primer estrato de 0 a 3 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 218m/s. Correspondiente a una arena limosa de suelta a medianamente densa.

El segundo estrato de 3 a 15.5 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 495 m/s. Correspondiente a una arena limosa densa.

El tercer estrato de 15.5 a 30 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 740m/s. Correspondiente a una arena limosa muy densa.

- **MASW-07**

Línea de 75 m de longitud que genera resultados confiables hasta una profundidad de 30m, los cuales evidencian la presencia de tres estratos, la velocidad de ondas de corte promedio para los 30m más superficiales es $V_{s30} = 421$ m/s.

El primer estrato de 0 a 3.7 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 215m/s. Correspondiente a una arena limosa de suelta a medianamente densa.

El segundo estrato de 3.7 a 15.5 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 396 m/s. Correspondiente a una arena limosa densa.

El tercer estrato de 15.5 a 30 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 550 m/s. Correspondiente a una arena limosa muy densa.

- **MASW-08**

Línea de 75 m de longitud que genera resultados confiables hasta una profundidad de 30m, los cuales evidencian la presencia de cuatro estratos, la velocidad de ondas de corte promedio para los 30m más superficiales es $V_{s30} = 442$ m/s.

El primer estrato de 0 a 2.3 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 216m/s. Correspondiente a una arena limosa de suelta a medianamente densa.

El segundo estrato de 2.3 a 7.0 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 294m/s. Correspondiente a una arena limosa de medianamente densa a densa.

El tercer estrato de 7 a 15.5 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 481 m/s. Correspondiente a una arena limosa densa.

El cuarto estrato de 15.5 a 30 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 575m/s. Correspondiente a una arena limosa muy densa.

- **MASW-09**

Línea de 75 m de longitud que genera resultados confiables hasta una profundidad de 30m, los cuales evidencian la presencia de tres estratos, la velocidad de ondas de corte promedio para los 30m más superficiales es $V_{s30} = 470$ m/s.

El primer estrato de 0 a 3.7 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 295m/s. Correspondiente a una arena limosa de medianamente densa a densa.

El segundo estrato de 3.7 a 15.5 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 443 m/s. Correspondiente a una arena limosa densa.

El tercer estrato de 15.5 a 30 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 608 m/s. Correspondiente a una arena limosa muy densa.

- **MASW-10**

Línea de 75 m de longitud que genera resultados confiables hasta una profundidad de 30m, los cuales evidencian la presencia de tres estratos, la velocidad de ondas de corte promedio para los 30m más superficiales es $V_{s30} = 470$ m/s.

El primer estrato de 0 a 3.7 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 297m/s. Correspondiente a una arena limosa de medianamente densa a densa.

El segundo estrato de 3.7 a 15.5 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 447 m/s. Correspondiente a una arena limosa densa.

El tercer estrato de 15.5 a 30 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 640m/s. Correspondiente a una arena limosa muy densa.

- **MASW-11**

Línea de 75 m de longitud que genera resultados confiables hasta una profundidad de 30m, los cuales evidencian la presencia de tres estratos, la velocidad de ondas de corte promedio para los 30m más superficiales es $V_{s30} = 289$ m/s.

El primer estrato de 0 a 8.9 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 178m/s. Correspondiente a una arena limosa suelta.

El segundo estrato de 8.9 a 20.8 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 351 m/s. Correspondiente a una arena limosa de medianamente densa a densa.

El tercer estrato de 20.8 a 30 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 488m/s. Correspondiente a una arena limosa densa.

- **MASW-12**

Línea de 75 m de longitud que genera resultados confiables hasta una profundidad de 30m, los cuales evidencian la presencia de dos estratos, la velocidad de ondas de corte promedio para los 30m más superficiales es $V_{s30} = 227$ m/s.

El primer estrato de 0 a 3.7m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 178m/s. Correspondiente a una arena limosa suelta.

El segundo estrato de 3.7 a 30.0m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 248 m/s. Correspondiente a una arena limosa de medianamente densa a densa.

- **MASW-13**

Línea de 75 m de longitud que genera resultados confiables hasta una profundidad de 30m, los cuales evidencian la presencia de dos estratos, la velocidad de ondas de corte promedio para los 30m más superficiales es $V_{s30} = 281$ m/s.

El primer estrato de 0 a 3.7m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 220m/s. Correspondiente a una arena limosa suelta.

El segundo estrato de 3.7 a 30.0m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 284 m/s. Correspondiente a una arena limosa de medianamente densa a densa.

- **MASW-14**

Línea de 75 m de longitud que genera resultados confiables hasta una profundidad de 30m, los cuales evidencian la presencia de tres estratos, la velocidad de ondas de corte promedio para los 30m más superficiales es $V_{s30} = 248$ m/s.

El primer estrato de 0 a 3.7 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 130m/s. Correspondiente a una arena limosa suelta.

El segundo estrato de 3.7 a 15.5 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 245 m/s. Correspondiente a una arena limosa de medianamente densa a densa.

El tercer estrato de 15.5 a 30 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 337m/s. Correspondiente a una arena limosa densa.

- **MASW-15**

Línea de 75 m de longitud que genera resultados confiables hasta una profundidad de 30m, los cuales evidencian la presencia de dos estratos, la velocidad de ondas de corte promedio para los 30m más superficiales es $V_{s30} = 213$ m/s.

El primer estrato de 0 a 10.9 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 167m/s. Correspondiente a una arena limosa suelta.

El segundo estrato, de 10.9 a 30.0 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 255 m/s. Correspondiente a una arena limosa de medianamente densa a densa.

- **MASW-16**

Línea de 75 m de longitud que genera resultados confiables hasta una profundidad de 30m, los cuales evidencian la presencia de un estrato, la velocidad de ondas de corte promedio para los 30m más superficiales es $V_{s30} = 178$ m/s.

El estrato de 0 a 30 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 178m/s. Correspondiente a una arena limosa suelta.

- **MASW-17**

Línea de 75 m de longitud que genera resultados confiables hasta una profundidad de 30m, los cuales evidencian la presencia de un estrato, la velocidad de ondas de corte promedio para los 30m más superficiales es $V_{s30} = 167$ m/s.

El estrato de 0 a 30 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 167m/s. Correspondiente a una arena limosa suelta.

- **MASW-18**

Línea de 75 m de longitud que genera resultados confiables hasta una profundidad de 30m, los cuales evidencian la presencia de dos estratos, la velocidad de ondas de corte promedio para los 30m más superficiales es $V_{s30} = 204$ m/s.

El primer estrato de 0 a 7m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 155m/s. Correspondiente a una arena limosa suelta.

El segundo estrato de 7 a 30 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 225m/s. Correspondiente a una arena limosa de medianamente densa a densa.

- **MASW-19**

Línea de 75 m de longitud que genera resultados confiables hasta una profundidad de 30m, los cuales evidencian la presencia de tres estratos, la velocidad de ondas de corte promedio para los 30m más superficiales es $V_{s30} = 233$ m/s.

El primer estrato de 0 a 10.9 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 168m/s. Correspondiente a una arena limosa suelta.

El segundo estrato de 10.9 a 15.5 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 263 m/s. Correspondiente a una arena limosa de medianamente densa a densa.

El tercer estrato de 15.5 a 30 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 310m/s. Correspondiente a una arena limosa densa.

- **MASW-20**

Línea de 75 m de longitud que genera resultados confiables hasta una profundidad de 30m, los cuales evidencian la presencia de tres estratos, la velocidad de ondas de corte promedio para los 30m más superficiales es $V_{s30} = 286$ m/s.

El primer estrato de 0 a 5.2 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 183m/s. Correspondiente a una arena limosa suelta.

El segundo estrato de 5.2 a 10.9 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 235 m/s. Correspondiente a una arena limosa de medianamente densa a densa.

El tercer estrato de 10.9 a 30 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 367m/s. Correspondiente a una arena limosa densa.

- **MASW-21**

Línea de 75 m de longitud que genera resultados confiables hasta una profundidad de 30m, los cuales evidencian la presencia de tres estratos, la velocidad de ondas de corte promedio para los 30m más superficiales es $V_{s30} = 353$ m/s.

El primer estrato de 0 a 3.7 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 200m/s. Correspondiente a una arena limosa suelta.

El segundo estrato de 3.7 a 8.9 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 309 m/s. Correspondiente a una arena limosa de medianamente densa a densa.

El tercer estrato de 8.9 a 30 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 389 m/s. Correspondiente a una arena limosa densa.

- **MASW-22**

Línea de 75 m de longitud que genera resultados confiables hasta una profundidad de 30m, los cuales evidencian la presencia de tres estratos, la velocidad de ondas de corte promedio para los 30m más superficiales es $V_{s30} = 236$ m/s.

El primer estrato de 0 a 5.2 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 173m/s. Correspondiente a una arena limosa suelta.

El segundo estrato de 5.2 a 8.9 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 246 m/s. Correspondiente a una arena limosa de medianamente densa a densa.

El tercer estrato de 8.9 a 30 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 280 m/s. Correspondiente a una arena limosa densa.

- **MASW-23**

Línea de 75 m de longitud que genera resultados confiables hasta una profundidad de 30m, los cuales evidencian la presencia de tres estratos, la velocidad de ondas de corte promedio para los 30m más superficiales es $V_{s30} = 343$ m/s.

El primer estrato de 0 a 5.2 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 230 m/s. Correspondiente a una arena limosa suelta.

El segundo estrato de 5.2 a 8.9 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 290 m/s. Correspondiente a una arena limosa de medianamente densa a densa.

El tercer estrato de 8.9 a 30 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 400m/s. Correspondiente a una arena limosa densa.

- **MASW-24**

Línea de 75 m de longitud que genera resultados confiables hasta una profundidad de 30m, los cuales evidencian la presencia de dos estratos, la velocidad de ondas de corte promedio para los 30m más superficiales es $V_{s30} = 761$ m/s.

El primer estrato de 0 a 15.5 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 722m/s. Correspondiente a una roca moderadamente fracturada.

El segundo estrato de 15.5 a 30 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 806 m/s. Correspondiente a una roca levemente fracturada.

- **MASW-25**

Línea de 75 m de longitud que genera resultados confiables hasta una profundidad de 30m, los cuales evidencian la presencia de dos estratos, la velocidad de ondas de corte promedio para los 30m más superficiales es $V_{s30} = 416$ m/s.

El primer estrato de 0 a 15.5 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 347m/s. Correspondiente a una arena limosa densa.

El segundo estrato de 15.5 a 30 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) de 520 m/s. Correspondiente a una arena limosa muy densa.

El material predominante en la ciudad de Chimbote son arenas limosas de sueltas a densas, depósitos aluviales provenientes del río Lacramarca y rocas con diferente grado de fracturación

4.2. REFRACCIÓN SÍSMICA

La refracción sísmica es un método que mide la propagación de las ondas elásticas, transcurrido entre un sitio donde se generan ondas sísmicas y la llegada de éstas a diferentes puntos de observación.

Se efectuaron un total de 25 líneas sísmicas de 75m de longitud cada una obteniendo perfiles geosísmicos y generando un perfil unidimensional de ondas compresionales que será utilizado al momento de calcular los parámetros dinámicos a diferentes profundidades.

4.2.1. Registro de Ondas Compresionales

Para registrar las señales de las ondas compresionales " V_p " se realiza un arreglo lineal de geófonos de 14 Hz de frecuencia, la fuente impulsiva que genera la señal se aplicará en 5 puntos de la línea sísmica.

El sismógrafo Geode se encarga de registrar la señal convirtiéndolas de analógicas a digitales, el intervalo de toma de datos varia de 0.125 ms y el registro es de 0.256s.

4.2.2. Procesamiento de Ondas Compresionales

Las señales obtenidas del ensayo serán procesadas mediante el software Seismager y sus componentes pickwin y plotrefa.

El procesamiento consiste en obtener las señales de las ondas compresionales en un sistema que muestre el espaciamiento de los geófonos (m) y el tiempo de adquisición (ms); a partir de éste registro se procede a seleccionar las primeras llegadas de las ondas, dando origen a las dromocrónicas, por medio de las cuales se interpretará la cantidad de estratos presentes, según las pendientes predominantes. Finalmente, definiendo adecuadamente los cambios de pendientes se genera un proceso de inversión, dando lugar a un perfil geosísmico donde se evidencia la geometría de los estratos en función de las velocidades de ondas compresionales. (Ver Figura 4.2)

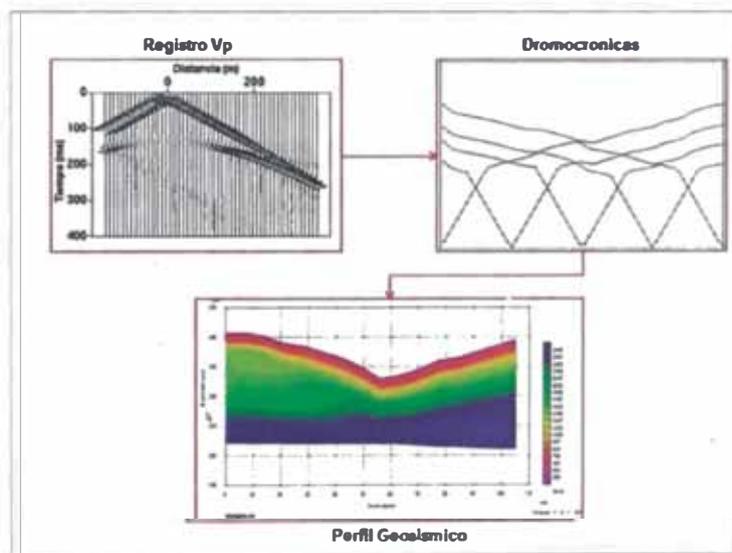


Figura 4.2. Procesamiento de ondas compresionales

4.2.3. Resultados de las Mediciones

A lo largo de la ciudad de Chimbote se distribuyeron adecuadamente 25 líneas sísmicas de 75m de longitud cada una, siendo su ubicación la misma que los ensayos MASW.

Del ensayo de refracción sísmica se obtuvo la velocidad de ondas compresionales señaladas en el Anexo II – Perfiles Geosísmicos, y del ensayo MASW se obtuvo la velocidad de ondas de corte presentadas en el Anexo I – Perfil Unidimensional de Ondas de Corte; generando de la interacción de estas velocidades los parámetros dinámicos ubicados en el Anexo III-Parámetros Dinámicos

4.3. MEDICIÓN DE MICROTREMORES – MÉTODO NAKAMURA

Para estimar el período de vibración del suelo se ha empleado el cociente espectral H/V propuesto por Nakamura. Asimismo, para definir el cociente espectral se utilizó la siguiente expresión:

$$H/V = \frac{\sqrt{(S_1)^2 + (S_2)^2}}{S_V}$$

Siendo S_1 y S_2 los valores de amplitud del espectro de Fourier en las componentes horizontales; y S_V los valores de amplitud del espectro de Fourier en el componente vertical, todos ellos para un mismo valor de período.

Se analizó un total de 25 puntos distribuidos adecuadamente en toda la ciudad de Chimbote con la finalidad de construir curvas de isoperíodos.

4.3.1. Registro de Microtremores

Para registrar los microtremores se instala en el suelo 2 sensores triaxiales de 1 Hz de frecuencia que estarán debidamente nivelados.

El sensor modelo CR4.5-1S se encarga de registrar la señal del ruido ambiental, el tiempo de medición es de 5 minutos con un intervalo de muestreo de 200 muestras/s.

4.3.2. Procesamiento de Microtremores

Las señales obtenidas del ensayo de microtremor son disociadas mediante el software m2n y presentadas en tres componentes por cada sensor siendo, una vez visualizadas en el software mtpln2 para depurar la información contaminada se eligen ventanas de análisis, cuyos registros sean aceptados colocando los intervalos en el software notepad donde se ingresarán datos del nombre del archivo con el que fue grabado en campo para cada componente x, y, z.

Finalmente, dicho registro con extensión .ind será procesado mediante el software CALHVM4 que aplica el método de Nakamura transformando el archivo de extensión .ind a .HVM que contiene información del período de vibración fundamental del suelo. (Ver Figura 4.3)

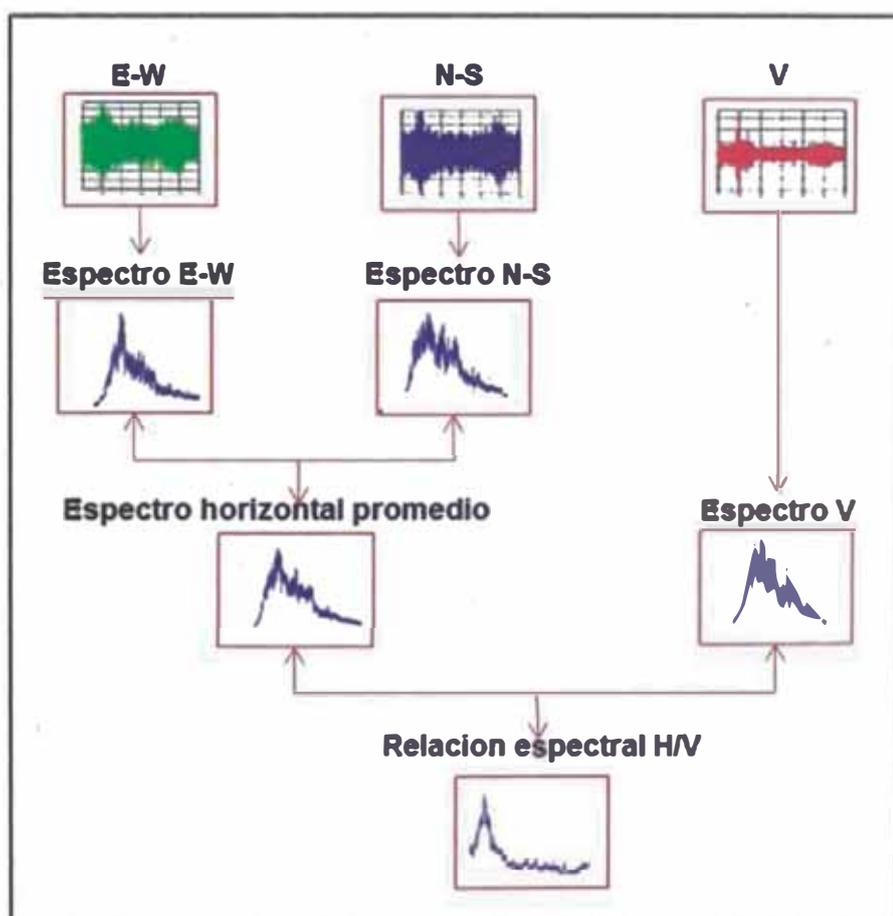


Figura 4.3. Procesamiento de los registros de microtremor

4.3.3. Resultado de las Mediciones

La distribución de los puntos microtremor se muestra en el Anexo VI planos - P-04; estos puntos fueron distribuidos adecuadamente a lo largo de toda la ciudad de Chimbote. Los espectros obtenidos de los ensayos de microtrepidaciones que muestran las relaciones espectrales H/V se presentan en el Anexo IV – Relaciones espectrales; mediante las cuales se calcula el período característico del suelo .

CAPÍTULO V: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. ANÁLISIS DE LAS ONDAS DE CORTE Y COMPRESIÓN

Los ensayos geofísicos de MASW y refracción sísmica fueron distribuidos adecuadamente en la ciudad de Chimbote, teniendo como referencia el plano geológico.

De la clasificación sísmica, según la ASCE 2010 se presenta cuatro tipos de suelo B, C, D y E correspondientes a roca, suelo muy denso o roca blanda, suelo rígido y suelo blando, respectivamente; ocupando la mayor área de la ciudad de Chimbote el suelo rígido o tipo D, secundado por suelo muy denso o roca blanda denominado también tipo C, hacia las estribaciones se evidencia roca o suelo tipo B, con menos área de influencia se ubica el suelo blando o tipo E.

La clasificación sísmica de la ciudad de Chimbote se presenta en el Anexo VI: Planos-P-03.

De los resultados obtenidos se mencionan las principales urbanizaciones y asentamientos humanos cimentados sobre determinado tipo de suelo según la ASCE 2010.

- **Suelo tipo B – Roca**

Sobre este tipo de suelo se encuentra cimentado el A.A.H.H. José Sánchez, Urbanización 14 de Febrero, Urbanización David Dasso, Urbanización Las Lomas y el A.A.H.H. 3 de Octubre.

- **Suelo tipo C–Suelo muy denso o roca blanda**

Sobre este tipo de suelo se encuentra cimentado la Urbanización Los Pinos, A.A.H.H. 2 de Junio, las urbanizaciones Santa Rosa, El Pacífico, Santa Cristina, Las Gardenias, Unicreto, Las Casuarinas, Los Héroes, Cáceres de Aramayo, los A.A.H.H. Villa Mercedes, Toledo, Villa Sur, Las Palmas, Divino Jesús, y las urbanizaciones Los Jardines, Garatea, Luis Felipe, El Pescador.

- **Suelo tipo D–Suelo rígido**

Sobre este tipo de suelo se encuentra cimentado la Urbanización Laderas del Norte, A.A.H.H. El Porvenir, Urbanización El Progreso, Urbanización 21 de Abril, Urbanización La Caleta, Urbanización San Isidro, A.A.H.H. 2 de Mayo, Ciudad Comercial 2 de Mayo, Pueblo Joven San Juan, A.A.H.H. Ramiro Priale, ENAPU y SIDERPERU.

- **Suelo tipo E–Suelo blando**

Sobre este tipo de suelo se encuentra cimentado el A.A.H.H. Florida Baja y Miramar Bajo.

La ubicación y clasificación sísmica para cada ensayo MASW realizado en la ciudad de Chimbote se presenta en la Tabla 5.1, se incluye también el cálculo del periodo característico indicado en el ítem 3.7

Tabla 5.1. Clasificación de suelos según ASCE 2010 y la norma técnica peruana de diseño sísmoresistente E-030

Coordenadas WGS 84		Ensayo	Descripción ASCE 2010			T ₀ (s)	Descripción E-030	
E(m)	N(m)		V _{S30} (m/s)	Tipo de suelo	Nombre de suelo		Tipo de suelo	Nombre de suelo
770587	8992370	MASW-01	831	B	Roca	0.14	S1	Roca o suelos muy rígidos
770864	8991588	MASW-02	845	B	Roca	0.14	S1	Roca o suelos muy rígidos
770169	8991842	MASW-03	326	D	Suelo Rígido	0.37	S1	Roca o suelos muy rígidos
769901	8991580	MASW-04	345	D	Suelo Rígido	0.35	S1	Roca o suelos muy rígidos
769229	8991630	MASW-05	311	D	Suelo Rígido	0.39	S1	Roca o suelos muy rígidos
772652	8988869	MASW-06	494	C	Suelo Muy Denso o Roca Blanda	0.24	S1	Roca o suelos muy rígidos
772140	8990173	MASW-07	421	C	Suelo Muy Denso o Roca Blanda	0.29	S1	Roca o suelos muy rígidos
771179	8990957	MASW-08	442	C	Suelo Muy Denso o Roca Blanda	0.27	S1	Roca o suelos muy rígidos
773227	8991060	MASW-09	470	C	Suelo Muy Denso o Roca Blanda	0.26	S1	Roca o suelos muy rígidos
773453	8992205	MASW-10	486	C	Suelo Muy Denso o Roca Blanda	0.25	S1	Roca o suelos muy rígidos
769174	8992458	MASW-11	289	D	Suelo Rígido	0.42	S2	Suelos intermedios
768507	8990249	MASW-12	227	D	Suelo Rígido	0.53	S2	Suelos intermedios

Coordenadas WGS 84		Ensayo	Descripción ASCE 2010			T ₀ (s)	Descripción E-030	
E(m)	N(m)		V _{S30} (m/s)	Tipo de suelo	Nombre de suelo		Tipo de suelo	Nombre de suelo
767857	8992829	MASW-13	281	D	Suelo Rígido	0.43	S2	Suelos intermedios
767793	8993900	MASW-14	248	D	Suelo Rígido	0.48	S2	Suelos intermedios
766829	8995581	MASW-15	213	D	Suelo Rígido	0.56	S2	Suelos intermedios
766119	8994779	MASW-16	178	E	Suelo Blando	0.67	S3	Suelos flexibles
765253	8995502	MASW-17	167	E	Suelo Blando	0.72	S3	Suelos flexibles
765662	8996191	MASW-18	204	D	Suelo Rígido	0.59	S2	Suelos intermedios
766775	8996882	MASW-19	233	D	Suelo Rígido	0.52	S2	Suelos intermedios
766764	8998163	MASW-20	286	D	Suelo Rígido	0.42	S2	Suelos intermedios
765393	8997346	MASW-21	353	D	Suelo Rígido	0.34	S1	Roca o suelos muy rígidos
762856	8996109	MASW-22	236	D	Suelo Rígido	0.51	S2	Suelos intermedios
763923	8996795	MASW-23	343	D	Suelo Rígido	0.35	S1	Roca o suelos muy rígidos
764539	8998819	MASW-24	761	B	Roca	0.16	S1	Roca o suelos muy rígidos
765280	8998076	MASW-25	416	C	Suelo Muy Denso o Roca Blanda	0.29	S1	Roca o suelos muy rígidos

Debido al pequeño grado de deformación aplicado al suelo mediante los ensayos geofísicos los parámetros elásticos obtenidos como el módulo de corte, módulo de Young y módulo volumétrico son valores máximos.

Las velocidades de ondas compresionales obtenidas de los ensayos de refracción sísmica y la velocidad de ondas de corte obtenidas del ensayo MASW permiten calcular todos los parámetros elásticos del suelo.

A continuación se presenta el comportamiento de los parámetros elásticos a diferentes profundidades para cada punto analizado.

- **Parámetros elásticos para D_f=1.5m**

Los parámetros elásticos para una profundidad de 1.5m se presentan en la Tabla 5.2. y en el Anexo VI: Planos-P-06, el comportamiento del módulo de elasticidad dinámico en la ciudad de Chimbote.

A esta profundidad predominan arenas de sueltas a medianamente densas secundadas por arena medianamente densa, arena densa y roca con cierto grado de fracturación.

Tabla 5.2. Parámetros elásticos para Df=1.5m

Ensayo		Coordenadas WGS 84		μ	Gd (Kg/cm ²)	Ed (Kg/cm ²)	Kd (Kg/cm ²)
Refracción	MASW	E(m)	N(m)				
LS-01	MASW-1	770587	8992370	0.20	3286	7881	4363
LS-02	MASW-2	770864	8991588	0.22	3476	8513	5154
LS-03	MASW-3	770169	8991842	0.39	563	1569	2490
LS-04	MASW-4	769901	8991580	0.40	563	1571	2536
LS-05	MASW-5	769229	8991630	0.38	595	1643	2294
LS-06	MASW-6	772652	8988869	0.35	787	2119	2300
LS-07	MASW-7	772140	8990173	0.26	1085	2734	1903
LS-08	MASW-8	771179	8990957	0.27	1270	3221	2312
LS-09	MASW-9	773227	8991060	0.17	1566	3656	1832
LS-10	MASW-10	773453	8992205	0.16	1609	3747	1860
LS-11	MASW-11	769174	8992458	0.22	264	645	382
LS-12	MASW-12	768507	8990249	0.39	325	903	1355
LS-13	MASW-13	767857	8992829	0.36	1148	3134	3865
LS-14	MASW-14	767793	8993900	0.39	315	877	1345
LS-15	MASW-15	766829	8995581	0.28	296	759	577
LS-16	MASW-16	766119	8994779	0.38	447	1231	1667
LS-17	MASW-17	765253	8995502	0.25	269	673	451
LS-18	MASW-18	765662	8996191	0.39	370	1030	1567
LS-19	MASW-19	766775	8996882	0.32	355	937	866
LS-20	MASW-20	766764	8998163	0.29	563	1447	1131
LS-21	MASW-21	765393	8997346	0.26	1213	3064	2152
LS-22	MASW-22	762856	8996109	0.37	518	1421	1823
LS-23	MASW-23	763923	8996795	0.17	946	2215	1118
LS-24	MASW-24	764539	8998819	0.14	9601	21944	10238
LS-25	MASW-25	765280	8998076	0.35	4197	11655	17444

• **Parámetros elásticos para Df=8.0m**

Los parámetros elásticos para una profundidad de 8.0 m se presentan en la Tabla 5.3. y en el Anexo VI: Planos-P-07, el comportamiento del módulo de elasticidad dinámico en la ciudad de Chimbote.

A esta profundidad predominan arenas medianamente densas secundadas por arena densa, arena de suelta a medianamente densa y roca con cierto grado de fracturación.

Tabla 5.3. Parámetros elásticos para Df=8.0m

Ensayo		Coordenadas WGS 84		μ	Gd (Kg/cm ²)	Ed (Kg/cm ²)	Kd (Kg/cm ²)
Refracción	MASW	E(m)	N(m)				
LS-01	MASW-1	770587	8992370	0.37	11572	31806	42171
LS-02	MASW-2	770864	8991588	0.18	7347	17331	9012
LS-03	MASW-3	770169	8991842	0.22	1837	4477	2653
LS-04	MASW-4	769901	8991580	0.22	1716	4194	2512
LS-05	MASW-5	769229	8991630	0.41	2500	7055	13197
LS-06	MASW-6	772652	8988869	0.20	4702	11240	6147
LS-07	MASW-7	772140	8990173	0.36	2749	7465	8751
LS-08	MASW-8	771179	8990957	0.39	3104	8641	13323
LS-09	MASW-9	773227	8991060	0.33	2916	7737	7439
LS-10	MASW-10	773453	8992205	0.32	3669	9650	8697
LS-11	MASW-11	769174	8992458	0.17	1042	2449	1255
LS-12	MASW-12	768507	8990249	0.39	784	2178	3273
LS-13	MASW-13	767857	8992829	0.36	1455	3961	4761
LS-14	MASW-14	767793	8993900	0.36	1137	3084	3587
LS-15	MASW-15	766829	8995581	0.21	891	2158	1240
LS-16	MASW-16	766119	8994779	0.39	654	1817	2728
LS-17	MASW-17	765253	8995502	0.31	669	1752	1538
LS-18	MASW-18	765662	8996191	0.38	970	2682	3809
LS-19	MASW-19	766775	8996882	0.15	808	1858	884
LS-20	MASW-20	766764	8998163	0.24	1195	2970	1921
LS-21	MASW-21	765393	8997346	0.29	2209	5721	4649
LS-22	MASW-22	762856	8996109	0.30	1390	3610	2987
LS-23	MASW-23	763923	8996795	0.19	1886	4478	2385
LS-24	MASW-24	764539	8998819	0.20	10609	25507	14271
LS-25	MASW-25	765280	8998076	0.32	7619	20065	18258

• **Parámetros elásticos para Df=15.0m**

Los parámetros elásticos para una profundidad de 15.0 m se presentan en la Tabla 5.4. y en el Anexo VI: Planos-P-8, el comportamiento del módulo de elasticidad dinámico en la ciudad de Chimbote.

Tabla 5.4. Parámetros elásticos para Df=15.0m

Ensayo		Coordenadas WGS 84		μ	Gd (Kg/cm ²)	Ed (Kg/cm ²)	Kd (Kg/cm ²)
Refracción	MASW	E(m)	N(m)				
LS-01	MASW-1	770587	8992370	0.37	15876	43545	56434
LS-02	MASW-2	770864	8991588	0.16	7845	18209	8941
LS-03	MASW-3	770169	8991842	0.26	3431	8618	5888
LS-04	MASW-4	769901	8991580	0.31	3217	8397	7191
LS-05	MASW-5	769229	8991630	0.43	3217	9214	22701
LS-06	MASW-6	772652	8988869	0.18	7694	18110	9342
LS-07	MASW-7	772140	8990173	0.18	3481	8203	4248

Ensayo		Coordenadas WGS 84		μ	Gd (Kg/cm ²)	Ed (Kg/cm ²)	Kd (Kg/cm ²)
Refracción	MASW	E(m)	N(m)				
LS-08	MASW-8	771179	8990957	0.40	6400	17981	31467
LS-09	MASW-9	773227	8991060	0.19	4900	11636	6203
LS-10	MASW-10	773453	8992205	0.25	5308	13240	8727
LS-11	MASW-11	769174	8992458	0.15	2025	4649	2200
LS-12	MASW-12	768507	8990249	0.38	1488	4095	5511
LS-13	MASW-13	767857	8992829	0.35	1837	4963	5548
LS-14	MASW-14	767793	8993900	0.39	2236	6217	9435
LS-15	MASW-15	766829	8995581	0.28	1444	3692	2777
LS-16	MASW-16	766119	8994779	0.42	729	2068	4233
LS-17	MASW-17	765253	8995502	0.37	721	1972	2469
LS-18	MASW-18	765662	8996191	0.42	1089	3098	6648
LS-19	MASW-19	766775	8996882	0.16	1466	3391	1646
LS-20	MASW-20	766764	8998163	0.23	1949	4788	2941
LS-21	MASW-21	765393	8997346	0.18	3104	7343	3859
LS-22	MASW-22	762856	8996109	0.39	1577	4376	6467
LS-23	MASW-23	763923	8996795	0.16	2749	6357	3082
LS-24	MASW-24	764539	8998819	0.22	10638	25879	15203
LS-25	MASW-25	765280	8998076	0.22	10550	25742	15321

5.2. ANÁLISIS ESPECTRAL – MÉTODO DE NAKAMURA

Para evaluar la respuesta de sitio se determina el período de vibración fundamental o frecuencia natural. Este valor es obtenido mediante ensayos de microtemores llamada también microtrepidaciones.

El período característico del suelo aporta información con respecto al comportamiento dinámico del suelo.

Los resultados son presentados en la Tabla 5.5 correspondientes a los períodos de vibración fundamental son representados mediante curvas de isoperíodos en el Anexo VI: Planos-P-05.

Tabla 5.5. Período de vibración fundamental del suelo

Ensayo	Coordenadas WGS 84		T ₀	Descripción E-030	
	E(m)	N(m)		Tipo de suelo	Nombre de suelo
M-1	762882	8996100	0.26	S1	Roca o suelos muy rígidos
M-2	764392	8996955	0.36	S1	Roca o suelos muy rígidos
M-3	764553	8998799	0.15	S1	Roca o suelos muy rígidos
M-4	765398	8997352	0.43	S2	Suelos intermedios
M-5	765718	8998140	0.39	S1	Roca o suelos muy rígidos
M-6	766709	8998082	0.26	S1	Roca o suelos muy rígidos
M-7	766789	8996776	0.54	S2	Suelos intermedios

Ensayo	Coordenadas WGS 84		To	Descripción E-030	
	E(m)	N(m)		Tipo de suelo	Nombre de suelo
M-8	766812	8995606	0.40	S2	Suelos intermedios
M-9	767626	8994836	0.30	S1	Roca o suelos muy rígidos
M-10	768735	8993969	0.40	S2	Suelos intermedios
M-11	766335	8995901	0.30	S1	Roca o suelos muy rígidos
M-12	765846	8994984	0.43	S2	Suelos intermedios
M-13	767850	8992828	0.35	S1	Roca o suelos muy rígidos
M-14	768576	8990279	0.39	S1	Roca o suelos muy rígidos
M-15	769423	8992558	0.36	S1	Roca o suelos muy rígidos
M-16	769713	8991820	0.30	S1	Roca o suelos muy rígidos
M-17	770494	8992216	0.20	S1	Roca o suelos muy rígidos
M-18	770847	8991611	0.13	S1	Roca o suelos muy rígidos
M-19	771159	8992606	0.48	S2	Suelos intermedios
M-20	771076	8991176	0.12	S1	Roca o suelos muy rígidos
M-21	772135	8990189	0.13	S1	Roca o suelos muy rígidos
M-22	773082	8992037	***	***	***
M-23	773256	8991031	0.13	S1	Roca o suelos muy rígidos
M-24	773480	8988043	0.14	S1	Roca o suelos muy rígidos
M-25	772645	8988871	0.22	S1	Roca o suelos muy rígidos

Se obtiene valores de períodos de vibración altos 0.54s en el litoral disminuyendo hasta 0.12s en las estribaciones donde existen unidades geológicas más competentes.

Para construir el plano de isoperíodos presentado en el Anexo VI planos - P-05 se consideró los periodos característicos obtenidos del ensayo de microtrepidaciones y del ensayo MASW.

5.3. COMPARACIÓN DE PERIODOS CARACTERÍSTICOS OBTENIDOS POR LOS ENSAYOS MASW Y MICROTREMOR

Se realizó el cálculo del periodo característico a partir de los ensayos MASW y de microtremores efectuando la comparación de estos métodos en puntos donde se realizaron los dos ensayos de manera muy cercana.

En la Tabla 5.6 se representa los valores de los periodos obtenidos a partir del ensayo MASW y microtremores, para efectuar su comparación.

Tabla 5.6. Comparación de periodos de vibración obtenidos por el método de microtrepidaciones y MASW

Ensayo N°	Ensayo		T ₀ MASW (s)	T ₀ Microtremor (s)
	MASW	Micotremor		
1	MASW-01	M-17	0.14	0.20
2	MASW-02	M-18	0.14	0.13
3	MASW-04	M-16	0.35	0.30
4	MASW-06	M-25	0.24	0.22
5	MASW-11	M-15	0.42	0.36
6	MASW-13	M-13	0.43	0.35
7	MASW-15	M-08	0.56	0.40
8	MASW-19	M-07	0.52	0.54
9	MASW-20	M-06	0.42	0.26
10	MASW-22	M-01	0.38	0.26
11	MASW-24	M-03	0.16	0.15

En la Figura 5.1 se representa gráficamente los valores de los periodos obtenidos a partir del ensayo MASW y microtremor visualizando su aproximación a la tendencia $y=x$

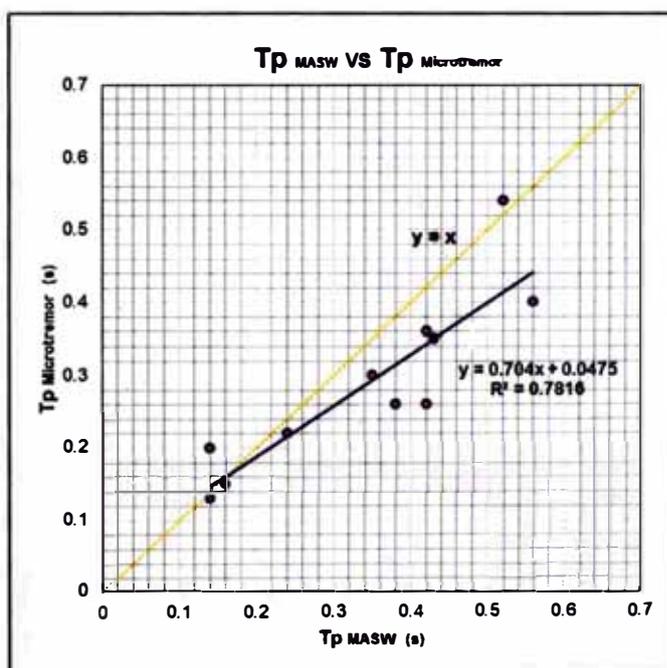


Figura 5.1. Comparación de los periodos obtenidos por ensayos de microtrepidaciones y ensayos MASW

En la Tabla 5.7 se representa los valores de los periodos obtenidos a partir de los ensayos MASW y microtremores, en esta comparación se consideraron los valores obtenidos para los cuales la diferencia de periodos por el método MASW y microtremores son menores al 10%

Tabla 5.7. Comparación de periodos de vibración obtenidos por el método de microtrepidaciones y MASW para un error menor de 10%

Ensayo N°	Ensayo		T ₀ MASW (s)	T ₀ Microtremor (s)
	MASW	Micotremor		
1	MASW-01	M-17	0.14	0.2
2	MASW-02	M-18	0.14	0.13
3	MASW-04	M-16	0.35	0.3
4	MASW-06	M-25	0.24	0.22
5	MASW-11	M-15	0.42	0.36
6	MASW-13	M-13	0.43	0.35
7	MASW-19	M-07	0.52	0.54
8	MASW-24	M-03	0.16	0.15

En la Figura 5.2 se representa gráficamente los valores de los periodos obtenidos a partir del ensayo MASW y microtremor visualizando mayor aproximación a la tendencia $y=x$

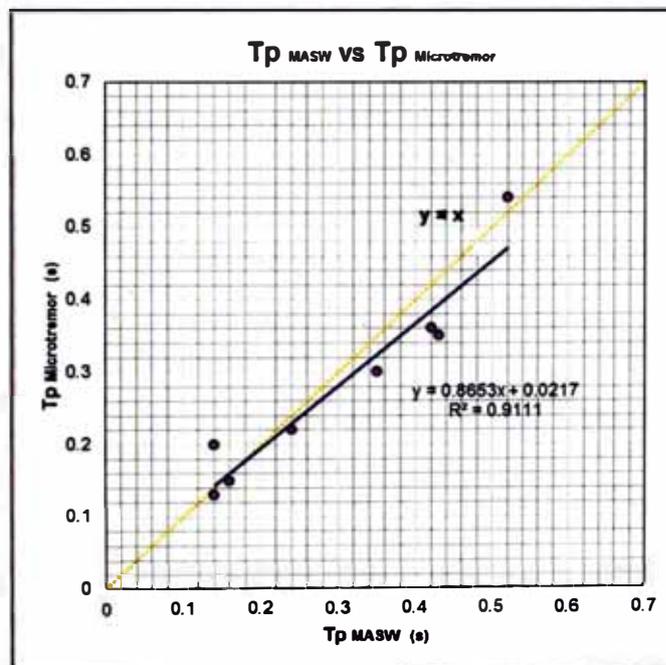


Figura 5.2. Comparación de los periodos obtenidos por ensayos de microtrepidaciones y ensayos MASW para errores menores a 10%

Los resultados obtenidos de los periodos característicos aplicando la relación ($T_0=4H/ V_{s30}$) que involucra el parámetro V_{s30} obtenido del ensayo MASW y los valores de periodos característicos obtenidos de la división espectral (Nakamura) fueron contrastados determinando una coincidencia en el 80% de ensayos.

5.4. PROPAGACIÓN ONDAS DE CORTE EN SUELOS POTENCIALMENTE LICUABLES

El incremento de la presión de poros genera la disminución del esfuerzo efectivo, la cual finalmente se reduce a cero cuando la relación de presión de poros es igual al esfuerzo total. Tal estado del suelo da como resultado el fenómeno de la licuefacción, que es un estado en que el suelo pierde su resistencia al corte

Uno de los mejores casos documentados de licuación de suelos en el Perú ocurrió en la ciudad de Chimbote debido al sismo ocurrido el 31 de mayo de 1979. Se evidenció desplazamiento lateral del terreno en depósitos deltaicos y en la playa, agrietamiento del terreno, compactación diferencial en el centro de Chimbote, volcanes de arena y eyección de agua debido a licuación. Los ensayos MASW realizados fueron superpuestos en el plano donde se evidencian las probables zonas licuables analizando el comportamiento de las velocidades de propagación de las ondas de corte en estos sectores.

Los sectores potencialmente potencialmente licuables son representados en el Anexo VI: Planos-P-09.

Tabla 5.8. Ensayos MASW realizados en los sectores potencialmente licuables

Ensayo	Descripción ASCE 2010			T_0 (s)	Descripción E-030	
	V_{s30} (m/s)	Tipo de suelo	Nombre de suelo		Tipo de suelo	Nombre de suelo
MASW-12	227	D	Suelo Rígido	0.53	S2	Suelos intermedios
MASW-14	248	D	Suelo Rígido	0.48	S2	Suelos intermedios
MASW-15	213	D	Suelo Rígido	0.56	S2	Suelos intermedios
MASW-16	178	E	Suelo Blando	0.67	S3	Suelos flexibles
MASW-22	236	D	Suelo Rígido	0.51	S2	Suelos intermedios

De acuerdo a la descripción de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE 2010), los suelos son tipificados en gran parte como tipo D, sin embargo los sectores en los cuales se desarrollaron los ensayos MASW presentados en la Tabla 5.11 son potencialmente licuables hasta una profundidad promedio de 8 m. El fenómeno de la licuación ocurre para velocidades de ondas de corte $V_s < 200$ m/s, tal como se muestra en la Figura 5.3. Siempre y cuando se den las condiciones tales como el nivel freático alto, suelos granulares con cierto porcentaje de finos y la acción sísmica.

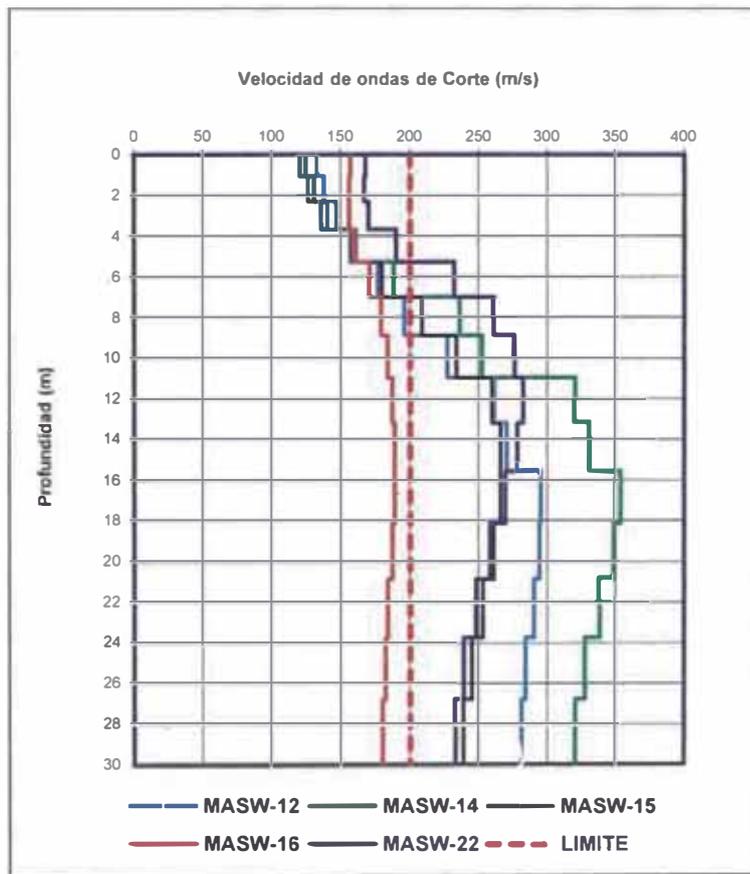


Figura 5.3. Suelos potencialmente licuables para $V_s < 200$ m/s

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

1. Las exploraciones geofísicas son métodos de investigaciones económicas y rápidas, que en un corto tiempo permiten obtener información de las características dinámicas de grandes áreas.
2. Producto del ensayo MASW se obtiene un perfil unidimensional de velocidades de ondas de corte, proporcionando información sobre las características dinámicas del suelo para los 30m más superficiales para cada punto analizado.
3. Se incrementa la rigidez del suelo conforme aumenta la profundidad, evidenciado en los perfiles unidimensionales de las ondas corte.
4. La distribución de los ensayos geofísicos se realizaron convenientemente apoyados del plano geológico, obteniendo como resultado diferentes tipos de suelos en la clasificación sísmica.
5. Se elaboró la clasificación local de suelos de Chimbote aplicando métodos geofísicos detectando 4 tipos de suelos, suelo tipo B o roca, suelo tipo C también denominado suelo muy denso o roca blanda, suelo tipo D o suelo rígido y suelo tipo E o suelo blando
6. La clasificación sísmica de los suelos de Chimbote se realizó siguiendo las recomendaciones Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE 2010), ubicando las principales urbanizaciones y los asentamientos humanos sobre cada tipo de suelo en el cual esta cimentado.

- Suelo tipo B – Roca

Sobre este tipo de suelo se encuentra cimentado el A.A.H.H. José Sánchez, Urbanización 14 de Febrero, Urbanización David Dasso, Urbanización las lomas y el AAHH 3 de Octubre.

- Suelo tipo C – Suelo muy denso o roca blanda

Sobre este tipo de suelo se encuentra cimentado la Urbanización Los Pinos, A.A.H.H. 2 de Junio, Urbanización Santa Rosa, Urbanización El Pacífico, Urbanización Santa Cristina, Urbanización Las Gardenias, Urbanización Unicreto, Urbanización Las Casuarinas, Urbanización Los Héroes, Urbanización Cáceres de Aramayo, A.A.H.H. Villa Mercedes, A.A.H.H. Toledo, A.A.H.H. Villa Sur, A.A.H.H. Las Palmas, Urbanización Los Jardines, Urbanización Garatea, Urbanización Luis Felipe, Urbanización El Pescador y A.A.H.H. Divino Jesús.

- Suelo tipo D – Suelo rígido

Sobre este tipo de suelo se encuentra cimentado la Urbanización Laderas del Norte, A.A.H.H. El Porvenir, Urbanización El Progreso, Urbanización 21 de Abril, Urbanización La Caleta, Urbanización San Isidro, A.A.H.H. 2 de Mayo, Ciudad Comercial 2 de Mayo, Pueblo Joven San Juan, A.A.H.H. Ramiro Priale, ENAPU y SIDERPERU.

- Suelo tipo E – Suelo blando

Sobre este tipo de suelo se encuentra cimentado el A.A.H.H. Florida Baja y Miramar Bajo.

7. El cálculo de los parámetros elásticos son obtenidos de la interacción de las ondas compresionales y ondas de corte resultado de los ensayos de refracción sísmica y MASW, respectivamente.
8. Mediante los ensayos de refracción sísmica y MASW se induce al suelo pequeñas deformaciones comportándose de manera lineal y elástica, siendo los valores de los parámetros elásticos obtenidos máximos.
9. El suelo mejora sus características dinámicas conforme se incrementa la profundidad, evidenciado en el análisis del comportamiento del módulo de Young a diferentes profundidades.

10. La medición de microtrepidaciones es un método rápido y confiable para determinar el período característico del suelo, para el cual el registro de señales no debe poseer contaminación por ruido.
11. En el plano de Isoperíodos se identifican sectores en que los períodos varían desde 0.10 s. hasta 0.20 s. en suelos tipo B, de 0.20 hasta 0.40 s en suelos Tipo C, de 0.40 hasta 0.60 s en suelos Tipo D y mayores a 0.6 s en suelos Tipo E.
12. La relación existente entre la norma técnica peruana de diseño sismoresistente E-030 y la clasificación sísmica de suelos, según la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles, está dada por: S1 corresponde a los suelos tipo B y C, S2 corresponde a suelos tipo D y S3 a suelos tipo E.
13. De acuerdo a los periodos característicos determinados a partir de los ensayos MASW y microtremores se obtiene valores de 0.72s en el litoral y va disminuyendo hasta 0.12s conforme se acerca a las estribaciones donde existen unidades geológicas más competentes.
14. Los resultados obtenidos de los periodos característicos aplicando la relación $(T_0=4H/ V_{s30})$ que involucra el parámetro V_{s30} obtenido del ensayo MASW y los valores de periodos característicos obtenidos de la división espectral (Nakamura) fueron contrastados determinando una coincidencia en el 80% de resultados obtenidos
15. Los suelos de Chimbote son tipificados en gran parte como tipo D, sin embargo se presentan sectores potencialmente licuables debido a la baja rigidez del terreno en sus primeros metros presentando valores de propagación de ondas de corte menores a 200 m/s
16. El fenómeno de la licuación ocurre para velocidades de ondas de corte $V_s < 200$ m/s. Siempre y cuando se den las condiciones tales como el nivel freático alto, suelos granulares con cierto porcentaje de finos y la acción sísmica

RECOMENDACIONES

1. Evitar en la contaminación de las señales al momento de realizar los ensayos geofísicos como las microtrepidaciones, MASW y refracción símica
2. Para una mejor tendencia de las curvas de isoperíodos realizar más ensayos obteniendo una mayor densidad de puntos.
3. Para tener bien definidos los contactos de los diferentes tipos de suelos realizar una mayor cantidad de ensayos MASW.
4. Realizar una campaña de exploraciones geotécnicas en áreas aun no estudiadas siendo contrastadas con los resultados obtenidos en la clasificación mediante métodos geofísicos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aki, K., "Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors", *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 35, 415–457, 1957.
2. Alva Hurtado J.E. , "Breve Historia del Fenómeno de Licuación de Suelos en el Perú", IV Congreso Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, Lima, Perú, 1983
3. Alva Hurtado J.E. y Orihuela P., "Estudio de Licuación y Amplificación Sísmica en Chimbote, Perú", IV Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Chiclayo, Perú, 1982
4. Arboleda, J y M Ordaz "Cocientes espectrales en Acapulco, Guerrero, México" Informe interno presentado a ERN Ingenieros Consultores, 2001
5. ASCE, "Minimum Design Loads For Buildings And Other Structures", 2010.
6. Barrón H., "Vulnerabilidad Sísmica de Chimbote", Tesis de Grado, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, 1984
7. Bard, P Y, A M Duval, B Lebrun, C Lachet, J Riepl y D Hatzfeld , "Reliability of the H/V technique for site effects measurement and experimental assessment", *Seventh International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Istanbul,pag, 19-24, 1997.
8. Bard, P.-Y., "Microtremor measurements: a tool for site effect estimation?", *State-of-the-art paper, Second International Symposium on the Effects of Surface Geology on seismic motion*, Yokohama, December 1-3, 1998, Irikura, Kudo, Okada & Sasatani (eds), 3, 1251-1279, Balkema, 1999.
9. Bonilla, L., Steidl, J., Lindley, G., Tumarkin, A. y Archuleta, R.J. "Site amplification in the San Fernando valley, California: variability of site-effect estimation using the S-wave, coda, and H/V methods". *Bulletin of the Seismic Society of America*. Volumen:87. N°3, p. 710-730, 1997.
10. Castellaro, S., Mulargia, F. y Bianconi, L. "Passive seismic stratigraphy: a new efficient, fast and economic technique". *Journal Geoth. And Environmental Geology*.Volumen:3.p:76-102, 2005.
11. Cuadra P., "Aplicación de Técnicas de Vibraciones Ambientales: Análisis de Microtremores y Vibraciones Naturales, Para la Caracterización de Sitio", Tesis de Grado, Universidad Simon Bolívar, Sartenejas, Venezuela, 2007

12. Hermosa M., "Estudio sobre el Sismo del 31 de Mayo de 1970, Ciudad de Chimbote", Tesis de Grado, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, 1972.
13. Ishihara K., "Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics", Tokio , Japon , 1996.
14. Kanai, K., T. Tanaka and K. Okada. Bull. Earthq. Res. Inst., 32 (1954), pags. 199, 1954.
15. Kanai, K. y Tanaka. "On microtremors", VIII Bull. Earthq. Res. Inst.,39-1, pags. 97-114, 1961.
16. Kagami, H., C. M. Duke, G. C. Liang, and Y. Ohta. Observation of 1 To 5 Second Microtremors and Their Application to Earthquake Engineering. Part II. Evaluation Of Site Effect Upon Seismic Wave Amplification Due ToExtremely Deep Soil Deposits, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 72, pags.987-998, 1982.
17. Kramer, S. L., "Geotechnical Earthquake Engineering". Prentice Hall, New Jersey, USA, 1996.
18. Lachet, C y P Y Bard , "Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique", J. Phys. Earth., 42, 377-397, 1994.
19. Lermo, J. and F. J. Chavez-Garcia, Are Microtremors useful in site response evaluation? Bull. Seism. Soc. Am., 83, 1350-1364; D.F. México, 1994.
20. Meneses, J. Microtrepidaciones: fundamentos y análisis: MEM. Sem. Int. de Microzonificación y su aplicación al planeamiento urbano para mitigación de desastres. JICA – CISMID; pags.80-104, 1991.
21. Morimoto R., Koizumi Y., Matsuda T., Hakuno M. y Yamaguchi I. (1971), "Seismic Microzoning of Chimbote Area, Peru", Overseas Technical Cooperation Agency, Government of Japan, March.
22. Nakamura, Y. "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using Microtremors on the ground surface". Quarterly Report Railway Technology. Research Institute. Vol. 30. N°3. Págs. 25-30, 1989.
23. Omori, F., "On Micro-Tremors". Bull. Imperial Earth. Investigation Committee of Tokyo, Vol. II, Pag 1-6, 1908.

24. Parra D., "Evaluación del Potencial de Licuación de Suelos en Chimbote", Tesis de Grado, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, 1991.
25. PNUD - INDECI. "Plano de Peligros y Plan de Usos del Suelo de La Ciudad de Chimbote", 2000.
26. Richard, Hall, Woods. "VIBRATIONS OF SOILS AND FOUNDATIONS". Prentice Hall, USA, 1970.
27. Silva R., "Evaluación del Potencial de Licuación de Suelos en Chimbote", Tesis de Grado, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, 2000.
28. Sifuentes A., "Microzonificación Geotécnica Sísmica del Distrito de la Molina", Tesis de Grado, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, 2012.
29. Silgado, E. (1978), "Historia de los Sismos más Notables Ocurridos en el Perú (1513-1974)", Instituto de Geología y Minería, Boletín No. 3, Serie C, Geodinámica e Ingeniería Geológica, Lima, Perú.
30. Tokimatsu K., Shinzawa K., Kuwayama S., Use of short-period microtremors for Vs profiling, J. Geotechnical Eng., vol. 118 (10), ASCE, pp. 1544-1558, 1992.
31. Theodulidis, N., P.-Y. Bard, R.J Archuleta and M. Bouchon, 1996. Horizontal to vertical spectral ratio and geological conditions: the case of Garner Valley downhole array in Southern California, Bull. Seism. Soc. Am. 86, 306-319